Ein integrales Energie- und Stoffstrommodell als Grundlage zur Bewertung einer nachhaltigen Entwicklung urbaner Systeme

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur Architekt
Michael Prytula
aus Berlin

von der Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt,
der Technischen Universität Berlin,
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:
Vorsitzender: Prof. Rainer Hascher
Berichter: Prof. Claus Steffan
Berichter: Prof. Dr. Ekhart Hahn

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 15. Juli 2011

Berlin 2011

D 83

ISBN 978-3-7983-2373-5 (Druckausgabe)
ISBN 978-3-7983-2374-2 (Online-Version)

Berlin 2011

*** Gedruckt auf säurefreiem alterungsbeständigem Papier**

Druck/ Printing: ENDFORMAT Gesellschaft für gute Druckerzeugnisse mbH
Köpenicker Str. 187-188
10997 Berlin
www.endformat.com

Vertrieb/ Publisher: Universitätsverlag der TU Berlin
Universitätsbibliothek
Fasanenstr. 88 (im VOLKSWAGEN-Haus), D-10623 Berlin
Tel.: (030)314-76131; Fax.: (030)314-76133
E-Mail: publikationen@ub.tu-berlin.de
http://www.univerlag.tu-berlin.de/

DANKSAGUNG

Ich danke zunächst Herrn Prof. Claus Steffan für den großartigen Gestaltungsspielraum, den ich über viele Jahre als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Gebäudetechnik und Entwerfen an der TU Berlin für die Konzeption und Durchführung meiner Entwurfs- und Theorieseminare hatte. Diese Tätigkeit ermöglichte mir, im Austausch mit Studenten und Kollegen anhand vieler Seminar- und Entwurfsarbeiten meine konzeptionellen Überlegungen zu der vorliegenden Arbeit zu überprüfen und fachliche Kenntnisse zu vertiefen. Ich danke Herrn Prof. Dr. Ekhart Hahn für seine Ermunterung und die konstruktive Kritik, die er meiner Arbeit entgegengebrachte, und Herrn Prof. em. Dr. Wilhelm Ripl, der für lange Zeit ein wichtiger Mentor war.

Diese Arbeit ist gewachsen durch die inspirierenden Gespräche mit zahlreichen Experten. Auch wenn manchmal nur ein geringer Teil dieser Gespräche in diese Arbeit einfließen konnte, so bin ich diesen Menschen doch für ihre großzügige fachliche und persönliche Unterstützung außerordentlich dankbar.

Im Rahmen der Vortragsreihe *Zero-Emission-Region* im WS 2004 waren es besonders:
Prof. Dr. Peter Baccini, Prof. em. für Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik an der ETH Zürich,
Prof. Dr. Michael Braungart, Univers. Lüneburg, Leiter v. EPEA Internationale Umweltforschung GmbH,
Prof. Dr. Stefan Bringezu, Wuppertal Institut / Nachhaltiges Ressourcenmanagement, Univers. Kassel,
Dr.-Ing. Martin Buchholz, Geschäftsführer der Watergy GmbH,
Prof. Dr. Peter Heck, Geschäftsführender Direktor des IfaS, FH Trier-Birkenfeld,
Prof. Dr. Niklaus Kohler, Prof. em. am ifib der Universität Karlsruhe,
Dr.-Ing. René Scheumann, Institut für Zukunftsstudien u. Technologiebewertung gemeinnützige GmbH,
Dr.rer.pol. Thomas Sterr, IUWA Heidelberg e.V.,
Dipl.-Biol. Peter Werner, IWU Darmstadt.

Im Rahmen der Seminarreihe *Urbaner Metabolismus* 2004/05 waren es besonders:
Dr.-Ing. Wulf-Holger Arndt, Bereichsleiter Mobilität und Raum am ZTG, TU Berlin,
Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter, Lehrstuhl für Abfallwirtschaft, TU Berlin,
Prof. Dr. Dr. Martina Schäfer, Stellvertretende Wissenschaftliche Geschäftsführerin ZTG, TU Berlin,
Dipl.-Ing. Matthias Schnauss, Büro für Nachhaltige Entwicklung, Berlin,
Prof. em. Dr. Heinrich Tepasse, Versorgungsplanung und -technik, Universität der Künste Berlin,

Im Rahmen des NSE-Symposiums *Urban Transitions* im Juni 2007 waren es besonders:
Dr. Hans Peter Bader, Systemanalyse und Modellierung, EAWAG Dübendorf,
Dipl.-Ing. Oliver Elser, Kurator BDA am Deutschen Architekturmuseum Frankfurt a.M.,
Dr.-Ing. Harald Hiessl, Stellvertr. Institutsleiter, Fraunhofer-Institut für System- u. Innovationsforschung,
Prof. Bernd Kniess, Städtebau / Urban Design an der HCU Hamburg,
Dr. rer. pol. Heike Köckler, Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung, Univers. Kassel,
Prof. Dr. phil. nat. Riklef Rambow, Architekturkommunikation, Karlsruher Institut für Technologie / KIT,
Prof. Dr. Holger Wallbaum, Institut für Bau- & Infrastrukturmanagement an der ETH Zürich.

Ganz besonders danke ich den Kollegen und Freunden des Doktoranden-Netzwerks *Nachhaltige Stadtentwicklung* (NSE) Dipl.-Ing. Holger Wolpensinger und Dipl.-Ing. Jörg Lammers für den befruchtenden wissenschaftlichen und persönlichen Austausch sowie Dipl.-Ing. Hendrik Schultz und vor allem Dipl.-Ing. Maria Bettin für die Unterstützung bei der wissenschaftichen Recherche, der Energiebilanzierung und der graphischen Gestaltung der Diagramme.

Weiterhin danke ich herzlich für die fachliche Beratung und persönliche Unterstützung:
Dr. Claudia Bell für die Übersetzung der Kurzfassung ins Englische,
Dr. habil. Klaus-Dieter Wolter, Ökosystemtheorie,
Dipl.-Ing. Michael Vogelsang, Energiesysteme,
Dr.-Ing. Erwin Nolde und Dipl.-Ing. Marco Schmidt, Wassersysteme,
Dr. Thomas Lichtensteiger und Ruth Scheiddegger, urbaner Stoffhaushalt / EAWAG Dübendorf,
Prof. Dr. Konrad Scheffer und PD. Dr.-Ing. Marianne Karpenstein-Machan, Bioenergiedorf Jühnde,
Dr.-Ing. Michael LaFond, id22 e.V. Institut für kreative Nachhaltigkeit,
Udo Blum vom Berliner Innovationskreis *Alternativen in Arbeit, Technik, Betrieben und Regionen,*
Prof. Gunter Pauli für seine Zero-Emission-Vision.

... und vielen anderen...

Nicht zuletzt danke ich meiner lieben Frau Andrea für ihre unerbittliche Empathie und Ermächtigung, diese Arbeit zu einem Abschluss zu bringen und das Geschenk des Contextuellen Coachings.
Ich liebe dich.

VORWORT

„Vor allem aber ist der Modus, in dem neue Gedanken, neue Erkenntnisse entstehen, prinzipiell identisch mit jenem, der im Evolutionsgeschehen Niedagewesenes entstehen lässt. Fast immer entsteht die neue Erkenntnis daraus, dass zwei bereits existente Gedankengänge zu einer Einheit integriert werden, die neue Systemeigenschaften besitzt.“

Konrad Lorenz
Die Vorstellung einer zweckgerichteten Weltordnung (1976)
In: Das Wirkungsgefüge der Natur und das Schicksal des Menschen (1978), S.34

Das Wachstum der Weltbevölkerung, die steigende Inanspruchnahme von erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Ressourcen und die damit verbundene sozioökonomische Globalisierung führen heute zu Rückkopplungen in einer neuen, globalen Dimension, wie sie die Menschheit zuvor nicht kannte. Die Diskussion um eine nachhaltige Entwicklung hat seit der Veröffentlichung der *Grenzen des Wachstums* eine zunehmend größere Bedeutung gewonnen und die Wahrnehmung der ökologischen Krise ist im kollektiven Bewusstsein angelangt. Die urbanen Systeme nehmen in diesem Diskurs eine Schlüsselstellung ein. Hier lebt ein Großteil der Weltbevölkerung und bewegt direkt oder indirekt einen Großteil der globalen Ressourcen in zumeist wenig nachhaltiger Art und Weise.
Aus historischer Perspektive gehören Nachhaltigkeitskrisen aber schon immer zur Evolution natürlicher und gesellschaftlicher Systeme. Während uns die Pressemedien und die Wissenschaft täglich mit neuen Schlagzeilen und Erkenntnissen zur ökologischen Krise versorgen, befinden wir uns gleichzeitig an einem Punkt der technologischen und sozialen Entwicklung, wo wir auch über das Wissen zur Gestaltung einer nachhaltigen Zukunft verfügen. Wenngleich weiterer Forschungsbedarf in vielen Wissensgebieten besteht, so halten wir doch bereits heute viele Mittel in den Händen, um allen Menschen eine würdige und materiell hinreichend gesicherte Existenz zu ermöglichen, ohne die Tragfähigkeit der ökologischen Systeme zu zerstören. Die Herausforderung liegt darin, die bereits vorhandenen nachhaltigen Technologien und das entsprechende Handlungswissen umfassend und zeitnah in die Lebenspraxis zu integrieren.
In vielen Forschungsarbeiten wird der Weg der Spezialisierung beschritten und eine Analyse oder Optimierung eng umgrenzter Teilsysteme vorgenommen. Ich habe den umgekehrten Weg verfolgt: Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick zu den wichtigsten Strategien, Konzepten und Technologien, die zu einer nachhaltigen Entwicklung urbaner Systeme und insbesondere der Energieversorgung beitragen. Dies geschieht in der Absicht, aus der sich durch die umfassende Synthese bereits vorhandener Ansätze ergebenden Emergenz einen Beitrag zur Ausrichtung nachhaltigen Handelns abzuleiten. Im Zentrum meiner Arbeit steht daher die Darstellung des Systemverständnisses, in welchen Beziehungen die wichtigsten Teilsysteme zueinander stehen und welche Systemhierarchien bestehen. Erst ein ausreichend genaues Systemverständnis erlaubt ein richtungssicheres Handeln. Ich bin mir dabei bewusst, im Rahmen dieser Arbeit nicht alle angesprochenen Handlungsfelder, Teilsysteme oder Technologien umfassend und gleichermaßen im Detail behandeln zu können und sehe eine Vielzahl sich anschließender Forschungsfragen.

Berlin im Dezember 2011

Michael Prytula

KURZFASSUNG

Vorindustrielle Städte standen in einer starken Wechselwirkung zu ihrem Umland. In symbiotischer Beziehung bezogen Städte ihre Subsistenzgüter aus der sie umgebenden Landschaft und führten mit ihren Abfallprodukten wichtige Nährstoffe in den Produktionsprozess zurück. Die Größe und das Wachstum der Städte waren daher stark durch die Produktivität der Landnutzungssysteme limitiert. Die Industrialisierung führte mit der Bereitstellung fossiler Energieträger, Kunstdünger und neuartige Infrastruktursysteme zu einer räumlichen Ausweitung der Stoffflüsse und ermöglichte eine weitgehende Entkopplung der ursprünglichen funktionalen Stadt-Land-Beziehungen. Die Funktionsfähigkeit des Energie-, Stoff- und Wasserhaushalts moderner urbaner Systeme ist derzeit von der kontinuierlichen Versorgung mit fossilen Energieträgern abhängig, was als nicht nachhaltig zu bezeichnen ist. Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit steht die Frage, wie urbane Systeme mit einer hohen Bevölkerungsdichte auf der Grundlage erneuerbarer Energien nachhaltig mit Subsistenzgütern versorgt werden können.

Ausgehend von einem ökosystemaren Ansatz zur Betrachtung des urbanen Ressourcenhaushalts habe ich in dieser Arbeit ein Modell entwickelt, das die Beziehungen von Ressourcenversorgung und Landnutzungssystemen für die vier Subsysteme Ernährung, thermische Gebäudekonditionierung, Haushaltsstrom und Verkehr darstellt. Dabei unterscheide ich nach somatischer Energie (Nahrungs- und Futtermittel) und extrasomatischer Energie (alle anderen für das Funktionieren urbaner Systeme benötigten Energieflüsse). Da diese um die begrenzte Ressource Fläche konkurrieren, wird ein Flächenindikator zur Bewertung herangezogen. Im Gegensatz zur häufig verwendeten Methode des ökologischen Fußabdrucks kommt in meinem Modell der Betrachtung der raum-zeitlichen Beziehung von Ressourcenbereitstellung und Ressourcennutzung eine wichtige Bedeutung zu. Im Mittelpunkt der Bilanzierung steht eine Klassifizierung nach Stadtstrukturtypen. Diesen sind charakteristische Gebäudeprofile wie Bautypologie, Konstruktion, gebäude- und stadttechnische Infrastrukturen zur Wärmeversorgung, Bewohnerdichte, Energiebedarf usw. zugeordnet. Anhand von beispielhaften Gebäuden, die als Typenvertreter die Stadtstrukturtypen repräsentieren, werden drei verschiedene Heizenergiebedarfstandards mit bis zu acht verschiedenen Varianten zur Wärmeversorgung energetisch bilanziert. Für den daraus resultierenden spezifischen Endenergiebedarf lässt sich der Bedarf an Energieträgern sowie in Verbindung mit Flächenkennwerten deren Flächeninanspruchnahme zur Bereitstellung berechnen.

Das Modell wurde am Beispiel der Region Berlin-Brandenburg exemplifiziert. Mit diesem Modellansatz wurde der Gesamtenergiebedarf des Berliner Wohnungsbestandes für verschiedene Wärmeversorgungsszenarien ermittelt. Die Untersuchung dieser Szenarien ermöglicht Aussagen über die Auswirkungen verschiedener infrastruktureller Entwicklungspfade auf den zukünftigen Bedarf an Energieträgern aus erneuerbaren Energien und deren Flächenwirksamkeit. Die Bilanzierung von vier ausgesuchten Varianten zeigt, dass der Flächenbedarf für eine nachhaltige Versorgung der betrachteten Teilsysteme selbst unter Ausschöpfung erheblicher Effizienzpotenziale bei der energetischen Gebäudesanierung die Flächenverfügbarkeit in der Region bei weitem überschreitet. Eine nachhaltige Versorgung der untersuchten Region erfordert die Erschließung weiterer Effizienzpotenziale in den Bedarfsfeldern Ernährung und Verkehr sowie den Ausbau erneuerbarer Energiesysteme, die ohne eine Inanspruchnahme weiterer Landnutzungssysteme auskommen.

ABSTRACT

Pre-industrial cities and their surrounding countryside used to strongly interact with one another. In a symbiotic relationship the towns received their subsistence goods from the urban hinterland, and by returning their waste products also returned important nutrient matter to the production process. Thus, size and growth of the cities were strongly limited by the productivity of the systems governing land use. Industrialization with its provision of fossil energy sources, artificial fertilizers and new infrastructure systems led to a regional expansion regarding the flow of materials and enabled a far reaching deconstruction of the original functional town country relationships. For a functioning supply with energy, material and water, modern urban systems currently depend on the continuous provision of fossil energy, which cannot be considered sustainable. This work focuses on the question of how urban systems with a high population density can be sustainably supplied with subsistence goods on the basis of renewable energy sources.

Analysing the urban use of resources from an ecosystemic point of view, I have developed a model, that illustrates the relations between resource supply and systems of land use for the four subsystems food supply, thermal building performance, supply of domestic electricity and transport. I hereby differentiate between somatic energy (food and animal feed) and extra somatic energy (all other energy sources necessary for the functioning of an urban system). As these systems compete with one another for space as a limited resource, a spatial indicator is used for the evaluation. In contrast to the frequently employed ecological footprint method, my model attributes particular importance to the analysis of spatiotemporal relationships of the supply and use of resources. A classification based on the various types of urban structures forms the core of the performance calculation. These structure types are characterised by specific building profiles such as building typology, construction, technical infrastructure of buildings and cities for heat supply, population density, energy demand etc. Based on building examples, representative for particular types of city structures, three different standards for heating energy requirements with up to eight different alternatives for heat supply are analysed with regard to their energy balance. For the resulting specific final energy requirement, the necessary energy sources and – in connection with spatial indicators – the corresponding land use can be calculated.

The model was applied to the region of Berlin Brandenburg as an example. The total energy requirement of the Berlin housing stock for various heat supply scenarios was calculated based on this model. The analysis of these scenarios allowed conclusions regarding the effects of different infrastructural development paths on the future need for renewable energy sources and their respective spatial efficiency. The performance calculation of four select options shows, that the spatial requirements for a sustainable supply of the analysed subsystems – even when utilizing substantial energy efficiency potentials regarding building refurbishment – by far exceeds the availability of land in the region. A sustainable supply of the analysed region requires the development of further efficiency potentials in the demand areas food supply and transport as well as the development of renewable energy systems, that work without requiring further land use systems.

INHALTSVERZEICHNIS

Danksagung I
Vorwort III
Kurzfassung V
Abstract VII
Inhaltsverzeichnis IX

1. Einleitung, Fragestellungen und Gliederung der Arbeit

1.1 Der Ressourcenhaushalt urbaner Systeme 1
1.2 Ziele, Methoden und Aufbau der Arbeit 4
1.3 Arbeitsthesen zu einer nachhaltigen Entwicklung urbaner Systeme 6
1.4 Fallstudie Region Berlin-Brandenburg 8

2. Das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung

2.1 Ideengeschichte und Konzept einer nachhaltigen Entwicklung 10
2.1.1 Einleitung 10
2.1.2 Das Nachhaltigkeitsprinzip in der Forstwirtschaft 10
2.1.3 Urbanisierung und Umweltkrisen im Zeitalter der Industrialisierung 12
2.1.4 Der Brundtland-Bericht und die Agenda 21 13
2.1.5 Aktuelle Positionen im Diskurs zu einer nachhaltigen Entwicklung 16
2.2 Das gesellschaftliche Naturverhältnis 17
2.2.1 Bevölkerungsentwicklung und ökologische Tragfähigkeit 17
2.2.2 Systemtheoretischer Ansatz: Die Grenzen des Wachstums 19
2.2.3 Sozialökologische Modellansätze 22
2.3 Erkenntnistheoretische Positionen zur ökologischen Krise 24
2.3.1 Philosophie der ökologischen Krise 24
2.3.2 Die „national-sozialistische“ Tiefenstruktur der gegenwärtigen Weltpolitik 24
2.3.3 Die Wirtschaft als dominantes gesellschaftliches Subsystem 25
2.3.4 Die geistesgeschichtlichen Grundlagen der ökologischen Krise 25
2.4 Die ökonomische Dimension der Nachhaltigkeit 26
2.4.1 Ansätze zu einer ökologischen Ökonomik 26
2.4.2 Starke oder schwache Nachhaltigkeit? 27
2.4.3 Ressourcenmanagementregeln 30
2.4.4 Was macht Gesellschaften reich? 30
2.5 Strategien und Operationalisierung einer nachhaltigen Entwicklung 31
2.5.1 Nachhaltigkeitsstrategien und Indikatoren 31
2.5.2 Effizienz-Strategie: Erhöhung der Ressourcenproduktivität 31
2.5.3 Suffizienz-Strategie: Konsumverzicht oder neue Wohlstandsmodelle? 32
2.5.4 Konsistenz-Strategie: Stoffkreisläufe und Erhöhung der Ressourceneffektivität 32
2.5.5 Indikatoren zur Operationalisierung einer nachhaltigen Entwicklung 33
2.6 Zusammenfassung 37

3. Der Ressourcenhaushalt urbaner Systeme

3.1 Die Stadt als anthropogenes Ökosystem 38
3.1.1 Ökosystemforschung und deren Anwendung auf urbane Systeme 38
3.1.2 Man and the Biosphere - Programm (MaB) 41
3.2 Der urbane Metabolismus 44
3.2.1 Das Konzept des urbanen Metabolismus 44
3.2.2 Metabolismus als Metapher in Architektur und Städtebau 44
3.2.3 Abel Wolman: The Metabolism of Cities (1965) 51
3.2.4 Energie- und Stoffstrommanagement 52
3.2.5 Der regionale Stoffhaushalt 54
3.2.6 Industrial Ecology und angewandtes Stoffstrommanagement 55
3.2.7 Modellebenen für die Beschreibung des urbanen Metabolismus 56
3.3 Methoden zur Analyse des Ressourcenhaushalts urbaner Systeme 60
3.3.1 Ökobilanzierung (LCA) 60
3.3.2 Stoffflussanalysen (SFA) 62
3.3.3 Der ökologische Fußabdruck 63
3.4 Zusammenfassung....65

4. Der Energiehaushalt urbaner Systeme

4.1 Energie und Energiesysteme 67
4.1.1 Einleitung 67
4.1.2 Grundlagen zu Energie und Thermodynamik 67
4.1.3 Die fossile Energiewirtschaft 69
4.1.4 Die Energiewirtschaft mit erneuerbaren Energien 74
4.1.5 Energiesystemmodelle 76
4.1.6 Der Einsatz von GIS zur Ermittlung von Potenzialen erneuerbarer Energien 78
4.2 Energieeffizientes Bauen 81
4.2.1 Zur Entwicklung gesetzlicher Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden 81
4.2.2 Energieeffiziente Gebäude – Standards und Pilotprojekte 82
4.2.3 Energiesparhäuser und Solararchitektur 83
4.2.4 Niedrigenergiehäuser 84
4.2.5 Passivhaus-Standard 85
4.2.6 Das energieautarke Solarhaus in Freiburg 86
4.2.7 Null- und Plusenergiegebäude 88
4.2.8 Kybernetik-Haus, Triple Zero® und ZeroEmission-LowEx 90
4.3 Konzepte zur nachhaltigen Wärmeversorgung von Siedlungsstrukturen 93
4.3.1 Wärmebedarf, Marktsituation und politische Rahmenbedingungen 93
4.3.2 Dezentrale Wärmeerzeugung in Gebäuden 94
4.3.3 Technologien zur Kraft-Wärme-Kopplung 95
4.3.4 Solare Nahwärmeversorgung mit Saisonalspeichern 97
4.4 Akteursorientierte Ansätze: Energieautarke Regionen 100
4.4.1 Zentrale oder dezentrale Energiesysteme? 100

4.4.2 Das Bioenergiedorf Jühnde 103
4.4.3 Energieautarke Regionen – Modelle für ein regionales Energiemanagement 106
4.5 Szenarien für den Übergang ins zweite solare Zeitalter 110
4.5.1 Szenarien zur Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland 110
4.5.2 100% Erneuerbare Energien zur Stromversorgung bis 2050 112
4.5.3 Erdgas als Brücke ins regenerative Zeitalter 113
4.6 Zusammenfassung 115

5. Ein integrales Energie- und Stoffstrommodell

5.1 Stadtstrukturtypen und Gebäudetypologien 116
5.1.1 Von der Biotoptypenkartierung zur Analyse von Stadtstrukturtypen 116
5.1.2 Datenblätter zur Erfassung der energetischen Qualität von Gebäudetypologien 118
5.1.3 Energie- und Stoffstromanalysen von Stadtstrukturtypen 119
5.1.4 Stadtstrukturtypen und urbane Infrastrukturen 125
5.2 Modellbeschreibung 130
5.2.1 Forschungsziel und Modellbildung 130
5.2.2 Systemgrenzen, Modellebenen und Arbeitsschritte 131
5.3 Flächenbedarf für Ernährung 140
5.3.1 Umweltauswirkungen des Bedarfsfeldes Ernährung 140
5.3.2 Zur Ernährungsphysiologie des Menschen 141
5.3.3 Flächenbedarf zur Produktion von Nahrungsmitteln 144
5.3.4 Energiebedarf im Bedarfsfeld Ernährung 154
5.3.5 Der Einfluss von Ernährungsgewohnheiten auf den Flächenbedarf 157
5.4 Flächenbedarf für die Bereitstellung von Energie 159
5.4.1 Stromverbrauch im Haushalt 159
5.4.2 Flächenbedarf für die Bereitstellung von Elektrizität aus Biogas 159
5.4.3 Energieverbrauch im Verkehrssektor 160
5.4.4 Flächenbedarf für die Bereitstellung von Kraftstoffen 160
5.4.5 Zusammenstellung der Flächenkennwerte für Haushaltsstrom und Verkehr 163
5.5 Zusammenfassung 166

6. Fallstudie Region Berlin-Brandenburg

6.1 Systembeschreibung Berlin-Brandenburg 167
6.1.1 Kenngrößen zur Bevölkerung und Flächennutzung 167
6.1.2 Kenngrößen zum Berliner Wohnungsbestand und zum Energieverbrauch 169
6.1.3 Beschreibung der Stadtstrukturtypen in Berlin 175
6.2 Auswahl und Beschreibung der gewählten Stadtstrukturtypen 176
6.2.1 Stadtstrukturtyp 1: Niedrige Bebauung mit Gartenstruktur 178
6.2.2 Stadtstrukturtyp 2: Zeilenbebauung der 1920er und 1950er Jahre 182
6.2.3 Stadtstrukturtyp 3: Gründerzeitliche Blockrandbebauung 186
6.2.4 Stadtstrukturtyp 4: Hohe Bebauung der Nachkriegszeit 190
6.3 Energetische Bilanzierung der Stadtstrukturtypen 194

6.3.1 Methodik zur Ermittlung des Wärmebedarfs für den Berliner Wohnungsbestand 194
6.3.2 Parametervariation zur energetischen Bilanzierung 202
6.3.3 Ergebnisse der energetischen Bilanzierung 208
6.4 Der Flächenbedarf verschiedener Versorgungsszenarien 220
6.4.1 Beschreibung des Rechenmodells und ausgewählter Versorgungsszenarien 220
6.4.2 Darstellung der Ergebnisse der gewählten Versorgungsszenarien 223
6.4.3 Diskussion der Ergebnisse der gewählten Versorgungsszenarien 240
6.5 Versorgungspotenziale erneuerbarer Energien im Land Brandenburg.....242
6.5.1 Landschafts- und Kulturentwicklung Brandenburgs 242
6.5.2 Aktuelle Studien und Stand des Ausbaus erneuerbarer Energien in Brandenburg 244
6.5.3 Potenzialabschätzung zur Nutzung erneuerbarer Energien in Brandenburg.....246
6.6 Zusammenfassung 250

7. Zusammenfassung, Modellbewertung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung und Modellbewertung 251
7.2 Konsequenzen aus den Modellergebnissen 254
7.3 Ausblick auf eine nachhaltige urbane Energieversorgung 257

Anhang

Abkürzungsverzeichnis 260
Umrechnungstabelle Energieeinheiten 262
Glossar 263
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis 268
Literaturverzeichnis 274
Lebenslauf 296

1. EINLEITUNG, FRAGESTELLUNGEN UND GLIEDERUNG DER ARBEIT

1.1 Der Ressourcenhaushalt urbaner Systeme

Es leben heute mehr als 7 Milliarden Menschen auf der Erde und nach Schätzungen der Vereinten Nationen wird die Weltbevölkerung im Jahre 2050 auf ca. 9,5 Milliarden Menschen anwachsen [DEUTSCHE STIFTUNG WELTBEVÖLKERUNG 2011:6]. Bereits heute lebt die Hälfte der Weltbevölkerung in urbanen Systemen – in den industrialisierten Nationen sind es bis zu 80% [BMBF 2003:3] – und im Jahr 2030 werden es voraussichtlich zwei Drittel sein, besonders in den von starkem Bevölkerungswachstum geprägten Regionen Asiens, Afrikas und Lateinamerikas. Die Entwicklung der urbanen Systeme steht daher im Mittelpunkt des Diskurses einer nachhaltigen Ent- wicklung. Während im Prozess der globalen Urbanisierung vor allem die Probleme von Megacities diskutiert werden (Abb. 1.1), sind es aber besonders die urbanen Systeme der industriellen und postindustriellen Gesellschaften, deren Versorgung mit Nahrungsmitteln, Energie, Wasser, Baustoffen und Gebrauchsgütern den Großteil der globalen anthropogenen Ressourcenströme und globalen Emissionen verursachen.

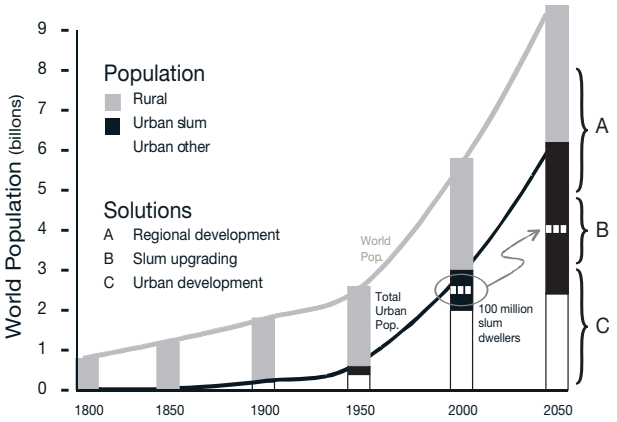


Abb. 1.1 Dynamik der Probleme urbaner Slums [UN-HABITAT 2005:9]

Die Entwicklung vorindustrieller Städte, ihre Ausdehnung, Bevölkerungsgröße und -dichte, war eng an die Tragfähigkeit der sie umgebenden Region gebunden. Die Produktivität der Region war in hohem Maße von den geographischen und klimatischen Gegebenheiten, den saisonalen Energieschwankungen sowie den lokalen technologischen und kulturellen Produktionsmöglichkeiten bestimmt. Die Versorgung von Städten beruhte auf orts- und zeitabhängigen Produktionsweisen. In symbiotischer Beziehung bezogen Städte ihre Subsistenzgüter aus der Landschaft und führten mit ihren Abfallprodukten wichtige Nährstoffe in den Produktionsprozess zurück. Infolge der industriellen Revolution und der sich mit ihr entwickelnden fossilen Energiewirtschaft hat sich die Art und Weise der städtischen Versorgung grundsätzlich verändert. Die Verfügbarkeit künstlicher Dünger und die Bereitstellung fossiler Energien für Produktions- und Transportprozesse im 19. Jahrhundert führten zu einem schnellen Bevölkerungs- und Städtewachstum. Durch die neuartigen Infrastruktursysteme im Energie-, Siedlungswasser- und Transportsektor entstand eine zunehmende raum-zeitliche Entkopplung der Stadt von regionalen Ver- und Entsorgungsleistungen. Kulturhistorisch ist der Begriff Stadt eng mit den Siedlungszentren der Agrargesellschaften und den sich später daraus entwickelnden Industriestädten verbunden. Die Funktionen vorindustrieller Städte als Handelsplätze oder politische Zentren mit der Notwendigkeit zur militärischen Verteidigung führten zu räumlich verdichteten Siedlungsstrukturen. Das Wachstum der Städte infolge von Industrialisierung, veränderten militärischen Möglichkeiten und Erfordernissen des modernen Verkehrs sprengte im 19. Jahrhundert die alten Stadtgrenzen. Seit Mitte des 20. Jahrhunderts hat sich die funktionale und morphologische Trennung von Stadt und Land besonders durch den motorisierten Individualverkehr

zunehmend aufgelöst. Das Bild der europäischen Stadt mit engräumig überlagernden Wohn-, Produktions-, Arbeits-, Kultur- und Freizeitfunktionen in der verdichteten Kernstadt dient zwar vorherrschend als Leitbild einer nachhaltigen Stadtentwicklung. Die Sub- bzw. Desurbanisierung in Form der *Zwischenstadt* [SIEVERS 1999] ist aber gleichermaßen relevant. Das urbane Leben ist soziologisch wie physiologisch ortlos geworden [SIEBEL 1999:151]. Insofern der Begriff Stadt nur noch unzureichend die hier behandelten Phänomene abbildet, wird im Weiteren der Begriff *Urbane Systeme* [OSWALT / BACCINI 2003:46] verwendet.

Die urbanen Systeme industrialisierter Gesellschaften sind heute hinsichtlich ihrer Energie-, Nahrungsmittel- und Güterversorgung von einem globalen Hinterland abhängig. Als globales Hinterland werden jene Territorien und Umweltkompartimente bezeichnet, die außerhalb der Grenzen eines urbanen Systems liegen und für den Import und Export von Gütern benötigt werden [OSWALT / BACCINI 2003:162]. Das gilt in besonderem Maß für die postindustriellen Dienstleistungs- oder Wissensgesellschaften, die große Teile ihrer Industrieproduktion und die damit verbundenen Emissionen sowie den Ressourcenbedarf in industrielle Schwellenländer ausgelagert haben. Das globale Ungleichgewicht in der Möglichkeit der Ressourcennutzung führt nicht nur zu einer ungleichen Verteilung von Wohlstand und Armut, sondern auch zu einer Disparität von Verursachung und Betroffenheit der sozialen und ökologischen Folgen [SACHS 2000]. Die Folgen der urbanen Lebensweise werden damit weiträumig externalisiert [BUND / MISEREOR 1997:25]. In diesem Zusammenhang spricht Hartwig Berger von entgrenzten Städten, deren physische, ökonomische und politische Rückkopplungen mit der Region verloren gegangen sind [BERGER 2003:46 f.].

Das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung beinhaltet die Gestaltung des Ressourcenhaushalts urbaner Systeme, der die Quellen und Senken der natürlichen Umweltsysteme weder erschöpft noch langfristig schädigt. Der Ressourcenhaushalt urbaner Systeme kann durch verschiedene Methoden analysiert werden. Die Methode des *ökologischen Fußabdrucks* [WACKERNAGEL / REES 1997] beschreibt den Ressourcenbedarf einer Region in Beziehung zur verfügbaren produktiven Fläche. Studien auf der Grundlage dieser Methode zeigen, dass die industrialisierten Regionen die Tragfähigkeit ihrer produktiven Landesfläche zumeist um ein Vielfaches überschreiten. Nach Abschätzungen liegt der ökologische Fußabdruck der gesamten Weltbevölkerung bereits heute ca. 25% über der Fläche, die für die globale Tragfähigkeit verfügbar ist und liegt damit im *ecological overshoot* [GLOBAL FOOTPRINT NETWORK 2008:14] (Abb. 1.2).

Aufgrund des hohen Ressourcenbedarfs industrieller und postindustrieller Gesellschaften sowie des rasanten Wachstums der industriellen Schwellenländer bestehen berechtigte Zweifel, ob diese Art und Weise des Wirtschaftens auf lokaler und globaler Ebene dauerhaft aufrechterhalten werden kann. Eine Abschätzung der Reichweite der fossilen Energiereserven und anderer nicht erneuerbarer Ressourcen zeigen, dass das Lebensmuster der entwickelten Welt langfristig nicht globalisierbar ist [BACCINI 1999:44]. Eine Verallgemeinerung des industriellen Entwicklungsmodells als globaler Entwicklungspfad erscheint weder vorstellbar noch wünschenswert. Auf internationaler Ebene wird seit dem Brundland-Report [HAUFF 1987] und der in Rio 1993 beschlossenen Agenda 21 das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung propagiert. Deren Ziel besteht darin, allen Menschen die Befriedigung ihrer Grundbedürfnisse durch eine ökologisch und sozial verträgliche Nutzung regenerativer und nichtregenerativer Ressourcen zu ermöglichen. So sehr es über diese Ziele einen breiten Konsens

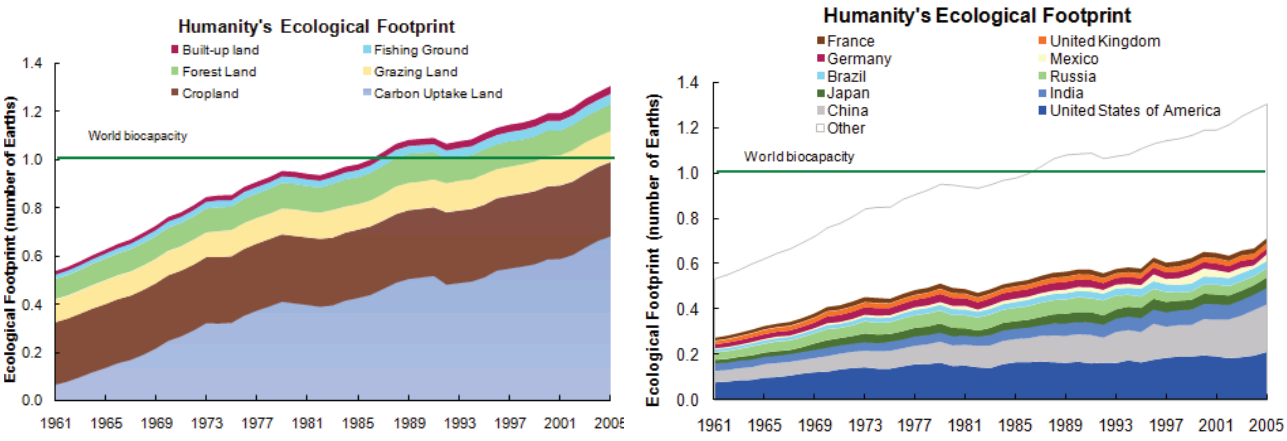


Abb. 1.2 Die Entwicklung des ökologischen Fussabdrucks von 1961 - 2005 global (links) und nach Nationen (rechts) [GLOBAL FOOTPRINT NETWORK 2008:14]

gibt, so wenig besteht Einigkeit über den Weg zur Umsetzung dieses Paradigmas. In der öffentlichen Diskussion ist der Begriff *Nachhaltigkeit* nicht selten zu einer Leerformel verkommen.

Während sich einerseits eine wachsende Weltbevölkerung bei wachsendem Wohlstandsanspruch mit Nahrungsmitteln, Trinkwasser, Konsumgütern, Baumaterialien und Energie versorgen will, setzen die begrenzten natürlichen Ressourcen einen engen physiologischen Rahmen, diese Bedürfnisse zu befriedigen. Eine Vorrausetzung für die Gestaltung eines nachhaltigen Ressourcenhaushalts ist der Übergang vom derzeit vorherrschenden fossilen Energiesystem zu einem System, das vollständig auf erneuerbaren Ressourcen beruht. Der Übergang zur 2. solaren Gesellschaft erfolgt unter der Prämisse, dass der totale Pro-Kopf-Primärenergiebedarf in den Industrienationen von derzeit durchschnittlich 6.000 Watt auf ca. 2.000 Watt reduziert wird (Abb. 1.3) [BACCINI 1999:53].

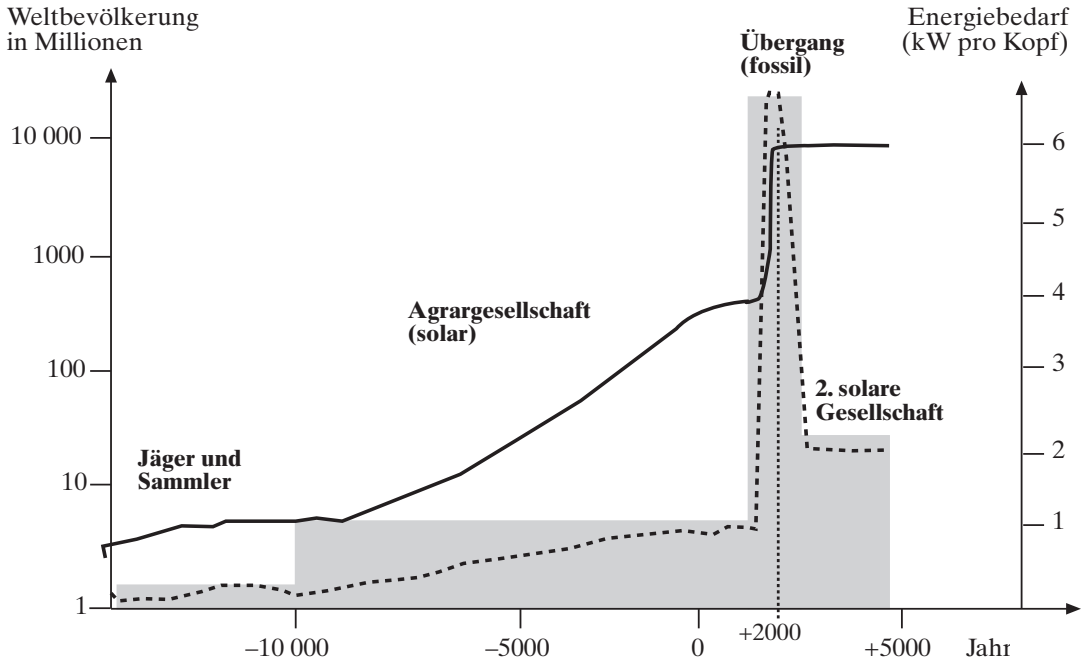


Abb. 1.3 Übergang zur 2. solaren Gesellschaft [BACCINI 1999:47]

1.2 Ziele, Methoden und Struktur der Arbeit

In den industrialisierten und postindustriellen Gesellschaften ist die Wachstumsphase der urbanen Systeme nahezu abgeschlossen. Die urbanen Systeme befinden sich in einer Umbauphase, in der Gebäude, Siedlungs- und Infrastrukturen erneuert und an die u.a. durch demographische Veränderungen sich wandelnden Bedürfnisse angepasst werden. Diese Phase muss dazu genutzt werden, die Ressourcennutzung in den urbanen Systemen nachhaltig zu gestalten. Das Modell, das ich in dieser Arbeit entwickelt habe, leistet einen Beitrag zur Bewertung der Richtungssicherheit für Entscheidungen, wie dieser Transformationsprozess gestaltet werden kann.

Die Arbeit gliedert sich in einen theoretischen und einen empirischen Teil (Abb. 1.4):

Im **theoretischen Teil** der Arbeit untersuche ich zunächst ausgehend von übergeordneten Fragestellungen einer nachhaltigen Entwicklung urbaner Systeme (Kapitel 1) die verschiedenen Dimensionen im Nachhaltigkeitsdiskurs (Kapitel 2). Daran schließt sich die Frage an, mit welchen Modellen und Methoden die Prozesse des regionalen Energie- und Stoffhaushalts operational erfasst werden können (Kapitel 3).

Diesem Ansatz liegt die These zugrunde, dass urbane Systeme als anthropogene Ökosysteme zu betrachten sind, deren Entwicklung hinsichtlich Umweltverträglichkeit und Zukunftsfähigkeit mit Methoden wie Ökobilanzen, Stoffflussanalysen u.a. bewertet werden kann. Dieser Ansatz mündet im Konzept des urbanen Metabolismus, der als systemischer Ansatz eine umfassende Betrachtung der Wechselwirkungen der verschiedenen Teilsysteme im Gesamtsystem ermöglicht. Die Betrachtungen beschränken sich hierbei vorrangig auf die physiologischen Aspekte, da eine detaillierte Einbeziehung aller sozialen und ökonomischen Abhängigkeiten den Umfang dieser Arbeit überschreitet.

Als Teilsystem wird vertiefend die Energieversorgung urbaner Systeme untersucht (Kapitel 4). Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Wärmeversorgung von Gebäuden und Siedlungsstrukturen. Diese beanspruchen im mitteleuropäischen Klima derzeit große Mengen fossiler Energieressourcen und weisen ein hohes Optimierungspotential auf. Aufbauend auf bestehenden Stadtstrukturtypenansätzen wird ein Modell entwickelt, das den Flächenbedarf zur Sicherung der urbanen Subsistenz, insbesondere die Bereitstellung von Wärmeenergie in Konkurrenz zu anderen, flächenabhängigen Ressourcen wie Nahrungs- und Futtermittel abbildet (Kapitel 5).

Es werden die Auswirkungen unterschiedlicher gebäude- und stadttechnischer Versorgungstechnologien und -strategien auf die benötigte Menge an erneuerbaren Energieträgern untersucht. Als Indikator für die Bewertung wurde die zur Bereitstellung der jeweiligen Ressourcen benötigte Fläche gewählt, da diese raum-zeitlich limitiert und für die Siedlungs-, Stadt- und Regionalplanung von großer Bedeutung ist.

Im **empirischen** Teil der Arbeit wird das Modell exemplarisch am Beispiel der Region Berlin - Brandenburg angewandt (Kapitel 6). Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst, diskutiert und weiterführende Forschungsfragen erörtert (Kapitel 7).

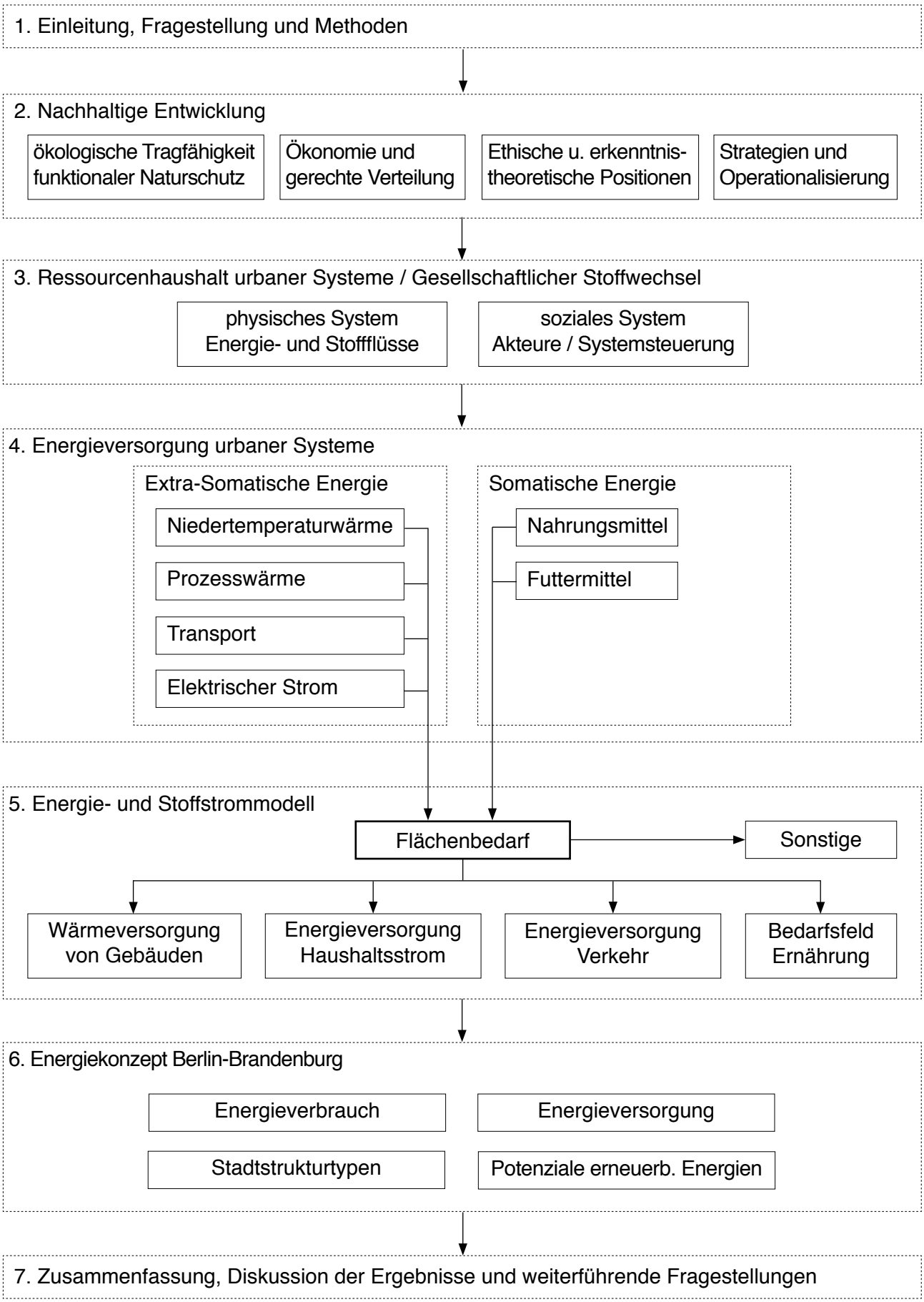


Abb. 1.4 Überblick und Gliederung der Arbeit

Dieser Forschungsansatz wurde gewählt, weil das Modell

- als allgemeiner Modellansatz auf andere urbane Systeme übertragbar ist,
- die funktionalen Abhängigkeiten von Energie- und Stoffströmen hinsichtlich ihrer räumlichen Organisation in den Maßstabsebenen von Haushalt, Block oder Siedlung, Quartier, Stadt, Region und globalem Hinterland sowie die spezifischen Wechselwirkungen von gebäude- und stadttechnischen Systemen abbildet,
- in Verbindung mit den vorhandenen statistischen Daten zum Gebäudebestand eine überschlägige Gesamtbilanz des Untersuchungsraums ermöglicht,
- die Untersuchung verschiedener Versorgungsszenarien einbezieht sowie
- skalierbar und erweiterungsfähig für die Bilanzierung anderer Ressourcenströme wie Trinkwasser, Abwasser, Baustoffe u.a. ist.

1.3 Arbeitsthesen zu einer nachhaltigen Entwicklung urbaner Systeme

Die zentrale Forschungsthese dieser Arbeit lautet, dass eine nachhaltige Ressourcennutzung in urbanen Systemen zukünftig stärker auf orts- und zeitangepassten Ver- und Entsorgungssystemen beruhen wird. Dezentrale und semizentrale Infrastrukturen erweisen sich in regionalen Ver- und Entsorgungszusammenhängen gegenüber den bestehenden zentralen Infrastruktursystemen mit globalen Versorgungsketten als ressourceneffizienter und werden langfristig zu einer Transformation der bestehenden urbanen Infrastrukturen führen. Die Miniaturisierung von Technologien, die Informationsvernetzung und komplexe Kommunikationsstrukturen führen zu einer Verlagerung und Integration stadtinfrastruktureller Versorgungsprozesse in die Ebene der Siedlungs- und Gebäudetechnik. Sektorielle Lösungen werden zukünftig durch systemisch vernetzende Ansätze ergänzt und abgelöst. Diese These stützt sich auf Erkenntnisse aus der Ökosystemforschung und aktuellen Forschungen in der Energie- und Siedlungswasserwirtschaft [PRYTULA 2009b].

Folgende vier Handlungsfelder sind dabei näher zu berücksichtigen:

Arbeitsthese 1: Nachhaltige Energieversorgung

Das derzeitige, auf fossil-nuklearen Energieträgern beruhende Energiesystem wird langfristig von einer regenerativen Energieversorgung abgelöst. Eine nachhaltige Energieversorgung stützt sich auf die Kombination von drei Strategien: 1. Energieeinsparung, 2. Energieeffizienz und 3. die Nutzung erneuerbarer Energien. Der Energiebedarf urbaner Systeme ist zur Zeit so hoch, dass sich ohne eine signifikante Reduzierung des Energiebedarfs die fossile Energieversorgung nicht durch eine regenerative Energieerzeugung substituieren lässt. In mitteleuropäischen Industriegesellschaften liegt der durchschnittliche Bedarf eines Bewohners in Deutschland bei ca. 6 t Steinkohleeinheiten im Jahr oder einer Energieleistung von ca. 6.000 Watt [HEINLOTH 2003:86]. Nur durch eine signifikante Absenkung der Energiedichte um den Faktor 4 oder mehr auf eine 2.000 Watt-Gesellschaft [BACCINI 1999, Novatlantis] oder 1.500 Watt-Gesellschaft [DÜRR 1995] wird sich der Energiebedarf vollständig durch erneuerbare Energien decken lassen. Die Verbindung eines sparsamen Umgangs von Energienutzungen (Energieeinsparung), die Entwicklung und der Einsatz

von Technologien, die eine höhere Energieausbeute bei vergleichbarem Komfortnutzen erzielen (Energieeffizienz) sowie die Nutzung von Umweltenergien zur Energiebereitstellung (Konsistenz) erfordern Versorgungskonzepte, welche die unterschiedlichen Versorgungsebenen von Gebäude-, Siedlungs- und Regionalebene miteinander verbinden.

Arbeitsthese 2: Stoffliche Kreislaufwirtschaft

Das Konzept einer stofflichen Kreislaufwirtschaft orientiert sich an der Funktionsweise von Ökosystemen, deren Funktionalität dauerhaft nur durch eine nahezu verlustfreie Zirkulation von Nähr- und Mineralstoffen gewährleistet werden kann. Für die Landbewirtschaftung bedeutet das, die Nährstoffkreisläufe zu schließen, indem die Stoffverluste der eingebundenen Subsysteme wie Trink- und Abwasser-, Energie- oder Abfallwirtschaft minimiert werden. In der industriellen Produktion können in Abhängigkeit der jeweiligen Güter verschiedene Strategien für den Erhalt der stofflichen und ökonomischen Werte der Güter angewendet werden. In der Hierarchie der Maßnahmen reicht das von der Wiederverwendung oder Weiterverwendung von Produkten, über die Rückgewinnung bis zum Downcycling oder der energetischen Verwertung der eingesetzten Rohstoffe. Gebäude und Infrastrukturen urbaner Systeme werden zukünftig nicht nur als Ressourcennutzer sondern auch im Sinne des *Urban Mining* als wichtige Ressourcenspender angesehen [LICHTENSTEIGER 2006]. Unter dem allgemeinen Paradigma einer industriellen Kreislaufwirtschaft sind verschiedene Ansätze versammelt, wie Integriertes Produktmanagement [LUTZ / NEHLS-SAHABANDU 2001], Regionales Stoffstrommanagement [HECK / BEMMAN 2002], industrielle Verwertungsnetzwerke [KALUZA ET AL. 2001, STERR 2003], Industrial Ecology [GLEICH / GÖSSLING-REISEMANN 2008] oder Zero-Emission-Initiativen [PAULI 1999 und 2010, DIEFENBACH ET AL. 2002] .

Arbeitsthese 3: Dezentrale Infrastrukturen

Sowohl in der Energie- als auch in der Wasserwirtschaft bestehen hinsichtlich dezentraler oder semizentraler Nutzung regenerativer Ressourcen strukturelle Ähnlichkeiten. Die heutigen urbanen Systeme mit ihren überwiegend zentralen Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen haben sich historisch auf der Grundlage eines industriellen Produktionssystems unter Nutzung fossiler Energierohstoffe entwickelt. Die immanente Struktur regenerativer Energien hingegen begünstigt dezentrale Systeme. Da in den nächsten Jahren ein großer Anteil an zentralen Versorgungsstrukturen wie Großkraftwerke und Einrichtungen zur Wasserver- und Entsorgung erneuert werden müssen, ist es von entscheidender Bedeutung, ob die notwendigen Investitionen in die Erneuerung der bestehenden zentralen Versorgungssysteme getätigt werden oder diese durch ein Netzwerk von dezentralen Einrichtungen schrittweise ersetzt werden. Viele dieser Technologien können zukünftig in die Gebäudetechnik integriert werden, die damit zunehmend Funktionen urbaner Infrastrukturen übernehmen wird. Dezentrale Infrastrukturen können besser an sich verändernde gesellschaftliche Prozesse oder demographischen Wandel angepasst werden, wobei die Entscheidung für dezentrale, semizentrale oder zentrale Systeme neben der Ressourceneffizienz von einer Vielzahl anderer Faktoren wie technologischer Stand, Betreibermodelle oder ökonomische Skaleneffekte (*economies of scale*) abhängig ist.

Arbeitsthese 4: Regionalität

Einen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigen Energieversorgung bildet Biomasse aus forst- und landwirtschaftlicher Produktion. Nach einer Studie im Auftrag des deutschen Bundesministeriums für Umwelt zur Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland können biogene Energieträger im Jahr 2050 nahezu die Hälfte eines zukünftigen, durch Schrumpfung und Effizienzstrategien reduzierten Energiebedarfs abdecken [BMU 2004:192]. Bereits heute zeigen verschiedene Initiativen von Bioenergiedörfern in Deutschland, Österreich oder Schweden, dass eine regionale Energieproduktion nicht nur zur Versorgungs- und Krisensicherheit beiträgt, sondern durch die regionale Wertschöpfung auch Wohlstand sichert. Entscheidend hierbei ist, dass der energetische Wirkungsgrad durch Kraft-Wärme-Kopplung optimiert wird und die Wärme in Nah- und Fernwärmenetzen regional genutzt werden kann. In der Arbeit wird daher untersucht, wie groß der regionale Beitrag zur Versorgung urbaner Systeme sein kann, welche räumlichen Einzugsgebiete dafür notwendig sind und wie sich die Flächenkonkurrenz von stofflicher und energetischer Verwertung der Biomasse auswirkt.

1.4 Fallstudie Region Berlin-Brandenburg

Als konkreter Bezugsrahmen dieser Arbeit dient die Region Berlin-Brandenburg. Berlin ist eine mitteleuropäische Metropole, die sich im Vergleich zu anderen europäischen Metropolen erst spät im 19.Jahrhundert entwickelt hat. Mit knapp 3,4 Millionen Einwohnern ist Berlin heute die größte Stadt Deutschlands. Nach der politischen Wiedervereinigung 1990 und dem Regierungsumzug 1999 waren die letzten Jahre durch eine hohe bauliche Investitionstätigkeit, verkehrspolitische Großprojekte und einen strukturellen sozio-ökonomischen Wandel charakterisiert. Brandenburg ist als das angrenzende Flächenbundesland mit 2,5 Millionen Bewohnern das natürliche regionale Hinterland Berlins.

Trotz zahlreicher Studien über die Berliner Entwicklung, wie *Die BerlinStudie* (2000) oder *Nachhaltiges Berlin* (2005) ist mir keine Untersuchung bekannt, welche die Stoffwechselbeziehungen von Stadt und Umland hinreichend betrachtet. Eine erste Näherung stellt der Ökologische Fußabdruck von Berlin dar, der im Juli 2001 von Matthias Schnauss im Auftrag der Enquetekommission „Lokale Agenda 21 / Zukunftsfähiges Berlin“ des Abgeordnetenhauses von Berlin mit dem Bezugsjahr 1998 berechnet wurde (Abb. 1.5) [SCHNAUSS 2001:12].
Jede einzelne Person beansprucht demnach ca. 4,41 ha an bioproduktiver Fläche, was mit einer Gesamtfläche von 15 Millionen Hektar etwa 40% der Fläche der Bundesrepublik Deutschland ausmacht. Diese Fläche beschreibt einen Kreis mit einem Radius von mehr als 200 km, der bis



Abb. 1.5 Der Ökologische Fußabdruck von Berlin [SCHNAUSS 2001:12]

Hamburg reicht. Da alle urbanen Systeme in Deutschland ähnliche Einzugsgebiete aufweisen, die sich räumlich konkurrierend überlagern, müssen sie ihren Ressourcenbedarf durch ein überregionales oder globales Hinterland decken.

Die historisch gewachsene Region lässt sich geographisch und administrativ gut abgrenzen und durch die statistischen Landesämter ist eine gute Datenlage verfügbar. Der Umweltatlas der Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung enthält bereits umfangreiche Darstellungen zu verschiedenen Umweltbereichen wie Energie-, Wasser- und Flächennutzung, Boden, Klima, Lärm und Verkehr, die sich in diese Untersuchung einbeziehen lassen. Auch zur historischen Entwicklung der Infrastruktursysteme Berlins vom 19. Jahrhundert bis heute gibt es detailreiche Studien [TEPASSE 2001a, 2001b, 2007].

Im Rahmen dieser Arbeit beschränken sich die Bilanzierung der Energie- und Stoffströme auf einen Modellausschnitt, der vier zentrale Handlungsfelder urbaner Subsistenz betrachtet (Abb. 1.6):

- Bedarfsfeld Ernährung,
- Wärmeversorgung von Wohngebäuden,
- Energie für Haushalt und
- Energie für Verkehr.

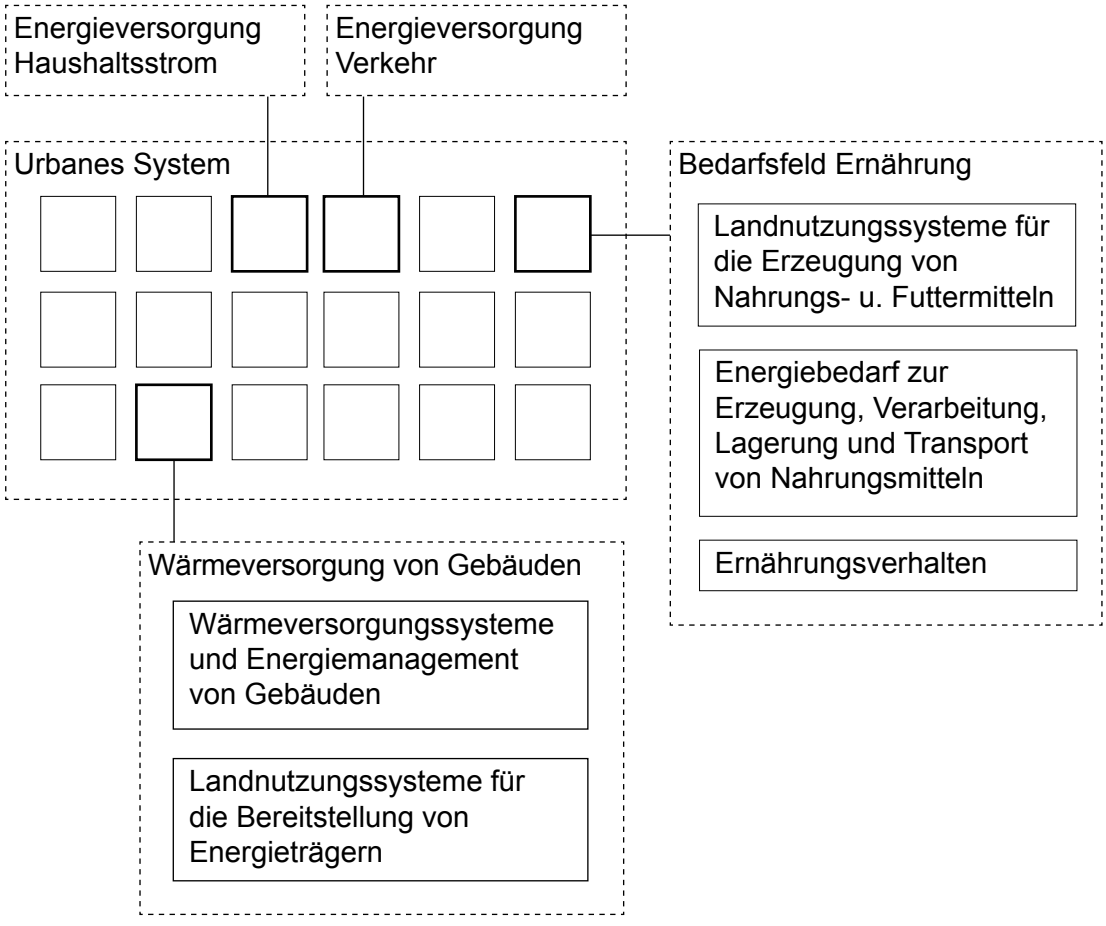


Abb. 1.6 Die vier im Modell betrachteten Handlungsfelder

2. DAS LEITBILD EINER NACHHALTIGEN ENTWICKLUNG

2.1 Ideengeschichte und Konzept einer nachhaltigen Entwicklung

2.1.1 Einleitung

Der Begriff *nachhaltige Entwicklung* wird in der öffentlichen Diskussion seit Ende der 1980er Jahre synonym für die Zukunftsfähigkeit ökologischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Systeme verwendet. Eine dauerhafte und vorausschauende Ressourcenbewirtschaftung ist zwar schon immer Ziel und Praxis menschlichen Wirtschaftens gewesen, das Nachhaltigkeitsprinzip wurde aber lange Zeit nur auf die Forst- und Fischereiwirtschaft angewendet.
Das Konzept einer nachhaltigen Entwicklung in seiner heutigen Ausprägung entstand aus der Zusammenführung internationaler Debatten über Umwelt- und Entwicklungspolitik. Die sich seit Anfang der 1970er Jahre abzeichnenden ökologischen Grenzen des industrie-gesellschaftlichen Wachstums und der Nord-Süd-Konflikt, der die Fragen internationaler Verteilungsgerechtigkeit aufwirft, wurden als ein sich gegenseitig bedingendes Wirkungsgeflecht wahrgenommen. Die Komplexität der globalen Probleme erforderte eine neue, umfassende Sichtweise.
Im Abschlussbericht der Brundtland-Kommission *Unsere gemeinsame Zukunft* [Hauff 1987] wird erstmalig das Konzept einer nachhaltigen Entwicklung als globalpolitisches Leitbild formuliert. Eine nachhaltige Entwicklung verfolgt demnach die Absicht, dass heutige und zukünftige Generationen überall auf der Welt die Möglichkeit besitzen sollen, ihre Bedürfnisse zu befriedigen und ein angemessenes Maß an Wohlstand zu erlangen, ohne die hierfür benötigten ökologischen, ökonomischen und sozialen Grundlagen zu zerstören.
Seither wird ein kontroverser Diskurs geführt, wie das Leitbild einer ökologisch verträglichen und sozial gerechten Nutzung von Ressourcen ethisch-konzeptionell präzisiert und handlungsbezogen umgesetzt werden kann [HUBER 1995, BUND / MISEREOR 1997, BRAND / JOCHUM 2000, OTT / DÖRING 2004]. Ausgehend von der Ideengeschichte des Begriffs werden im Folgenden die wichtigsten ökologischen, ökonomischen und sozialen Dimensionen dieses Diskurses sowie die grundsätzlichen Strategien zur Umsetzung des Leitbildes beschrieben, die für eine nachhaltige urbane Entwicklung von Bedeutung sind.

2.1.2 Das Nachhaltigkeitsprinzip in der Forstwirtschaft

Der Begriff *nachhaltig* entstammt ursprünglich der Forstwirtschaft und wird dem kursächsischen Oberberghauptmann Hans Carl von Carlowitz (1645-1714) zugeschrieben, der als Verfasser der *Sylvicultura oeconomica, oder haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur wilden Baum-Zucht* (1713) Bedeutung erlangte. Als Reaktion auf eine drohende Holznot formulierte er in seiner forstwirtschaftlichen Schrift das Konzept einer dauerhaften Ressourcenbewirtschaftung, wonach einem Wald über eine festgelegte Nutzungsdauer hinweg nicht mehr Holz entnommen werden darf als nachwächst: „Wird derhalben die größte Kunst / Wissenschaft / Fleiß und Einrichtung hiesiger Lande darinnen beruhen / wie eine sothane Conservation und Anbau des Holtzes anzustellen / daß es eine continuierliche beständige und nachhaltende Nutzung gebe / weiln es eine unentberliche Sache ist / ohne welche das Land in seinem Esse nicht bleiben mag“ [CARLOWITZ 1713:105].

Bereits im Mittelalter gab es bedeutsame forstwirtschaftliche Reglementierungen. 1476 verabschiedete der venezianische Senat eine Forstgesetzgebung, um die Kontrolle über die wichtige Ressource Holz zu behalten [GROBER 2010:82]. 1480 besagt eine eidgenössische Ordnung, „dass der Wald geschont werden müsse, weil auch „die Nachkommen des Holtzes deheinst nottürftig" sein würden" [SCHUBERT 1986:270]. Von Carlowitz selbst knüpfte mit seiner Schrift direkt an das bedeutende Werk des englischen Gartenbauers, Architekten und Mitglieds der neu gegründeten Royal Society John Evelyn (1620-1706) an. Mit *Sylva, or Discourse on Forest Trees* (1664) veröffentlichte Evelyn ein Handbuch für die wald- und gartenbauliche Praxis des englischen Landadels, in dem er bereits das Konzept einer nachhaltigen Bewirtschaftung der durch Bergbau und militärischen Schiffsbau stark reduzierten Wälder der britischen Inseln formulierte [GROBER 2010:93]. 1661 begannen im absolutistischen Frankreich unter Colbert ebenfalls forstwirtschaftliche Reformen.

Der Begriff *nachhaltend* wurde von dem württembergischen Forstmann Wilhelm Gottfried Moser 1757 in *nachhaltig* verändert [GROBER 2010:121]. Im Fürstentum Sachsen-Weimar entstanden erste nachhaltige Forsteinrichtungen und in Tharandt bei Dresden wurde 1816 eine Forstschule gegründet, aus der die erste Forstakademie der Welt hervorging [OTT / DÖRING 2004:20]. Das Konzept einer nachhaltigen Entwicklung und die Begriffsbildung wird daher unmittelbar mit der deutschen Frühromantik und Klassik in Verbindung gebracht [GROBER 2010:134, 143].
Ähnlich wie von Carlowitz benutzte wenig später der Leiter der preußischen Staatsforstverwaltung Georg Ludwig Hartig (1764-1837) den Begriff, wenn er in der Anweisung zur Taxation der Forste oder zur Bestimmung des Holzertrags der Wälder (1795) schrieb: „....denn es lässt sich keine dauerhafte Forstwirtschaft denken und erwarten, wenn die Holzabgabe aus den Wäldern nicht auf Nachhaltigkeit berechnet ist. Jede weise Forstdirektion muss daher die Waldungen des Staates ohne Zeitverlust taxieren lassen und sie zwar so hoch als möglich, doch so zu benutzen suchen, dass die Nachkommenschaft wenigstens ebenso viel Vorteil daraus ziehen kann, als sich die jetzt lebende Generation zueignet " [Hartig nach GROBER 2010:165].

Von Carlowitz beschreibt bereits die zentralen Ziele und Strategien, die auch in heutigen Forderungen an eine nachhaltige Entwicklung benannt werden. Das Ziel einer dauerhaften Nutzung natürlicher Ressourcen, welche auch die Ertragsmöglichkeiten der nachkommenden Generationen im Blick hat (= intergenerationelle Gerechtigkeit), kann durch Holzsparkünste (= Effizienzsteigerung), durch das Säen und Pflanzen wilder Bäume (= Investitionen in Naturkapital) oder durch die Suche nach Surrogata (= Substitution von Materialien) erreicht werden.

In den Verordnungen zur spätmittelalterlichen Waldwirtschaft spiegelte sich die elementare Bedeutung der Holzproduktion für die vorindustrielle Gesellschaft wider. Holz war als Baustoff für den Haus-, Berg- und Schiffsbau sowie als Energieträger zur Beheizung oder für Verhüttungsprozesse von zentraler wirtschaftlicher Bedeutung. Eine Übernutzung der Wälder führte periodisch zu einer ökonomischen Stagnation, wie z.B. durch die Stilllegung von Bergwerken oder zu einer dauerhaften Degradierung von Landschaften infolge von Bodenerosion. Beispiele finden sich bereits seit der Antike in der Entwaldung Nordafrikas durch die römische Hegemonialmacht und seit dem Mittelalter für den Schiffbau der verschiedenen europäischen Großmächte. Die Auswirkungen menschlichen Wirtschaftens auf die Landschaftsentwicklung und Tragfähigkeit der natürlichen ökologischen Systeme sind ausführlich beschrieben worden [BORK ET AL.1998, RADKAU 2000, HAHN / REITH 2001].

2.1.3 Urbanisierung und Umweltkrisen im Zeitalter der Industrialisierung

Der gesellschaftliche Übergang zum fossilen Energiesystem vollzog sich u.a. aufgrund einer sich verschärfenden Holzkrise im 17. Jahrhundert [HARRISON 1994:60]. Die Ressource Holz spielte als Werkstoff, Baumaterial und Energieträger eine zentrale Rolle im gesellschaftlichen Stoffwechsel. Trotz der allerorts verordneten Reglementierungen zur Waldbewirtschaftung verschärfte sich mit der beginnenden Industrialisierung die Holzkrise. Nach Schätzungen standen in Deutschland im frühen Mittelalter ca. 33 cbm, im 13. Jahrhundert 6-8 cbm und in der Mitte des 18. Jahrhunderts nur noch 1,5 cbm Holz pro Person und Jahr zur Verfügung [SIEFERLE 1997a:138].

Letztlich wurde eine nachhaltige Bewirtschaftung der Wälder erst durch die umfangreiche Erschliessung neuer Energieträger und Baumaterialien ermöglicht. Als Energieträger wurde Holz zunächst durch Kohle substituiert. Als Baustoffe konnten in großen Mengen energieintensive Materialien wie gebrannte Ziegel, Stahl oder Glas erzeugt werden. Durch den Bau von Eisenbahnen und Schifffahrtskanälen wurde der Transport von Nahrungsmitteln, Baustoffen und anderen Gütern auf dem Land- und Wasserweg auch über große Distanzen ermöglicht. Die Erfindung und der Einsatz von Kunstdünger und Maschinen in der Landwirtschaft steigerten in großem Umfang die Nahrungsmittelproduktion. Verbesserte Hygiene und die moderne Medizin senkten Kindersterblichkeit und Seuchengefahr. Das Zusammenspiel aller Faktoren bewirkte in positiver Rückkopplung ein starkes Bevölkerungs- und Städtewachstum mit neuartigen technischen Infrastruktursystemen.

Während die Basis vorindustrieller Produktionssysteme in höchstem Maße auf den Erträgen und der Flächenlimitierung der Land- und Forstwirtschaft beruhte, vollzog sich die Industrialisierung auf der Grundlage der Nutzung von Rohstoffvorkommen, die nicht den Regenerationszyklen natürlicher ökologischer Systeme unterlagen. Die Entkopplung von der Fläche führte auch zu einer fundamentalen Transformation der gesellschaftlichen Systeme. Der Landbesitz als Grundlage der Feudalherrschaft und des alten Ständesystems wurde durch bürgerliches Unternehmertum abgelöst.

Eine wichtige sozial-politische Diskussion im 19. Jahrhundert war die Lösung der Sozialen Frage. Die menschenunwürdigen Lebens- und Arbeitsbedingungen als Begleiterscheinungen der industriellen Revolution führten zu radikalen Forderungen nach gerechteren Produktions- und Eigentumsverhältnissen, gesunden Wohnverhältnissen und sozialen Sicherungssystemen. Der Massenwohnungsbau für die unteren Gesellschaftsschichten mit hoch verdichteten, schlecht belichteten und belüfteten städtebaulichen Strukturen provozierte radikale Gegenentwürfe, die sich zunächst an vorindustriellen Produktions- und Lebensweisen orientierten.
So entwarf William Morris (1834-1896) bereits 1890 in seinem utopischen Roman *News from Nowhere (Kunde von Nirgendwo)* [MORRIS 1980] eine egalitär-anarchistische Gesellschaft, die im Einklang mit der Natur lebt und ihre sozialen und ökologischen Gegensätze durch dezentrale Strukturen gelöst hat. Auf die Ideengeschichte ökologischer Utopien, angefangen bei den klassischen Suffizienzansätzen *Utopia* (1516) von Thomas Morus (1478-1535) und *Walden* (1854) von Henry Thoreau (1817-1862), über das *Gartenstadtmodell* von Ebenezar Howard (1850-1928) bis hin zu den zeitgenössischen Konzepten von Ernest Callenbach (geb. 1929) *Ecotopia* (1975) und Murray Bookchin (1921-2006) kann an dieser Stelle nur verwiesen werden [BOLLERY 1991, KIESS 1991, BRUYN 1996, GEUS 1999].

Im 20. Jahrhundert rückten die durch die Industrialisierung hervorgerufenen Umweltprobleme ins allgemeine politische Bewusstsein. Die Verschmutzung von Luft und Gewässern sowie die Veränderungen der agrarischen Kulturlandschaft wurden zwar schon vorher wahrgenommen, aber trotz aller Nebenerscheinungen war die Industrialisierung das Erfolgsmodell für einen stetig wachsenden Wohlstand. Fundierte ökologische Kritik am industriellen Produktionsmodell beginnt Mitte des 20. Jahrhunderts. 1962 veröffentlichte die amerikanische Biologin Rachel Carson (1907-1964) *Silent Spring (Der stumme Frühling)* und machte damit auf das Artensterben und die Abnahme der Biodiversität durch den Einsatz von Pestiziden in der Landwirtschaft aufmerksam. Der zunehmende Druck von Bürgerinitiativen und ein wachsendes umweltpolitisches Bewusstsein führte in den USA 1970 zur Gründung der ersten nationalen Umweltbehörde, der *Environmental Protection Agency* (EPA). Mit dem *Clean Air Act* (1970) und dem *Clean Water Act* (1972) wurden erste umfassende umweltpolitische Gesetze in den USA verabschiedet [WEIZSÄCKER 1992:16].

Auf Initiative der skandinavischen Länder, deren Seen und Waldböden durch die schwefelhaltigen Emissionen aus den Kraftwerken zumeist anderer Staaten stark versauerten, fand 1972 in Schweden eine Umweltkonferenz der UNO statt, die den eigentlichen Beginn der internationalen Umweltpolitik markiert [WEIZSÄCKER 1992:17, 51, 205]. Die Teilnehmerstaaten einigten sich in der *Stockholm-Deklaration* erstmals auf eine grenzüberschreitende Zusammenarbeit im Umweltschutz mit der Verpflichtung, dass durch die Nutzung der eigenen Ressourcen anderen Staaten kein Schaden zugefügt wird. Auf der Konferenz wurde ein Aktionsplan verabschiedet, der ein internationales Umweltmanagement und ein globales Erdbeobachtungssystem (http://earthwatch.unep.net/) vorsah. Infolge der Stockholmer Konferenz wurde im gleichen Jahr durch die UN-Vollversammlung das UN-Umweltprogramm UNEP gegründet. Stockholm wird damit als der eigentliche Ursprung des Prozesses angesehen, der zum Konzept einer nachhaltigen Entwicklung führte.

2.1.4 Der Brundtland-Bericht und die Agenda 21

Unter der Leitung der damaligen norwegischen Ministerpräsidentin Gro Harlem Brundlandt gründeten die Vereinten Nationen 1983 die *Weltkommission für Umwelt und Entwicklung* (WCED = *World Commission on Environment and Development*). Vor dem Hintergrund einer weltweiten Rezession und der internationalen Schuldenkrise, verbunden mit struktureller Armut, Hungersnöten und mangelhafter Gesundheitsversorgung bei hohen Rüstungsausgaben in vielen Ländern der Dritten Welt sollte die Kommission eine globale Handlungsstrategie für einen Entwicklungsprozess entwerfen, der sowohl eine Überwindung der Armut als auch den langfristigen Erhalt der natürlichen Ressourcen gewährleisten würde [BRAND / JOCHUM 2000:20, OTT / DÖRING 2004:24].
Ausgehend von einer globalen Problemanalyse formulierte die Kommission 1987 in ihrem Abschlussbericht – dem sogenannten Brundtland-Report *Our Common Future* (Unsere gemeinsame Zukunft) [HAUFF 1987] – das normative Konzept einer nachhaltigen Entwicklung als Leitbild für eine ökologisch angepasste und sozial gerechte Erdpolitik [HUBER 1995:10]. In stark verkürzter Form bezeichnet dieses Konzept eine Entwicklung, „die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen“ [HAUFF 1987] („Sustainable development meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs“).

Die Kommission führt dabei bereits etablierte Diskurse zu einem neuen politischen Leitbild zusammen, das eine integrale Sichtweise auf die weltweiten, internationalen Interdependenzen der ökonomischen, ökologischen und sozialen Systeme ermöglicht. Drei Themenfelder standen im Mittelpunkt des Abschlussberichts der Kommission:

1. die Frage nach dem geeigneten wirtschaftlichen Entwicklungsmodell, das die Länder der Dritten Welt aus der bestehenden „Unterentwicklung“ zu Wohlstand führen würde („nachholende Entwicklung“),
2. die ökologischen Probleme und die Gefährdung der natürlichen Lebensgrundlagen, die sich gerade aus dem industriellen Produktionssystem und dem damit verbunden Ressourcenverbrauch ergaben und
3. die Frage nach der Verteilungsgerechtigkeit sowohl in der intergenerativen Perspektive – verstanden als Verantwortung für künftige Generationen –, als auch in der intragenerativen Perspektive, im Sinne von Verantwortung für die heute Lebenden, insbesondere für Menschen in den armen Staaten [JÖRRISSEN ET AL. 1999:15].

Der Begriff Entwicklung beinhaltet stets eine Wertung und spiegelt den jeweiligen Standort derer wider, die ihn verwenden – mit allen historischen, wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Rahmenbedingungen. Nach Joseph Huber ist der Begriff der Entwicklung, wie er im Nachhaltigkeitskonzept verwendet wird, Joseph Schumpeter verpflichtet. „Entwicklung bedeutet hierbei, in Übereinstimmung sowohl mit der allgemeinen Evolutionstheorie als auch der neueren Systemtheorie, eine Ausdifferenzierung sowie laufende erfolgreiche Reproduktion von Systemen durch sich bewährende Innovationen“ [HUBER 1995:13].

Die Industrialisierung erscheint offensichtlich als das zu Wohlstand führende Wirtschaftssystem. Indem die Industrieländer Rohstoffe zu günstigen Preisen beziehen, diese industriell „veredeln“ und mit Mehrwert als hochwertige Konsum- und Industriegüter exportieren, mehren sie ihren Reichtum. Hieraus resultiert ein Entwicklungsvorsprung, der einerseits auf technologischem und organisatorischem Know-how beruht, andererseits auf der politischen und wirtschaftlichen Kolonialisierung durch die europäischen Hegemonialmächte begründet ist. Entwicklungspolitische Bestrebungen der 1950er und 60er Jahre zielten auf den Aufbau von Produktionskapital und Infrastrukturen nach dem Muster der Entwicklungsverläufe der Industrieländer im 19. Jahrhundert, unabhängig davon, ob diese auf die lokalen sozioökonomischen, institutionellen oder klimatisch-geographischen Umstände angepasst waren. Unabhängig, ob in markt- oder planwirtschaftlicher Ausprägung, die nachholende industrielle Entwicklung und Modernisierung galt als der bevorzugte Entwicklungspfad zu ökonomischer und politischer Unabhängigkeit.

Während sich in einigen Ländern, z.B. in Südkorea, Taiwan, Hongkong und Singapur (die *vier kleinen Tiger*), die Strategie der nachholenden Entwicklung als durchaus erfolgreich erwies, blieben bei der großen Mehrzahl der Entwicklungsländer jedoch die erwarteten Erfolge aus. Seit Mitte der 1970er Jahre rückten mit dem *self-reliance-Konzept* – d.h. Vertrauen auf die eigenen Kräfte und Fähigkeiten setzend – die Sicherung der materiellen Grundbedürfnisse wie Nahrung, Kleidung, Wohnung, Wasser- und Gesundheitsversorgung usw. in den Vordergrund [Engelhard 2007:173]. Wirtschaftliches Wachstum gilt nicht mehr als die Voraussetzung für die Befriedigung

der menschlichen Grundbedürfnisse, sondern diese werden als wesentliche Voraussetzung für wirtschaftliches Wachstum anerkannt. Das Konzept setzt auf eine angepasste Entwicklung durch Hilfe zur Selbsthilfe. Durch Abkoppelung vom Weltmarkt sollen die Abhängigkeiten von den Industrienationen gemindert werden. Statt kapital-, energie- und wartungsintensive Technologien des Westens zu importieren, sollen mit Rückbesinnung auf lokale Traditionen einfache, den Verhältnissen angepasste Technologien (*appropriate technologies*) im Sinne eines *Small is Beautiful* [SCHUMACHER 1973] entwickelt und eingesetzt werden.

Die Schwächen dieser auf einseitige Entwicklungsmaßnahmen angelegten Strategien führten zu der Erkenntnis, dass eine Lösung der verschiedenen Problemfelder durch eine getrennte Behandlung aufgrund ihrer hochgradigen nationalen und internationalen Interdependenzen nicht möglich ist. Die im Brundlandt-Bericht formulierten entwicklungspolitischen Ansätze sehen daher eine untrennbare Verknüpfung zwischen Umwelt- und Entwicklungsaspekten und Fragen einer gerechten Verteilung.

Weiterhin ist der Fortbestand der lebensnotwendigen Ökosysteme ein zentrales Anliegen. Bis in die 1970er Jahre beherrschten *End-Of-Pipe-Strategien* die Umweltschutzdiskussion. Gesetzlich verordnete Emissionsgrenzwerte führten durch die Entwicklung wirksamer Umwelttechnologien zu einer stetigen Verringerung von Emissionen in der Luft, im Abwasser oder hinsichtlich des Lärms aus Produktionsprozessen. Heute wird ein Großteil der Emissionen durch die Verbraucher selbst weiträumig dissipiert. Die systemdynamischen Modellierungen von Maedows [MAEDOWS ET AL. 1972] und andere Methoden zur Darstellung des Ressourcenbedarfs wie der ökologische Fußabdruck [WACKERNAGEL / REES 1995] legen weiterhin nahe, dass eine Verallgemeinerung des mit dem westlichen Lebensstil verbundenen Ressourcenkonsums nicht möglich ist und stellen das Modell des industrialisierenden Entwicklungspfads selbst zur Diskussion. Quantität und Qualität des gesellschaftlichen Stoffwechsels geraten damit in den Fokus der Diskussion. In der Umweltdebatte zeichnet sich daher eine Entwicklung von einer emissions- zu einer systembezogenen Betrachtungsweise ab. Der allgemeine Schwerpunkt verlagert sich vom nachgeschalteten zum integrierten Umwelt- und Ressourcenschutz in allen Sektoren, was sich als ökologischer Modernisierungs- und Strukturwandelprozess gleichermaßen bezeichnen lässt.

Schließlich stellt sich die Frage nach einer gerechten Verteilung von Ressourcen und dem aus ihrer Nutzung erzeugten Wohlstand. Diese Frage muss zeitlich und räumlich differenziert betrachtet werden. Auf der zeitlichen Ebene ist die Frage mit dem Begriff der intergenerativen Gerechtigkeit verbunden, d.h. der Verteilung von Nutzungschancen zwischen heutigen und zukünftigen Generationen. Die heutige Nutzung fossiler Energieträger für Verbrennungsprozesse zur Bereitstellung von Raumwärme, Elektrizität und Transport oder der unersetzbare Verlust natürlicher Artenvielfalt durch anthropogene Landschaftsnutzung wie z.B. durch die Vernichtung tropischer Regenwälder, beschneidet die oben bezeichnete Wahlfreiheit zukünftiger Generationen in erheblichem Maße. Auf der räumlichen Ebene stellt sich die Frage nach der intragenerativen Gerechtigkeit, der Verteilungsgerechtigkeit von Ressourcen zwischen und innerhalb von Gesellschaften der gegenwärtigen Generation.

Auf den Brundlandt-Bericht folgte im Juni 1992 die Konferenz für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen in Rio de Janeiro mit der Deklaration der *Agenda 21* [UNCED 1992]. Ziel der Konferenz war, das Konzept für Politik, Wirtschaft und Gesellschaft anschlussfähig zu gestalten

und als normatives Leitbild zu etablieren. Nach dem Motto *Global denken - lokal handeln!* haben sich die 172 Unterzeichnerländer dazu verpflichtet, das Leitbild der nachhaltigen Entwicklung auf kommunaler Ebene gemäß den lokalen und regionalen Erfordernissen in einer eigenen *Lokalen Agenda 21* umzusetzen sowie durch konkrete Ziele und die Entwicklung geeigneter Indikatoren überprüfbar zu gestalten. Mit dem Weltgipfel in Johannisburg 2002 (Rio+10) sowie den nachfolgenden Klimakonferenzen lässt sich eine Stagnation im entwicklungs- und umweltpolitischen Prozess feststellen.

2.1.5 Aktuelle Positionen im Diskurs zu einer nachhaltigen Entwicklung

Das so genannte *Drei-Säulen-Modell* wurde von der Enquettekommission des 13. Deutschen Bundestages *Schutz des Menschen und der Umwelt* (1998) als konzeptionelle Grundlage gewählt. Die Bundesregierung hat dieses Modell in der im April 2002 verabschiedeten nationalen Nachhaltigkeitsstrategie verankert [OTT / DÖRING 2004:34]. Im Zentrum dieses Leitbildes steht die Erkenntnis, dass Ökologie, Ökonomie und soziale Sicherheit eine untrennbare Einheit bilden und gleichermaßen behandelt werden müssen. Die Interessen in diesen Handlungsbereichen stehen aber nicht selten in einem Zielkonflikt miteinander, wie in Abb. 2.1.1 *Zauberscheiben der Nachhaltigkeit* [DIEFENBACHER ET AL. 1997] dargestellt ist.

Gerade aber wegen seiner konzeptionellen Vereinfachung und Anschaulichkeit wird das Drei-Säulen-Modell kritisiert. „Wie Brand und Jochum (2000) feststellten, entwickeln sich die Säulen mittlerweile zu einer Art Wunschzettel, in die jeder eintragen kann, was er für wichtig hält. (...) Das Drei-Säulen-

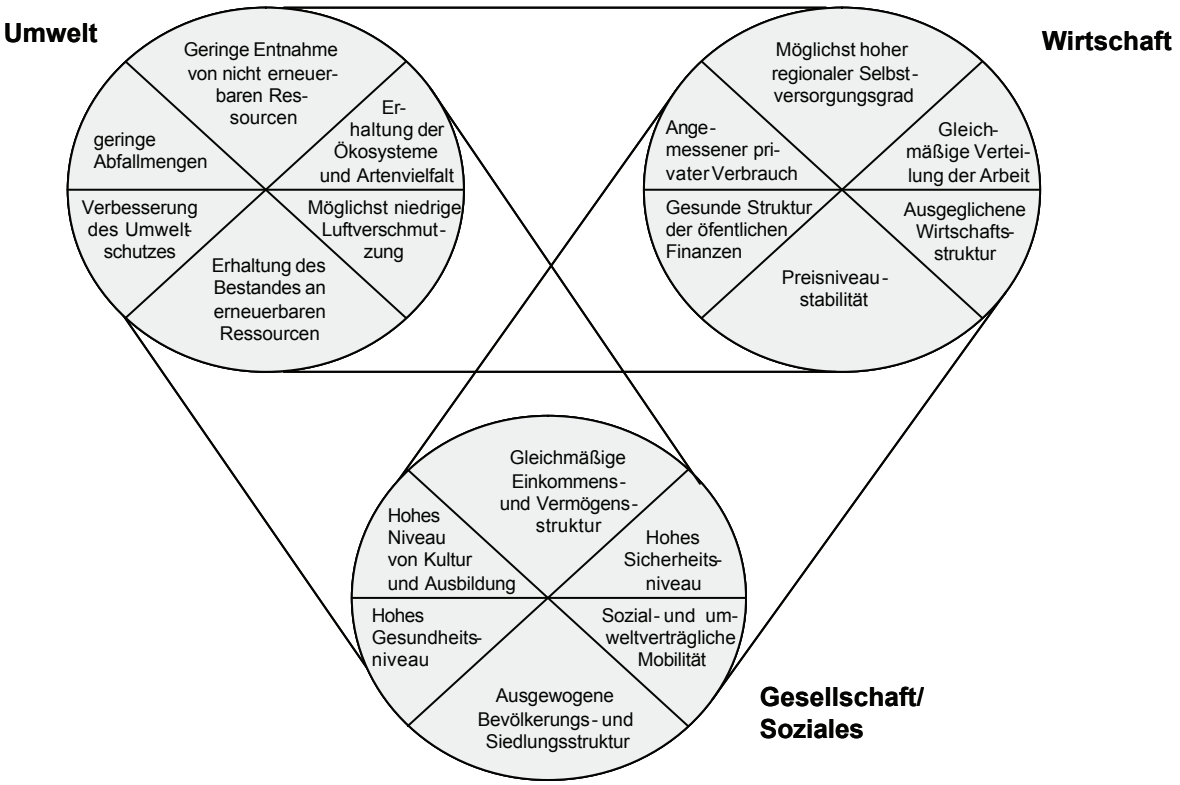


Abb. 2.1.1 Zauberscheiben der Nachhaltigkeit [DIEFENBACHER ET AL. 1997 in: KÖCKLER 2005:41]

Modell ist der große „Weichspüler“ der Nachhaltigkeitsidee. (...) Das Drei-Säulen-Modell bezahlt seine vordergründige politische Anschlussfähigkeit mit systematischen Defiziten. Dadurch wird es (hoffentlich) auch für die Politik unattraktiv; denn es ist fraglich, worin (über Rhetorik hinaus) der Wert dieser Nachhaltigkeitskonzeption liegt“ [OTT / DÖRING 2004:36]. Einen umfassenden Überblick zu den unterschiedlichen Positionen besonders im Hinblick auf die Diskussion in Deutschland bieten Karl-Werner Brand und Georg Jochum [BRAND / JOCHUM 2000].

In Nordamerika hat sich ein anderer Diskurs etabliert, der insbesondere die Beziehung von Natur- und Humankapital behandelt. Unter dem komplementären Begriffspaar *schwache* und *starke* Nachhaltigkeit (*weak and strong sustainability*) sind fundamental gegensätzliche Positionen zur Frage der Substituierbarkeit von Naturkapital durch Humankapital versammelt. Diese Frage befasst sich mit Handlungsoptionen, denen ökologische und ökonomische Interessen zugrunde liegen. Diese Positionen werden in Kapitel 2.4 näher erörtert.

In jüngerer Zeit wurden weitere Konzepte aus der Ökosystemtheorie wie *Homöostase* und *Resilienz* in den Diskurs eingeführt und auf neue Handlungsfelder ausgeweitet. Homöostase bezeichnet dabei die Fähigkeit biologischer Systeme, auf Störungen weitgehend stabil zu reagieren und in einem dynamischen Gleichgewicht zu verharren [ODUM 1999:36]. Dabei werden zwei Arten von Stabilität unterschieden: die Stabilität durch Resistenz, d.h. die Fähigkeit, Stress zu ertragen oder abzubauen sowie die elastische Stabilität, d.h. die Fähigkeit, sich nach Stresseinwirkung schnell zu erholen. Die Homöostase ist eng mit der Resilienzfähigkeit eines Systems verbunden. Diese bezeichnet die Fähigkeit eines Systems, nach einer Störung immer wieder zum Grundzustand zurückzukehren. Die Resilienz wurde ursprünglich anhand von großflächigen Ökosystemen studiert. Wegen der Bedeutung des menschlichen Einflusses auf die Entwicklung dieser Ökosysteme wurden die Studien auf das Zusammenspiel sozioökologischer Systeme ausgeweitet. Ein System ist resilient, wenn folgende Eigenschaften möglichst stark ausgeprägt sind: Pufferfähigkeit, Selbstorganisation sowie Lern- und Anpassungsfähigkeit (Carpenter et al. 2001) [DARNHOFER 2005:69]. Wenn Systeme diese Eigenschaften bzw. Bedingungen erfüllen, steigt ihre Fähigkeit, dauerhaft bzw. nachhaltig zu existieren.

2.2 Das gesellschaftliche Naturverhältnis

2.2.1 Bevölkerungsentwicklung und ökologische Tragfähigkeit

Ein zentraler Aspekt einer nachhaltigen Entwicklung ist die Beachtung der Grenzen der ökologischen Tragfähigkeit. Der aus der Populationsökologie stammende Begriff *Tragfähigkeit* (*carrying capacity*) bezeichnet die theoretisch maximale Populationsdichte einer Art in einem bestimmten Lebensraum [ODUM 1991:163]. Das Konzept der Tragfähigkeit beschreibt einen Regelkreis zwischen der Populationsdynamik und der physischen Umwelt, die als Lebensraum der Bereitstellung der lebensnotwendigen Ressourcen dieser Population dient.
Der Begriff Tragfähigkeit wird aber weitgehend mit der *agraren Tragfähigkeit* gleichgesetzt. Er beschreibt den Nahrungsmittelspielraum (Mombert 1929) und damit diejenige Tragfähigkeit, von welcher Süßmilch (1741) und später Malthus (1798) ausgingen. Tragfähigkeit im engeren Sinne drückt also

die jeweils aktuelle Relation von Nahrungsmittelproduktion und existierendem Nahrungsmittelbedarf, im weiteren Sinne die Mensch-Ressourcen-Relation aus [WEISS 2004:604].

Die großen, durch den Industrialisierungsprozess hervorgerufenen gesellschaftlichen Transformationen im ausgehenden 18. Jahrhundert wurden von einer Diskussion um die Abhängigkeit des Bevölkerungswachstums vom Naturhaushalt begleitet [SIEFERLE 1990]. In Europa erhöhte sich zwischen 1750 und 1850 die Bevölkerung von (geschätzten) 140 auf 266 Millionen. Allein in Großbritannien verdreifachte sich die Bevölkerung von (geschätzten) sieben auf über 20 Millionen Menschen [OTT / DÖRING 2004:21]. Der schottische Pfarrer, Nationalökonom und Sozialphilosoph Thomas Robert Malthus (1766 – 1834) versammelte in seinem *Essay on the Principle of Population* (1798) die Argumente seiner Zeit und wurde mit seiner pessimistischen Position berühmt, wonach es zu einer Verelendung und Verarmung des Landes kommen müsse, da das Bevölkerungswachstum exponentiell, die Nahrungsmittelproduktion gleichzeitig aber nur linear steigen würden. Sein Argument war zwar in erster Linie gegen eine staatliche Armenfürsorge gerichtet und stützte konservative Interessen, es gründete sich aber auf einer für seine Zeit allgemein gültige Denkfigur. Sein Denken war der vorindustriellen, agrarisch dominierten Wirtschaftsform verhaftet, in der „alle Dinge der Welt sich innerhalb eines Gleichgewichts befinden, wobei die Menge der verfügbaren Elemente grundsätzlich konstant ist. Gewinne der einen Seite müssen daher immer zu Lasten einer anderen Seite gehen“ [SIEFERLE 1990:86]. Sieferle hat diese Denkfigur das Nullsummenprinzip genannt, und stellt diesem das Maximierungsprinzip entgegen, das als modernes Gegenstück grundsätzlich die Möglichkeit postuliert, alle entscheidenden Größen zugleich vermehren zu können [SIEFERLE 1990:87].

Der pessimistische Glaube, dass die Fruchtbarkeit des beackerten Bodens über die Länge der Zeit langsam aber sicher abnehme, war schon seit der Antike verbreitet. In moderner Form argumentierte der deutsche Chemiker Justus von Liebig (1803 – 1873) mit der Chemie und mit den Erfahrungen aus der Weltgeschichte gegen den Raubbau des europäischen Ackerbaus. Nach Liebig beruht die Fruchtbarkeit des Bodens auf mineralischen Bestandteilen. Durch jede Ernte werden dem Boden Minerale entzogen und sofern der Mensch diese dem Boden nicht in irgendeiner Form zurückgibt, verliert der Boden unweigerlich seine Fruchtbarkeit. Diese Vorstellung folgte dem Muster des um die gleiche Zeit aufgestellten Energieerhaltungssatzes oder der Geldwirtschaft, wonach man immer ärmer wird, wenn man mehr ausgibt als man einnimmt. Nach Liebig schreitet dieser Prozess der schleichenden Verarmung des Bodens schon seit Jahrtausenden voran, und wird durch die neuzeitlichen Agrarreformen und die moderne Abwasserentsorgung mit Wasserklosett und Mischkanalisation sogar beschleunigt. Da Liebig zu dieser Zeit den chemischen Dünger noch nicht erfunden hatte, sah er die einzige Lösung in der Rückführung der Fäkalien in die Landwirtschaft, wie es die Chinesen seit Jahrtausenden praktizierten und woraus er die einzigartige Kontinuität ihrer Kultur erklärte: „Der Kreislauf der Nährstoffe würde wieder geschlossen, wenn die Exkremente von Mensch und Tier einschließlich des Urins dem Boden, dem die Nahrung entstammt, vollständig wieder zurückgegeben würden. Der ‚Fortschritt der Kultur‘ – so Liebig – sei eine ‚Kloakenfrage‘ “ [RADKAU 2000: S.24].

Die Argumentation von Malthus erzeugte zwar zunächst die düstere Vision einer dauerhaften Subsistenzkrise in Europa [OTT / DÖRING 2004:22]. Mit der Erfindung des Kunstdüngers durch

Liebig selbst und mit der Einführung industrieller Produktionsweisen erfuhr die Landwirtschaft jedoch einen Produktivitätszuwachs, der Malthus‘ These offensichtlich widerlegte. Dennoch ist es gerade das Maximierungsprinzip, das zum Paradigmenwechsel einer auf grenzenlosem Wachstum gegründeten Wirtschaft führte und heute als eine der wesentlichen Ursachen der ökologischen Krise angesehen wird.

In dem 1967 veröffentlichten Buch des amerikanischen Biologen Paul R. Ehrlich *The Population Bomb* wird die Argumentation von Malthus in moderner Form wieder aufgenommen. Darauf aufbauend haben Paul Ehrlich und John Holdren 1972 mit der *IPAT-Formel* (Impact = Population * Affluence * Technology) ein einfaches Modell für die Größe von Umwelteinwirkungen (impact) in Abhängigkeit von Bevölkerungsanzahl (population), Wohlstand (affluence) und Stand der Technologie (technology) entwickelt.

Diesem Ansatz wird entgegengehalten, dass hier Natur als ein Gleichgewichtssystem betrachtet wird, während menschliche Gesellschaften die Tragfähigkeit ihres Lebensraumes durch Kulturtechniken und die Kolonialisierung natürlicher Systeme schon immer erhöht und durch Transport und Handel von Gütern über natürliche Begrenzungen hinweg ausgedehnt haben. Menschen haben durch Arbeitsteilung die Naturaneignung gesellschaftlich organisiert. Die Leistungen und Erträge werden durch symbolische Tauschwerte, im allgemeinen Geld, vermittelt, wodurch der materielle Austausch auf eine abstraktere Steuerungsebene gehoben und der Prozess weg von Subsistenz hin zu globaler Ökonomie dynamisiert wurde. Die Tragfähigkeit kann also nicht als eine statische Größe angesehen werden, sondern ist eine Funktion aus dem Zusammenwirken von Bevölkerungsentwicklung und dem Niveau, dem natürlichen und kulturell erschlossenen Ressourcenpotenzial des Lebensraumes sowie gesellschaftlichen Kolonisationsstrategien und Technologien der Ressourcennutzung. Global konstante Kapazitätsgrenzen sind demnach nicht definierbar. Diese lassen sich nur durch dynamische Modellansätze abbilden.

2.2.2 Systemtheoretischer Ansatz: Die Grenzen des Wachstums

Unmittelbar vor der Stockholmer Umweltkonferenz 1972 wurde ein Bericht veröffentlicht, der großes Aufsehen erregte und die Umweltdiskussionen der folgenden Jahre prägen sollte. Im Auftrag des *Club of Rome* wurde Anfang der 1970er Jahre die Tragfähigkeit der globalen Ökosysteme in Wechselwirkung mit den menschlichen Aktivitäten erstmalig mit Hilfe eines systemdynamischen Computermodells simuliert. Die Ergebnisse wurden als *Die Grenzen des Wachstums* [MEADOWS ET AL. 1972] veröffentlicht und zeigten, dass ein andauerndes wirtschaftliches Wachstum in der bisherigen Form nicht unbeschränkt möglich sein kann. Zwanzig Jahre später kommt der aktualisierte Bericht *Die neuen Grenzen des Wachstums* zu dem Ergebnis, dass einige dieser Grenzen bereits überschritten und dringend Maßnahmen zu ergreifen sind, um die lebenserhaltenden Systeme auf der Erde zu bewahren [MEADOWS ET AL. 1993]. Die Kritik am industriellen Wachstumsmodell wurde so mit neuen wissenschaftlichen Methoden untermauert.

Die Grundlage für das Modell bildet das Konzept der *System Dynamics* (SD) des amerikanischen Elektroingenieurs Jay W. Forrester (geb. 1918). Forrester entwickelte mit seinen Mitarbeitern an der *Sloan School of Management* des *MIT* seit Ende der 1950er Jahre Computermodelle, um das Verhalten

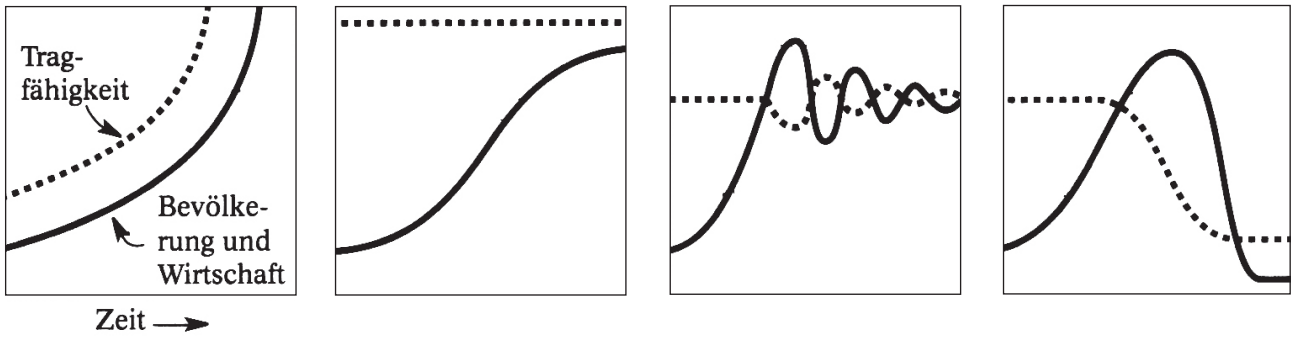
industrieller Systeme und die Beziehungen von Angebot und Nachfrage in ökonomischen Prozessen zu untersuchen. Diese Studien wurden 1961 in *Industrial Dynamics* veröffentlicht. Aufbauend auf diesen Untersuchungen entwarf er in *Urban Dynamics* [FORRESTER 1969] ein Modell, mit dem das Zusammenspiel von Industrie, Bevölkerungs- und Siedlungsentwicklungen sowie Migrationen in urbanen Systemen beschrieben werden konnten. In *World Dynamics* (1971) wurde dieses Modell auf den globalen Maßstab ausgedehnt und bildete als Weltmodell die theoretische Grundlage für das Simulationsprogramm, mit dem die Grenzen des Wachstums ermittelt wurden.

Der Ansatz beruht auf der Beobachtung, dass komplexe Systeme, wie wirtschaftliche Unternehmen, Volkswirtschaften, soziale, ökologische oder urbane Systeme sich entgegen intuitiven Vorstellungen nichtlinear verhalten. Einfache Lösungen rufen häufig nur neue, größere Probleme hervor, da die Ziele von Teilsystemen häufig im Widerspruch zu den Zielen eines größeren Systemzusammenhangs stehen können. Ein System wird als die Gesamtheit mehrerer miteinander verknüpfter und sich gegenseitig beeinflussender Elemente aufgefasst, die einen bestimmten Zweck erfüllen und emergente Eigenschaften aufweisen. Im systemischen Denken werden die komplexen Zusammenhänge der realen Welt modellhaft vereinfacht. Die Elemente werden als Bestandsgrößen und Durchflussmengen charakterisiert, und es werden die Rückkopplungen und Grenzwerte, die das Verhalten des Gesamtsystems beeinflussen, dargestellt. Systeme werden von positiven und negativen Rückkopplungen (*feedback loops*) gesteuert. Positive Rückkopplungen bewirken eine Verstärkung der Abweichung und sorgen für Wachstum. Negative Rückkopplungen oder abweichungshemmende Eingänge haben eine wachstumsdämpfende Wirkung auf das System und wirken dadurch stabilisierend auf das Systemverhalten.

Die Entwicklung des systemischen Denkens vollzog sich maßgeblich in den USA der Nachkriegszeit. Zwischen 1946 und 1953 fanden dort zehn interdisziplinäre Konferenzen statt, die als *Macy Conferences* den Beginn der neuen Wissenschaft der Kybernetik markieren. Unter der Leitung des Neurophysiologen Warren McCulloch (1899-1969) trafen sich Natur- und Sozialwissenschaftler verschiedener Fachgebiete, darunter die Mathematiker John von Neumann und Norbert Wiener, die Biologen Heinz von Foerster und Max Delbrück sowie die Anthropologen Gregory Bateson und Margaret Mead, um die fachübergreifenden, systemisch-strukturellen Grundlagen ihrer Wissenschaftsdisziplinen zu ergründen. Einen Überblick zur Entwicklung des systemischen Denkens findet sich bei Fritjof Capra [CAPRA 1996] und Günther Ossimitz [OSSIMITZ 2000].

Die neuen Grenzen des Wachstums [MEADOWS ET AL. 1993] wurden mit dem Computermodell *World 3* untersucht, das als eine Fortschreibung des Weltmodells von 1972 in der Programmiersprache STELLA geschrieben wurde. Es besteht aus fünf Sektoren, die hinsichtlich ihrer Wechselwirkungen miteinander verknüpft wurden:

1. Bevölkerungszahl und deren Entwicklung
2. Industrieproduktion und Stand technologischer Entwicklungen
3. Nahrungsmittelproduktion und Landnutzung
4. Verfügbarkeit von Ressourcen, Ressourcenbedarf und –verbrauch
5. Umweltverschmutzung



a) Ständiges Wachstum b) Logistisches Wachstum c) Grenzüberziehungen mit Einschwingungen d) Grenzüberziehungen mit Zusammenbruch

Abb. 2.2.1 Graphische Darstellung des Systemverhaltens [MEADOWS ET AL. 1993:156]

Dem Modell wurden als die wichtigsten Charakteristika Wachstumsprozesse, wirksame Grenzen, Verzögerungszeiten und Erosionsprozesse hinterlegt. „Es gibt vier grundsätzliche Verhaltensformen, mit denen sich eine wachsende Bevölkerung den Grenzen der Tragfähigkeit nähern kann (Abb. 2.2.1). Wenn die Grenzen noch weit entfernt liegen oder sich gar ausdehnen, kann die Bevölkerung ungehemmt weiter wachsen. Das Wachstum kann sich auch in einer ausgeglichen verlaufenden Kurve zum Nullwachstum einpegeln, so dass ein Gleichgewichtszustand nahe der Grenze der Tragfähigkeit eintritt; es bildet sich in diesem Fall eine S-förmige, logistische Kurve. Wenn das Bevölkerungswachstum über die Grenzen hinausschießt, ist es möglich, dass die Bevölkerungszahl eine Zeit lang um den Grenzwert schwingt, bis ein Gleichgewichtszustand eintritt. Wenn das Wachstum aber mit Schwung die Begrenzung so überzieht, dass die Basis aller Ressourcen zerstört wird, ist keine Anpassung mehr möglich. Das Ergebnis ist dann der Zusammenbruch“ [MEADOWS ET AL. 1993:141].

Der Modellierung wurde eine „homogene Welt“ zugrunde gelegt, mit einem „idealen“ Marktverhalten und ohne eine differenzierte Betrachtung verschiedener Regionen oder Länder. Unkontrollierbare Störgrößen wie Naturkatastrophen, politische Unruhen oder Kriege wurden ebenfalls nicht berücksichtigt. Es stellt insofern eine starke Vereinfachung dar, dessen Ergebnisse deshalb vielfach als unwissenschaftlich kritisiert wurden. Es war aber nie als ein Werkzeug zur Vorhersage gedacht, wann z.B. einzelne Rohstoffquellen erschöpft sein würden. Die Szenarien dienten dazu, das systemimmanente Verhalten in Abhängigkeit von der Variation einzelner Parameter aufzuzeigen – insbesondere was sich ereignen könnte, wenn die Menschheit ihr Verhalten auf globaler Ebene nicht ändert. Als Standardlauf des Weltmodells wurde der Status quo fortgeschrieben. Andere Szenarien zeigen das Verhalten des Weltmodells bei verdoppelten oder „unbegrenzten“ Rohstoffreserven, beim Einsatz neuer Technologien, bei erhöhter Ressourceneffizienz oder die Auswirkungen von Emissions- und Geburtenbeschränkungen.

Der Standardlauf zeigte im Ergebnis eine bedrohliche Zuspitzung an Rohstoffknappheit und Umweltverschmutzung, die zu einem rapiden Abfall der Weltbevölkerung und des Lebensstandards innerhalb von 50 bis 100 Jahren führten, wenn die gegenwärtigen Trends anhielten. Einige Szenarien zeigten aber auch, dass ein weltweiter Gleichgewichtszustand mit einer Grenzbevölkerung von ca. 8 Milliarden Menschen bei mittlerem Lebensstandard im gegenwärtigen Europa erreicht werden kann,

wenn die Durchsatzmengen, die für die wirtschaftliche Tätigkeit erforderlich sind, auf ein umweltverträgliches Maß gesenkt werden. Allerdings zeigten die Studien von 1992, dass die gangbaren Wege in eine erstrebenswerte Zukunft in den letzten 20 Jahren schwieriger geworden sind, da manche Grenzen bereits überzogen wurden [MEADOWS ET AL. 1993:28]. 2004 veröffentlichten die Autoren auf Grundlage des Computermodells *World 3* mit aktualisierten Annahmen ein 30-Jahre-Update. Demnach ist die Tragfähigkeit der Erde bereits im Jahr 2004 um ca. 20 % überschritten worden.

2.2.3 Sozialökologische Modellansätze

Die Menschheitsgeschichte ist geprägt durch regelmäßig auftretende Nachhaltigkeitskrisen. Hervorgerufen werden diese Krisen durch ein sich rückkoppelndes System von Bevölkerungswachstum und Ressourcenverfügbarkeit am Rande der Tragfähigkeit.
Der Umwelthistoriker Rolf Peter Sieferle unterscheidet in der Menschheitsgeschichte drei epochale gesellschaftliche Entwicklungsstadien, die charakteristische Muster hinsichtlich des vorherrschenden Energiesystems, der Landschaftsnutzung sowie der Ausbildung spezifischer Kulturweisen und sozialer Muster aufweisen: die Jäger- und Sammlergesellschaften, die Agrargesellschaften und die Industriegesellschaften [SIEFERLE 1997a].

1. Jäger- und Sammlergesellschaften
Jäger- und Sammlergesellschaften bewegen sich in einem unmodifizierten Solarenergiesystem. Die Menschen sind im natürlichen Energie- und Ressourcenfluss integriert, ohne diesen maßgeblich zu beeinflussen. Die vorherrschende Landschaftsform ist die Natur-Landschaft. Aufgrund der extensiven Nutzung der Naturressourcen ist die Bevölkerungsdichte von Jäger- und Sammlergesellschaften sehr gering (0,1 – 0,02 Personen / km^2). Der verhältnismäßig kleinräumige Aktionsradius und eine begrenzte Tradierungsfähigkeit dieser Gesellschaften ermöglichen nur relativ flüchtige kulturelle Strukturen ohne dauerhafte Stilformationen.

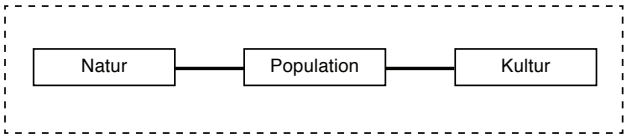
2. Agrargesellschaften
Der universalgeschichtliche Übergang zur Landwirtschaft, der so genannten neolithischen Revolution vor etwa 10.000 Jahren, führte zur Bildung von Agrargesellschaften mit einem kontrollierten Solarenergiesystem. Der Mensch entwickelt kulturelle Techniken zur Kontrolle von Solarenergieflüssen. Neben der Produktion und Nutzung von Biomasse werden bereits einfache Technologien zur Nutzung regenerativer Energien wie z.B. Wind- und Wassermühlen eingesetzt. Die Steigerung der Erträge aus der Landschaft, die zur Kulturlandschaft wird, führt zu einem Bevölkerungswachstum, was wiederum einen Innovationsdruck zu einer intensiveren Ressourcennutzung erzeugt. Das agri-kulturelle System operiert daher stets an der Obergrenze der Ressourcenverfügbarkeit und weitet diese zugleich aus. Die permanenten, räumlich gebundenen Rekursionen im Informationsaustausch mit Verstetigungen, z.B. durch Tradierungen in Schrift-Sprache, erzeugen spezifische kulturelle Formtraditionen. Es entsteht die eigentümliche Dualität von Volkskultur und zivilisatorischer Hochkultur.

3. Industriegesellschaften
Im späten 18. Jahrhundert begann in England die industrielle Transformation. Das Energiesystem industrieller Gesellschaften beruht auf der intensiven Nutzung fossiler Energieträger. Mit der Nutzung fossiler Energieträger beginnt eine langfristige Entkopplung der Energiebereitstellung von der land-

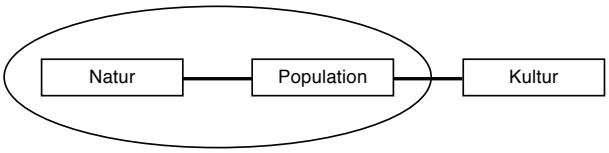
und forstwirtschaftlichen Produktionsfläche. Arbeits- und Zugtiere wurden durch Maschinen ersetzt, die nicht mehr aus der Fläche genährt, sondern von Bodenschätzen angetrieben wurden. Die für Agrargesellschaften typische Symbiose von Mensch und Tier wurde in den Industriegesellschaften durch eine Symbiose von Mensch und Maschine ersetzt. Damit verbunden ist auch die industrielle Transformation der Landschaft. Die Rohstoffgewinnung im Berg- und Tagebau ist mit weitgehenden Eingriffen in den landschaftlichen Wasserhaushalt verbunden. Die moderne Agrarwirtschaft verwandelte die Vielfalt der kleinteiligen Kulturlandschaft in großflächige, monokulturelle Produktionsflächen, die in hohem Maße auf Energiebeihilfen für Düngung, Transport und künstlicher Bewässerung angewiesen sind. Wie kaum eine andere kulturelle Errungenschaft hat das Automobil zu einer Überformung der Städte und Landschaften beigetragen.

Auf der Grundlage der Nutzung fossiler Energieträger vollzog sich eine Transformation der Agri-Kulturlandschaft zur industriell überformten Landschaft. „Diese sich neu bildende Landschaft ist weder eine Naturlandschaft noch eine Kulturlandschaft; sie bewahrt weder die Spontaneität der natürlichen Evolution noch die agrargesellschaftliche Einbettung von Natur und Kultur. Sie ist vielmehr Ausdruck einer vollständigen Mobilisierung, die kaum noch ein Element der Wirklichkeit auslässt. Die Zustände, die jetzt geschaffen werden, sind daher auch nicht stabil: Es handelt sich um Transformationen, die sich permanent weiter transformieren werden“ [SIEFERLE 1997a:213]. Für diesen hochdynamischen Zustand prägte Sieferle den Begriff der totalen Landschaft. Begleitet wurde diese Transformation zunächst von der Bildung nationaler Räume in Form von Nationalstaaten. Eine in zunehmendem Maße globalisierende Universalisierung der Informationsflüsse führt im Resultat zu einer „merkwürdigen Einheit von beschleunigtem Kompetenzgewinn und Verflüchtigung“ kultureller Muster.

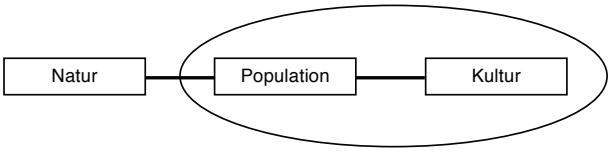
Um den sozialökologischen Wirkungszusammenhang bei der Entstehung und Bewältigung von Umweltkrisen zu beschreiben hat Sieferle ein Modell entwickelt, in dem die Triade von Natur, Population und Kultur ein sozialökologisches System bilden [SIEFERLE 1997b:37].
Die menschliche Population ist durch ihre physische Existenz einerseits abhängig von der Natur, andererseits ist sie durch ihre Fähigkeit zur Bildung und Verwendung von Artefakten, Sprache, Tradition usw. Träger einer kulturellen Evolution. Die Population wirkt damit als das verbindende Glied zwischen Natur und Kultur, die einen jeweils voneinander unabhängigen, autonomen Systemcharakter besitzen. Eine unzureichende, verzerrte oder verzögerte Repräsentation des materiellen Bereichs (= Natur) im symbolischen (= Kultur) Bereich ist der prinzipielle Grund für das Auftauchen von Umweltproblemen [SIEFERLE 1997b:50] (Abb. 2.2.2).



Das sozialökologische System



Das human-ökologische System



Das soziale System

Abb. 2.2.2 Sozialökologischer Wirkungszusammenhang [SIEFERLE 1997:37]

2.3 Erkenntnistheoretische Positionen zur ökologischen Krise

2.3.1 Philosophie der ökologischen Krise

Das Wohlstandsniveau in den entwickelten Industrieländern – allen voran der *American Way of Life* –, bildet das zentrale ökonomische Leitbild der heutigen Zeit. Eine Universalisierung des westlichen Lebensstandards auch in der Dritten Welt ist aber auf Grund seiner hohen Energie- und Stoffflussintensität de facto nicht möglich. Dieses Wohlstandsmodell birgt sogar die große Gefahr eines globalen ökologischen Zusammenbruchs, wenn alle Bewohner dieses Planeten soviel Energie, Rohstoffe und Güter nutzen würden wie die Bevölkerung der Ersten Welt. Nicht nur die Rohstoffquellen, sondern insbesondere die ökologischen Senken der Atmosphäre oder der Weltmeere würden aufgrund der Schadstoffbelastungen überlastet werden. Das Wohlstandsmodell der industriellen und post-industriellen Gesellschaften ist in seiner gegenwärtigen Ausprägung kein global verallgemeinerungsfähiges, nachhaltiges Leitbild.

1990, zu Beginn des Transformationsprozesses in der ehemaligen Sowjetunion, hielt der Mailänder Philosoph Vittorio Hösle eine Vortragsreihe, die unter dem Titel *Philosophie der ökologischen Krise* veröffentlicht wurde [HÖSLE 1994]. In diesen Vorträgen legte Hösle die erkenntnistheoretischen Ursachen der ökologischen Krise dar. Als wesentliche Triebkraft der ökologischen Krise sieht er die „national-sozialistische“ Tiefenstruktur der gegenwärtigen Weltpolitik, die auf dem vorherrschenden Paradigma der Ökonomie als dominantes gesellschaftliches Subsystem und der erkenntnistheoretischen Position des (bürgerlichen) subjektiven Idealismus beruht.

2.3.2 Die „national-sozialistische“ Tiefenstruktur der gegenwärtigen Weltpolitik

Der soziale Friede innerhalb der Industriestaaten beruht auf einem stetigen Wirtschaftswachstum, das die Grundlage für die Befriedigung der Konsumbedürfnisse seiner Bevölkerung bildet. Dies gelang wirtschaftlich bisher nur effizient durch eine Externalisierung der Kosten, einerseits hinsichtlich der Nutzung natürlicher Ressourcen, andererseits durch das wirtschaftliche Gefälle der Nationen. Analog zum thermodynamischen Gesetz der Entropie wird die innere Ordnung durch das „Hinauspumpen“ der Unordnung realisiert. Der moderne Staat wird so zu einer Ausbeutungspolitik nach außen gezwungen, die in der Weltgeschichte einmalig sein dürfte.

Hösle bezieht sich auf den Wiener Philosophen Hans-Dieter Klein, wenn er hierbei von einer „national-sozialistischen“ Tiefenstruktur der gegenwärtigen Weltpolitik spricht: „Der nationale Sozialstaat muss in der Tat, wenn die Bedürfnisse seiner Bewohner ungeordnet wachsen, das zur Stillung dieser Bedürfnisse dort zu nehmen suchen, wo der Widerstand am geringsten ist. Dazu bieten sich im wesentlichen zweierlei Objekte an: einerseits die Natur, andererseits jene Nationen, die das Prinzip des sozialen Rechtsstaates noch nicht internalisiert haben, weil sie etwa in parafeudalen Verhältnissen leben, also die Völker der Dritten Welt“ [HÖSLE 1994:32, 101].

Die schwächsten Glieder im Wirtschaftsprozess sind einerseits die Natur, die in der neuzeitlichen Rechtsphilosophie allgemein als rechtlos gilt, und mit ihr die kommenden Generationen, da sie noch nicht existent, auch keine Rechte haben können. Andererseits wird die Plünderung der Dritten Welt

damit legitimiert, dass ihre Bewohner die Prinzipien des modernen Rechtsstaates noch nicht anerkannt hätten. Dies führt zwangsläufig zu einer Legitimationskrise der westlichen Demokratie, die den Frieden im Binnenverhältnis nur auf Kosten der Verletzung souveräner Rechte im Außenverhältnis realisieren kann [HÖSLE 1994:33]. Die Verschärfung der Umweltkrise und die katastrophale Situation der Dritten Welt, die selbst miteinander unlöslich zusammenhängen, sind somit notwendiges Resultat der „national-sozialistischen" Tiefenstruktur der gegenwärtigen Politik, welche selbst im Bann des Paradigmas der Wirtschaft steht [HÖSLE 1994:33].

2.3.3 Die Wirtschaft als dominantes gesellschaftliches Subsystem

Die Wirtschaft ist heute das dominante gesellschaftliche Subsystem, deren Zweckrationalität sich alles andere unterzuordnen hat. Dieses war in der Geschichte aber keineswegs immer so gewesen. In der Antike war das Verhältnis von Politik und Wirtschaft ein ganz anderes als heute:
„Die frühgriechische Wirtschaft war primär Subsistenzwirtschaft, und daher empfand der antike Staat für seine Bürger eine ganz andere, unendlich schwächere wirtschaftliche Verantwortung als der moderne" [HÖSLE 1994:27]. Historisch vollzogen sich Paradigmenwechsel von der Religion (Mittelalter und frühe Neuzeit) zur Politik der Nationalstaaten (19. Jahrhundert) und von dieser zur Ökonomie (20. Jahrhundert). Nach Hösle wird es im 21. Jahrhundert einen erneuten Paradigmenwechsel geben: von der Ökonomie zur Ökologie, die als Leitwissenschaft zur Erhaltung der Lebensgrundlagen eine zentrale Rolle übernehmen wird [HÖSLE 1994:27].

2.3.4 Die geistesgeschichtlichen Grundlagen der ökologischen Krise

Um die Struktur der modernen Industriegesellschaft näher zu analysieren, unterscheidet Hösle drei gesellschaftliche Teilsysteme: die moderne Wissenschaft, die moderne Technik und die kapitalistische Wirtschaft. Das Zusammenwirken dieser Teilsysteme erzeugt eine „Superstruktur", die den zunehmend schwerer zu kontrollierenden Motor der modernen Gesellschaft bildet und die ursächlich an der Entstehung moderner Nachhaltigkeitskrisen beteiligt ist [HÖSLE 1994:44].

Dabei sind nicht die Eigentumsverhältnisse an den Produktionsmitteln entscheidend für die Ausbeutung der Natur, sondern die strukturellen Eigenschaften des wirtschaftlichen Systems selbst und die „Systemzwänge", die sich hieraus für die Akteure ergeben. „Zu Recht hat Gorz kapitalistische und sozialistische Wirtschaft der Gegenwart unter dem umfassenden Begriff des *Industrialismus* zusammengefasst" [HÖSLE 1994:102].

Erkenntnistheoretisch sieht Hösle die Hauptursache der ökologischen Krise im (bürgerlichen) subjektiven Idealismus. Der subjektive Idealismus mit der dualistischen Entgegensetzung von *res cogians* und *res extensa* durch Descartes (1596 – 1650) bildet hierbei eine entscheidene Grundlage für die Entwicklung der modernen Naturwissenschaften mit ihren letztlich auf mathematischen Modellen basierenden Formen der Naturerforschung. Hösle unterscheidet fünf grundsätzliche Typen des Naturbegriffs, die sich aus dem gesellschaftlichen Entwicklungsstand ergeben.
Der Wissenschafts- und letztlich Naturbegriff hat sich von der archaischen Zeit mit einer eher magisch-mythischen Erkenntnispraxis – *Das Wilde Denken* [LÉVI-STRAUSS 1997] – über den Naturbegriff der alten Hochkulturen, Formen der deduktiven Wissenschaft bei den Griechen (Platon / Aristoteles)

und des Naturbegriffs im Christentum hin zum modernen Wissenschaftskonzept (Bacon, Descartes, Kant) stufenweise weiterentwickelt [HÖSLE 1994:49]. Die moderne Wissenschaft wiederum wurde zur Basis der modernen Technik, die seit dem 19. Jahrhundert in Verbindung mit der modernen Finanzwirtschaft eine Wachstumsdynamik in der Exploration und Transformation natürlicher Ressourcen entfalten konnte, die bis dahin nicht möglich war.

Als erkenntnistheoretischen Ausweg sieht Hösle in Anlehnung an Hans Jonas [JONAS 1984] die Begrenzung des Autonomieideals der Moderne verbunden mit einer Philosophie des objektiven Idealismus, welche der Natur ein starkes und zu schützendes Eigenrecht zubilligt. Auf der sozioökonomischen Ebene sieht Hösle als einzig wünschenswerte Alternative eine ökologisch-soziale Marktwirtschaft, welche die Wahrnehmung privatwirtschaftlicher Interessen unter Wahrung gesellschaftlicher Rahmenbedingungen (ökologische Leitplanken) wie z.B. die Internalisierung von Umweltkosten verbunden mit einer grundlegenden ökologischen Steuerreform ermöglicht.

2.4 Die ökonomische Dimension der Nachhaltigkeit

2.4.1 Ansätze zu einer ökologischen Ökonomie

Im vorangegangenen Kapitel wurde auf die herausragende Bedeutung des Subsystems Wirtschaft für das Entstehen der ökologischen Krise eingegangen. Wie können Gesellschaften ökologisch verträglich wirtschaften, um eine nachhaltige Entwicklung zu erreichen?
Welche Bedingungen müssen erfüllt sein, um Ressourcen nachhaltig zu nutzen?

Wirtschaftswissenschaftler unterteilen das menschliche Tun in die Kategorien Produktion und Konsum. Unsere Handlungsprämissen hinsichtlich Produktion und Konsum folgen einer paradoxen Logik: Während alles Tun im Bereich der Produktion einer strengen Rentabilitätsberechnung unterliegt, ist der Bereich des Konsums grundsätzlich „unwirtschaftlich“. „Wir produzieren, um uns bestimmte Annehmlichkeiten und Bequemlichkeiten als „Konsumenten“ leisten zu können. Wenn jedoch jemand dieselben Annehmlichkeiten und Bequemlichkeiten verlangen würde, während er „produziert“, würde man ihm sagen, das sei unwirtschaftlich und unrentabel, und die Gesellschaft könne sich eine solche Unrentabilität nicht leisten. Mit anderen Worten: es hängt alles davon ab, ob es vom produzierenden oder vom konsumierenden Menschen getan wird. Wenn der produzierende Mensch erster Klasse reist oder ein Luxusauto benutzt, wird das Geldverschwendung genannt. Wenn aber derselbe Mensch in seiner Gestalt als konsumierender Mensch dasselbe tut, nennt man das ein Zeichen hohen Lebensstandards“ [SCHUMACHER 1977:96].

Ökonomische Betrachtungen sind somit immer zugleich mit Diskussionen über gesellschaftliche Wertehierarchien verbunden. Allein die genauere Bestimmung von Bedürfnissen ist von vielen Prämissen abhängig. Zumindest über die Bestimmung der Grundbedürfnisse (*basic needs*) besteht im Nachhaltigkeitsdiskurs ein gewisses Einvernehmen. Eine zentrale, normative Forderung betrifft die Verteilungsgerechtigkeit von Ressourcen und deren Nutzungserträgen bezogen auf die rezenten Generationen, aber insbesondere auch auf die nachfolgenden Generationen. Wie viele Ressourcen der Natur dürfen wir zu Befriedigung unserer Bedürfnisse gebrauchen oder verbrauchen und wie

viele gestehen wir den nachfolgenden Generationen zu?

Die *Ökologische Ökonomik* ist eine umfangreiche Teildisziplin, in der naturwissenschaftliche, sozialwissenschaftliche und ökonomische Betrachtungsweisen aufeinandertreffen. Es werden gleichermaßen Fragen zur Nutzung natürlicher Ressourcen (Quellen und Senken), die Allokation der ökonomischen Kosten von Emissionen, das Verhältnis von Sach- und Naturkapital, die Entropie und Selbstorganisation in sozialen Systemen [BECKENBACH / DIEFENBACHER 1994], Verteilungsgerechtigkeit, Lebensstile und nachhaltiger Konsum, Regionalisierung und Globalisierung sowie mikro- und makropolitische Steuerung verhandelt.

An dieser Stelle beschränke ich mich auf eine kurze Beschreibung der Positionen zur starken und schwachen Nachhaltigkeit, den in diesem Zusammenhang formulierten Ressourcenmanagementregeln sowie eine Darstellung der Bedingungen, welche erfüllt sein sollten, damit eine Gesellschaft nachhaltig Wohlstand generieren kann [RADERMACHER 2005]. Einen umfangreichen Überblick zum Thema gibt die *Einführung in die Ökologische Ökonomik* [CONSTANZA ET AL 2001]. Für den sozio-kulturellen Diskurs über neue Lebensstile und nachhaltigen Konsum sei auf die Veröffentlichung von Gerhard Scherhorn und Christoph Weber [SCHERHORN / WEBER 2003] verwiesen. Globalisierungsfragen werden u.a. von Wolfgang Sachs [SACHS 2000] diskutiert. Ansätze zur regionalen Selbststeuerung durch Regionalwährungen werden von Margit Kennedy und Bernard Lietaer [KENNEDY / LIETAER 2004] dargestellt.

2.4.2 Starke oder schwache Nachhaltigkeit?

Das Konzept der starken und schwachen Nachhaltigkeit (*strong and weak sustainabilty*) stammt ursprünglich aus den USA und ist mit Anhängern der *Ecological Economics* wie H. Daly, E. Odum, R. Goodland, D.W. Pearce, R.K. Turner und R. Costanza verbunden. Im Grundsatz sind sie Anhänger einer Gleichgewichtsökonomie, die Konzepte wie Nullwachstum, Kreislaufwirtschaft, differenzierte Strukturwandlungsprozesse u.ä. vertritt, welche auf Überlegungen des englischen Philosophen und Ökonomen John Stuart Mill (1806 – 1873) aus der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts zurückgehen [HUBER 1995:53].

Die Unterscheidung der beiden komplementär aufeinander bezogenen Konzeptionen von starker und schwacher Nachhaltigkeit liegt in einer grundsätzlich unterschiedlichen Beurteilung der Substitutionsmöglichkeiten von Naturkapital. Zur Betrachtung dieser Unterscheidung bedarf es zunächst einer näheren Bestimmung der Begriffe Kapital und Ressource. In der Ökonomie stellt eine Ressource ein nutzbares Kapital dar, das unterschiedliche Formen, Eigenschaften und Funktionen annehmen kann. Der Diskurs einer nachhaltigen Entwicklung legt einen Schwerpunkt auf den Erhalt der materiell-physiologischen Lebensgrundlagen (ökologische Dimension), die durch eine Übernutzung natürlicher Ressourcen gefährdet sind. Ressourcennutzung bedeutet hier zumeist im weitesten Sinne die Rohstoffgewinnung und -transformation in wirtschaftliche Güter. Schumacher unterscheidet hierbei die von der Natur gegebenen Güter (erneuerbare und nicht-erneuerbare) von denen, die durch Menschenhand geschaffen sind (Erzeugnisse und Dienstleistungen) (Abb. 2.4.1) [SCHUMACHER 1977: 45].

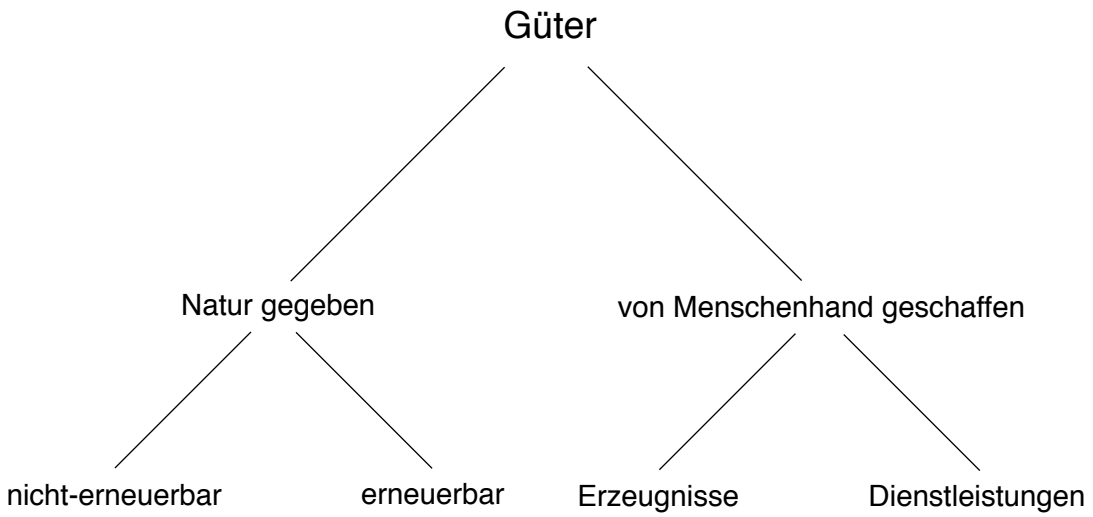


Abb. 2.4.1 Gütergruppen nach Ernst Schumacher [SCHUMACHER 1977:45]

Eine differenzierte Unterteilung von verschiedenen Kapitalformen findet sich bei Konrad Ott und Ralf Döring [OTT / DÖRING 2004:100]:

1. Sachkapital
2. Naturkapital
3. Kultiviertes Naturkapital
4. Sozialkapital (moralisches Orientierungswissen, politische Institutionen usw.)
5. Humankapital (Fertigkeiten, Bildung)
6. Wissenskapital

Das Naturkapital wird weiterhin unterschieden nach:

a) erneuerbaren (sich aus sich selbst erneuernden) und nicht-erneuerbaren Ressourcen,
b) Naturkapital und kultiviertem, d.h. durch menschliche Tätigkeit überformtem Naturkapital,
c) Quellen (*sources*) und Senken (*sinks*) sowie
d) Beständen bzw. Fonds (*stocks*) und Nutzenstrom (*flow*).

Diese Differenzierung ist insofern wichtig, als dass einige Kapitalformen in andere überführt oder zu deren Erzeugung eingesetzt werden können, andere hingegen nicht.

Bei der Konzeption der *schwachen Nachhaltigkeit* besteht ein gleichgewichtiges und konvertierbares Verhältnis zwischen Humankapital und dem natürlichen Kapital, das durch Humankapital ersetzt werden kann.

Bei der Konzeption der *starken Nachhaltigkeit* wird eine Begrenzung in der Nutzung und Konvertierung von Natur- in anderes Sach- oder Humankapital gesehen, die durch die Limitierung der natürlichen Ressourcen- und Senkenkapazität gesetzt ist. In dieser Sicht ist der Verlust natürlicher nichtregenerativer Ressourcen letztlich unersetzlich. Bei der starken Nachhaltigkeit ist es vorrangiges Ziel, die Umwelt zu erhalten und zu sichern. Der Primat liegt in der ökologischen Dimension, auf

welche die ökonomische und soziale Dimension auszurichten sind. Zur Operationalisierung dieser Forderung wurden Ressourcennutzungsregeln formuliert (Kapitel 2.4.3).

Vertreter der schwachen Nachhaltigkeit argumentieren, daß das industrielle Entwicklungsmodell trotz des Durchlaufens mehrerer Stufen mit erhöhtem Umweltverbrauch letztlich zu größerer Nachhaltigkeit führe. Aus dem durch einen höheren Entwicklungsstand der Industrialisierung erreichten Wohlstand heraus kann sich die Gesellschaft schließlich höhere Umweltstandards und eine höhere Lebensqualität leisten. Ein prominenter Vertreter dieser Konzeption ist Bjorn Lomborg, der mit seinem Buch *Apokalypse No!* [LOMBORG 2002] und dem *Copenhagen Consensus* (2004 / 2008) [http://www.copenhagenconsensus.com/Home.aspx] auf sich aufmerksam gemacht hat.

Die Kritiker des industriellen Entwicklungsmodells – allen voran der langjährige Leiter des World-Watch-Instituts, Lester Brown [BROWN 2001] – plädieren aufgrund der stark ansteigenden Ausbeutung von Naturressourcen und des Verlusts von natürlichen, vom Menschen weitestgehend ungenutzten Landschaften zu einem radikalen Umschwenken der Wirtschaftsweise hin zu einer ökologischen Ökonomie - eine Position der starken Nachhaltigkeit.

Es liegt in den Besonderheiten von Naturkapitalien, dass sie nicht vollständig substituiert werden können. Der Verlust genetischer Vielfalt durch das Artensterben oder unberührter Naturräume lässt sich durch keine Form von Sachkapital kompensieren. „Wenn Naturkapital vollständig oder sehr weitgehend substituiert werden könnte, so würden wir unseren Nachfahren nur wenig Naturkapital hinterlassen müssen, denn andere Kapitalien würden mindestens einen gleich hohen Nutzen stiften. (...) Die hintergründige Frage lautet also, ob Menschen ihre Wohlfahrt idealiter ausschließlich aus ihren eigenen Erzeugnissen heraus schaffen können, in die zwar noch naturale Substrate (Materie, Stoff) eingehen, deren Nutzenstiftung jedoch wesentlich von ihrer vom Menschen geprägten Funktion (Form) ausgeht“ [OTT / DÖRING 2004:100].

Weiterhin führt die Tatsache, dass evolutionäre Prozesse irreversibel verlaufen und nicht beliebig umkehrbar sind, zu einem weiteren Argument für einen sorgfältig bewahrenden Umgang mit dem Naturkapital. Im Anschluss an Georgescu-Roegen, der sich auf Schrödinger bezog, hat Daly den Begriff des Naturkapitals entropietheoretisch eingeführt [Daly 2002]. Demnach wird die industrielle Ökonomie generell als eine Umwandlung niedriger in hohe Entropie aufgefasst, wobei die Neoklassik nach Daly den Sachverhalt übersieht, dass das Industriesystem die Negentropie der Biosphäre degradiert. Dem Aufbau von Sachkapital steht naturhistorisch eine Entropieerhöhung gegenüber. Die industrielle Produktionsweise degradiert und zerstört damit Strukturen, die sie nicht rein artifiziell bzw. industriell aufbauen kann [Ott / Döring 2004:205].

Wesentliche Gründe sprechen somit für die Wahl des Konzepts starker Nachhaltigkeit mit partiellen Möglichkeiten der Substitution im Produktionsbereich, da hinsichtlich
- der Ungewissheit der Präferenzen und größeren Wahlfreiheit späterer Generationen,
- der Berücksichtigung des Vorsorgeprinzips angesichts ungewisser Risikoabschätzungen,
- der Schwierigkeiten bei der Identifikation „kritischen“ Naturkapitals
- sowie erkenntnistheoretischer und ethischer Erwägungen

das Konzept der starken Nachhaltigkeit den richtungssicheren Pfad in die Zukunft darstellt [OTT / DÖRING 2004:160]. Als Ziel nationaler und transnationaler Nachhaltigkeitsstrategien sollte in jedem Fall als Leitlinie verfolgt werden, das Naturkapital in unterschiedlichen Beständen und auf unterschiedlichen Skalen über die Zeit hinweg zumindest konstant zu halten.

2.4.3 Ressourcenmanagementregeln

Die Ressourcenmanagementregeln bezeichnen die grundlegenden Wirtschaftsweisen, die im Rahmen der Position einer starken Nachhaltigkeit zum Erhalt des natürlichen Kapitalstocks beachtet werden müssen. 1991 hat der amerikanische Ökonom Herman Daly (geb. 1938) drei Bedingungen für den Energie- und Stoffwechsel nachhaltiger Volkswirtschaften formuliert [DALY 2002]. Diese wurden durch eine vierte Regel ergänzt [ENQUETE 1994:32, BUND / MISEREOR 1996:32, BRAND / JOCHUM 2000:72]:

1. Die Abbaurate erneuerbarer Ressourcen soll deren Regenerationsrate nicht überschreiten.
2. Nicht-erneuerbare Ressourcen sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger Ersatz in Form erneuerbarer Ressourcen oder höherer Produktivität der erneuerbaren sowie der nicht-erneuerbaren Ressourcen geschaffen wird.
3. Stoffeinträge in die Umwelt sollen sich an der Belastbarkeit der Umweltmedien orientieren, wobei alle Funktionen zu berücksichtigen sind, nicht zuletzt auch die empfindlichere Regelungsfunktion.
4. Das Zeitmaß anthropogener Einträge bzw. Eingriffe in die Umwelt muss im ausgewogenen Verhältnis zum Zeitmaß der für das Reaktionsvermögen der Umwelt relevanten Prozesse stehen.

2.4.4 Was macht Gesellschaften reich?

Der Mathematiker und Ökonom Franz Josef Radermacher, seit 2002 Mitglied im *Club of Rome* und Mitinitiator der *Global Marshall Plan Initiative*, nennt sieben Bedingungen, die eine Gesellschaft gleichermaßen erfüllen muss, um nachhaltig Wohlstand zu erzeugen [RADERMACHER 2005:99]. In ähnlicher Form hat bereits Joseph Huber [HUBER 1995:105] fünf dieser Aspekte benannt:

	Franz Josef Radermacher (2005):	Joseph Huber (1995):
1.	gut funktionierendes, leistungsfähiges Governance-System	intakter Rechtsstaat, intakte öffentliche Verwaltung und eine strategiefähige Elitenkooperation in der Politik
2.	exzellent ausgebildete und geeignet orientierte und motivierte Menschen	qualifizierte Arbeitskraft als weitere Form von Humankapital
3.	hervorragende Infrastrukturen auf internationalem Niveau	-
4.	hervorragender Kapitalstock	genügend großer Kapitalstock
5.	Zugriff auf benötigte Ressourcen	-
6.	leistungsfähige Forschung und international konkurrenzfähige Innovationsprozesse	Wissen, sei es in wissenschaftlicher Theorie- oder Empirieform, sei es als praktisches Erfahrungswissen
7.	enge Einbettung der Unternehmen und Menschen in weltweite Wertschöpfungsnetzwerke	Technologie und effiziente Unternehmensführung

Erst das Zusammenspiel aller dieser Aspekte ermöglicht einen nachhaltigen gesellschaftlichen Wohlstand. Trotz großer Rohstoffvorkommen kann z.B. der Großteil einer Gesellschaft in Armut leben, wenn aufgrund eines ungerechten Regierungssystems nur die Eliten von der Exploration der Ressourcen profitieren. Auf der anderen Seite können Gesellschaften mit geringen Rohstoffvorkommen durch internationale Handelsbeziehungen auf die Rohstoffvorkommen anderer Gesellschaften zurückgreifen, um dadurch Wertschöpfung und Wohlstand zu generieren.

Von Radermacher sind diese Bedingungen ausführlich beschrieben. Alle Aspekte unterliegen einer gesellschaftlichen Eigendynamik, die zu einem Auf- oder Abstieg im internationalen Vergleich führen kann. Landes und Daimond beschreiben sehr anschaulich, wie sich Gesellschaften aufgrund ihrer wissenschaftlichen, technologischen, sozialen und politischen Entwicklungen historisch verändert haben [LANDES 1999, DAIMOND 1999].

2.5 Strategien und Operationalisierung einer nachhaltigen Entwicklung

2.5.1 Nachhaltigkeitsstrategien und Indikatoren

Ein erklärtes Ziel in der Diskussion zur Gestaltung einer nachhaltigen Entwicklung ist die Reduktion der Energie- und Stoffströme in den Industrienationen unter Wahrung bzw. Steigerung des Lebensstandards. Die Strategien zur Etablierung eines nachhaltigen gesellschaftlichen Stoffwechsels lassen sich in drei Kategorien zusammenfassen: Effizienzstrategie, Konsistenzstrategie und Suffizienzstrategie. Effizienz- und Suffizienzstrategien stehen für eine quantitative Reduktion des gesellschaftlichen Stoffwechsels durch eine bessere Ressourcenausnutzung und einen Verzicht bzw. sparsamen Umgang mit Ressourcen. Konsistenzstrategien stehen für die wirksame Einpassung industrieller Produktionsprozesse in Naturkreisläufe und damit für eine qualitative Veränderung des Stoffwechsels.

Aufgrund ihrer methodisch-disziplinären Herkunft messen Wissenschaftler diesen Strategien eine unterschiedliche Bedeutung bei. In der Bewertung von Umweltproblemen und bei der Formulierung von Lösungsvorschlägen können vier Paradigmen oder Denkmuster unterschieden werden [FISCHER-KOWALSKI 1997:13]: Chemiker und Mediziner legen den Fokus eher auf die stoffliche Dimension (Giftstoffe / Schadstoffe) und bevorzugen Konsistenzstrategien. Physiker und Ökonomen beschäftigen sich eher mit Fragen der Ressourcenökonomie, Thermodynamik und Entropie und propagieren eher Effizienzstrategien. Biologen, Ökologen, Klimatologen und Agrarwissenschaftler arbeiten in komplexen chemisch-physikalischen Systemzusammenhängen und haben einen Fokus, der als Bewahrung des natürlichen Gleichgewichts bezeichnet werden kann. Philosophen, Moralisten und Ethiker beschäftigen sich mit Fragen der Konvivialität und dem Eigenwert von Natur (s. Kapitel 2.3). Ein weiteres Denkmuster lässt sich den sozialwissenschaftlichen Disziplinen zuordnen, die sich häufig mit Suffizienzstrategien beschäftigen.

Für Huber stellt die *Industrielle Ökologie* das derzeit umfassenste Konzept zur Umgestaltung der Industriegesellschaft dar, bei dem Effizienz-, Konsistenz- und Suffizienzstrategien zusammenspielen, wobei der Konsistenzstrategie die wichtigste Rolle zukommt [HUBER 2000:5].

Abschließend stellt sich die Frage, wie eine nachhaltige Entwicklung überhaupt gemessen und gesteuert werden kann. Zur Bewertung und Steuerung von Prozessen kommt Indikatoren eine Schlüsselstellung zu. In der Chemie bezeichnet ein Indikator einen Stoff, der z.B. durch seinen Farbwechsel das Ende einer chemischen Reaktion anzeigt. Erst durch Indikatoren kann die abstrakte Diskussion über eine nachhaltige Entwicklung konkretisiert werden. Nachhaltigkeitsindikatoren sind demnach Messgrößen, mit deren Hilfe der Zielerreichungsgrad quantitativ oder qualitativ überprüft werden kann, beispielsweise, ob sich ein Unternehmen, eine Region oder eine Gesellschaft in Richtung Nachhaltigkeit entwickelt oder nicht. Indikatoren spiegeln aber immer auch die Zielsetzungen und Modellrahmen derjenigen wider, die sie aufstellen. Die Aussagekraft hängt demnach von den zugrunde gelegten Fragestellungen ab. Die Umsetzung einer jeden Nachhaltigkeitsstrategie bedarf eigener Indikatoren.

2.5.2 Effizienz-Strategie: Erhöhung der Ressourcenproduktivität

In allen Phasen des Lebenszyklus eines Produktes von der Herstellung über die Nutzung bis zur Entsorgung bzw. zum Recycling werden mehr oder weniger große Energie- und Stoffströme hervorgerufen. Das Ziel der Effizienz-Strategie ist eine effizientere Ausnutzung der Ressourcen durch verbesserte Technologien mit höheren Systemwirkungsgraden und intelligente Steuerungstechnik. Der Energie- und Stoffumsatz für die Herstellung eines Produkts oder das Erbringen einer Dienstleistung soll gesenkt werden, damit die vorhandenen Ressourcen geschont und einer größeren Anzahl von Menschen zugänglich gemacht werden können (vergl. IPAT-Fomel in Kapitel 2.2.1).
Verschiedene Autoren haben Konzepte zu einer besseren Energie- und Rohstoffnutzung entwickelt, um Wohlstand umweltverträglicher zu gestalten:

• Faktor 4	Ernst Ulrich von Weizsäcker und Amory Lovins („Faktor Vier“)
• Faktor 10	Friedrich Schmidt-Bleek, Wuppertal-Institut
• 2.000 Watt – Gesellschaft	Novatlantis (ETH-Bereich, Schweiz)
• 1,5 Kilowatt – Gesellschaft	Hans-Peter Dürr [DÜRR 1995]

2.5.3 Suffizienz-Strategie: Konsumverzicht oder neue Wohlstandsmodelle?

Suffizienzstrategien können von zwei Seiten her initiiert sein: Einerseits kann Suffizienz als freiwilliger Konsumverzicht erfolgen oder sie kann durch politisch motivierte Maßnahmen hervorgerufen werden, die sich auf private Konsumentscheidungen z.B. durch eine Verteuerung der Ressourcennutzung aufgrund fiskalischer Steuern auswirken. Andererseits sind infolge der Erschöpfung natürlicher Quellen oder durch Nutzungsunterbrechung z.B. infolge von Notsituationen während oder nach Naturkatastrophen, kriegerischen Auseinandersetzungen usw. absolute Grenzen der Ressourcenverfügbarkeit gesetzt.

Ansätze zur Umsetzung von Suffizienzstrategien liegen in der Lebensstilforschung und in der Untersuchung der Funktion positionaler Güter, in der Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch durch Dematerialisierung des Konsums und *Product Sharing* sowie allgemein in der Etablierung nachhaltiger Lebensstile durch neue Wohlstandsmodelle.
Diesen Ansätzen liegt die Vorstellung zugrunde, dass jeder materielle Gegenstand zugleich ein

Zeichen ist, mit dem eine Vielzahl konnotativer Bedeutungen, ästhetische und gefühlsmäßige Ausdrücke verbunden sind. „Jedes einzelne Produkt ist eingebettet in ein komplexes System von Beziehung und Bedeutung, innerhalb dessen seine Nützlichkeit nur ein Ausschnitt ist. (...) Materielle Produktion ist in dieser Perspektive nichts anderes als die Produktion und Reproduktion von Sinnstrukturen.“ [KRAMER 1996:152]. Ein grundsätzliches Problem von Suffizienzstrategien liegt darin, dass sie ein geringes sozio-kulturelles Anschluss- und Resonanzpotenzial besitzen, da sie zumeist als Konsumverzicht wahrgenommen werden.

2.5.4 Konsistenz-Strategie: Stoffkreisläufe und Erhöhung der Ressourceneffektivität

Natürliche Ökosysteme sind durch konsistente Stoffflüsse charakterisiert. In natürlichen Ökosystemen verursachen Stoffverluste eine Absenkung ihres Wirkungsgrads bis hin zu einer vollständigen Degradierung. Daher sind in natürlichen Landschaftsprozessen Stoffströme in zumeist kleinräumig geschlossenen Kreisläufen organisiert, wodurch sich der Wirkungsgrad des Systems erhöht [RIPL / WOLTER 2002].

Konsistenz-Strategien beabsichtigen den Übergang von einer industriellen Durchfluss- zu einer industriellen Kreislaufwirtschaft, mit möglichst vollständiger Schließung der natürlichen und industriellen Stoffkreisläufe. Die Erhöhung der Ressourceneffektivität bedeutet eine Rückführung aller Abfälle in biologische oder technische Kreisläufe, wo die Ressourcen neuen Produktionsprozessen zugeführt werden. Sie vollziehen damit den Übergang von einem nachsorgenden zu einem vorsorgenden Umweltschutz. Während der Effizienz-Ansatz einen nachfolgenden Entfaltungs- und Wachstumsverlauf im Rahmen des Möglichen optimaler zu gestalten versucht, zielt der Konsistenz-Ansatz direkt auf einen beschleunigten Strukturwandel der Produktionsweise mit technologischen Innovationen. Aus systemischer Sicht ergibt sich daher die Prioritätenfolge von Konsistenz vor Effizienz vor Suffizienz [HUBER 2000:14]. Beispiele für die Umsetzung von Konsistenz-Strategien sind:

• Industrial Metabolism	Robert U. Ayres	[AYRES 1994]
• Stoffstrom-Management	Enquete-Kommission	[ENQUETE 1994]
• Zero-Emission-Konzepte	Gunter Pauli	[PAULI 1999]
• Öko-Effektivität / Cradle-to-Cradle-Ansatz	Michael Braungart	[BRAUNGART / MCDONOUGH 2005]
• Angewandtes Stoffstrommanagement	Peter Heck	[HECK / BEMMAN 2002]
• Industrielle Verwertungsnetzwerke	Thomas Sterr	[STERR 2003]
• Industrielle Ökologie	Armin von Gleich	[GLEICH 2008]
• Industrial Symbiosis Kalundborg	http://www.symbiosis.dk/	

2.5.5 Indikatoren zur Operationalisierung einer nachhaltigen Entwicklung

Nachhaltigkeitsindikatoren beschreiben in Abhängigkeit des Erkenntnisinteresses mit geeigneten energetischen, stofflichen, ökonomischen, sozialen oder räumlichen Parametern den Zustand eines Systems.Auf empirischer Ebene wird zumeist eine Vielzahl von Einzelindikatoren ermittelt, die dann durch Aggregation zu komplexen Indikatorensystemen zusammengefasst werden. Die Aggregation

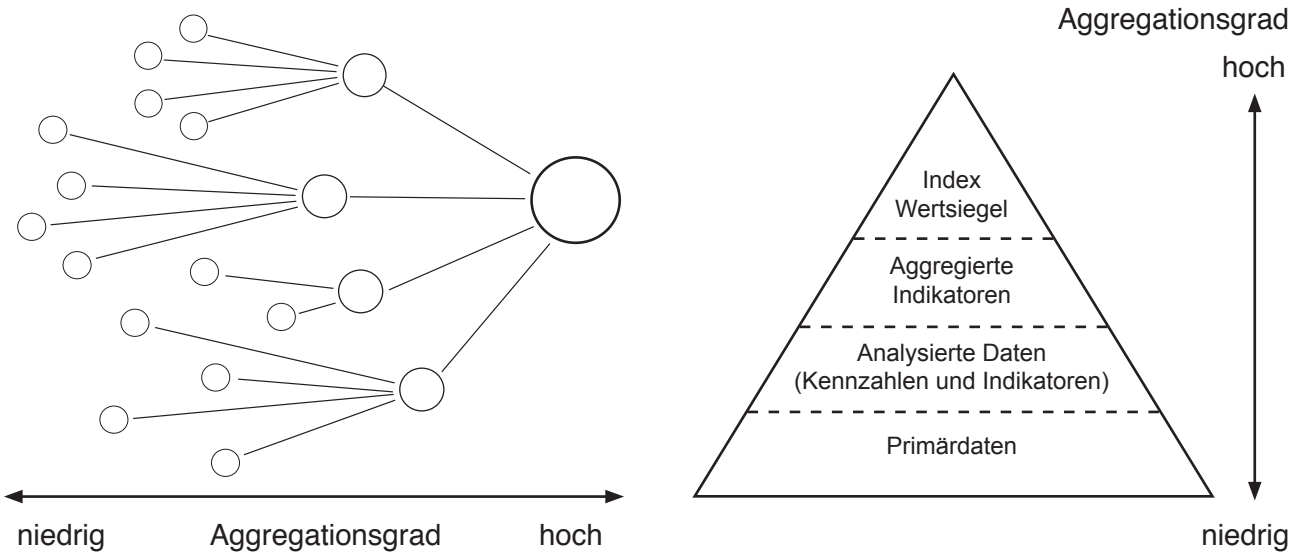


Abb. 2.5.1 Aggregationsstufen von Indikatoren zu Indikatorensystemen

von Einzelindikatoren reduziert zwar einerseits die Transparenz und räumliche Differenzierung, zugleich ermöglicht sie aber auch das Erfassen größerer Zusammenhänge (Abb. 2.5.1). Während Wissenschaftler eher auf einer niedrigeren Aggregationsebene operieren, bevorzugen politische, ökonomische oder raumplanerische Entscheidungsträger höhere Aggregationsstufen.

Hoch aggregierte Indikatorensysteme sind z.B. Umweltökonomische Gesamtrechnungen (UGR), die über längere Zeiträume hinweg die durch wirtschaftliche Aktivitäten verursachten Ressourcenströme oder Umweltveränderungen durch Ressourcenentnahme, Energieverbrauch, Emissionen, Bodennutzung usw. abbilden. Indikatoren sind damit ein wichtiges Instrument zum Monitoring von Zuständen und Veränderungen. Für die Beschreibung der physiologischen Zustände urbaner (Sub-) Systeme eignen sich z.B. energetische Indikatoren wie Gebäudeenergiekennwerte oder der *Kumulierte Energieaufwand* (KEA) für die Ermittlung des gesamten Energiebedarfs eines baulichen Systems über den gesamten Lebenszyklus sowie typische Flächenindikatoren wie die Pro-Kopf-Wohnfläche oder der ökologische Fußabdruck. Stoffliche Indikatoren werden häufig für die Beschreibung von Landnutzungssystemen verwendet.

An die Auswahl von Indikatoren und Indikatorensystemen wird eine Reihe von Anforderungen gestellt: Indikatoren müssen grundsätzlich theoriekonform und aussagekräftig das betrachtete System abbilden; sie sollten verständlich, vollständig, umfassend und exklusiv sein. Indikatorensysteme sollten erweiterbar sein und hinsichtlich ihrer Datenerfassung durch zeitliche und räumliche Vergleichbarkeit Aussagen über Entwicklungstrends ermöglichen. Schließlich besteht die Notwendigkeit der Datenverfügbarkeit bzw. Praktikabilität bei der Durchführung der Datenerhebung.

Indikatorensysteme müssen einerseits der spezifischen Problemlage des betrachteten Landes oder der Region gerecht werden, andererseits sollte eine möglichst weitgehende internationale Harmonisierung angestrebt werden [BMU 2000:4]. Am weitesten verbreitete Indikatorensysteme sind das Pressure-State-Response-Modell der OECD (1994) und das *Driving Force-State-Response-Modell* der *Kommission für nachhaltige Entwicklung* (CSD), die eine internationale Vergleichbarkeit

anstreben. Das CSD-Modell sieht insgesamt 134 Indikatoren vor, die den vier Dimensionen Umwelt, Wirtschaft, Soziales oder Institutionen zugeordnet sind. Nach einer zweijährigen Testphase von 1997-1999 wurde das CSD-Indikatorensystem in Deutschland auf einen Umfang von 96 Indikatoren – darunter 50 Schlüsselindikatoren – reduziert [BMU 2000]. Als Weiterentwicklung benennt die 2002 beschlossene *Nationale Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung Deutschland* [BUNDESREGIERUNG 2002] insgesamt 21 Schlüsselindikatoren, darunter die Energie- und Rohstoffproduktivität, die im Kyoto-Protokoll festgehaltenen Treibhausgase, den Anteil der erneuerbaren Energien am Energieverbrauch und die Flächeninanspruchnahme durch Siedlungs- und Infrastrukturausbau.

Ein Beispiel für den Aufbau eines Indikatorensystems für raumbezogene Daten ist der Indikatorenkatalog des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) mit insgesamt 70 Einzelindikatoren [IRMEN / MILBERT 2002]. Für den Indikator Energieverbrauch je Beschäftigten (Abb. 2.5.3) ist exemplarisch ein Datenblatt abgebildet, das den Indikator hinsichtlich seiner Nachhaltigkeitsdimension sowie seiner Kompatibilität mit anderen Indikatorensystemen beschreibt und Aussagen zur räumlichen Verteilung der Ergebnisse trifft. Die folgende Abbildung 2.5.2 zeigt eine typische Spinnennetzgraphik für die visuelle Repräsentation der Ergebnisse.

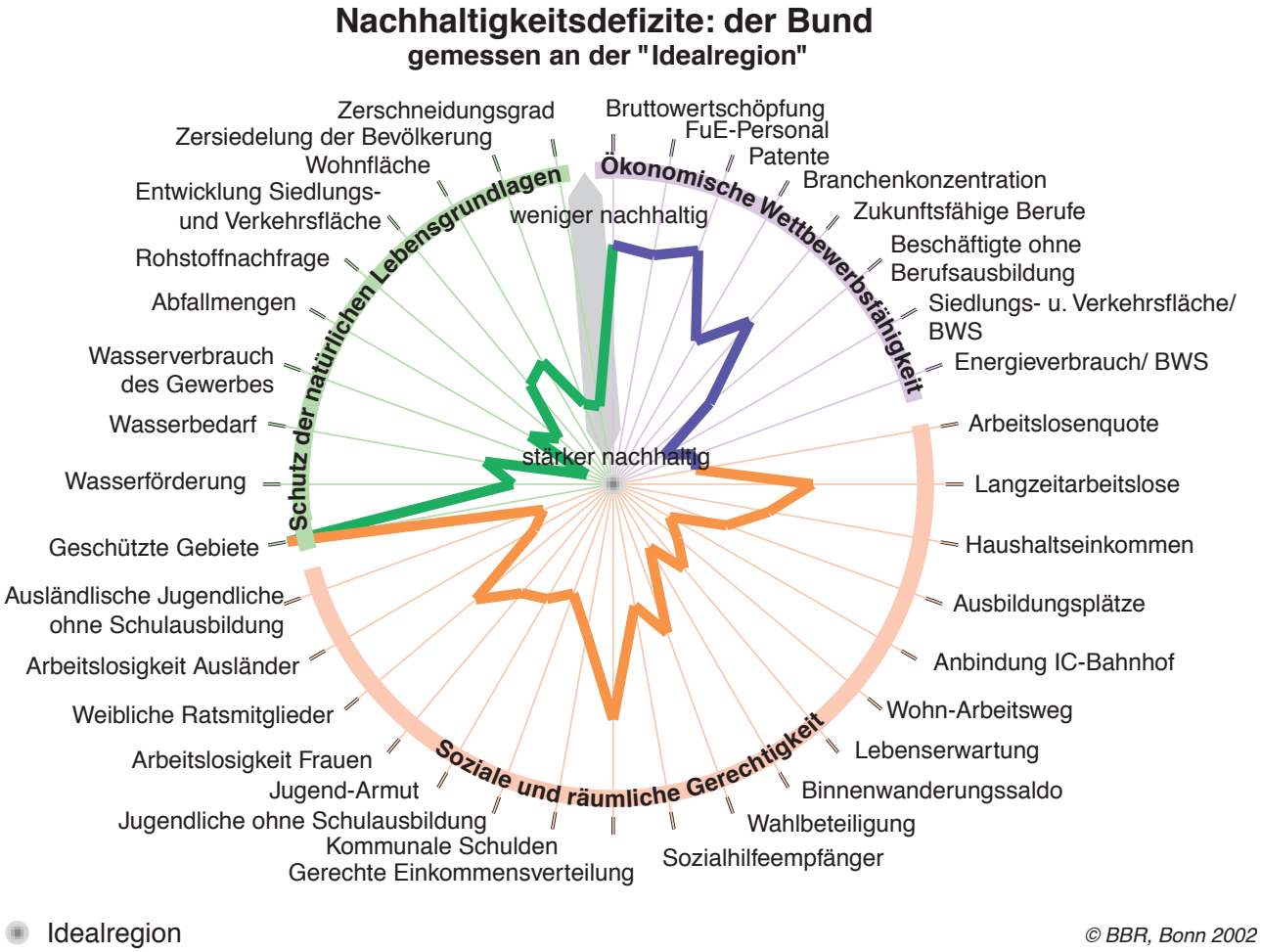
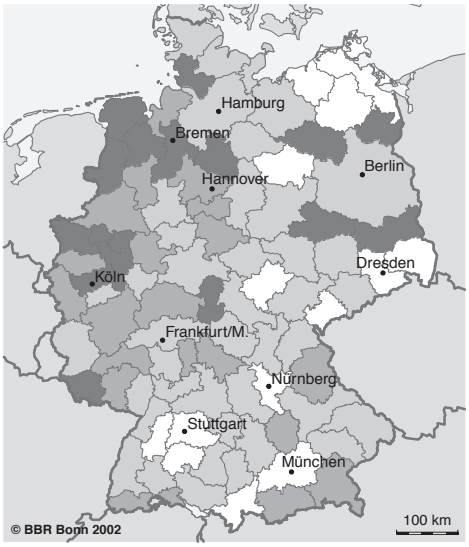
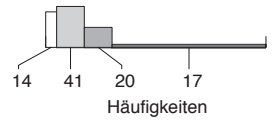


Abb. 2.5.2 Indikatorenkatalog des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR): Nachhaltigkeitsdefizite des Bundes [IRMEN / MILBERT 2002:127]



Energieverbrauch* in GJ je sozialversicherungspflichtig Beschäftigten 1997

	bis unter	200
200	bis unter	300
300	bis unter	400
400	und mehr	



* Energieverbrauch der Industrie in Betrieben mit 20 und mehr Beschäftigten 1997, in Haushalten 1997 (geschätzt) und im Straßenverkehr 1997 (geschätzt)

Datenbasis: Laufende Raumbeobachtung des BBR — Analyseregionen, Stand 1.1.1996

Dimension:	Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen
Ziel:	Rückgang in der Nutzung nicht-regenerativer Ressourcen – fossile Energieträger
Unter-/Teilziel:	Erhöhung der gesamtwirtschaftlichen Ressourcenproduktivität
Indikatorenkonzept:	CSD, Weltbank, WWF / NEF, OECD
Berechnung:	Energieverbrauch nicht möglich
Alternative Berechnung:	Energieverbrauch der Industrie in Betrieben mit 20 und mehr Beschäftigten, in Haushalten (geschätzt) und im Straßenverkehr (geschätzt) je Beschäftigten
regionale Auswertung:	Indikator wird nicht weiter berücksichtigt

Energieverbrauch je Beschäftigten 1997

	Indikatorwert	Variationskoeffizient	Minimum	Maximum
	GJ	%	GJ	GJ
Bund	304,8	102,9	160,6	955,5
Alte Länder	324,0	43,0	160,6	955,5
Neue Länder	236,0	51,1	164,9	551,7

Aussagefähigkeit

Der Energieverbrauch bezogen auf die Beschäftigten richtet den Blick auf die wirtschaftlichen Produktionsprozesse und damit auf Regionen, in denen energieintensiv produziert wird. Der Indikator soll die gesamtwirtschaftliche Energieproduktivität indizieren. In seiner Entwicklungstendenz soll er letztlich vor dem Hintergrund der Zielvorstellungen einer nachhaltigen Raumentwicklung einem Rückgang in der Nutzung nicht-regenerativer Energien anzeigen. Damit zielt er, wie der Energieverbrauch pro Kopf auch, auf die Reduktion in der Nutzung fossiler Energieträger.

Verglichen mit dem Indikator Energieverbrauch je Einwohner bildet der Bezug auf die Beschäftigten die wirtschaftliche Komponente des Energieverbrauchs ab. In diesem Aussagegehalt überlagert er sich mit dem Energieverbrauch je Einheit der Bruttowertschöpfung. In den Industrieländern hat in den letzten Jahren eine Entkopplung des Energieeinsatzes vom Wirtschaftswachstum stattgefunden, d.h. das Wirtschaftswachstum steigt schneller als der Energieverbrauch.

Regionale Verteilung

Nicht nur wegen der ähnlichen Aussage hinsichtlich des gleichen Ziels nachhaltiger Entwicklung, vor allem aber wegen der gleichen benutzten Datengrundlage, korrelieren die vorliegenden Energieindikatoren sehr stark miteinander. Es liegt als Datengrundlage derzeit nur der Energieverbrauch des produzierenden Gewerbes mit 20 und mehr Beschäftigten plus einer Schätzung des Energieverbrauchs der Haushalte und im Straßenverkehr vor.

Entsprechend bildet der Indikator – wie der pro-Kopf-Energieverbrauch auch – letztlich die altindustrialisierten Gebiete mit ihren energieintensiven Branchen wie z.B. Metallerzeugung und –bearbeitung, chemische Industrie und andere Regionen mit energieintensiver Wirtschaft wie z.B.

Abb. 2.5.3 Indikatorenkatalog des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR): Indikator Energieverbrauch je Beschäftigten [IRMEN / MILBERT 2002:105]

2.6 Zusammenfassung

Das Konzept einer nachhaltigen Entwicklung wird zum zentralen Paradigma des 21. Jahrhunderts. Ausgehend vom Brundtland-Bericht 1989 wurde es im Wesentlichen als ein Wirtschaftskonzept entwickelt, das eine dauerhafte und ökologisch verträgliche Ressourcennutzung von Quellen und Senken mit den Fragen einer gerechten Verteilung verbindet [HUBER 1995:12, BRAND / JOCHUM 2000:20]. Die im Brundtland-Bericht geforderte Balance von sozialer, ökonomischer und ökologischer Nachhaltigkeit kann als eine Übertragung des sozialdemokratischen Wirtschaftsprinzips auf den globalen Maßstab betrachtet werden. Die im Drei-Säulen-Modell bezeichneten Teilsysteme Ökologie, Ökonomie und soziale Systeme stehen in einer untrennbaren Dependenz zueinander, wobei der Ökologie eine dominierende Rolle zukommt, da ohne intakte physiologische Rahmenbedingungen Entwicklungen in der ökonomischen und sozialen Sphäre nur begrenzt zukunftsfähig sind.
Das zentrale Ziel einer nachhaltigen Entwicklung ist es, auf globaler Ebene die existenziellen menschlichen Bedürfnisse zu befriedigen und darüber hinaus Wohlstand zu ermöglichen, ohne die physiologischen Bedingungen unserer Existenz zu gefährden. Die Weiterentwicklung von sozioökonomischen Systemen muss in Einklang mit der Funktionsfähigkeit von Ökosystemen gebracht werden. Der Erhalt der ökologischen Tragfähigkeit, effizientes Wirtschaften und eine sozial gerechte Verteilung der erwirtschafteten Güter werden als die wichtigsten normativen Anforderungen angesehen [OTT / DÖRING 2004:51]. Gemäß dem Konzept der starken Nachhaltigkeit sind unter Berücksichtigung der lokalen und regionalen Einflussfaktoren für die Erhaltung des natürlichen Kapitalstocks entsprechende Ressourcenmanagementregeln einzuhalten. Die drei Nachhaltigkeitsstrategien *Konsistenz*, *Effizienz* und *Suffizienz* sind gleichermaßen zu berücksichtigen, wobei der Konsistenz die wichtigste Rolle zukommt. Durch geeignete Indikatoren kann die Entwicklung von Systemen beobachtet, gemessen und – im Rahmen der Möglichkeiten – zielgerichtet gesteuert werden.
Menschliche Gesellschaften haben aufgrund ihrer kulturellen Evolution ein dynamisches Verhältnis zur ihrer Umwelt. Konstante Kapazitätsgrenzen, wie sie aus der Biologie für natürliche Ökosysteme bestimmt werden können, lassen sich für anthropogen beeinflusste Ökosysteme nicht ohne Weiteres festlegen. Spätestens mit der neolithischen Revolution vor ca. 10.000 Jahren begannen menschliche Gesellschaften in natürliche Systeme kolonialisierend einzugreifen. Seither greifen sie in die natürlichen Energie- und Stoffflüsse ein, um die Erträge an Nahrungs- und Futtermittel sowie Energieträger zu lenken und zu steigern. Die Kolonialisierung natürlicher Systeme ermöglichte ein Bevölkerungswachstum, das zugleich einen Innovationsdruck nach sich zog. In einer spiralförmigen Bewegung bewegte sich das agri-kulturelle System stets entlang der Obergrenze von Ressourcenverfügbarkeit und Subsistenz. Historisch betrachtet kam es lokal, regional und überregional immer wieder zu Nachhaltigkeitskrisen. Jedes dynamische System tendiert dazu, an den Grenzen seines Wachstums und seiner Leistungsfähigkeit zu operieren. Nachhaltigkeitskrisen sind daher ein immanenter Bestandteil und Ausdruck der Systemdynamik und letztlich dessen Vitalität. Sie sind immer eine Möglichkeit, wenn nicht Voraussetzung zur Adaption und Weiterentwicklung. Nachhaltigkeitskrisen sind ein Motor für technologische und soziale Innovation und führen zu neuen kollektiven Handlungsversprechen. Die Nachhaltigkeitsdiskussion kann nicht allein auf der technologisch-inhaltlichen Ebene geführt werden. Entscheidend ist die Reflexion und Wandlung unserer Wertevorstellungen, welche Erwartungen wir an das Leben und die Natur zur Erfüllung unserer Bedürfnisse haben und wie wir diese mit den Bedingungen, welche die Natur an uns stellt, in Einklang bringen.

3. DER RESSOURCENHAUSHALT URBANER SYSTEME

3.1 Die Stadt als anthropogenes Ökosystem

3.1.1 Ökosystemforschung und deren Anwendung auf urbane Systeme

Der Begriff Ökologie wurde von dem deutschen Arzt und Zoologen Ernst Haeckel (1834-1919) 1866 eingeführt und bezeichnet „die gesamte Wissenschaft von Beziehungen des Organismus zur umgebenden Außenwelt, wohin wir im weiteren Sinne alle Existenzbedingungen rechnen können“ [ODUM 1999:1]. Die Vorstellung eines untrennbaren Systemzusammenhangs von lebenden Organismen in ihrer belebten und unbelebten Umwelt führte zu dem Begriff des Ökosystems, wie ihn 1935 der britische Ökologe Arthur Tansley (1871-1955) verwendete [ODUM 1999:7]. Durch den Einfluss der allgemeinen Systemtheorie setzte sich bereits seit Anfang der 1950er Jahre mit der *New Ecology* von Eugene P. und Howard T. Odum eine ökosystemare Sichtweise durch, die eine integrale Betrachtung aller lebendigen und physikalischen Komponenten anstrebte und zunehmend auf physikalischen und mathematischen Modellierungen beruhte (Abb. 3.1.1 / 3.1.2) [TREPL 1987:194].

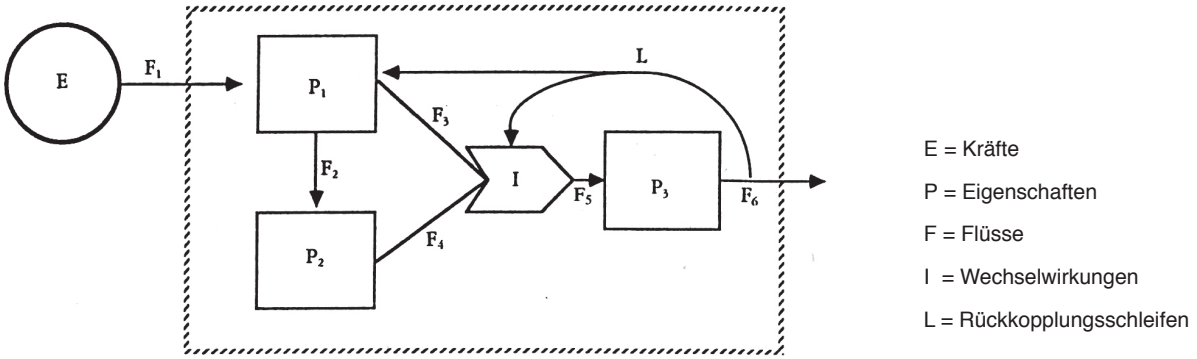


Abb. 3.1.1 Grundschema mit fünf Komponenten für die Erstellung von Ökosystemmodellen [ODUM 1991:48]

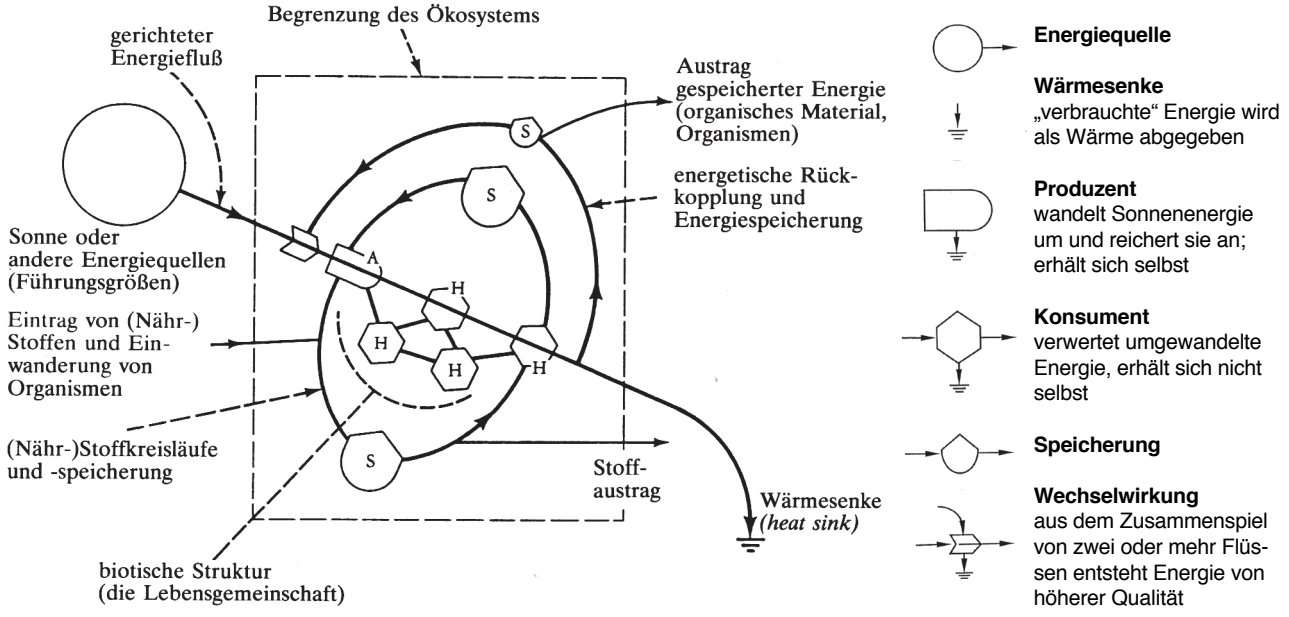


Abb. 3.1.2 Funktionsdiagramm eines Ökosystems. Der Schwerpunkt liegt auf der inneren Dynamik des Systems. Dabei spielen Energiefluss, Stoffkreisläufe, Speicherung (S) und Nahrungsnetze mit autotrophen (A) und heterotrophen (H) Organismen eine Rolle [ODUM 1991:52].

Diese Modellvorstellung lässt sich auch auf anthropogene Systeme übertragen: „Im Prinzip ist beispielsweise eine Stadt mit ihren Randbezirken und dem Umland, aus dem sie vorwiegend versorgt wird, durchaus als Ökosystem zu betrachten. Denn die darin lebenden Menschen sind Glieder von Nahrungsnetzen und nehmen an Energieumsätzen wie Stoffkreisläufen teil. Wie Odum (1971) mit Recht betont, liegt hier namentlich für die mathematische Systemanalyse kein grundsätzlich anderer Fall vor als etwa bei einem Süßwassersee mit seiner Uferzonierung und seinen Zuflüssen oder bei einem Korallenriff“ [ELLENBERG 1973:23]. Der Ökologe Heinz Ellenberg bezieht sich hier auf die Forschungen von Howard T. Odum, der die Energieflüsse von Industriestädten mit denen von Austernbänken vergleicht und beide als konzentrierte Konsumenten bezeichnet hat. Städte sind nicht nur direkt durch den Betrieb von Maschinen und Gebäuden von fossilen Energieträgern

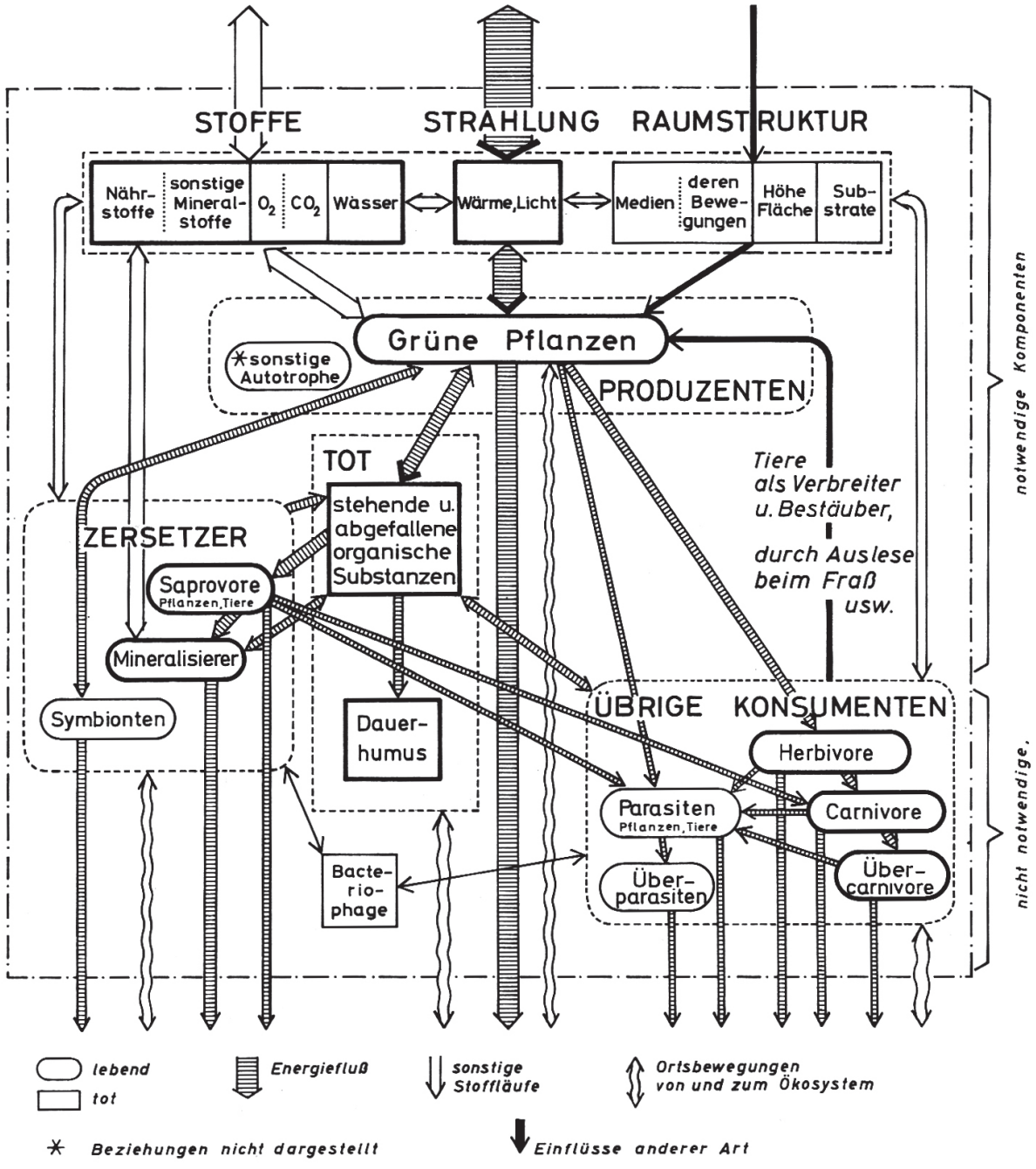


Abb. 3.1.3 Modell eines vollständigen Ökosystems [ELLENBERG 1973:3]

abhängig, sondern auch indirekt wird zur Nahrungsmittelproduktion in den Agrarsystemen und zur Güterverteilung viel Energie aufgewendet. Die Natur selbst kann als ein nachhaltiges, sich selbst optimierendes System betrachtet werden. Eine Jahrmillionen währende Evolution hat hochkomplexe Systeme hervorgebracht, die sich durch Selbstorganisation, Überlebens-, Anpassungs- und Reproduktionsfähigkeit charakterisieren lassen. Entgegen des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, nach welchem Prozesse der Energieumwandlung spontan nur in Richtung eines energieärmeren Zustandes ablaufen können und deshalb geschlossene Systeme dem Zustand des thermodynamischen Gleichgewichts oder maximaler Entropie zustreben, vermögen es Organismen und Ökosysteme, einen Zustand hoher Komplexität aufrechtzuerhalten und sich an wechselnde Umweltbedingungen anzupassen. Man bezeichnet sie daher auch als komplexe adaptive Systeme (*complex adaptive systems*).

Bei jedem Schritt der Energieumwandlung wird ein Anteil der Energie in für den Organismus nicht nutzbare Wärmeenergie umgewandelt. Dieser Prozess bedeutet eine Zunahme von Unordnung oder Entropie, und würde in einem geschlossenen System zu dessen Stillstand bzw. Tod führen. Zur Aufrechterhaltung ihrer Lebensfunktionen müssen Organismen daher mit ihrer Umwelt einen Stoffwechsel oder Metabolismus unterhalten, durch den sie organische oder anorganische Stoffe assimilieren. Organismen sind somit offene Systeme, die durch ihren Stoffwechsel Energie mit hoher Qualität importieren und niedriger Qualität exportieren, die zumeist als Wärme dissipiert wird. Letztlich dient der Stoffwechsel der Aneignung freier Energie oder „negativer Entropie“ (Negentropie), um den eigenen entropiearmen, hoch organisierten Zustand aufrechtzuerhalten [SCHRÖDINGER 1989:126].

Unter natürlichen Bedingungen tendieren komplexe, organisierte Strukturen zu einer Abnahme an Komplexität und Information. Dass die Natur hingegen entlang eines lang währenden evolutionären Prozesses aus ungeordneten, wahllos verteilten Atomen und Molekülen immer komplexere Lebewesen hervorgebracht hat, liegt daran, dass komplexe adaptive Systeme die Unordnung aus dem System „hinauspumpen“. Einen wichtigen Beitrag zum Verständnis dieses Wirkungsprinzips hat der russisch-belgische Physiker und Chemiker Ilja Prigogine (1917-2003) 1972 mit seiner Erklärung von Selbstorganisation in ungleichgewichtigen Systemen geleistet, bei der dissipative Strukturen eine zentrale Rolle spielen. Dissipation (lat. Zerstreuung) bezeichnet den Übergang einer Energieform in eine andere unter Abgabe von Wärmeenergie. Organismen realisieren diesen Prozess z.B. durch die Veratmung von Kohlenhydraten. In einem Ökosystem stellt die Gesamtatmung ökologischer Lebensgemeinschaften oder Biozönosen die dissipative Struktur dar [ODUM 1991:82]. Die besondere Leistung komplexer adaptiver Systeme liegt somit darin, den eigenen Organisationsgrad und Informationsgehalt zu steigern, indem sie sich die Ordnung aus anderen Strukturen aneignet. Die Grundlage des Energie- oder Negentropieflusses in Ökosystemen bildet eine externe Energiequelle, zumeist die Sonnenstrahlung und deren Fixierung und Umwandlung in chemisch gebundene Energie durch autotrophe Organismen, den Pflanzen. Auf dieser Basis organisieren sich Nahrungsnetze zu einer hierarchisch gegliederten dissipativen Gesamtstruktur. In Ökosystemen wird der Energiefluss durch Nahrungsnetze (Trophieketten) und deren Gesamtatmung fein reguliert. Nach Odum sind Organismen und Ökosysteme dementsprechend „offene, nicht im Gleichgewicht stehende, thermodynamische Systeme, die Energie und Stoff kontinuierlich mit der Umwelt austauschen, um ihre innere Entropie zu verringern und die äußere Entropie zu vergrößern“ [ODUM 1999:42].

Aus naturwissenschaftlicher Sicht sind urbane Systeme somit als anthropogen überformte Ökosysteme zu betrachten, die den Gesetzen der Thermodynamik und Selbstorganisation unterliegen und hinsichtlich ihres physiologischen Verhaltens aus Sicht der Ökosystemtheorie analysiert und erklärt werden können [ELLENBERG 1973:23, ODUM 1991:57, BACCINI / BADER 1996:19]. Als heterotrophe oder konsumierende Ökosysteme sind sie auf produktive Vorleistungen angewiesen, die zu großen Teilen von einem versorgenden Hinterland erbracht werden müssen. Allerdings ist gegen die Heterotrophie urbaner Systeme im Prinzip nichts einzuwenden, „solange sie mit geeigneten autotrophen Systemen in Verbindung stehen, die ihnen die erforderliche Nahrung und sonstige Energie (und natürliche Rohstoffe) liefern können und gleichzeitig in der Lage sind, den gewaltigen Ausstoß an Abfallprodukten, den die Stadt produziert, zu assimilieren“ [ODUM 1991:57].

3.1.2 Man and the Biosphere – Programm (MaB)

1971 startete die UNESCO offiziell das Programm *Man and the Biosphere* (MaB). Hier wurde ausdrücklich der Versuch unternommen, die aus der Ökosystemforschung bekannten Methoden auf urbane Systeme zu übertragen [WÄCHTER 2004:41]. In dem Programm entstanden u.a. drei exemplarische Studien, welche urbane und anthropogene Systeme als Gesamtökosysteme betrachten: Brüssel von Duvigneaud / Denayer-De Smet (1977) (Abb. 3.1.4), Hongkong [BOYDEN ET AL. 1981] und Gotland von Zucchetto / Jansson (1985).

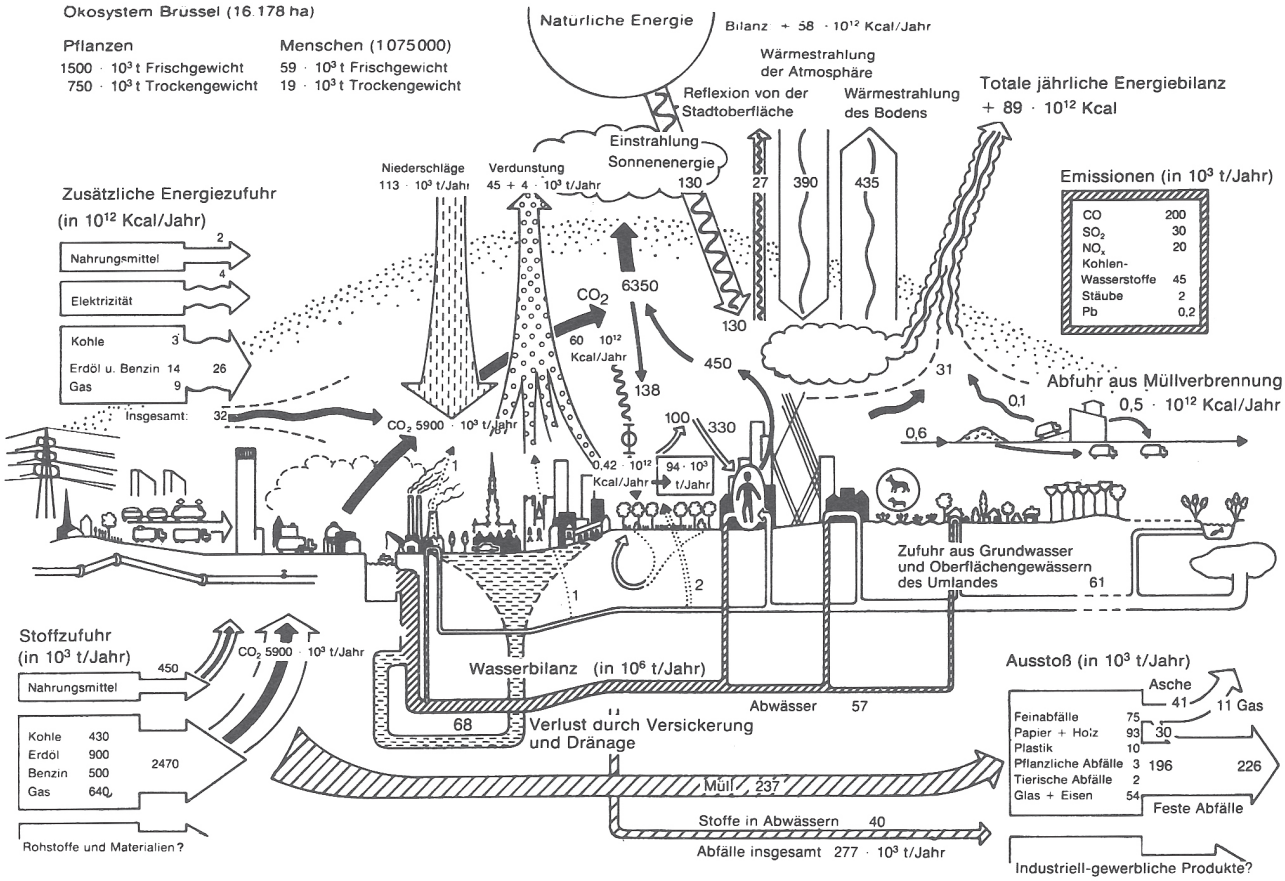


Abb. 3.1.4 Energie- und Stoffflussmodell der Stadt Brüssel von Duvigneaud und Denayer-De Smet (1977) in: [NEDDENS 1986:142]

Der ökosystemare Ansatz konnte sich aber zunächst nicht durchsetzen. Die Betrachtung urbaner Systeme als Gesamtökosystem trat in den Hintergrund, weil sie zwar Erkenntnisse über die Ressourcenströme hervorbrachte, aber wenig konkrete Handlungsempfehlungen zu einem ökologischen Management von Städten ermöglichte. Zudem wurde die mangelnde Einbeziehung von Sozialwissenschaften in den Forschungen kritisiert. Um die Entwicklungsdynamik gesellschaftlicher und urbaner Systeme zu verstehen, wurde ein rein naturwissenschaftlich-physiologischer Ansatz als nicht ausreichend erachtet. Der Richtungswechsel im MaB-Programm hatte zur Folge, dass sich die Untersuchungen zunehmend auf die Untersuchung von Ökosystemen innerhalb der Stadt konzentrierten, anstatt das Gesamtökosystem Stadt zu betrachten [WÄCHTER 2004:89]. Zudem haben sich kulturell unterschiedliche Wissenschaftstraditionen herausgebildet.

Während sich im angelsächsischen Raum *Urban Ecology* eher auf eine ganzheitliche, auch durch soziologische Traditionen geprägte Betrachtungsweise bezieht, werden im deutschsprachigen Bereich unter *Stadtökologie* oder urbanen Ökosystemen seit 1980 vor allem Biozönosen verstanden, die sich in den räumlichen Grenzen der Stadt befinden und methodisch durch Biotopkartierung u.ä. erfasst werden (KROITZSCH 1994:18). Die Ökosystemtheorieforschung wendete sich damit zunächst überschaubaren Bereichen zu.

Mit der Humanökologie erfolgte die Einbeziehung sozialwissenschaftlicher Ansätze in die Analyse anthropogener Ökosysteme. Die Flexibilität menschlichen Verhaltens, die Fähigkeiten zur Beeinflussung und Kontrolle der Umwelt und die Tendenz zur Entwicklung von kultureller Identität unterscheidet menschliche Gesellschaften von anderen Organismen und machen eine Betrachtung erforderlich, die über die generellen Prinzipien der Ökologie hinausgehen. Ebenfalls im Rahmen des MaB-Programms veröffentlichte der australische Humanökologe Stephen Boyden 1979 ein konzeptionelles Modell, das die biologischen, physikalischen und sozialen Systembestandteile zu einem integrativen ökologischen Ansatz zusammenführt und die kulturelle Evolution einbezieht (Abb. 3.1.5) [BOYDEN 1979:21].
So differenziert er z.B. in der Hongkong-Studie den somatischen Energiebedarf für die Ernährung von Menschen und Tieren von dem extrasomatischen Energiebedarf für Maschinen und Gebäude (Abb. 3.1.6). Auch soziokulturelle Unter suchungen zu Lebensgewohnheiten (*bio-social survey*) werden zur Erklärung der Umweltauswirkungen menschlicher Handlungen hinzugezogen. Auf das weiterführende Modell von Sieferle zur Erklärung des sozialökologischen Wirkungszusammenhangs bei der Entstehung und Bewältigung von Umweltkrisen wurde bereits in Kapitel 2.2 eingegangen (Abb. 2.2.3).

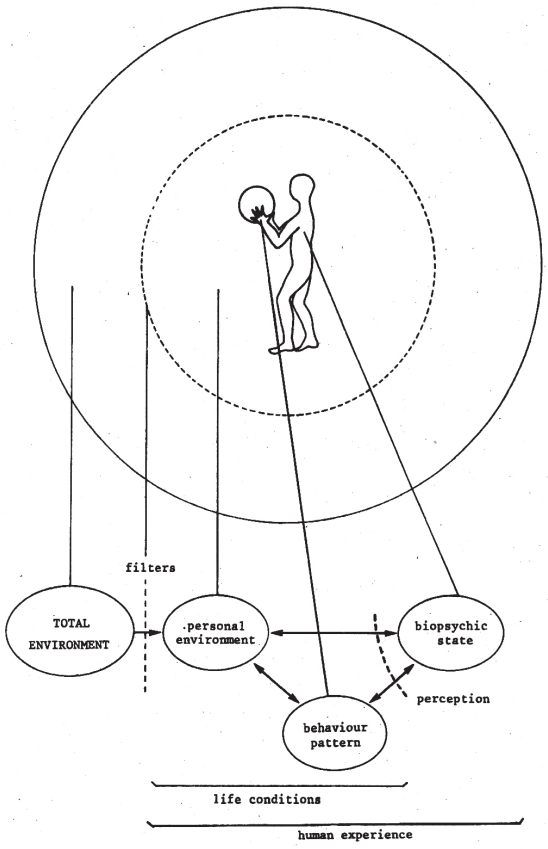


Abb. 3.1.5 Einflüsse auf den bio-psychischen Zustand [BOYDEN 1979:22]

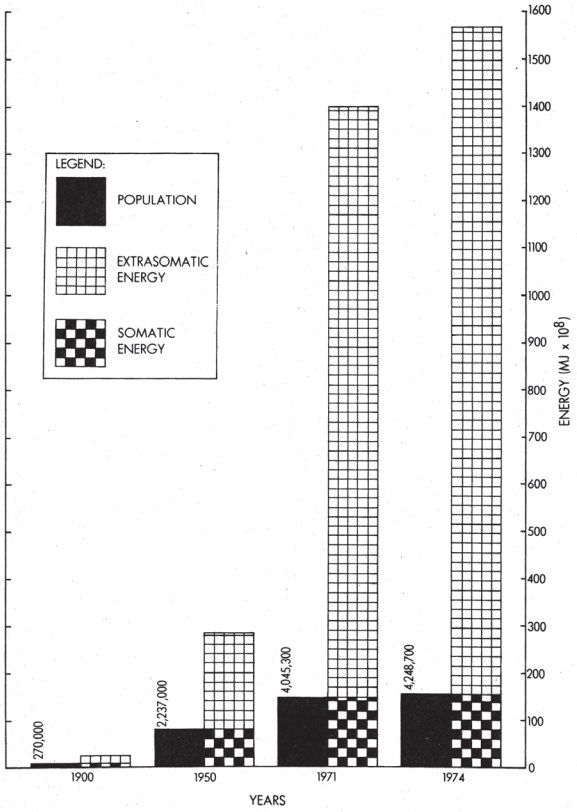


Abb. 3.1.6 Extra-somatische und somatische Energienutzung im Vergleich zur Bevölkerungsanzahl in Hongkong 1900, 1950, 1971 und 1974 [BOYDEN 1979:45]

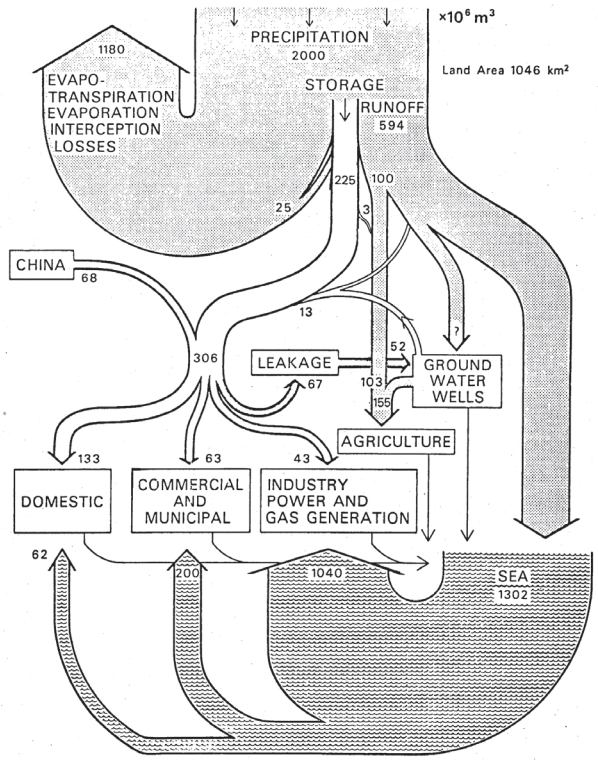


Abb. 3.1.7 Wasserbilanz in Hongkong, 1971 [BOYDEN 1979:53]

Vorreiter des systemischen Denkens in Deutschland waren u.a. Frederik Vester (1925-2003) und Hartmut Bossel (geb. 1935). Im Rahmen des MaB-Programms hat Vester mit dem Sensitivitätsmodell eine qualitative Systembeschreibung für den Ballungsraum Frankfurt/Main vorgenommen, die sich stark an den Bedürfnissen der Planungs- und Verwaltungspraxis orientierte, aber wenig umgesetzt wurde (Abb. 3.1.8) [WÄCHTER 2004:85]. Bossel war bis 1997 Professor für Umweltsystemanalyse und Leiter des Wissenschaftlichen Zentrums für Umweltsystemforschung der Universität Kassel. Er leitete umfangreiche Forschungsprojekte und Zukunftsstudien, bei denen Computersimulationsmodelle und Entscheidungshilfesysteme für die Bereiche Energieversorgung, globale Entwicklungsdynamik sowie landwirtschaftliche und forstwirtschaftliche Entwicklung konzipiert wurden [BOSSEL 1989, BOSSEL 1990].

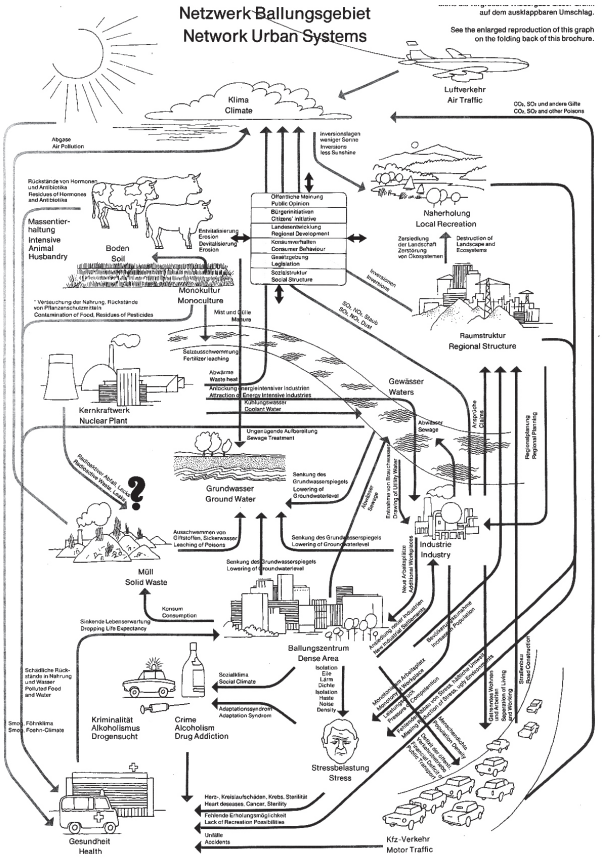


Abb. 3.1.8 Netzwerk Ballungsgebiet [VESTER 1976:8]

3.2 Der urbane Metabolismus

3.2.1 Das Konzept des urbanen Metabolismus

Organismen müssen für die Aufrechterhaltung ihrer Strukturen und Funktionen, für ihr Wachstum und ihre Reproduktion Energie- und Stoffflüsse mit ihrer Umwelt unterhalten. In der Biologie und Physiologie bezeichnet man die chemischen Auf- und Abbauprozesse in Organismen mit dem Begriff Metabolismus (griech. für Umwurf, Umwandlung) oder Stoffwechsel. Der Stoffwechsel lässt sich auf verschiedenen Ebenen betrachten: auf der Ebene einer einzelnen Zelle, bei Zellverbänden (Organen), Organsystemen, Organismen oder Ökosystemen.

Ähnlich wie natürliche Organismen organisieren auch Gesellschaften und deren urbane Systeme Material- und Energieflüsse mit ihrer natürlichen Umwelt. Rohstoffe werden zu Energie, Nahrung, Baustoffen und anderen Produkten verarbeitet und mit mehr oder weniger großer Zeitverzögerung als Abfälle und Emissionen an die Umwelt zurückgegeben. In Analogie zum Stoffwechsel biologischer Organismen werden daher die physiologischen Vorgänge von Transport und Transformation von Materie und Energie in anthropogenen Ökosystemen als gesellschaftlicher Stoffwechsel bezeichnet [BACCINI / BRUNNER 1991, BACCINI / BADER 1996, FISCHER-KOWALSKI ET AL. 1997].

Für den Stoffwechsel werden natürliche Ressourcenquellen kolonialisiert. In urbanen Systemen werden diese Prozesse durch die technischen Infrastrukturen der Energie-, Wasser-, Informations- bzw. Kommunikations- und Verkehrssysteme organisiert, die ihrerseits durch komplexe sozio-ökonomische Prozesse reguliert werden. Neben den Haushalten nehmen daher die Infrastruktursysteme eine Schlüsselposition in der Analyse der Austauschprozesse ein. Die Ver- und Entsorgungsleistungen des regionalen und globalen Hinterlandes sind in einer ganzheitlichen Betrachtung ebenfalls einzubeziehen. Ausgehend von der Ideengeschichte im architektonischen und städtebaulichen Diskurs wird im Folgenden gezeigt werden, wie sich dieser Ansatz durch die Integration ingenieur- und naturwissenschaftlicher Methoden zu einem wirkungsvollen Werkzeug für die Bewertung der physiologischen Prozesse urbaner Systeme entwickelt hat [PRYTULA 2010].

3.2.2 Metabolismus als Metapher in Architektur und Städtebau

Das Konzept des gesellschaftlichen und urbanen Metabolismus hat eine bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts zurückreichende Ideengeschichte und umfasst die verschiedenen Disziplinen der Medizin, Biologie, Ökologie, Sozial- und Kulturanthropologie und Sozialgeographie. Beeinflusst von den Schriften des Biologen Jakob Moleschotts von 1857 zum physiologischen Stoffwechsel und zu evolutionstheoretischen Ideen verwendeten Karl Marx und Friedrich Engels als Erste den Begriff des Stoffwechsels in Bezug auf die Transformation natürlicher Stoffe durch menschliche Arbeit [FISCHER-KOWALSKI 2003:37].

Patrick Geddes

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts führte der schottische Biologe und Urbanist Patrick Geddes (1854-1932) das Konzept der Region in die Städtebaudiskussion ein. Beeinflusst von den Schriften des vehementen Kritikers der frühkapitalistischen englischen Industriegesellschaft John Ruskin (1819-1900), war er der Überzeugung, dass soziale Prozesse und räumliche Form einander beeinflussen. Eine Veränderung der räumlichen Form kann somit auch die sozialen Strukturen verändern. Geddes verband in seiner urbanen Theorie geographische, geschichtliche und soziale Aspekte der Stadt mit frühen Konzepten der Evolutionstheorie und Ökologie, die er in seinem einflussreichsten Buch *Cities in Evolution* (1915) veröffentlichte.
Aufgrund der sich rasch verbreitenden Kohlenutzung und deren erschöpfbaren Vorräte interessierte sich Geddes auch für eine Verbesserung des Wirkungsgrads der Kohlenutzung auf allen Stufen der Prozesskette. Er hat hierfür eine Methode zur Erfassung der Energie- und Materialströme entwickelt, welche die Prozesse der Gewinnung, Verarbeitung, des Transports, Handels und Gebrauchs betrachtet und die einer vereinfachten Ökobilanz im heutigen Sinne nahe kommt [FRISCHKNECHT 2004:5].

Robert Ezra Park und die Chicagoer Schule

In den USA verglich 1915 der Chicagoer Stadtsoziologe Robert Ezra Park (1864-1944) die Stoffflüsse in Städten mit dem Kreislauf eines Organismus und verwendete dafür den Begriff *social metabolism* [WÄCHTER 2003:82]. Zusammen mit Ernest Burgess (1886-1966) und Roderick D. McKenzie veröffentlichte Park in *The City* (1925) die Ergebnisse der *Urban Ecology Studies.* Demzufolge sind Städte wie natürliche Ökosysteme zu betrachten, die sich nach den gleichen, von Darwin beschriebenen Kräften der Evolution entwickeln. Durch Wettbewerb zwischen den Menschen als wichtigste Antriebskraft in der gesellschaftlichen Differenzierung entsteht eine räumliche Differenzierung in Form konzentrischer Zonen [WÄCHTER 2003:63].

Ebenezar Howard und das Gartenstadtmodell

In dem 1898 veröffentlichten Buch *To-Morrow – A Peacefull Path to Real Reform* entwickelte der englische Parlamentsstenograph Ebenezar Howard seine städtebauliche Vision zur Lösung der sozialen Frage und des urbanen Wachstums durch die Gründung neuer autarker Satellitenstädte [HOWARD 1968]. Das Konzept beinhaltet bereits die drei Ebenen der heutigen Nachhaltigkeitsdebatte: ökonomisch sollten durch die gemeinschaftliche Nutzung der Bodenrente und der regionalen Selbstversorgung eine gerechte Verteilung und nachhaltige Wertschöpfung realisiert werden; ökologisch sollten durch regionales Nährstoffmanagement die biologischen Abfälle in den agrarischen Produktionsprozess zurückfließen und der Transportaufwand minimiert werden; soziale Stabilität sollte durch kollektive Selbstverwaltung, durch die ökonomische Sicherheit und gesunde Lebensbedingungen im Allgemeinen erzielt werden. Wie in kaum einer utopischen Stadtplanung zuvor beschrieb Howard detailliert die Fragen der Eigentums- und Rechtsformen, der technischen Infrastrukturen und machte konkrete Vorschläge zur architektonischen Raumordnung.

Leberecht Migge

Die Gartenstadt-Idee fand in Deutschland schnell Resonanz. Neben vielen Architekten arbeitete auch der Landschaftsarchitekt Leberecht Migge (1881-1935) an der Umsetzung dieser Ideen. In zahlreichen Vorschlägen zeigte er Möglichkeiten zur Steigerung der Bodenproduktivität durch Bewässerung, Düngung und eine Verbesserung der Bodentechnik auf. Unter dem Einfluss der dramatischen Erfahrung von Versorgungsengpässen am Ende des 1. Weltkrieges entwickelte er Konzepte zu einer umfangreichen Bodenreform, die eine intensivere Bodenbewirtschaftung und damit eine bessere Nahrungsmittelversorgung gewährleisten sollte. Migge veröffentlichte 1918 mit seinem Büchlein *Jedermann Selbstversorger* ein Programm für eine hausnahe Gartenbewirtschaftung. Bei einem Flächenbedarf von 500 bis 2.000 m^2 pro Einwohner könne durch intensiven Gartenanbau eine kommunale Selbstversorgung in Subsistenzwirtschaft erzielt werden (Abb 3.2.2). In den 1920er Jahren war Migge durch die Zusammenarbeit mit dem Frankfurter Stadtbaurat Ernst May und dem Berliner Stadtbaurat Martin Wagner an der Realisierung meherer Großsiedlungen beteiligt: Lindenhof in Berlin-Schöneberg (1918-1921), Hufeisensiedlung in Berlin-Neukölln (1925-1933), Waldsiedlung in Berlin-Zehlendorf (1926-1932), Ringsiedlung in Berlin-Siemensstadt (1929-1934).

In Verbindung mit dem Konzept des wachsenden Familienhauses entwickelte Migge ein ökologisches Modell, in dem der Nahrungsbedarf, produzierte Abfälle, entwickelte Arbeitskraft und Flächenbedarf aufeinander bezogen waren [REUSS 1990:252]. Seine Konzeptionen zu einer *Produktiven Abfallwirtschaft* (1922) (Abb.3.2.3) wirken überaus aktuell: Trennung der Abfälle am Ort ihrer Entstehung, Zusammenführung aller Abfälle am Ort ihres Gebrauchs, kurze Wege für den Gütertausch und als raumplanerische Konsequenz ein konzentrisches Modell für die Stadterweiterung. Mit dem Konzept der Kommunalen Selbstversorgung wollte Migge die traditionelle Abhängigkeit der Stadt von ihren Außenbeziehungen reduzieren. Seine Vision war eine Stadtentwicklung, deren Siedlungen – ähnlich wie bei den Thünschen Ringen – von einem Kulturgürtel aus Kleingärten, Erwerbsgärtnereien und agrarischen Klein- und Mittelbetrieben für die stadtnahe Versorgung umgeben sein sollten (Abb. 3.2.1) [MIGGE 1926:32].

Die Effizienz einer hochgradig arbeitsteiligen Gesellschaft mit kostengünstigen Erzeugnissen aus der Landwirtschaft und dem Erwerbsgartenbau standen aber einer Umsetzung seiner Ideen entgegen. Während sich bei den betrachteten Beispielen der Architektur- und Stadtplanung vorwiegend eine metaphorische Verwendung anatomisch-metabolischer Konzepte feststellen lässt, entwickelte Leberecht Migge bereits ein ausgeprägt funktionales Verständnis urbaner Versorgungsprozesse.

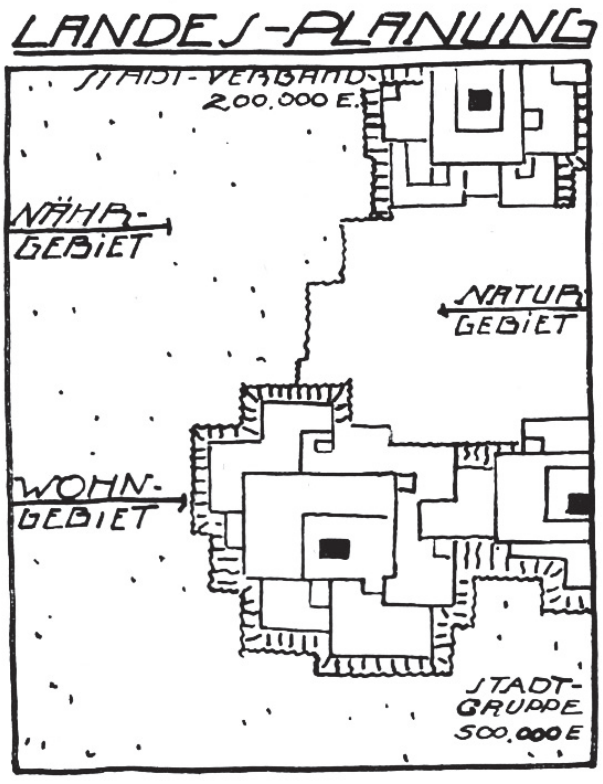


Abb. 3.2.1 Landesplanung vom Lande her [MIGGE 1926: 100]

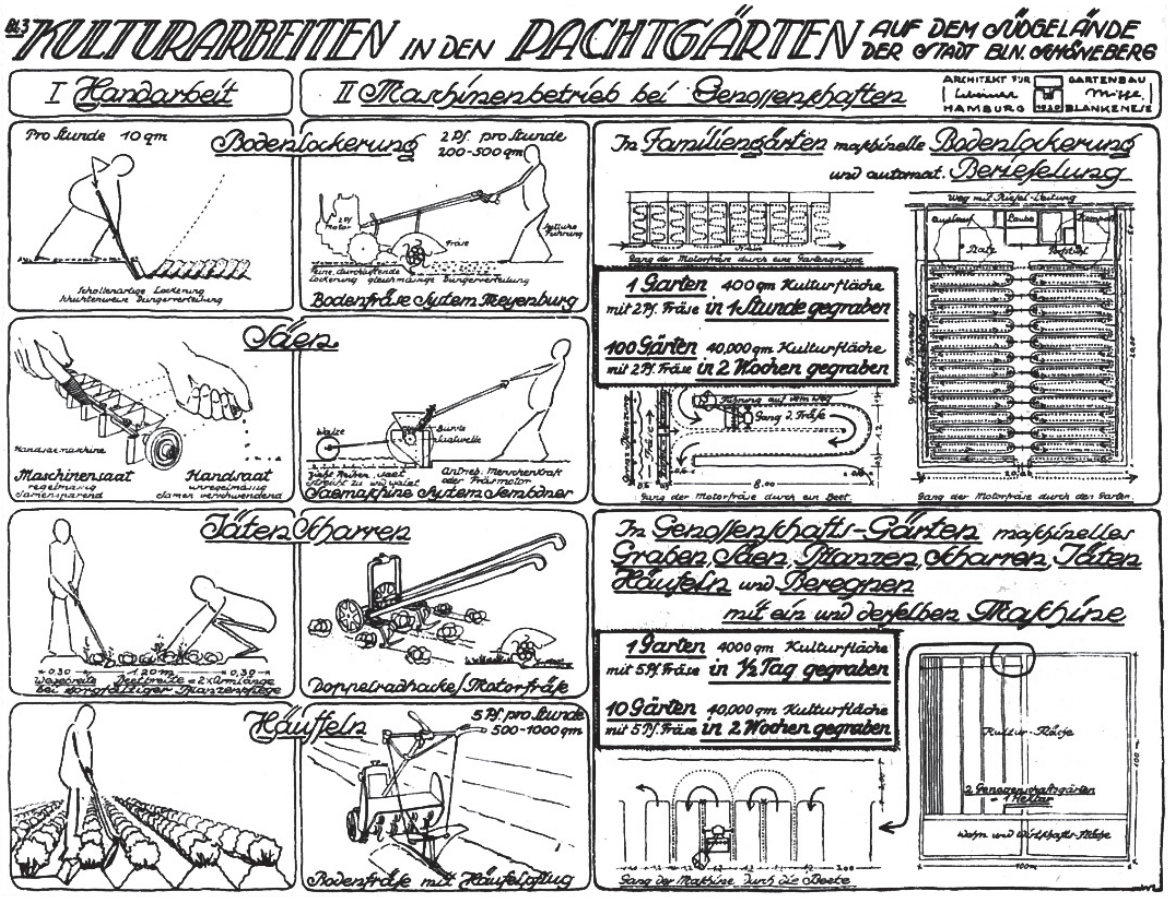


Abb. 3.2.2 Leberecht Migge: Selbsthilfe und urbane Subsistenz (1920) [REUSS 1990:255]

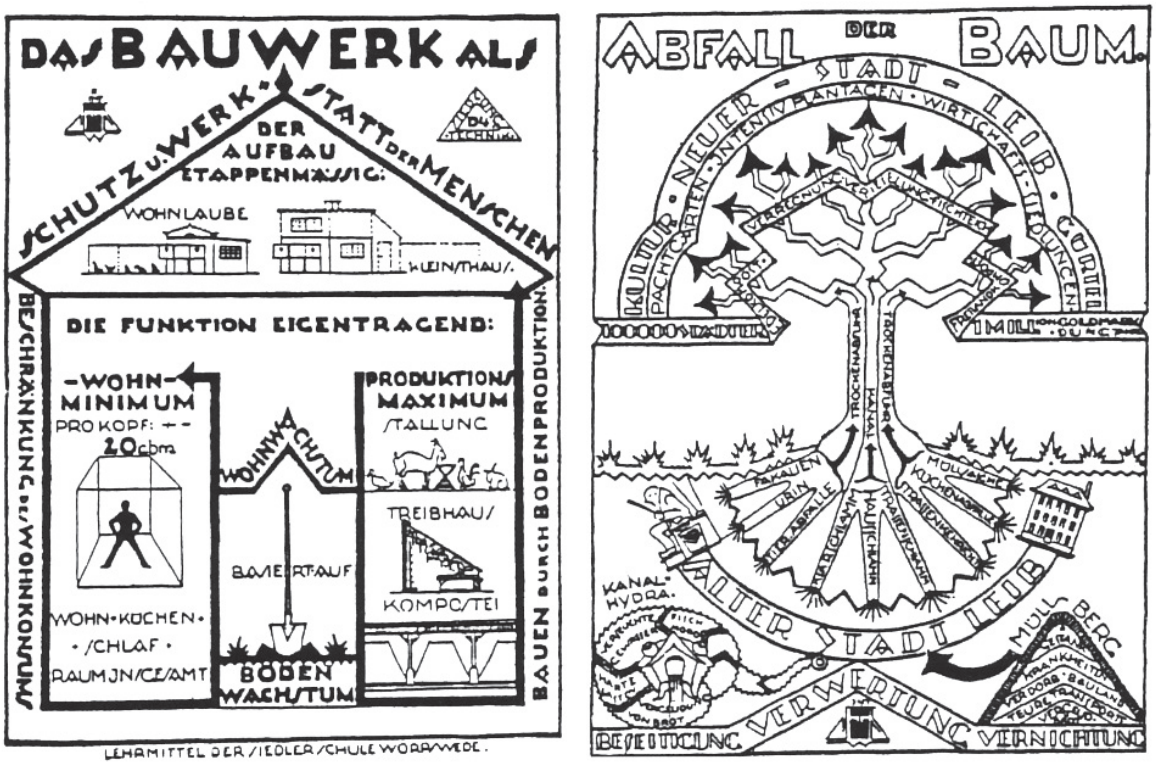


Abb. 3.2.3 Leberecht Migge: Ökologische Modelle der Haus- und Stadtwirtschaft (1923 und 1925) [REUSS 1990:253]

Le Corbusier

Der Architekt und Urbanist Le Corbusier (1887-1965) formulierte in der *Charta von Athen* (1933) Grundsätze für den modernen Städtebau, die auf dem fordianischen Produktionsprinzip der Funktionsteilung beruhen. Die Gliederung einer Stadt soll demnach in den vier voneinander getrennten Sektoren Wohnen, Handel, Dienstleistungen, Produktion und Freizeit erfolgen. Diese werden durch Verkehrssysteme miteinander verbunden, die ihrerseits streng nach Fußgänger und Automobilverkehr getrennt sind. So lassen sich die städtischen Funktionen wie eine Maschine optimieren. Aber auch Le Corbusier verwendete zur Illustration seiner urbanistischen Ideen biologische Metaphern. Zwar fordert er im Städtebau eine strenge geometrische Ordnung, weil der Mensch in Freiheit zur reinen Geometrie neige und diese ihm die größte Sicherheit und Ordnung gegenüber den Gewalten der Natur biete [LE CORBUSIER 1979:20]. Im Anhang von *Urbanisme* (1925, dt. Städtebau, 1929) zeigt Le Corbusier aber auch Darstellungen von Zellstrukturen, Organen und Organsystemen, deren harmonische Formen seine Thesen zu Prinzipien der Zirkulation und der natürlichen Ordnung bestätigen sollten.

In der neuen Hauptstadt des indischen Bundesstaats Punjab, Chandigarh, dessen Planung Le Corbusier 1951 von den amerikanischen Stadtplanern Albert Mayer und Maciej Nowicki nach dem tödlichen Flugzeugunfall Nowickis im Sommer 1950 übernommen hatte, sind die Funktionen in Analogie zur menschlichen Anatomie geordnet. Der Plan besteht aus 46 gemetrischen Sektoren mit einer Größe von 1.200 x 800 m.
Im Einklang mit der indischen Tradition des *Vastu Shastra*, die mittels eines Mandalas der menschlichen Figur die kosmische Ordnung des Stadtplans einschreibt, repräsentieren diese Sektoren nach Le Corbusier verschiedene Körperteile des Menschen:
Das Kapitol mit den Regierungsgebäuden bildet den Kopf, das kommerzielle Zentrum das Herz, ein innerstädtischer Park die grüne Lunge, die Straßen sind die Arterien und Venen. Gemäß den in der *Charta von Athen* formulierten Prinzipien wurden diese Funktionen aber räumlich voneinander getrennt angelegt, statt sie in der städtischen Organisation miteinander zu mischen. Für Le Corbusier war die Stadt ein Arbeitswerkzeug: „Sie ist die Beschlagnahme der Natur durch den Menschen. Sie ist eine Tat des Menschen wider die Natur, ein Organismus des Menschen zum Schutze und zur Arbeit. Sie ist eine Schöpfung“ [LE CORBUSIER 1979: VII].

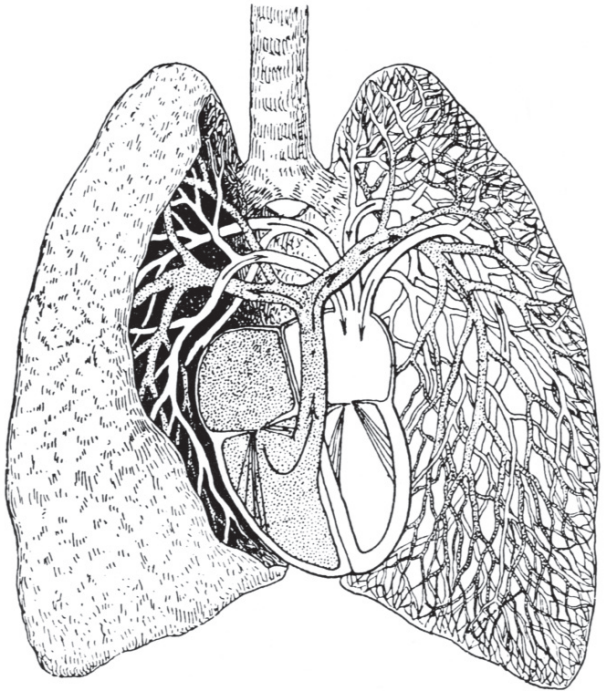


Abb. 3.2.4 “Unmittelbare, pünktliche und rasche Verbindungen zwischen zwei unabhängigen Funktionen ...”
[LE CORBUSIER 1979:260]

Eliel Saarinen

Mitten während des 2. Weltkrieges erschien von dem in Amerika lebenden finnischen Architekten Eliel Saarinen (1873-1950) das städtebauliche Manifest: *The City - Its Growth, Its Decay, Its Future* (Die Stadt - Ihr Wachstum, ihr Verfall, ihre Zukunft) [SAARINEN 1943]. Saarinen schreibt im Vorwort, dass unabhängig von dem herrschenden Krieg ein Kampf gegen den Verfall der Städte und ihren Slums zu führen sei und dass er in seinem Buch die Gründe für das Wachstum und den Verfall zu ergründen versucht: „Ich habe mich bemüht, die physische Ordnung der städtischen Gemeinschaft darzustellen, genauso, wie man die organische Ordnung in jedem lebenden Organismus verstehen kann“ [SAARINEN 1943]. Nach Saarinen ist die moderne Stadtplanung ein Produkt des enormen Wachstums der Städte infolge der industriellen Revolution. Seit dem 19. Jahrhundert ist sie vornehmlich zu einer Disziplin infrastruktureller Planung geworden. Die moderne Stadtplanung darf nach Saarinen aber nicht nur ein Instrument zur bloßen Befriedigung der physischen Bedingungen werden, sondern sie muss eine räumliche Verwirklichung der inneren, sozial wirkenden Ordnung sein. Während sich die heutige Stadtplanung auf die Gestaltung von Straßenplänen, Verkehrs- und Gesundheitsprobleme, Landnutzung und Zonierung beschränkt, müsse sich die wirkliche Stadtplanung mit Problemen der städtischen Gemeinschaft befassen – physisch, sozial, kulturell und ästhetisch – und sie allmählich über längere Zeit hinweg in eine kohärente physische Ordnung bringen. Saarinen gründet seine Betrachtungen auf den Vergleich mit der Evolution natürlicher Systeme und deren morphologischen Erscheinung. Die kompakte und von Mauern umfasste mittelalterliche Stadt korrespondiert mit der gesunden Zelle, während die durch die Industrialisierung unkontrolliert wachsende Stadt von der pathologischen Krebszelle repräsentiert wird. Als Ergebnis seiner Analyse empfiehlt Saarinen für die urbane Entwicklung das Konzept einer Organischen Dezentralisierung, wo städtebauliche Strukturen in überschaubarer Größe analog zu zellulären Strukturen eine natürliche, organische Ordnung ermöglichen.

Die japanischen Metabolisten

In den 1960er Jahren entwickelte sich aufgrund eines rapiden globalen Bevölkerungswachstums und zunehmender Verkehrsströme eine Vielzahl radikaler städtebaulicher Utopien. Angefangen bei Constants *New Babylon* (1956-1974) und den *Raumstadt-Entwürfen* Yona Friedmans (1956) und Eckhard Schulze-Fielitz‘ (1960), Walter Jonas‘ *Trichterstadt* (Intrapolis) (1960), Peter Cooks *Plug-in City* (1964), Wolfgang Dörings *Stapelhaus* (1964), Richard Buckminster Fullers *Kuppel über Manhattan* (1967) und Frei Ottos *Stadt in der Arktis* (1971) bis hin zu Paolo Soleris Manifest *Arcology* (1969) vereinten diese zumeist utopisch anmutenden Raumstadt-Konzepte Gesellschaftskritik mit einem ungebrochenen technischen Optimismus. Die Konzepte bestehen zumeist aus zell-cluster-artigen Strukturen, die in großmaßstäbliche Trag- und Versorgungsstrukturen eingebettet sind.

Mit der Auflösung des *CIAM* 1958 öffnete sich der architekturtheoretische Diskurs einer jungen Generation von Architekten und Urbanisten. Neben dem *Team X* und den Architektengruppen *Archigram*, *Archizoom* und *Superstudio* trat insbesondere eine Gruppe junger japanischer Architekten in den Vordergrund, die *Metabolisten*. In Vorbereitung auf die internationale Designkonferenz im Jahr 1960 in Japan formierten sich 1959 um den Architekten und Psychologen Noboru Kawazoe die Architekten und Stadtplaner Kisho Kurokawa, Kiyonori Kikutake, Fumihiko Maki und Masato

Ohtaka sowie die Designer Kenji Ekuan und Kiyoshi Awazu. Kenzo Tange, der einer älteren Generation angehörte, wurde später zum Wortführer der Bewegung. Weiterhin kamen Arata Isozaki, Koji Kamiya, Sadao Watanabe und Heiki Koh hinzu.

Als Reaktion auf eine als chaotisch empfundene Verstädterung und Verknappung von Siedlungsfläche entwickelten die Metabolisten flexible, erweiterbare Großstrukturen, mit denen das Leben in der zukünftigen Massengesellschaft wie in einem lebendigen Prozess gestaltbar werden sollte. Sie bedienten sich hierbei verschiedener Metaphern aus der Biologie, der Kommunikations- und der Informationstechnologie. In konstruktiven Megastrukturen, dem Nervensystem, wurden Kapseln oder Container als Zellen für die privaten Lebensbereiche eingebettet. Im Plan für die Bucht von Tokio (1960) von Kenzo Tange u.a. wurden entlang einer Bandstadt die zentralen städtischen Funktionen wie Verwaltungen, Dienstleistungen, Regierungsfunktionen und ein neuer Zentralbahnhof angeordnet. Die Wohngebiete mit Terrassenhäusern wurden als autonome Nachbarschaften seitlich hierzu angeschlossen. Die städtische Funktionstrennung sowie die Differenzierung der Verkehrsstraßen nach motorisiertem und nichtmotorisiertem Verkehr lassen den starken Einfluss der städtebaulichen Prinzipien Le Corbusiers und des CIAM erkennen. In der Helix-City (1961) (Abb. 3.2.5) wurde eine gigantische Raumstadt zum Arbeiten und Wohnen in Analogie zum DNA-Molekül als Doppelhelix konzipiert. Die vertikalen Verkehrselemente und alle notwendigen Installationen befanden sich in riesigen Hohlzylindern und Hohlwänden, um die herum Wohnungen angelagert wurden. Die Verbindung der riesigen helikoidalen Türme untereinander erfolgte über Schnellstraßen, die oberen Etagen wurden verkehrsfrei gehalten, aber durch ein komplexes Wegesystem hochgradig miteinander vernetzt.

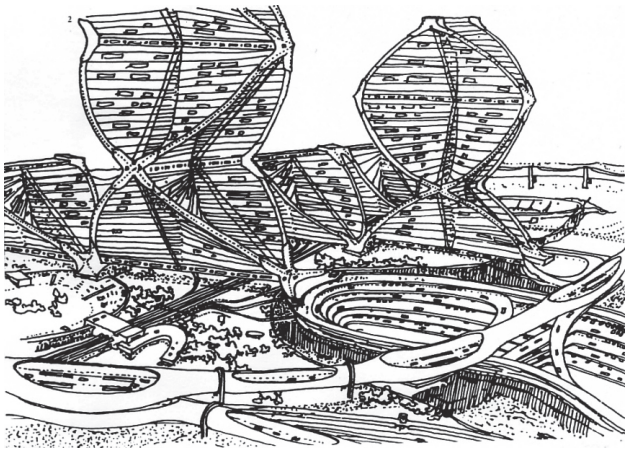


Abb. 3.2.5 Kisho Kurokawa: Helix-City, 1961 [DAHINDEN 1971:74]

Für den wichtigsten Theoretiker der Metabolisten, Kisho Kurokawa, repräsentiert das architektonische Konzept der Megastrukturen den *metabolic cycle*, wonach gewisse Teile der Konstruktion leicht ausgetauscht und recycelt werden können, um durch diese partiellen Änderungen der Gesamtarchitektur eine lange Lebensdauer zu ermöglichen (KUROKAWA 2005:204). Die Anhäufung von Abfallbergen durch die Konsumgesellschaft wurde als ein ernstes Problem wahrgenommen. Die Rückführung des Abfalls wurde daher als ein wichtiger Bestandteil einer nachhaltigen Gesellschaft angesehen. Der metabolic cycle „bedeutete nichts weniger als die Einführung eines Systems der Reproduktion, des Kreislaufs und der Zerlegung in Module in die Architektur“ (KUROKAWA 2005:202). Wohl im Hinblick auf Reyner Banhams *Theorie und Gestaltung im ersten Maschinenzeitalter* (1960) schreibt Kurakawa, dass für ihn 1959 das Ende des Zeitalters der Maschine und der Beginn des Zeitalters des Lebensprinzips begonnen haben (KUROKAWA 2005:201). Er verwendet den Begriff des symbiotischen Denkens, das die Gegensätze von östlicher und westlicher Kultur und Denkweise sowie von Natur und Technik überbrückt. Metabolismus (Regeneration/Recycling), Metamorphose (plötzliche Veränderung, eine sich rapide entwickelnde Welt), Symbiosis, Information und Ökologie

werden für ihn zu den wichtigsten Begriffen, wobei die Theorie des Metabolismus für ihn eine besondere Stellung im Prinzip des Lebens einnimmt.
Die Metabolisten sahen sich als Begründer einer erstmals eigenen japanischen Moderne, die eine Synthese traditionell japanischer Werte mit industriellen Bauweisen und Entwicklungen des modernen urbanen Lebens vollzogen. Entgegen des eigenen konzeptionellen Anspruchs werden die metabolischen Konzepte im Vergleich mit anderen Utopien als technokratische Modelle kritisiert, bei denen der formal-künstlerische und technisch-ökonomische Aspekt im Vordergrund standen (FRANK 2003). Ohne die besondere Rolle Tokyos als eine Megastadt mit einer sehr hohen Dichte, rasantem Wachstum und Flächenknappheit sind die Stadtvisionen der Metabolisten nicht zu verstehen. Ähnlich wie in den Entwürfen anderer Architekten der Zeit propagierten die Metabolisten mit den Megastrukturen eine Metastadt, die sich buchstäblich über die bestehende, aufgrund des unkontrollierten Wachstums als nicht mehr funktionsfähig angesehene Stadt erhob. Diese *Meta-Stadt* wurde bei den Metabolisten zwar als ein offenes System mit Nutzungsflexibilität und Erweiterbarkeit gedacht, und das Prinzip der Systemplanung begann das konventionelle Masterplanning zu ersetzen. Dennoch blieb der Stoffwechsel bei den Metabolisten wenig mehr als eine Metapher für ästhetische Vorstellungen, in denen die energetisch-stoffliche Performance eine untergeordnete Rolle spielte.

3.2.3 Abel Wolman: The Metabolism of Cities (1965)

Im September 1965 veröffentlichte der amerikanische Ingenieur Abel Wolman (1892-1989) im *Scientific American* einen Artikel mit dem Titel *The Metabolism of Cities*. Ein Leben lang mit Fragen der Planung und Entwicklung von Wasser-, Abwasser-, Abfallentsorgungs- und Verkehrssystemen befasst, prägte Wolman mit dem Artikel einen Begriff, der das Konzept einer ganzheitlichen Betrachtung der städtischen Ver- und Entsorgung mit der zugehörigen Infrastruktur bezeichnet:

“The metabolic requirements of a city can be defined as all the materials and commodities needed to sustain the city’s inhabitants at home, at work, and at play. Over a period of time these requirements include even the construction materials needed to build and rebuild the city itself. The metabolic cycle is not completed until the wastes and residues of daily life have been removed and disposed of with a minimum of nuisance and hazard. As man has come to appreciate that the earth is a closed ecological system casual methods that once appeared satisfactory for the disposal of wastes no longer seem acceptable. He has the daily evidence of his eyes and nose to tell him that his planet cannot assimilate without limit the untreated wastes of his civilization. ” [WOLMAN 1965:179]

„Die Stoffwechselerfordernisse einer Stadt können als die Materialen und Waren definiert werden, die benötigt werden, um die Bedürfnisse einer Stadt und ihrer Bewohner zu Hause, auf der Arbeit und in der Freizeit zu versorgen. Über die Zeit betrachtet umfassen diese Erfordernisse sogar die Materialien zum Bau und zur Erneuerung der Stadt selbst. Der Stoffwechselkreislauf ist erst geschlossen, wenn die Abfälle und Rückstände des täglichen Lebens unter einem Minimum an Aufwand und Gefahr entfernt und beseitigt sind. Seit der Mensch zur Kenntnis genommen hat, dass die Erde ein geschlossenes Ökosystem ist, erscheinen die bisher üblichen Praktiken zur Ablagerung von Abfällen nicht länger akzeptabel. Der tagtägliche Beweis vor seinen Augen und seiner Nase sagt ihm, dass sein Planet seinen unbehandelten Zivilisationsabfall nicht grenzenlos assimilieren kann “ [WOLMAN 1965:179] (Übersetzung durch den Autor).

Um das Metabolismus-Konzept zu illustrieren, legte er seinen Betrachtungen eine hypothetische Stadt der USA mit 1 Million Einwohnern zugrunde. Mit mehr als 600 kg (Ltr.) pro Tag und Einwohner stellte der Wasserdurchfluss den größten Massenstrom dar. 9,5 kg Brennstoffe (Kohle, Öl, Erdgas und Benzin) und 2,0 kg Nahrungsmittel vervollständigen den täglichen Ressourcenbedarf. Demgegenüber fielen als Abfallprodukte täglich 500 kg (Ltr.) Abwasser, 9,5 kg Abgase aus Verbrennungsprozessen und 2,0 kg feste Abfälle je Einwohner an [WOLMAN 1965:180].

Wolman schrieb selbst, dass der Metabolismus einer modernen Stadt zu komplex sei, als das sich dieser in einem einzelnen Artikel beschreiben ließe. Daher beschränkte er sich auf die für ihn damals dringlichsten drei Problemfelder: die Wasserversorgung, die Abwasserbehandlung und die Luftverschmutzung. Hinsichtlich der Wasserversorgung und Abwasserbehandlung führte er aus, dass sich die Herausforderungen durch die Herstellung geeigneter Infrastrukturanlagen lösen lassen. Die Ursachen der Luftverschmutzung lägen in der Beheizung der Haushalte, in der Stromerzeugung durch mit fossilen Energierohstoffen betriebene Kraftwerke und im Verkehr.
Zur Lösung der Probleme gäbe es drei grundsätzliche Strategien:
1. Wechsel zu Treibstoffen, die weniger Schmutzpartikel ausstoßen, z.B. Erdgas;
2. der Einsatz anderer Technologien zur Energieerzeugung, z.B. durch Atomreaktoren, wobei die Problematik der Abfälle zu lösen wäre und
3. die Filterung der Schmutzpartikel.

Die anderen Bereiche der städtischen Versorgung wie Nahrungsmittel, Kleidung, Konsumgüter, Baustoffe, Brennstoffe und elektrische Energie bereiteten in seinen Augen hingegen keine Schwierigkeiten.

Wolman gehörte der zweiten Generation von Gesundheitsingenieuren an, die sich seit dem 19. Jahrhundert um den Aufbau der städtischen Wasser- und Abwassersysteme der rasch wachsenden nordamerikanischen Städte verdient gemacht haben. Als Vorsitzender der *Water Resources Planning Committee of the National Resources Planning Board* (1935-41) hatte er großen Einfluss auf Fragen der nationalen Wasserversorgung und war als Mitglied der ersten U.S. Delegation an der Gründung der Weltgesundheitsorganisation WHO in Genf beteiligt [WOLMAN 2003:354]. Er war auch einer von 70 Teilnehmern an der 1955 in Princeton, New Jersey stattfindenden Konferenz *Man's Role in Changing the face of Earth*, die als das erste interdisziplinär besetzte Treffen zu Umweltfragen internationaler Wissenschaftler bezeichnet wird [FISCHER-KOWALSKI 2003:40].

3.2.4 Energie- und Stoffstrommanagement

Als Reaktion auf die durch industrielle Produktionsweisen hervorgerufenen Umweltschäden sorgte die Umweltpolitik seit den 1970er Jahren in der Bundesrepublik Deutschland und weltweit für Gesetze, die Emissionsgrenzwerte für Schadstoffe aus Industriebetrieben, Kraft- und Klärwerken festlegten. Während mit Filtertechnologien, sogenannten *End-of-Pipe-Lösungen*, die Verschmutzung der Luft und Gewässer aus punktförmigen Quellen verringert werden konnte, nehmen die aus diffusen Quellen stammende Verschmutzung durch Verkehr oder Landwirtschaft weiterhin zu [ODUM 1991:34, WEIZSÄCKER 1992:83 und 101]. Als die beste Kontrollmöglichkeit wird daher ein Input-Management gefordert, das die Einträge am Anfang statt am Ende des Produktionsprozesses verringert. Das erscheint auch auf lange Sicht ökonomisch sinnvoller [ODUM 1991:235].

Die Enquetekommission des 12. Deutschen Bundestags *Schutz des Menschen und der Umwelt* hat mit ihrem Bericht *Die Industriegesellschaft gestalten* [ENQUETE 1994] eine allgemeine Operationalisierung des Leitbilds einer nachhaltigen Entwicklung vorgenommen. Als Ziel wird eine ökologische Umgestaltung der Industriegesellschaft formuliert. Dieses soll durch die übergeordnete Strategie des Stoffstrommanagements (SSM) erreicht werden: „Unter dem Management von Stoffströmen der beteiligten Akteure wird das zielorientierte, verantwortliche, ganzheitliche und effiziente Beeinflussen von Stoffsystemen verstanden, wobei die Zielvorgaben aus dem ökologischen und dem ökonomischen Bereich kommen, unter Berücksichtigung von sozialen Aspekten. Die Ziele werden auf betrieblicher Ebene, in der Kette der an einem Stoffstrom beteiligten Akteure oder auf der staatlichen Ebene entwickelt“ [ENQUETE 1994:449].

Bereits 1881 hat der schottische Biologe und Regionalplaner Patrick Geddes (1854-1932) eine Methodik zur Erfassung der Energie- und Materialströme entwickelt, die mit der Herstellung, dem Transport und der Nutzung eines Produktes verbunden sind. Er gilt damit als einer der Begründer der Ökobilanz im heutigen Sinne [FRISCHKNECHT 2004:5]. Unter Ökobilanzierung oder *Life Cycle Assessment* (LCA) versteht man eine standardisierte Methode, die es erlaubt, die mit einem Produkt, einem Verfahren oder einer Dienstleistung verknüpften Umweltlasten ganzheitlich, d.h. unter Berücksichtigung aller vor- und nachgelagerten Prozessschritte, zu erfassen, zu quantifizieren und auszuwerten. Sie dient dem Vergleich der Umweltauswirkungen zweier oder mehrerer unterschiedlicher Produkte, Produktgruppen, Systeme, Verfahren oder Verfahrensweisen. Durch die Offenlegung von Schwachstellen unterstützt sie die Verbesserung der Umwelteigenschaften des untersuchten Gegenstands [FRISCHKNECHT 2004:9].

Rudolf Müller-Wenk hat mit der *ökologischen Buchhaltung* [MÜLLER-WENK 1978] die Methode produktbezogener Ökobilanzen für die Bewertung einer umweltorientierten Betriebsführung von Unternehmen (Ökocontrolling) weiterentwickelt. Bei dieser Bilanzierung handelt es sich um Input-Output-Analysen, die auf Wirtschaftsstatistiken beruhen. Sie unternehmen den Versuch, durch sogenannte Äquivalenzkoeffizienten auf der Grundlage der ökologischen Knappheit die unterschiedlichsten Umweltauswirkungen wirtschaftlichen Handelns in einer homogenen Weise abzubilden. Artur Braunschweig hat diese Methode auf die Bilanzierung von Städten und Regionen übertragen [BRAUNSCHWEIG 1988]. In Deutschland werden seit einigen Jahren vom statistischen Bundesamt umweltökonomische Gesamtrechnungen veröffentlicht. Sie bilden auf Länderebene in den Bereichen Energie-, Rohstoff- und Wasserverbrauch, Flächeninanspruchnahme und Abfallentsorgung den Einfluss der Wirtschaft und der privaten Haushalte auf die natürlichen Ressourcen ab. Konzeptionell stehen sie der ökologischen Buchhaltung von Müller-Wenk nahe.

Aufbauend auf dieser Entwicklung wurden seit Ende der 1980er Jahre Methoden zur Untersuchung des *regionalen Stoffhaushalts* entwickelt. Parallel dazu hat sich in den USA mit der *Industrial Ecology* eine Wissenschaft entwickelt, welche Wege zu einer ökologisch verträglichen Industrieproduktion aufzeigen will [AYRES 1994]. Ziel dieses Ansatzes ist die Umgestaltung des linearen Produktionssystems in eine industrielle Kreislaufwirtschaft nach dem Vorbild von Ökosystemen.

3.2.5 Der regionale Stoffhaushalt

Während Lebenszyklusanalysen als eine Methode für die Bewertung und Optimierung industrieller Herstellungsprozesse weit gehend etabliert wurden, sind Energie- und Stoffstrommodelle als ein Analyse- und Steuerungsinstrument für die nachhaltige Entwicklung urbaner Systeme bislang wenig verbreitet. Neben den Arbeiten über Energie- und Stoffströme im Bauwesen von Niklaus Kohler an der Universität Karlsruhe [KOHLER ET AL. 1999, HASSLER ET AL. 1999, SCHWAIGER 2002] und dem regionalen Materialhaushalt von Stefan Bringezu am Wuppertal-Institut [BRINGEZU 1999, 2000, 2004] sind besonders die Arbeiten des Schweizer Chemikers Peter Baccini und dessen Forschungsgruppe hervorzuheben.

Ausgehend von der Ökosystemforschung und dem *system dynamics-Ansatz* beginnt sich seit Ende der achtziger Jahre zunehmend eine ganzheitliche Betrachtung des regionalen Stoffhaushalts zu etablieren. Mit *Metabolism of the Anthroposphere* haben Peter Baccini und Paul Brunner eine grundlegende Methodik zur Beschreibung des regionalen Stoffhaushalts vorgelegt [BACCINI / BRUNNER 1991].

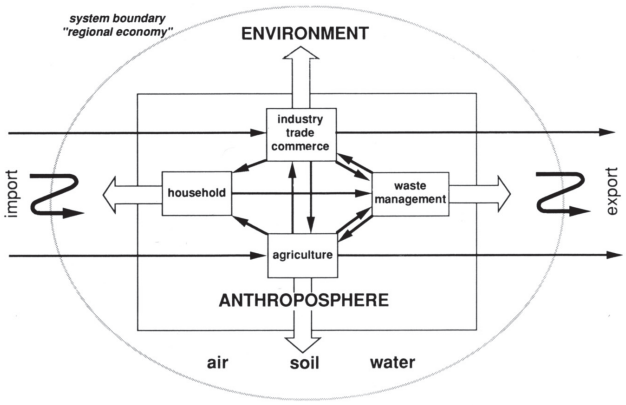


Abb. 3.2.6 Interaktionen zwischen der Anthroposphäre und der Umwelt im regionalen Stoffhaushalt [BACCINI / BRUNNER 1991:11]

Der regionale Stoffhaushalt bietet ein ganzheitliches Modell, den regionalen Ressourcenfluss abzubilden. Für die Analyse des regionalen Stoffhaushalts werden sämtliche Handlungen der Menschen durch die vier Aktivitäten *Ernähren und Erholen*, *Reinigen*, *Wohnen und Arbeiten* sowie *Transportieren und Kommunizieren* erfasst [BACCINI / BADER 1996]. Die Betrachtung dieser vier Aktivitäten ermöglicht eine überschneidungsfreie Erfassung der Stoffströme sowie einen Überblick, welche Stoffströme in den jeweiligen Aktivitäten dominieren.

Die übliche Methode zur Analyse der Prozesse des regionalen Stoffhaushalts ist die Stoffflussanalyse (SFA). Diese wird in Kapitel 3.3.2 näher beschrieben. In einer Vielzahl detaillierter Studien wurde der regionale Stoffhaushalt überwiegend am Beispiel der Schweiz systematisch untersucht [BACCINI / BADER 1996, LICHTENSTEIGER 1998, MÜLLER 1998, REAL1998, REDLE 1999, FAIST 2000, HUG 2002, LICHTENSTEIGER 2006, WITTMER 2006]. Die Ergebnisse dieser Studien zeigen u.a., dass in den urbanen Systemen zunehmend Stofflager aufgebaut werden, obwohl das Bevölkerungswachstum in den betrachteten Regionen stagniert. Grundsätzlich ist der Aufbau von Stofflagern nicht problematisch, da urbane Systeme zukünftig durch *Urban Mining* verstärkt wieder als Ressourcenspender genutzt werden können. Kritisch hingegen ist der Energiehaushalt: Der Energiebedarf in europäischen und nordamerikanischen Gesellschaften beträgt mit derzeit 6.000 bis 11.000 Watt Energieleistung pro Einwohner etwa das vier- bis sechsfache von dem, was durch eine als nachhaltig erachtete Energieversorgung bereitgestellt werden kann. Die Minderung des Energiebedarfs um den Faktor 4 bis 6 auf eine 2.000 Watt-Gesellschaft wird somit zu einem dringlichen Ziel.

Mit der Netzstadtmethode haben Franz Oswald und Peter Baccini einen Planungsansatz entwickelt, der die physiologische Methode des regionalen Stoffhaushalts und morphologische Planungswerkzeuge zu einer ganzheitlichen Methode des städtebaulichen Entwerfens zusammenführt [OSWALD / BACCINI 1998, 2004]. Urbane Systeme werden als flächendeckende dreidimensionale Netzwerke mit vielfältigen sozialen und physiologischen Verknüpfungen gesehen, die relativ hohe Dichten von Menschen, Gütern und Informationen aufweisen. Die kolonialisierten Ökosysteme von Land-, Forstwirtschaft und Gewässer sind Bestandteil des Systems und werden in die Betrachtung einbezogen. Die Netzstadtmethode „postuliert einen Satz von sechs Territorientypen (Siedlung, Infrastruktur, Landwirtschaft, Wald, Wasser und Brache), die ein urbanes System flächendeckend darstellen und auch erlauben, es flächendeckend mit Hilfe von morphologischen Grundbegriffen (Kohärenz, Grenzen, Maßstab, Aufgaben, Urbane Körnung und Urbaner Widerstand) zu beschreiben. Zwei Territorientypen, nämlich Siedlung und Infrastruktur, spielen eine herausragende Rolle, weil Netze aus Orten hoher Dichte, Flüssen (Verbindungen) und Grenzen (Skalen) durch Überlagerung dieser zwei Territorientypen konstruiert werden“ [OSWALD / BACCINI 2004:152].

Die Netzstadtmethode ist eine Plattform der transdisziplinären Arbeit, die an sich keine Entwürfe generiert, aber die Analyse und die Entwurfsarbeit strukturiert. Mit der Netzstadtmethode werden die Auswirkungen der vier Aktivitätsfelder der Menschen untersucht - physiologisch hinsichtlich der vier Schlüsselressourcen Energie, Wasser, Nahrungsmittel und Baumaterialien, - morphologisch bezogen auf die sechs Territorientypen und Netzelemente (Knoten, Verbindungen und Skalengrößen). Das Ziel der Netzstadtmethode liegt darin, ein offenes Konzept anzubieten, in dem optional sozialwissenschaftliche, anthropologische, ökonomische oder politische Disziplinen integriert werden können, um für die Planung, (Um-) Gestaltung und Steuerung der urbanen Systeme eine belastbare Wissensgrundlage zu schaffen [OSWALD / BACCINI 2004:182].

3.2.6 Industrial Ecology und angewandtes Stoffstrommanagement

Die Erkenntnis, dass sich die Umweltprobleme nicht durch End-of-pipe-Lösungen wie Filteranlagen nachhaltig lösen lassen und dass an sich ungefährliche Stoffe wie Kohlendioxid allein aufgrund ihrer großen Mengen die ökologischen Tragekapazitäten drastisch belasten, führte zu dem Ansatz eines integrierten Umweltschutzes, bei dem die Entstehung kritischer Stoffe bereits in der Produktion vermieden wird. Während die Analyse des regionalen Stoffhaushalts mit dem systemischen Verständnis den Ausgangspunkt für eine nachhaltige Gestaltung des gesellschaftlichen Stoffwechsels bildet, ist die Industrial Ecology eine Strategie zu einer konsistenten Gestaltung der Stoffflüsse.

Der Begriff des industriellen Stoffwechsels (*industrial metabolism*) wurde 1989 von Robert U. Ayers geprägt [BRINGEZU 2004:43]. Das Ziel der Industrial Ecology ist es, nach dem Vorbild ökologischer Systeme eine industrielle Kreislaufwirtschaft zu entwickeln. In Analogie zu natürlichen Nahrungsketten und -netzen mit funktionalen Vernetzungen zwischen Produzenten, Konsumenten und Destruenten wird die Gestaltung konsistenter Stoffkreisläufe angestrebt, wo die Abfallstoffe und Kuppelprodukte des einen Produzenten als Sekundärrohstoffe von anderen Produzenten genutzt werden. Als Geburtsstunde der Industrial Ecology wird die Veröffentlichung von Frosch und Gallpoulus *Strategies for Manufacturing* (1989) im *Scientific American* genannt, wobei es bereits zuvor richtungsweisende Arbeiten gab, z.B. von Kenneth Boulding 1966 *The Economics of the Coming Spaceship Earth*

[BRINGEZU 2004:43]. Seither hat sich vor allem im angloamerikanischen Raum eine umfangreiche wissenschaftliche Gemeinschaft zu dem neuen Forschungsfeld gebildet, die 2001 zur Gründung der *International Society for Industrial Ecology* geführt hat.

Während beim regionalen Stoffhaushalt vorwiegend die physiologischen Prozesse untersucht werden, spielt in der Industrial Ecology auch die Ökonomie eine wichtige Rolle. Die Industrial Ecology entwickelte sich an der Schnittstelle zwischen den Natur- und Ingenieurswissenschaften und den Wirtschaftswissenschaften mit einem Fokus auf Umweltökonomie und Umweltmanagement. So gehört auch Herman Daly‘s Beitrag zur Gleichgewichtsökonomie (*steady state economy*) (1992) [DALY 2002] ganz wesentlich zum theoretischen Fundament der Industrial Ecology. In der Industrial Ecology verbinden sich bislang weitgehend eigenständige Forschungsbereiche wie Lebenszyklusanalysen (*Life Cycle Assessment*), Material- und Energieflussanalysen (*Material Flow Analysis*), Untersuchungen zum industriellen Metabolismus (*Industrial Metabolism*) und Ansätze zu dynamischen System-Modellierungen (*System Dynamics, Dynamic Modeling*) zu einem umfassenden Konzept für die Transformation von einer Durchfluss- zu einer Kreislaufwirtschaft [ISENMANN 2008:305]. Das bekannteste Beispiel der Industrial Ecology ist die *industriell symbiosis* von *Kalundborg* in Dänemark [GÖLLINGER 1998]. Weitere Ansätze hierzu sind Initiativen zu *Zero-Emission-Regionen* [PAULI 1999, DIEFENBACH ET AL. 2002].

Die ersten praktischen Beispiele für angewandtes Stoffstrommanagement [HECK / BEMANN 2002] gibt es in Deutschland u.a. für die Verbandsgemeinde Weilerbach in Rheinland-Pfalz [HECK 2003] von Peter Heck am Institut für angewandtes Stoffstrommanagement (IfaS), FH Trier sowie die Arbeit zu industriellen Verwertungsnetzwerken von Peter Sterr am Institut für Umweltwirtschaftsanalysen Heidelberg (IUWA) [STERR 2003].

3.2.7 Modellebenen für die Beschreibung des urbanen Metabolismus

Seit Wolmans Veröffentlichung im Jahr 1965 werden mit dem Begriff *Urbaner Metabolismus* insbesondere die Ver- und Entsorgungsprozesse urbaner Systeme bezeichnet: „Unter Stoffwechsel urbaner Systeme versteht man die physiologischen Vorgänge (Transport und Transformation von Materie und Energie) in anthropogenen Ökosystemen“ [OSWALD / BACCINI 2003:156]. Die Infrastruktursysteme der Energie-, Wasser-, Abwasser- und Abfallwirtschaft, die Güterversorgung und Logistik, die Transport- und Verkehrssysteme sowie moderne Kommunikationstechnologien nehmen im Ressourcenhaushalt urbaner Systeme eine Schlüsselposition ein. Sie bilden die Schnittstelle bei der Ressourcenbereitstellung und Entsorgung von Abfallprodukten des urbanen Stoffwechsels und bestimmen die Effektivität bei der Ressourcennutzung.
Energie- und Stoffstromanalysen haben gezeigt, dass der weitaus größte Teil des hohen Energie- und Materialbedarfes in Industrieländern der Befriedigung elementarer Grundbedürfnisse dient. Diese sind maßgeblich von der infrastrukturellen Grundausstattung bestimmt: „Der hohe materielle Stoffwechsel industrialisierter Volkswirtschaften ist bei genauerem Hinsehen im Wesentlichen das Ergebnis der Bauintensität, der Ernährungsgewohnheiten und der Energieversorgung. Industrieländer scheinen eine starke Präferenz für äußerst materialintensive Versorgungssysteme zu haben. (...) Im Wesentlichen ist es aber die Art und Weise, wie wir unsere elementarsten Bedürfnisse – räumliche Geborgenheit, Schutz vor Witterung, Hunger und Durst – befriedigen, die unseren Umgang mit der Natur

bestimmt. Die Naturabhängigkeit gesellschaftlicher Prozesse ist durch den Industrialisierungsprozess nicht geringer geworden. Deutlich verändert haben sich allerdings die Dimensionen der materiellen Austauschprozesse“ [HÜTTLER ET AL. 1997:72]. Die heutige infrastrukturelle Grundausstattung ist als ein Durchflusssystem zu charakterisieren, das verhältnismäßig hohe Flussraten besitzt. Es ist von zunehmender Zentralisierung und Sektorialisierung der technologischen und institutionellen Systeme geprägt. Eine vergleichende Studie zur Entwicklung der Materialintensität verschiedener Metropolen zeigt, dass die Materialintensität und die damit verbundenen Umweltauswirkungen bezogen auf den Pro-Kopf-Verbrauch seit den 1970er Jahren zwischen 25 und 400% gestiegen ist [KENNEDY ET AL. 2007].

Andere Studien zum urbanen Metabolismus untersuchen die sozio-kulturellen und institutionellen Dimensionen der Entwicklung von Infrastruktursystemen und den Wandel ihrer gesellschaftlichen Leitbilder [TEPASSE 2001a, 2001b, 2007, FRANK / GANDY 2006]. Mattew Gandy beschreibt z.B. im *Niedergang der bakteriologischen Stadt* die Entstehung der Infrastruktursysteme zur Wasserver- und -entsorgung im 19. Jahrhundert nicht nur aus dem praktischen Erfordernis der Hygiene, sondern auch als Folge eines normativen Ideals eines integrierten, funktionalen öffentlichen Raums in Verbindung mit neu erwachsenden Ansprüchen kommunaler Verwaltung sowie deren Veränderungen im Übergang zu Postmoderne am Ende des 20. Jahrhunderts [FRANK / GANDY 2006:12, 21 f.].

Aus erkenntnistheoretischer Sicht ist der Stoffwechsel von Zellsystemen, Organismen und Biozönosen ein immanenter Bestandteil für die Reproduktions-, Anpassungs- und Entwicklungsfähigkeit in der biologischen und ökologischen Evolution. Ökosysteme – und somit auch urbane Systeme als anthropologisch überformte Ökosysteme – können demnach als eine Materialisierung von miteinander in Beziehung stehenden Informationsmustern betrachtet werden. „Wie Otto Rössler jüngst formuliert hat, ist jeder Organismus vom physikalischen Standpunkt gesehen ein System, das Energie an sich reißt und in positiver Rückkopplung (positive feedback) die gewonnene Energie zum Gewinnen weiterer verwendet. (...) Das organische System aber ist dadurch gekennzeichnet, dass seine Fähigkeit, aus der Umwelt Energie zu gewinnen, auf der abbildenden Information beruht, die es über sie besitzt, und weiterhin, dass es einen Teil der gewonnenen zur Gewinnung weiterer Information benutzt, die ihm neue Möglichkeiten des Energiegewinns eröffnet. Jede Spezies lebender Wesen ist somit ein System mit positiver Rückkopplung zwischen Energie- und Informationserwerb. Mit dem Erfolg des Energiegewinns erhöht sich nicht nur die Wahrscheinlichkeit eines weiteren, sondern auch die eines Zuwachses an Information, die neue Energiequellen erschließt“ [LORENZ 1978:253].

Hinsichtlich der Dynamik und Selbststeuerung von Gesellschaften liegt hierin eine der Ursachen für die evolutionäre Prämierung bei der Zunahme der Materialintensität im jeweiligen Übergang von Jäger- und Sammler- zu Agrar- und Industriegesellschaften und der Entstehung von Nachhaltigkeitskrisen: Gesellschaften, denen es gelang, mittels kultureller Regelung natürliche negative Rückkopplungen, d.h. solche, welche die menschliche Population reduzieren würden, zu unterlaufen konnten sowohl ihre innere Ordnung besser stabilisieren (Entropie reduzieren), als auch ihre Population vergrößern. „Kulturen, die stärker auf Selbstbeschränkung setzten (und ein müßiges Leben in relativem Überfluss pflegten), wurden schrittweise durch andere verdrängt, die expansionistisch agierten, mit dem paradoxen Resultat, dass immer mehr Menschen mit einem immer größeren

charakteristischen Stoffwechsel unter steigendem Arbeitsaufwand die Erde bevölkern“ [FISCHER-KOWALSKI 1997:207].

Zusammenfassend lassen sich damit im Wesentlichen vier Betrachtungsebenen von Wechselwirkungen im urbanen Metabolismus unterscheiden:

1. Die **physiologischen Wechselwirkungen** umfassen alle energetisch-stofflichen Prozesse, die für den Aufbau, Betrieb, Unterhalt und Rückbau der urbanen Systeme notwendig sind. Es werden die Prozesse in den Haushalten, Verwaltungs-, Dienstleistungs- und Produktionseinrichtungen sowie der Infrastruktursysteme untersucht.

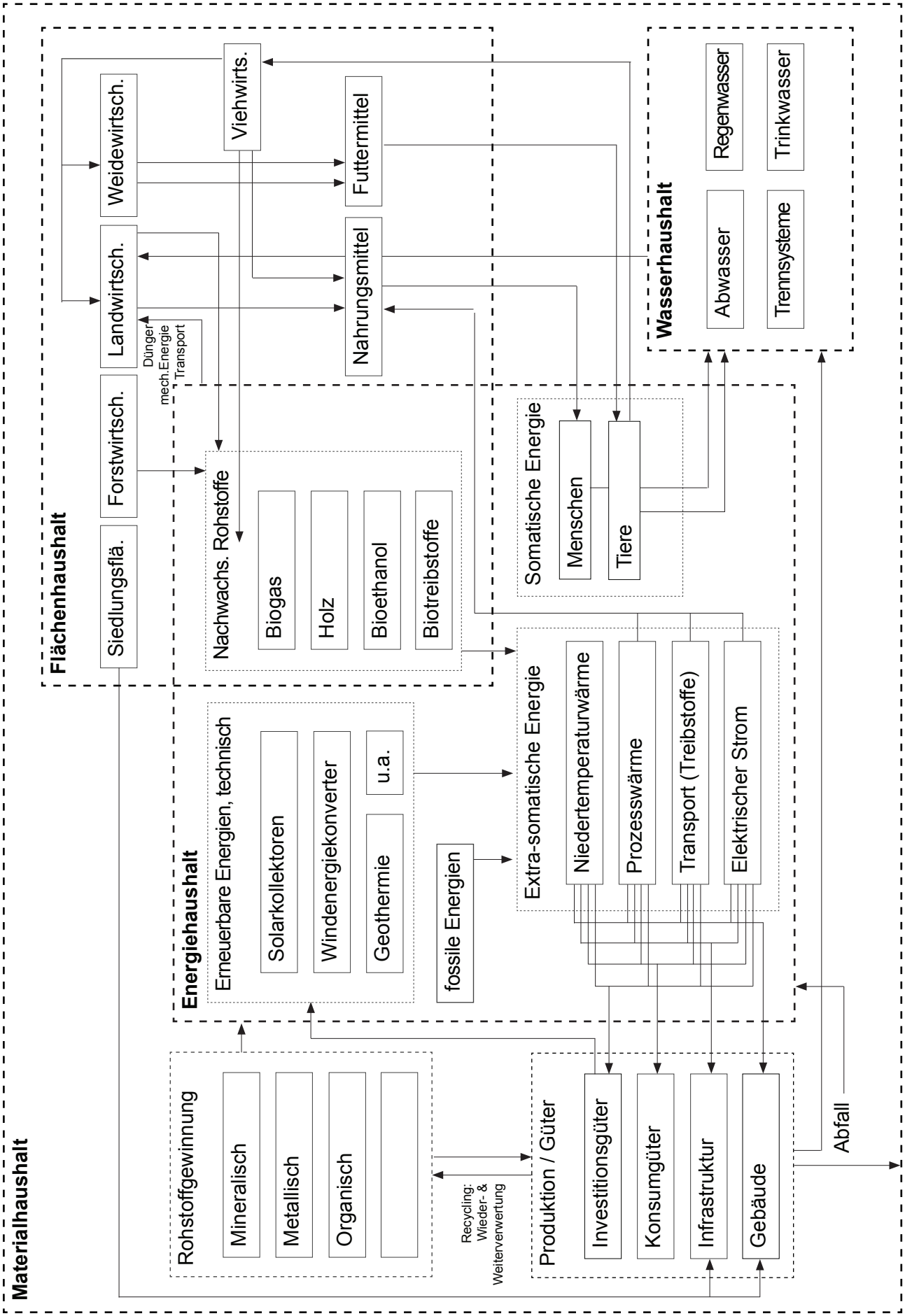
2. Die **raum-zeitlichen Wechselwirkungen** umfassen die Versorgungsbeziehungen zwischen den urbanen Systemen und der umgebenden Region bzw. dem globalen Hinterland, die als Quellen für die Versorgung mit Rohstoffen und Produkten oder als Senken zur Aufnahme von Abfällen und Emissionen von Bedeutung sind.

3. Die **sozioökonomischen Wechselwirkungen** umfassen die Beziehungen der verschiedenen Akteure, die als Konsumenten und Produzenten, als politische und administrative Funktionsträger oder als Betreiber von Infrastruktursystemen miteinander interagieren. Letztlich sind es die Menschen, die den urbanen Stoffwechsel verursachen und die über technologische, ökonomische, politische und rechtliche Steuerungsmechanismen die physiologischen Prozesse steuern.

4. **Erkenntnistheoretisch** können urbane Systeme als *Informationsmuster* betrachtet werden, die vermittelt durch Arbeit kulturelle Muster wie Traditionen, Werte, Kultur- und Produktionstechniken aufrechterhalten und reproduzieren. Sie manifestieren sich durch Austauschprozesse mit der Umwelt in Form von Ressourcen wie Energie und Material in Raum und Zeit.

Mein eigener Forschungsbeitrag bezieht sich in dieser Arbeit auf die Darstellung der Wechselwirkungen von Energie-, Material-, Wasser- und Flächenhaushalt in Bezug auf den Energiestoffwechsel für die Bereitstellung der Subsitenzgüter. Die Stoffwechselbetrachtungen beschränken sich dabei auf einen Ausschnitt, der die (bioproduktive) Versorgungsfläche für die Deckung des somatischen und extra-somatischen Energiebedarfs integral über einen Flächenindikator abbildet. Das Modell hierzu wird in Kapitel 5.2 erläutert. Abb. 3.2.7 zeigt annäherungsweise die Beziehungen, die zwischen den jeweiligen Subsystemen im Rahmen des urbanen Metabolismus bestehen.

Abb. 3.2.7 Diagramm zu den Wechselwirkungen zwischen Energie-, Material-, Wasser- und Flächenhaushalt in Bezug auf den Energiestoffwechsel für die Bereitstellung von Subsitenzgütern (Seite 59)


Materialhaushalt
Flächenhaushalt
Siedlungsflä.
Forstwirtsch.
Landwirtsch.
Weidewirtsch.
Viehwirts.
Futtermittel
Nahrungsmittel
Dünger
mech.Energie
Transport
Wasserhaushalt
Regenwasser
Trinkwasser
Abwasser
Trennsysteme
Energiehaushalt
Nachwachs. Rohstoffe
Biogas
Holz
Bioethanol
Biotreibstoffe
Somatische Energie
Menschen
Tiere
Erneuerbare Energien, technisch
Solarkollektoren
Windenergiekonverter
Geothermie
u.a.
fossile Energien
Extra-somatische Energie
Niedertemperaturwärme
Prozesswärme
Transport (Treibstoffe)
Elektrischer Strom
Rohstoffgewinnung
Mineralisch
Metallisch
Organisch
Recycling:
Wieder- &
Weiterverwertung
Produktion / Güter
Investitionsgüter
Konsumgüter
Infrastruktur
Gebäude
Abfall

3.3 Methoden zur Analyse des urbanen Ressourcenhaushalts

Aus der Vielzahl von Methoden zur Bewertung von Auswirkungen menschlichen Handelns auf die Umwelt werden hier drei der wichtigsten Werkzeuge für die Analyse des urbanen Ressourcenhaushalts näher dargestellt. Abb. 3.3.1 gibt einen Überblick zu weiteren Instrumenten und ihre Anwendungsgebiete bezogen auf die drei Nachhaltigkeitssäulen Gesellschaft, Umwelt und Ökonomie [FRISCHKNECHT 2004:17].

3.3.1 Ökobilanzierung (LCA)

Die Ökobilanzierung oder Life Cycle Assessment (LCA) bezeichnet eine standardisierte Methode, die es erlaubt, die mit einem Produkt, einem Verfahren oder einer Dienstleistung verknüpften Umweltlasten ganzheitlich, d.h. unter Berücksichtigung aller vor- und nachgelagerten Prozessschritte, zu erfassen, zu quantifizieren und im Zusammenhang einer gegebenen Fragestellung auszuwerten. Sie beruht auf einem Lebenszyklus-Ansatz. Es werden die Umweltauswirkungen eines Produktes von der Wiege bis zur Bahre (*cradle to grave*), also von der Rohstoffentnahme bis zur Entsorgung des Produktes und der Produktionsabfälle erfasst und beurteilt. Diese Methode dient dem Vergleich der Umweltauswirkungen zweier oder mehrerer unterschiedlicher Produkte, Produktgruppen, Systeme, Verfahren oder Verfahrensweisen und unterstützt durch die Offenlegung von Schwachstellen die Verbesserung der Umwelteigenschaften des untersuchten Gegenstands.
Während die ersten Ökobilanzen zunächst auf Produkte bezogen waren, wurde das Anwendungsgebiet zwischenzeitlich stark erweitert. Einer der Pioniere dieser Methode, Rudi Müller-Wenk, entwickelte 1978 eine Methode zur ökologischen Überwachung von Unternehmen (Ökocontrolling) [MÜLLER-WENK 1978]. Dieses wurde von Arthur Braunschweig [BRAUNSCHEIG 1988] auf Städte und Regionen ausgeweitet und angepasst, womit er an den Vorschlag von Patrick Geddes aus dem Jahr 1881 zu einer Bestands- und Flussrechnung des ökologischen Inventars einer Region anknüpft [FRISCHKNECHT 2004:8].

Eine Ökobilanz lässt sich gemäß der Normenreihe DIN / ISO 14040 ff. in vier Phasen unterteilen [FRISCHKNECHT 2004:9]:

1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
2. Sachbilanz
3. Wirkungsabschätzung und
4. Auswertung

Im ersten Schritt werden die Inhalte der Bilanzierung und Bilanzgrenzen festgelegt. Zur Durchführung der Sachbilanz wird dann zunächst eine Prozesskettenanalyse erstellt, bei dem ein beliebig komplexes System methodisch in endlich viele, überschaubare Teilsysteme (Prozesse) zerlegt wird. Für diese Teilsysteme werden die Energie- und Stoffströme ermittelt, die aus der Umgebung in das untersuchte System eintreten bzw. vom untersuchten System an die Umgebung abgegeben werden. Die Ergebnisse der Sachbilanz bilden den der Ausgangspunkt für die Wirkungsabschätzung, mit der versucht wird, die aus den Stoff- und Energieströmen resultierenden Wirkungen auf die Umwelt abzuschätzen. Abschließend werden die Resultate der vorhergehenden Schritte zusammengefasst

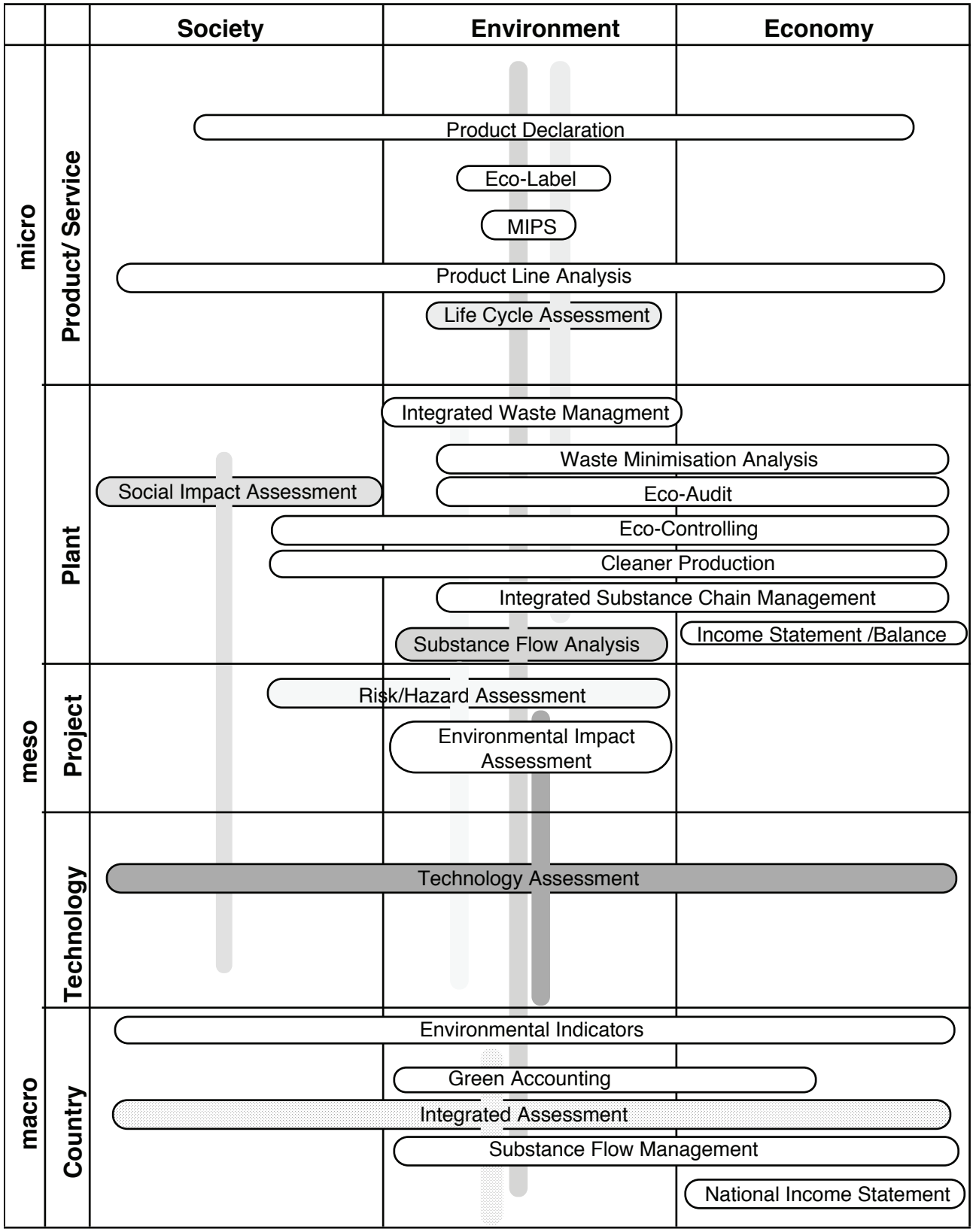


Abb. 3.3.1 Auswahl von Entscheidungsunterstützungsinstrumenten nach Hofstetter 1998. Die vertikalen Säulen illustrieren, welche Analyseebenene mitabgedeckt werden, wobei gleiche Schattierungen die Zuordnung zu den Instrumenten erlauben [FRISCHKNECHT 2004:17].

und interpretiert. Dieses Verfahren verläuft nicht linear, sondern die Bilanz wird zumeist in iterativen Schritten erarbeitet.

Für die Wirkungsabschätzung werden zumeist vier Kenngrößen ermittelt:
• Treibhauspotential (Global Warming Potential = GWP)
• Versauerungspotential
• Eutrophierungspotential
• Kumulierter nichtregenerativer Energieaufwand (KEA)

In Abhängigkeit der gewählten Systemgrenzen und der Analysetiefe kann die Prozesskettenanalyse ein sehr arbeitsaufwendiges Verfahren werden. Die Durchführung der Bilanzierung erfolgt mit einer dem Ziel und Zweck angemessenen Ökobilanz-Software. Eine umfangreiche, interaktive Übersicht zu Software für die Ökobilanzierung in allen Handlungsbereichen des Wohnungs- und Siedlungswesens findet sich auf der Internetseite von Holger Wolpensinger [http://www.oekosiedlungen.de/tools/MindMap/] (letzte Aktualisierung vom 07.12.2007).

Als Werkzeug zur Analyse von Umweltauswirkungen von Produkten oder Dienstleistungen hat sich die Methode etabliert. Die Anwendung wirft aber auch einige methodische Fragestellungen auf. In der ISO 14040 ff. ist zwar das Vorgehen zur Erstellung einer Bilanz formal geregelt, praktisch können aber für das gleiche Produkt erhebliche Unterschiede bei der Erstellung einer Ökobilanz auftreten. Beispielsweise muss für die Herstellung von Produkten Energie aufgewendet werden, deren Bereitstellung selbst durch Prozessketten abgebildet ist und die als Basisdaten in die Bilanzierung eingehen. Für das gleiche Produkt können regional und international erhebliche Schwankungen in der Bilanz auftreten, da der jeweilige Energiemix in den einzelnen Ländern stark schwankt. Die Stromgewinnung aus Atomkraftwerken (Frankreich, Schweiz), Kohle- und Braunkohlekraftwerken (Deutschland) oder aus regenerativen Energien (Windkraft oder Biomasse in Dänemark, Schweden oder Österreich) kann zu erheblichen Unterschieden bei der Bilanzierung gleicher Produkte oder Dienstleistungen führen. Ein weiteres Problem liegt in der Verfügbarkeit und Qualität der Ausgangsdaten. Technische Verfahren können sich in verhältnismäßig kurzer Zeit ändern, womit die Pflege der Basisdaten zu einem wichtigen, aber auch aufwendigen und kostspieligen Unternehmen wird. Aus diesem Grund wurde das Netzwerk Lebenszyklusdaten gegründet, um die methodischen und praktischen Fragen auf einer breiten wissenschaftlichen Basis zu behandeln [http://www.netzwerk-lebenszyklusdaten.de/cms/content].

3.3.2 Stoffflussanalysen (SFA)

Die physiologischen Vorgänge urbaner Systeme können mit Hilfe einer Analyse des regionalen Stoffhaushalts dargestellt werden. Als Grundlage hierfür dient die Methode der Stoffflussanalyse. Die SFA ist ein naturwissenschaftliches Verfahren, um für einen definierten Raum in einer bestimmten Zeitperiode (Systemgrenzen) den Stoff- oder Energieumsatz des zu untersuchenden Systems zu quantifizieren [BACCINI / BADER 1996:43]. Sie besteht in der Erfassung, Beschreibung und Interpretation von Stoffwechselprozessen. Mit Hilfe von Simulationen wird untersucht, wie sich der Stoffhaushalt hinsichtlich bestimmter Annahmen zukünftig entwickeln könnte. Diese Erkenntnisse sind hilfreiche Diskussionsgrundlagen für politische, ökonomische und forschungsrelevante Entschei-

dungen. Diese Methode wurde im Chemieingenieurwesen entwickelt, um den Stoff- und Energieverbrauch chemischer Produktionsprozesse, z.B. von Abfall- und Abwasseranlagen, zu optimieren. Seit Mitte der 1980er Jahre wird sie auch in der Umweltforschung angewendet [Bader 2006].

Ähnlich wie bei der Ökobilanz umfasst auch die Methode der Stoffflussanalyse vier Arbeitsschritte [BACCINI / BADER 1996:43]:

1. Zunächst ist das zu untersuchende System durch Güter, Prozesse und einen- oder mehrere Stoffe in seinem Detaillierungsgrad und durch Festlegungen der geografischen und zeitlichen Systemgrenzen zu beschreiben. Für das System gelten die physikalischen Gesetze der Massen- und Energieerhaltung. Die Systemzusammenhänge (Prozesse, Stoffflüsse, Lager usw.) werden auf der Grundlage des aktuellen Systemwissens modellhaft abgebildet und anschließend in mathematische Formeln übersetzt.

2. Als nächster Schritt folgt die Messung und Kalibrierung des Modells, durch eine Datenerfassung der relevanten Güterflüsse und Stoffkonzentrationen des Systems. Als Datenquellen dienen Mess- oder Literaturdaten, Schätzwerte sowie Expertenwissen. Die Quantifizierung der Energie- und Stoffströme dient in erster Linie auch dazu, das Systemverständnis auf seine Plausibilität hin zu überprüfen.

3. Als dritter Schritt erfolgt die mathematische Berechnung der Stoffflüsse mit einer geeigneten Software. Nachdem durch die Eingabe der Bestandsdaten eine Kalibrierung des mathematischen Modells erfolgt ist, können durch Variation einzelner Parameter verschiedene Szenarien unter stationären oder dynamischen Bedingungen untersucht werden. Die arithmetischen Berechnungen der Stoffflüsse erfolgt mit Hilfe von EDV-Programmen wie SIMBOX von der *Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz* (EAWAG) [http://www.eawag.ch/forschung/siam/software/simbox/index] oder UMBERTO vom Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu) [http://www.ifeu.de/index.php?bereich=oek&seite=umberto].
Die graphische Ausgabe erfolgt zumeist mit Sankey-Diagrammen.

4. Abschließend werden durch die Interpretation der Resultate die wichtigsten Quellen und Senken eines Stoffes, die für den Stoffumsatz relevanten Prozesse und die sich daraus ergebenden theoretischen Möglichkeiten zur Steuerung durch Veränderung der verfahrenstechnischen Prozesse diskutiert.

Wie bei der Erstellung einer Ökobilanz beeinflussen sich diese Arbeitsschritte gegenseitig und erfordern ein interaktives Vorgehen mit dem Ziel, ein gutes qualitatives und quantitatives Verständnis des betrachteten Systems zu erlangen.

3.3.3 Der ökologische Fußabdruck

Der ökologische Fußabdruck ist ein hoch aggregierter Flächenindikator, der den hypothetischen Flächenbedarf des menschlichen Pro-Kopf-Naturverbrauchs abbildet. Das Konzept wurde von den Ökologen Mathis Wackernagel und William Rees seit 1990 an der *University of British Columbia*

in Vancouver, Kanada, entwickelt, um den Vorgang der schleichenden Umweltzerstörung durch Übernutzung des Naturkapitals zu visualisieren [WACKERNAGEL / REES 1997]. Als Methode ist er besonders in den angelsächsischen Ländern stark verbreitet.

In Anlehnung an das Konzept der ökologischen Tragfähigkeit (*carrying capacity*) wird die Beziehung zwischen dem Ressourcenbedarf zur Bedürfnisbefriedigung und den aus der produktiven Land- oder Meeresfläche gewinnbaren Ressourcen hergestellt. Die ökologische Tragfähigkeit wird beim Großwild als die höchste Bevölkerungszahl definiert, die dauerhaft in einem Revier leben kann, ohne dessen Produktivität zu beeinflussen. „Der ökologische Fußabdruck einer gegebenen Bevölkerung (oder deren Wirtschaft) kann als das Gebiet von biologisch produktivem Land (und Wasser) in verschiedenen Kategorien wie Ackerland, Weiden, Wäldern usw. definiert werden, das erforderlich wäre, um mit der heutigen Technologie für diese Bevölkerung 1. alle konsumierte Energie und alle materiellen Ressourcen bereit zu stellen und 2. allen Abfall zu absorbieren, wo auch immer auf der Erde sich diese Flächen befinden“ [WACKERNAGEL / REES 1997:77].

Um den Naturverbrauch zu bilanzieren werden die Energie- und Materialflüsse einer Wirtschaftseinheit ermittelt und in Wasser- und Landflächen umgerechnet, die nötig sind, um diese Flüsse aufrechtzuerhalten. Hierfür werden sechs Flächennutzungskategorien eingeführt:

1. Energieflächenäquivalenz zum Ausgleich für die Verwendung fossiler Energie
2. Siedlungsfläche für Häuser, Verkehrs- und Produktionsflächen
3. Ackerland für die Erzeugung pflanzlicher Nahrungs- und Futtermittel und technischer Rohstoffe
4. Weideflächen für Nutztiere und deren Produkte
5. Wald für Bauholz und Papierrohstoff
6. Meeresfläche

Im Gegensatz zu herkömmlichen Tragfähigkeitsanalysen berücksichtigt das Konzept des ökologischen Fußabdrucks Handelsflüsse und den Stand der Technologie. Menschen können die ökologische Produktivität der Landschaft zum eigenen Vorteil erhöhen, indem Tier- und Pflanzenarten zurückgedrängt, örtlich knappe Ressourcen eingeführt und Technologien eingesetzt werden.

Der ökologische Fußabdruck erscheint als eine auf das Leitbild der nachhaltigen Entwicklung zugeschnittene Methode zur Abbildung der Tragfähigkeit von Ökosystemen. Der Vorteil des Verfahrens liegt in der Visulalisierung des abstrakten Vorgangs einer schleichenden Umweltzerstörung durch Übernutzung des Naturkapitals. Der Nachteil liegt in der Reduktion komplexer ökologischer Sachverhalte auf statistische Werte mit der Bildung von Durchschnittswerten, die konkrete Produktivitätsfaktoren des Standorts nicht immer hinreichend berücksichtig. Ein weiterer Nachteil liegt in unterschiedlich gewählten Berechnungswegen, besonders bei älteren Erhebungen. Je nach Berechnungsmethode und verwendeter Datenbasis führt die Berechnung des ökologischen Fußabdrucks nicht immer zu miteinander vergleichbaren Aussagen. Auf aktuelle Abschätzungen zum globalen Ökologischen Fußabdruck, der mit mind. 25% über der globalen Tragfähigkeit im *ecological overshoot* liegt, wurde bereits in Kapitel 1 eingegangen [GLOBAL FOOTPRINT NETWORK 2008:14]. Tab. 3.3.1 zeigt exemplarisch die Ergebnisse einiger Berechnungen.

Bezugssystem	Autor	Quelle	Erstellt	Bezugsjahr	ha / EW	Einwohner
Berlin	Matthias Schnauss	(1)	2001	1998	4,41	3.471.418
Hamburg	Gösta Jancke	(1)		1993	5,49	1.707.901
München	Raphael Treffny	(2)	2003	2001	3,1 / 4,4 (a)	1.260.597
Wien	Hans Daxbeck	(3)	2001	1997	3,1 / 3,9 (b)	
London	Herbert Giradet	(5)	1996		2,9	
London	Best Foot Forward	(6)	2002	2000	6,63	7.400.000
Toronto (GTA)	Onisto / Wackernagel	(7)	1998	1993	7,8	4.200.000
Capetown	Barrie Gasso	(8)	2002	1996-98	4,3	3.000.000
Deutschland	Matthias Schnauss	(1)	2001	1998	5,32	82.000.000
Großbritannien	Best Foot Forward	(6)	2002	2000	6,3	

Tab. 3.3.1 Übersicht des ökologischen Fußabdrucks zu ausgewählten Städten und Ländern mit spezifischem Kennwert in (ha / Einwohner)

Datenquellen:
(1) [SCHNAUSS 2001]
(2) [TREFFNY 2003]
(3) http://www.wien.gv.at/ma22/nachhaltigkeit/fussabdruck/
(4) http://www.ecouncil.ac.cr/rio/focus/report/english/footprint/
(5) [GIRADET 1999]
(6) http://www.ecouncil.ac.cr/rio/focus/report/english/footprint/
(7) http://www.city.toronto.on.ca/eia/links.htm
(8) www.saplanners.org.za/SAPC/papers/Gassonpaper.pdf
(a) bezogen auf die durchschnittliche Produktivität der Weltfläche
(b) nach Methodik Wackernagel / Rees

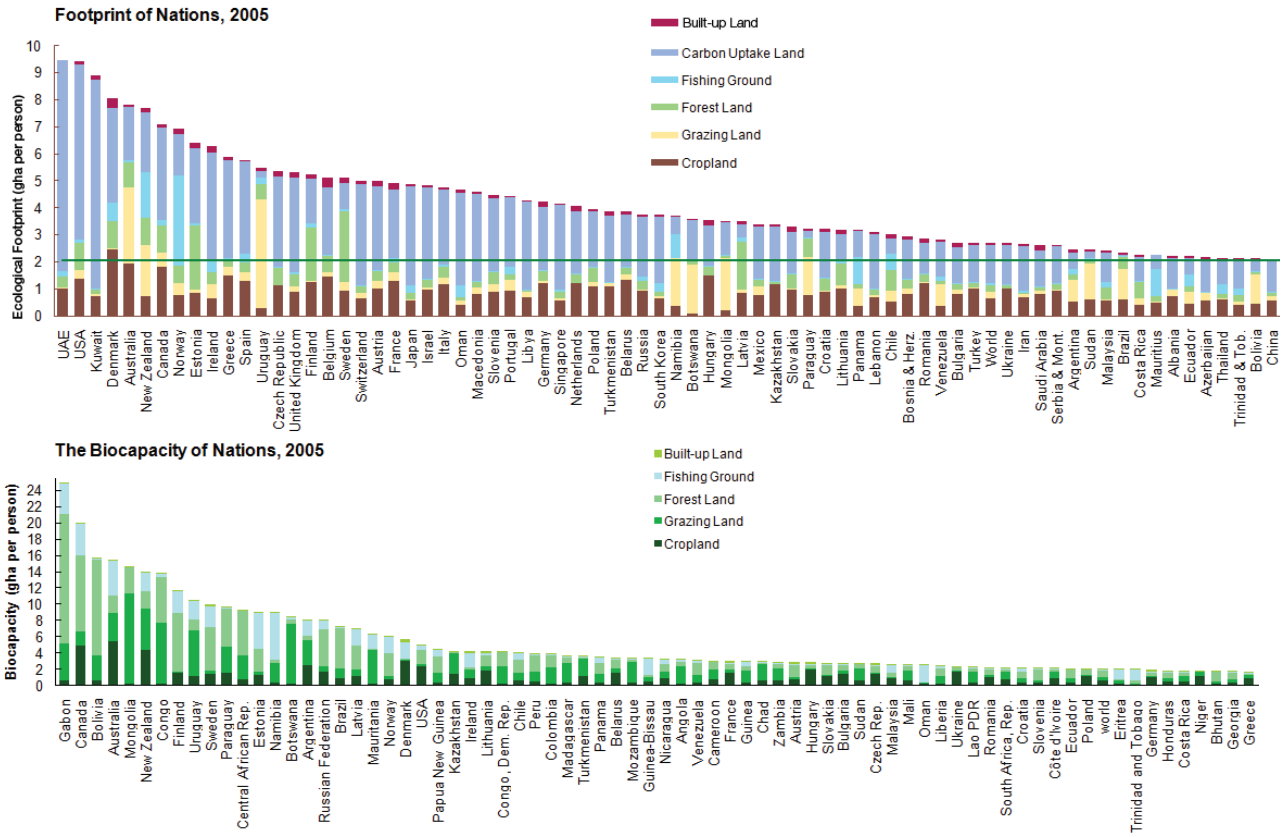


Abb. 3.3.2 Der ökologische Fussabdruck und die Biokapazität verschiedener Nationen 2005 [GLOBAL FOOTPRINT NETWORK 2008:15]

3.4 Zusammenfassung

Um Aussagen darüber zu treffen, ob sich ein urbanes System nachhaltig entwickelt oder nicht, können verschiedene Methoden und Modelle verwendet werden. Eine große Bedeutung kommt der Erfassung und Bewertung regionaler Energie- und Materialströme zu. Ein erster methodischer Ansatz zur Analyse von Ressourcennutzungen wurde von Patrick Geddes bereits Ende des 19. Jahrhunderts entwickelt. Seither hat sich mit der Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment) eine international standardisierte Methode etabliert, um die Umweltauswirkungen von Produkten und Systemen hinsichtlich ihrer Herstellung und Nutzung zu bewerten. Für die Analyse urbaner und regionaler Systeme ist diese Methode aber nicht ausreichend, da die vielfältigen Beziehungen der geologischen, geographischen, raum-zeitlichen, sozioökonomischen und soziokulturellen Parameter nicht hinreichend abgebildet werden.
Ausgehend von der Ökosystemforschung hat sich seit Ende der 1980er Jahre mit dem Modell des regionalen Stoffhaushalts und der Methodik von Energie- und Stoffflussanalysen ein naturwissenschaftlicher Ansatz zur Analyse urbaner und regionaler Systeme herausgebildet. Urbane Systeme werden hierbei als anthropogene Ökosysteme betrachtet, die als lebendige, komplexe, thermodynamische Systeme auf einen ständigen Zufluss von Energie und Stoffen angewiesen sind und die natürliche Senken mit Emissionen und Abfällen belasten. Sie weisen einen organischen (basalen) und technischen (gesellschaftlichen) Stoffwechsel auf, der mit naturwissenschaftlichen Methoden gemessen werden kann. Die Analyse von Energie- und Stoffströmen ist eine wichtige Voraussetzung, um ein qualitatives und quantitatives Verständnis über die Wechselwirkungen gesellschaftlicher und urbaner Systeme mit dem regionalen und dem globalen Hinterland zu erlangen. Das Ziel dieser Analysen ist letztlich, die Potenziale einer nachhaltigen Ressourcenbewirtschaftung zu ermitteln, um die Versorgungsprozesse richtungssicher zu steuern. Diese Versorgungsprozesse werden durch die Kolonialisierung natürlicher Systeme ermöglicht und erfolgen durch die technischen Infrastrukturen der Energie-, Wasser-, Informations- bzw. Kommunikations- und Verkehrssysteme. Diese werden durch komplexe sozioökonomische Prozesse reguliert, die in eine ganzheitliche Betrachtung mit einbezogen werden müssen. Das Konzept des urbanen Metabolismus bietet hierfür einen Modellansatz, der naturwissenschaftliche und sozialwissenschaftliche Ansätze miteinander verbindet. Der Umbau, die Erneuerung und die Anpassung der urbanen Infrastruktursysteme an sich verändernde demographische und technologische Rahmenbedingungen erfolgt in fließenden oder sprunghaften Übergängen. Diese urbanen Transitionen sind das zentrale Handlungsfeld einer nachhaltigen Gestaltung urbaner Systeme, für die das Modell des urbanen Metabolismus wichtige Ansätze liefern kann. Eine Aufgabe besteht darin, die existierenden infrastrukturellen Versorgungssysteme wie z.B. Energie- und Wassersysteme nachhaltig zu gestalten und deren Stoffflüsse zu optimieren. Es gilt, Lücken und Fehlstellen dieser Systeme aufzeigen. Wie groß ist der Verlust wichtiger Nährstoffe und Mineralien durch die Schwemmkanalisation und wie sieht eine zukunftsfähige Wasserinfrastruktur aus? Welche Potenziale entstehen an Stofflagern im urbanen Raum und wie lassen sich diese durch Recycling reaktivieren (*urban mining*)? Auf der Grundlage des Metabolismus-Konzepts allein lassen sich zumeist keine ausreichend konstruktiven stadtplanerischen Leitvorstellungen für eine Umgestaltung entwickeln. Aber durch die Entwicklung von Szenarien, welche die Verhaltensweisen anthropogener Ökosysteme für die Zukunft prognostizieren, können Leitbilder und Kriterien für eine Politik der Nachhaltigkeit und eine zukunftsfähige Stadtplanung entwickelt werden.

4. DER ENERGIEHAUSHALT URBANER SYSTEME

4.1 Energie und Energiesysteme

4.1.1 Einleitung

Im urbanen Metabolismus kommt dem Energiehaushalt eine Schlüsselstellung zu. Die Existenz und das Wachstum von Organismen, die Herstellung und der Betrieb baulicher Strukturen und technischer Systeme sowie deren Anpassung an sich ändernde Bedürfnisse oder Rahmenbedingungen ist ohne Energie in ihren vielfältigen Erscheinungsformen nicht denkbar. Energie ist für den Antrieb eines jeden Systems notwendig. Ausgehend von einer allgemeinen Beschreibung der Eigenschaften von Energie und Energiesystemen wird im Folgenden ein Überblick zur Entwicklung und den Stand der Technik energieeffizienter Bauweisen und nachhaltiger Systeme zur Wärmeversorgung von Gebäuden und Siedlungsstrukturen gegeben. Daran schließt sich eine Beschreibung akteursbasierter Ansätze zu einer nachhaltigen Energieversorgung ländlicher Regionen an sowie ein Ausblick auf Szenarien, wie sich derzeit eine auf erneuerbaren Energiequellen beruhende Energieversorgung bis 2050 darstellt.

4.1.2 Grundlagen zu Energie und Thermodynamik

Energie ist eine physikalische Größe, welche die Fähigkeit beschreibt, Arbeit zu verrichten. Allgemein betrachtet bedeutet Energie eine in den betrachteten Objekten innewohnende Wirksamkeit. Seit Mitte des 19. Jahrhunderts werden die naturwissenschaftlichen Grundlagen wichtiger energetischer Prozesse in der Thermodynamik beschrieben. Insgesamt bestehen vier Hauptsätze der Thermodynamik, von denen hier kurz die wichtigsten Aussagen des ersten und zweiten Hauptsatzes zusammengefasst sind. Der *erste Hauptsatz der Thermodynamik* besagt, dass Energie weder erzeugt noch verbraucht werden kann, sondern sich lediglich in ihrer Erscheinungsform verändert (Energieerhaltungssatz). Es werden folgende verschiedene Energieformen unterschieden:

- **elektromagnetische Energie** besteht als Photonenstrom in Form von Strahlung wie Licht oder Wärmestrahlung (Solarstrahlung),
- **thermische Energie** ist die in der ungeordneten Bewegung der Atome oder Moleküle eines Stoffes gespeicherte kinetische Energie,
- **chemische Energie** ist die in der chemischen Bindung von Atomen oder Molekülen enthaltene Energieform. Sie wird z.B. in Form von fossilen Brennstoffen oder Biomasse genutzt,
- **mechanische Energie** beschreibt die Lage-, Bewegungs- oder Spannenergie (elastischen Verformung) eines Körpers oder Stoffes,
- **elektrische Energie** liegt in elektrischen Ladungen, also freien Elektronen oder Ionen, oder in magnetischen Feldern vor.

Der *zweite Hauptsatz der Thermodynamik* (Entropiesatz) befasst sich mit der Umwandlung thermischer Energie in andere Energieformen und besagt, dass Energie innerhalb eines geschlossenen Systems unaufhaltsam und unumkehrbar einem Zustand völliger Verteilung bzw. Dissipation zustrebt. So neigt Wärme dazu, von wärmeren auf kältere Körper überzugehen, aber umgekehrt ist es nicht möglich, dass die Wärme eines kälteren Körpers von selbst auf einen wärmeren

Körper übergeht. Sie kann also auch keine Arbeit mehr verrichten. Mechanische Arbeit kann zwar vollständig in Wärme umgewandelt werden, Wärme aber nicht vollständig in mechanische Arbeit, weshalb in einem geschlossenen System die Wärmeenergie ständig abnimmt.
Für diese Zerstreuung der Wärme prägte der deutsche Physiker Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822-1888) den Begriff der *Entropie*. Ein System mit maximaler Entropie ist nicht mehr in der Lage, Arbeit zu leisten (Wärmetod). Die Erde ist zwar ein stofflich nahezu geschlossenes, aber energetisch offenes System. Durch den stetigen Zustrom solarer Strahlungsenergie sind natürliche Systeme mittels pflanzlicher Photosynthese in der Lage, entgegen des zweiten thermodynamischen Hauptsatzes komplexe, geordnete Strukturen zu erzeugen und aufrechtzuerhalten.
Eine weitere Ableitung aus dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik ist die Unterscheidung von thermischer Energie nach *Exergie* und *Anergie*. Es gilt dabei die Summengleichung:
Thermische Energie = Anergie + Exergie

Exergie bezeichnet dabei den umwandelbaren Anteil thermischer Energie in andere Energieformen, d.h. den Teil der Gesamtenergie eines Systems oder Stoffstroms, der Arbeit verrichten kann. Anergie bezeichnet hingegen den nicht nutzbaren Teil der Energie, d.h. den nicht arbeitsfähigen Anteil. Besonders in der Energietechnik ist der Exergie-Begriff nützlich und notwendig, um Energieformen mit Blick auf ihre praktische Nutzung bewerten zu können. So ist der Exergie-Gehalt von Wärme durch den thermodynamischen Wirkungsgrad begrenzt und in der Praxis relativ gering, während elektrischer Strom zu hundert Prozent aus Exergie besteht. Aufgrund dieser unterschiedlichen Wertigkeit werden die Kennwerte elektrischer und thermischer Leistung von Maschinen zur Strom- und Wärmeerzeugung jeweils getrennt voneinander angegeben, obwohl beide Energieformen in Kilowattstunden gemessen werden.

Auf der **physikalisch-infrastrukturellen Ebene** ist jeder energetische Prozess – sei es auf der großmaßstäblich technischen Ebene oder im biologischen Metabolismus – durch das Zusammenwirken der Systemzustände Energiewandlung, Energietransport und Energiespeicherung charakterisiert. Thermodynamische Systeme lassen sich durch Energiebilanzgleichungen darstellen, in denen diese Systemzustände mathematisch abgebildet werden.

• **Energiewandlung**: Gemäß des ersten thermodynamischen Hauptsatzes gibt es im physikalischen Sinn keine Energieerzeugung. Das, was im allgemeinen Sprachgebrauch mit Erzeugung bezeichnet wird, ist in Wirklichkeit eine mit Umwandlungsverlusten verbundene Energiewandlung von der einen in eine andere Energieform.

• **Energietransport**: Energienutzung ist immer an eine Infrastruktur zur Verteilung gebunden. Jede Energieform weist aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften unterschiedliche Möglichkeiten und Restriktionen in ihrer Verwendung, des Transports und der Speicherung auf.

• **Energiespeicherung**: Energiespeicherung dient entweder einer zum Zeitpunkt der Energiewandlung verzögert auftretenden Nutzung von Energie, z.B. die tages- oder jahreszeitliche Verschiebung von Wärmeenergie von energiereichen in energiearme Zeiten oder bei einer vom Ort der Energiewandlung räumlich getrennten Energienutzung (z.B. mobile Nutzung ohne unmittelbare infrastrukturelle Anbindung). Nicht alle Energieformen sind gleichermaßen für eine Speicherung

geeignet. So lassen sich elektromagnetische Energie (Strom) und bestimmte Strahlungsformen (Licht) praktisch nicht speichern und müssen in eine andere Energieform (z.B. chemische oder mechanische Energie) umgewandelt werden, was mit besagten Umwandlungsverlusten verbunden ist.

In der **Energiewirtschaft** und der statistischen Erfassung von Energie- und Materialströmen wird zwischen vier funktional unterschiedlichen **Energiesektoren** differenziert:
• Stromversorgung
• Prozesswärme für Industrie und Gewerbe
• Niedertemperaturwärmeversorgung für Raumwärme und Warmwasser
• Kraftstoffe für Transport und Mobilität

Auf der Akteursebene ist die Energiewirtschaft und Energieversorgung von drei notwendigen Anforderungen geprägt:
• Versorgungssicherheit
• Wirtschaftlichkeit
• Umweltverträglichkeit

4.1.3 Die fossile Energiewirtschaft

Am Ende des 18. Jahrhunderts erreichte die land- und forstwirtschaftliche Produktivität in Europa eine signifikante Grenze, die den Druck auf technologische Innovationen erhöhte. Die Nutzung fossiler Energierohstoffe, insbesondere der Steinkohle, leitete den Wechsel vom agrarischen zum fossilen Energiezeitalter ein. Mit der industriellen Revolution vor etwa zwei Jahrhunderten vollzog sich auch der Übergang der Nutzung von natürlichen Systemen zum Energieerwerb und für Kraft (Landwirtschaft, Tiere, Last- und Transport) zu technischen Systemen (Maschinen), angetrieben von fossilen Energieträgern, zu der auch die nukleare Stromerzeugung gezählt wird. Mit der zunehmenden Automobilisierung nach dem 2. Weltkrieg übernahm das Erdöl die führende Rolle in der Energieversorgung. Der große Vorteil von Erdöl und Mineralölprodukten gegenüber allen anderen Energieträgern liegt in der hohen Energiedichte, d.h. im Energieinhalt, bezogen auf Volumen und Gewicht, und in ihrer problemlosen Lagerung. Das führte sie zum Energieträger der Wahl in allen mobilen Anwendungen, insbesondere im Straßen-, Luft- und Schiffsverkehr [RWE 2004:23].

Heute liegt der Anteil von Kohle, Erdöl, Erdgas und Kernenergie am gesamten globalen Primärenergieverbrauch je nach Definition und Berechnungsverfahren bei ca. 87%, wenn die Atomenergie hinzugerechnet wird, sogar bei ca. 92% (Abb. 4.1.1) [BP 2011]. Der Anteil nichtkommerzieller, d.h. in offiziellen Handelsstatistiken nicht erfasster Energieträger wie Biomasse und sonstige erneuerbare Energien mit überwiegender Nutzung in den Entwicklungsländern liegt bei ca. 11% [BMWi 2006:2]. Aufgrund der zunehmenden Industrialisierung der Schwellenländer wird der Weltenergiebedarf noch deutlich schneller wachsen, als die Weltbevölkerung selbst. Auf die Industrieländer einschließlich der osteuropäischen Volkswirtschaften sowie der Nachfolgestaaten der ehemaligen UdSSR mit einem Anteil von 23% an der Weltbevölkerung entfallen 71% des globalen Energieverbrauchs. Auf die Schwellen- und Entwicklungsländer mit einem Weltbevölkerungsanteil von 77% entfallen gerade einmal 29% des Energieverbrauchs [RWE 2004:10]. Dennoch ist aus Gründen der Versorgungssicherheit (*Ressourcenlimitierung* und *geopolitische Risiken*) und des auf die Nutzung

Energieträger	Weltweit		Deutschland	
	Mio. t Öl-Äquivalent	%	Mio. t Öl-Äquivalent	%
Erdöl	4.028,1	33,6	115,1	36,0
Gas	2.858,1	23,8	73,2	22,9
Kohle	3.555,8	29,6	76,5	24,0
Nuklear	626,2	5,2	31,8	10,0
Wasser	775,6	6,5	4,3	1,4
Erneuerbar	158,6	1,3	18,6	5,8
	12.002,4	**100,0**	**319,5**	**100,0**

Tab. 4.1.1 Primärenergieverbrauch 2010, Global und in Deutschland in Mio. t Erdöläquivalenten [BP 2011]

fossiler, kohlenstoffhaltiger Energieträger zurückgeführten Klimawandels (*Entkarbonatisierung des Energiesystems*) der Übergang vom fossilen zu einem auf erneuerbaren Ressourcen beruhenden Energiesystem in naher Zukunft unablässig. Im folgenden sind die Argumente näher ausgeführt. Atomenergie ist aufgrund der Risiken im Anlagenbetrieb und der bislang weiterhin ungeklärten Problematik der Endlagerung der hochradioaktiven Abfallprodukte keine nachhaltige Alternative zum fossilen Energiesystem.

Ressourcenlimitierung

Über die genaue Reichweite der fossilen Energieressourcen besteht Uneinigkeit, aber viele Experten gehen davon aus, dass der *Depletion Mid Point* oder kurz *peak oil*, d.h. der Punkt, wo die Ölförderung ihr Maximum erreicht hat, bereits überschritten wurde. Selbst Erdöl- und Energiekonzerne schätzen die Reichweite des Erdöls vorsichtig ein und unternehmen Anstrengungen, sich im regenerativen Energiesektor z.B. durch Investitionen in PV-Anlagen nachhaltig einen ökonomischen Stand zu sichern. Als Maßgröße wird dabei die sogenannte statische Reichweite herangezogen, welche die aktuelle Jahresförderung eines Energieträgers in Beziehung zu den Reserven setzt. Für Erdöl kommt man bei diesem Verfahren aktuell zu einer Reichweite von 40 Jahren. „Das darf aber nicht so interpretiert werden, dass 2043 kein Erdöl mehr vorhanden ist. Sonst müsste das bereits geschehen sein, denn in den 70er-Jahren lag die Reichweite zeitweise unter 30 Jahren. Leider sind solche Fehlurteile nicht selten. Sie verkennen den flexiblen Charakter der Reservengröße. Die Reserven sind eine Art Arbeitsspeicher der Ölindustrie. Sinkt die statische Reichweite stark ab, ist das ein Zeichen, dass die Exploration verstärkt und Ressourcen in Reserven überführt werden müssen“ [RWE 2004:17].

Bei der Bewertung der Rohstoffvorkommen wird daher nach *Reserven* und *Ressourcen* unterschieden:
• **Reserven** sind die sicher nachgewiesenen und mit bekannter Technologie wirtschaftlich förderbaren Vorkommen,
• **Ressourcen** sind die entweder nachgewiesen, aber noch nicht wirtschaftlich förderbaren oder die noch nicht sicher nachgewiesen, aber aufgrund geologischer Indikatoren erwarteten Energieträger.

Bei der Beurteilung über die Reichweite von Erdöl und Erdgas besteht auch unter Experten der Erdöl- und Energiekonzerne keine Einigkeit. „Eine Gruppe von Experten, überwiegend Geologen

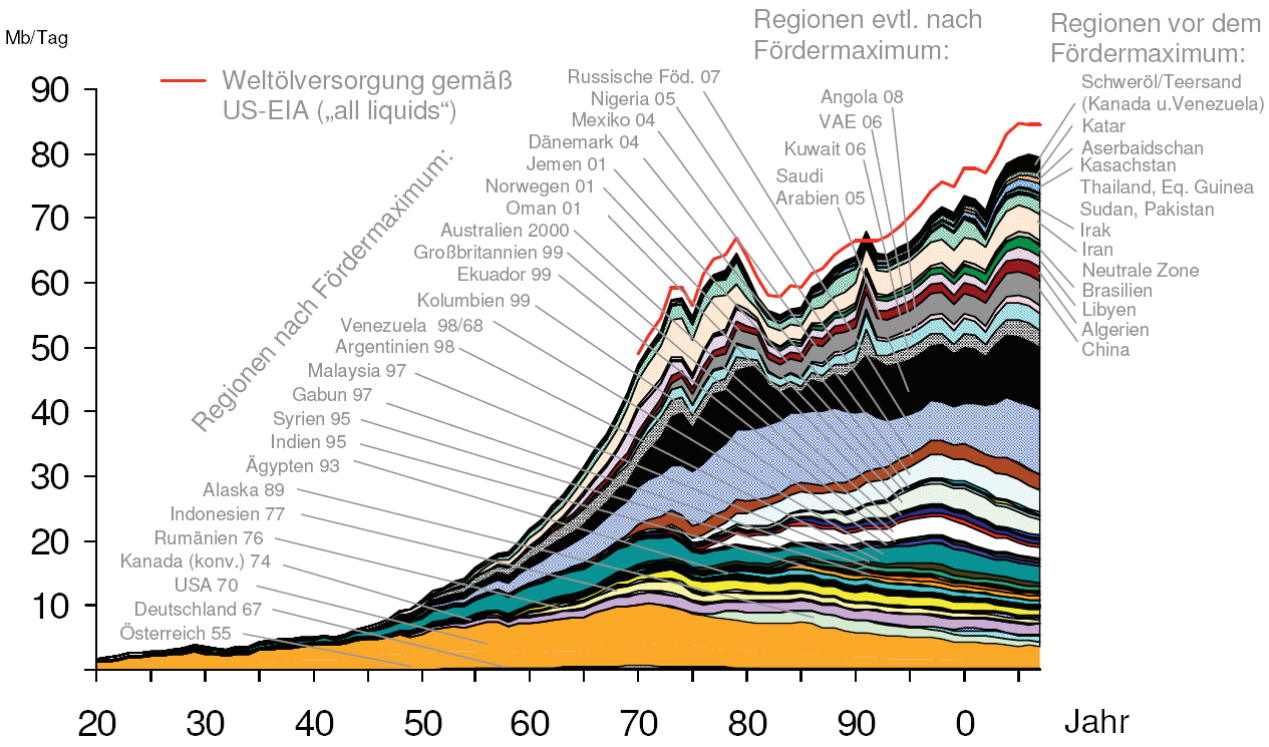


Abb. 4.1.1 Die weltweite Ölförderung von 1920 bis 2006 (Rohöl, Kondensat, NGL, Schweröl) [http://www.energywatchgroup.org/fileadmin/global/pdf/2008-05-21_EWG_Erdoel_Pressemeldung_D.pdf Energy Watch Group] [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/6/65/Welt%C3%B6lf%C3%B6rderung.png]

(Campbell, Laherèrre u.a.) schätzen das Gesamtpotenzial des Erdöls sehr vorsichtig ein. Sie sehen keine Möglichkeiten für ein weiteres Wachstum des Potenzials durch eine verbesserte Ausbeute der Lagerstätten und geben den nicht konventionellen Vorkommen wenig Chancen. Auf Basis dieser sehr restriktiven Sicht erwarten sie, dass die Ölförderung bereits in wenigen Jahren ihren „Peak“ erreichen wird und danach unaufhaltsam zurückgeht. Die Folge wäre eine weltumspannende Energie- und Wirtschaftskrise. Die Gegenposition, vertreten insbesondere von Ökonomen wie Adelman und Lynch, sieht die Ressourcenbasis nicht so pessimistisch und betont die Rolle des technischen Fortschritts bei der Erweiterung der Ressourcenbasis durch höhere Ausbeute der Lagerstätten und die Nutzung nichtkonventioneller Ölvorräte. In ihren Augen dauert es noch Jahrzehnte, bis der ‚Depletion Mid Point‘ erreicht wird, von dem aus die Förderung nicht mehr zu steigern ist“ [RWE 2004:24].

Kohle gilt als der fossile Energieträger mit dem größten Vorratspotenzial, aber auch mit den höchsten spezifischen CO_2-Emissionen bei der Verbrennung. Die Abscheidung und dauerhafte Speicherung von Kohlendioxid in unterirdischen Gaskavernen, die so genannte *CO_2-Sequestrierung* (CCS, engl. für Carbon Dioxide Capture and Storage), wird zwar insbesondere von den Großkonzernen der Energiewirtschaft als eine mögliche technische Lösung angesehen. In einer Stellungnahme des Sachverständigenrats für Umweltfragen zur erneuerbaren Stromversorgung wird dies aber technologisch und ökonomisch als nicht nachhaltig angesehen, da die für einen nachhaltigen Umbau der Energieinfrastruktur benötigten Investitionen in die falsche Richtung gelenkt werden [SRU 2010:6].

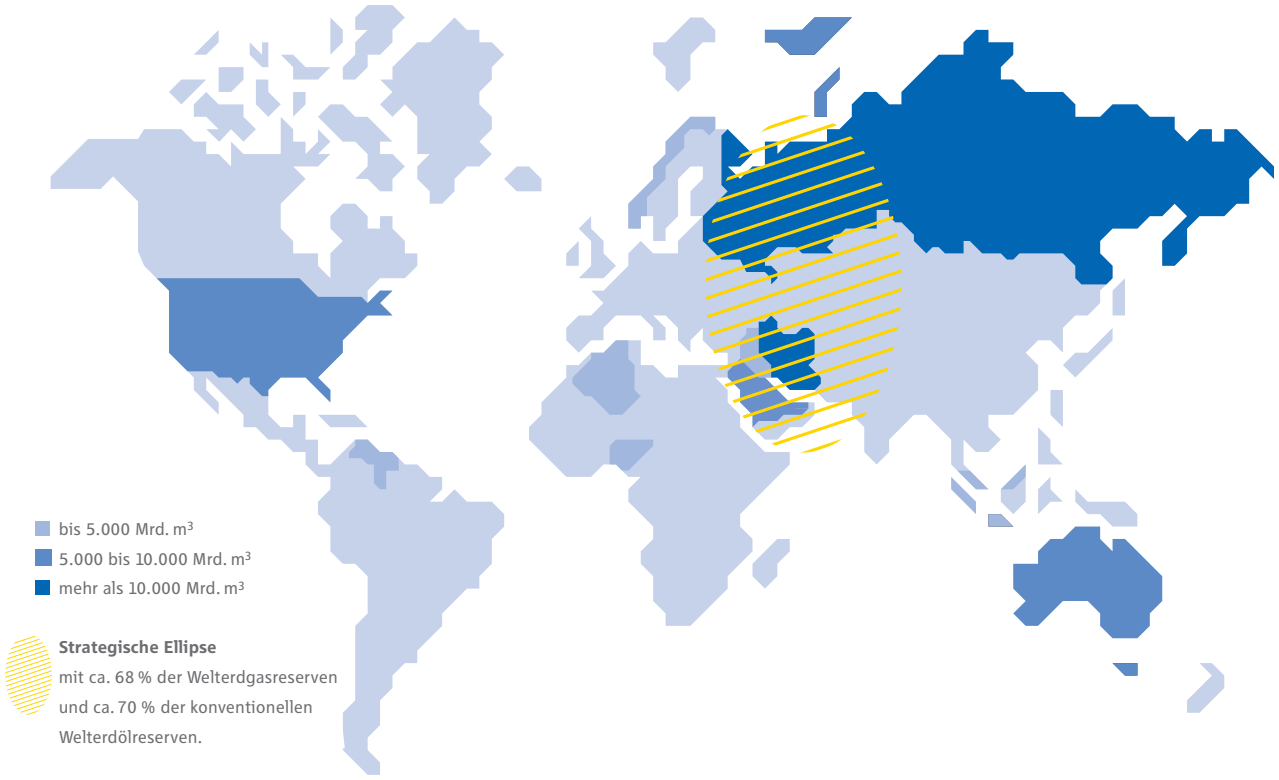


Abb. 4.1.2 Die *Strategische Linse* [RWE 2004:37]

Geopolitische Risiken

Das Erdölkartell OPEC im Nahen Osten (65% der Erdölreserven, 34% der Erdgasreserven) und Russland (39% der Erdgasreserven) kontrollieren einen Großteil der globalen fossilen Energieressourcen. Damit sind ca. 70% der konventionellen Erdölreserven und ca. 68% der Welterdgasreserven in einer geopolitisch sensiblen Region verortet, die als *Strategische Ellipse* bezeichnet wird (Abb. 4.1.3) [RWE 2004:34]. „Die politischen Krisen im Nahen Osten, Venezuela und Nigeria sorgten jedoch unabhängig von der OPEC-Politik für hohe Ölpreise, meist am oberen Rand oder sogar deutlich jenseits des Zielbandes. Eine echte Bewährungsprobe steht dem Kartell erst in den nächsten Jahren bevor, wenn nach einer Normalisierung in den Krisenländern und einer Erweiterung des Angebots außerhalb der OPEC deutliche Förderkürzungen der OPEC-Staaten erforderlich sind“ [RWE 2004:26]. Da Deutschland mit mehr als 80% des Energiebedarfs vom Import zumeist fossiler Energieträgern abhängig ist, muss auch aus geopolitischen Gründen ein zunehmendes Interesse an einem Ausbau regionaler, regenerativer Energiesysteme bestehen, um die Versorgungsabhängigkeit mittel- und langfristig zu mindern und zu beenden.

Klimawandel und Entkarbonatisierung des Energiesystems

Der in den vergangenen Jahrzehnten beobachtete Anstieg der Durchschnittstemperatur der erdnahen Atmosphäre und der Meere wird als globale Erwärmung bzw. Klimawandel bezeichnet. „Eine Erwärmung des Klimasystems ist eindeutig, wie nun aus Beobachtungen der Anstiege der mittleren globalen Luft- und Meerestemperaturen, dem ausgedehnten Abschmelzen von Schnee und Eis sowie dem Anstieg des mittleren globalen Meeresspiegels ersichtlich ist“ [IPCC 2008:2].

Als gegenwärtige wissenschaftliche Erklärung wird die Verstärkung des natürlichen Treibhauseffektes durch anthropogene Einflüsse angesehen. Vereinfacht beschrieben besagt der Treibhauseffekt, dass die auf die Erdoberfläche auftreffende kurzwellige Solarstrahlung in langwellige Wärmestrahlung umgewandelt und durch Absorption und Reflexion in der Atmosphäre an einer unmittelbaren vollständigen Rückstrahlung in den Weltraum gehindert wird. Dieser Wirkungsmechanismus bewirkt, dass durch die spezifische Zusammensetzung der Atmosphäre der globale Wärmehaushalt mit gesteuert wird. Die Zunahme der in der Atmosphäre wirksamen Treibhausgase Kohlendioxid (CO_2), Wasserdampf, Aerosole sowie Methan und Lachgas besonders seit Beginn der industriellen Revolution durch anthropogene Einflüsse wie die Verbrennung fossiler Energieträger, die zunehmende globale Entwaldung sowie die Praxis und Ausweitung der Land- und Viehwirtschaft führt dazu, dass heute sehr viel weniger Wärmestrahlung in das Weltall abgestrahlt wird und eine globale Temperaturerhöhung stattfindet. Darüber hinaus wird der Energiehaushalt der Erde nicht nur durch Treibhausgase, sondern auch durch Wolkenbildung und nichtanthropgene Einflüsse wie die Sonnenaktivität beeinflusst.

Nach Einschätzung des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), dem sogenannten Weltklimarat, wird eine Erwärmung um durchschnittlich 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau als Grenze einer gerade noch akzeptablen Klimaveränderung angenommen. Bei einer Erwärmung von mehr als 2°C werden irreversible ökologische Veränderungen prognostiziert, bis hin zum Aussterben zahlreicher Tier- und Pflanzenarten und dem völligen Kollaps von Ökosystemen. Erwartet werden auch eine starke Zunahme von extremen Klimaereignissen sowie ein Anstieg des Meeresspiegels mit negativen Auswirkungen in allen Weltregionen. Bei einer Erwärmung der mittlere globalen Erwärmung von über etwa 3,5°C deuten Modellprojektionen auf ein signifikantes Artensterben (40-70% der untersuchten Arten) weltweit hin [IPCC 2008:16]. Der *Wissenschaftliche Beirat der deutschen Bundesregierung Globale Umweltveränderungen* (WBGU) empfiehlt bereits seit 1994, die mittlere Erwärmung auf höchstens 2°C zu begrenzen. Das *2-Grad-Ziel* ist jedoch nur als eine politische Absichtserklärung zu verstehen, die bislang nicht in völkerrechtlich bindender Form verabschiedet worden ist.

Im vierten Sachstandsbericht des IPCC 2007 [http://www.de-ipcc.de/de/128.php] wurden für unterschiedliche Entwicklungsszenarien die *Wissenschaftlichen Grundlagen* (Arbeitsgruppe 1), die *Auswirkungen, Anpassung, Verwundbarkeiten* (Arbeitsgruppe 2) und Vorschläge zur *Verminderung des Klimawandels* (Arbeitsgruppe 3) vorgestellt [IPCC 2008]. Nach Einschätzung der Klimaforscher wird eine Fortsetzung der gegenwärtigen Praxis fossiler Energiewirtschaft und des forcierten Abbaus vor allem subtropischer Regenwälder verbunden mit einer Ausweitung von Land- und Viehwirtschaft zu Temperaturerhöhungen von 4°C bis 6°C führen. Es erscheint deshalb notwendig, dass der heutige Trend einer schnellen Zunahme der CO_2-Emissionen umgekehrt wird. Der IPCC nennt dazu vier wesentliche Strategien [Spreng 2003:7]:

- die Entkarbonisierung des Energieversorgungssystems durch den Einsatz erneuerbarer Energien
- Entsorgung von CO_2 (CO_2-Sequestrierung)
- rationellere Verwendung von Energie und
- Energiesparen, Reduktion des gegenwärtigen Konsumniveaus.

In der öffentlichen Diskussion wird der CO_2-Ausstoß bei der Energiewandlung als eine der Hauptursachen für den Treibhauseffekt angesehen. Seit der UNO-Konvention über Klimawandel im Jahre 1992 (UNFCCC 1992; http://unfccc.int/) wird intensiv über mögliche Maßnahmen zur

Emissionsreduktion von treibhausaktiven Gasen geforscht. Diese Maßnahmen sind zum Hauptziel nationaler und internationaler Klima- und Energiepolitik geworden. Die Diskussion über die Ursachen des Klimawandels wird dabei durchaus kontrovers geführt. Entgegen Vertretern des CO_2-Treibhausmodells wie Stefan Rahmstorf und Hans J. Schellnhuber [RAHMSTORF / SCHELLNHUBER 2007] sehen andere Wissenschaftler den Klimawandel nicht als Folge von CO_2-Emissionen, sondern als ein Resultat der großflächigen globalen Entwaldung und der damit verbundenen Zerstörung energiedissipativer Strukturen. „Die Dynamik von Wasser und Wasserdampf in Rückkopplung mit den Kontinentalflächen und ihrer Vegetationsdecke sowie den Meeresflächen stellt die wichtigste Komponente der physikalischen Verteilung (Dissipation) der Sonnenenergie dar und ist deshalb in ihrer Wirkungsweise den trockenen Klimagasen vorgeordnet. (...) Nur ökologisch intakte Flächen und angepasste Flächennutzungen sichern uns nachhaltig eine lebensfreundliche Umwelt“ [RIPL / SCHEER 2007:5].
Gestützt werden diese Hypothesen u.a. aus Forschungen zur Klimageschichte. Wolfgang Behringer beschreibt die Entwicklung der wissenschaftlichen Hypothesen zum Klimawandel [BEHRINGER 2007]. Auf der Grundlage von Sedimentanalysen und Radiokarbon-Analysen können präzise Aussagen über die atmosphärische Zusammensetzung und die Klimaentwicklung vergangener Jahrtausende und Jahrmillionen gemacht werden. Bereits in den 1960er Jahren wurden mit der Eiskernbohrtechnik detaillierte Darstellungen des Klimas für die letzten 150.000 Jahre erstellt, heutige Methoden erlauben einen Rückblick von bis ca. 800.000 Jahren [BEHRINGER 2007:21f.]. Die CO_2-Konzentrationen variierten in den letzten 500 Mio. Jahren auch ohne anthropogene Einflüsse erheblich und unabhängig von der CO_2- Konzentration kam es zu erheblichen Temperaturschwankungen. Ursachen hierfür sind u.a. auch Phasen verminderter Sonneneinstrahlung durch Schwankungen der Erdbahnparameter und der Einfluss von Vulkanaktivitäten auf die Atmosphäre. Demnach besteht keine eindeutige Evidenz, in welchem Ausmaß die CO_2- Konzentration in der Atmosphäre Ursache oder Folge von Klimaveränderungen ist [BEHRINGER 2007:30]. Auch das IPCC gesteht zu, dass die heutigen mathematischen Klimamodelle für die Erstellung sicherer Klimaprognosen noch nicht ausreichen. Unabhängig vom wissenschaftlichen Streit um das gültige Modell zur Erklärung der beobachtbaren klimatischen Veränderungen sprechen aber alle Gründe für eine mittelfristige Entkarbonatisierung des Energiesystems durch eine Umstellung auf erneuerbare Energiequellen.

4.1.4 Die Energiewirtschaft mit erneuerbaren Energien

Die Nutzung erneuerbarer Energiequellen stellt ein großes theoretisches und praktisches Potenzial zur Deckung des wachsenden globalen Energiebedarfs zur Verfügung. Letztlich sind nur die erneuerbaren Energien geeignet, die Probleme der Weltenergieversorgung dauerhaft zu lösen. Ihre Erschließung ist allerdings zu Zeit meist mit einem höheren technischen und ökonomischen Aufwand verbunden. Mit Erreichen von *peak oil* ist aber auch der ökonomische Anreiz für den Einsatz erneuerbarer Energien gestiegen [RWE 2004:14]. Bereits heute bestehen zahlreiche technische Lösungen, die mit der Nutzung fossiler Energieträgern ökonomisch konkurrieren können.
Die Deckung aller Energiebedürfnisse durch erneuerbare Energien erfordert eine optimale Umsetzung von drei Strategien:
1. die effizientere Nutzung von Energie (Ressourceneffizienz),
2. die Reduktion des Energiebedarfs durch neue Wohlstandsmodelle (Suffizienz),
3. die Erschließung und Nutzung von erneuerbaren Energiequellen (Ressourceneffektivität).

Erneuerbare Energiequellen nutzen Energiepotenziale, die sich letztlich auf Solarstrahlung, Gravitationskräfte oder geothermische Energien zurückzuführen lassen. Diese Systeme wandeln entweder Umgebungsenergie (Geothermie oder solarthermische Potenziale) in direkter Weise in Nutzenergie um oder nutzen die aus der rezenten Vegetation bereitgestellte biochemische Energie in Verbrennungsprozessen. Somit werden zwei grundlegend verschiedene Nutzungsweisen unterschieden: der *technische* und der *biochemische* Nutzungspfad.

Die verschiedenen Quellen und technischen Nutzungspfade sind in Abb. 4.1.4 dargestellt [KLEEMANN / MELISS 1993:3]. Bei biochemischen Energieträgern liegt die Nutzenergie bereits in speicherfähiger Form vor, während viele technische Wandlungspfade, wie die aktive Solarenergienutzung oder Windenergiekonverter, saisonalen oder stochastischen Schwankungen unterliegen, die – verbunden mit Energiewandlungsverlusten – weitere Speichersysteme benötigen. Aufgrund dieser Eigenschaft sind die biochemischen Energieträger neben der Wärmeerzeugung besonders zum Einsatz als Regelenergie und im Grundlastbereich der Stromerzeugung geeignet. Ähnlich verhält es sich mit der Tiefengeothermie. Auf die weiteren technischen und ökonomischen Grundlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien sei an dieser Stelle auf die umfangreiche Literatur verwiesen [KLEEMANN / MELISS 1993, KALTSCHMITT ET AL. 2003, KARL 2004].

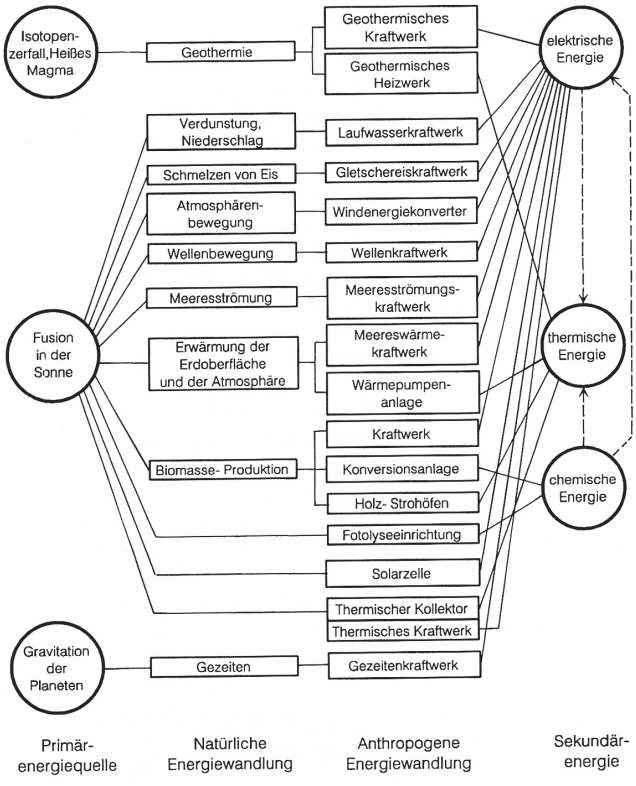


Abb. 4.1.3 Herkunft erneuerbarer Energien [KLEEMANN / MELISS 1993:3]

Für die effiziente Nutzung erneuerbarer Energien steht heute eine Vielzahl bewährter Technologien zur Verfügung. Die große Herausforderung liegt in deren Integration in das bestehende Energiesystem und dessen nachhaltige Transformation durch den Ausbau von KWK- und Kombikraftwerken in Verbindung mit Nah- und Fernwärmenetzen im Wärme und *smart grids* im Strombereich. Ein wesentliche Vorraussetzung dafür ist der Entwicklung leistungsfähiger Speichersysteme.

„Um das gegenwärtige Energieproblem dauerhaft zu lösen, bedarf es der Konstruktion eines der Natur analogen Systems von Kreisläufen, das geschlossen ist und nachhaltig betrieben werden kann. Es wird sich um ein System handeln, das langfristig verfügbare Formen von Primärenergie über verschiedene Formen von Nutzenergie letztlich in Wärme und Entropie umwandelt. Allein die physikalische Ernte der eingestrahlten Sonnenenergie würde ausreichen, das Energieproblem dauerhaft zu lösen, wenn wir über eine entsprechende Energieinfrastruktur mit den notwendigen Umwandlungs-, Transport- und Speichertechnologien verfügen würden. (...) Es geht also nicht darum, eine einzelne Speicher- oder Wandlungstechnologie auszusuchen und zu optimieren, sondern eine ganze Reihe von nebeneinander existierenden Technologien so zu verschalten („Energiemix“), dass ein nachhaltiger Zustand der Energiewandlung in der Technik entsteht“ [SCHLÖGEL / SCHÜTH 2008:256/258].

4.1.5 Energiesystemmodelle

Der Energiehaushalt urbaner Systeme besteht aus einer Vielzahl energetischer Prozesse. In der Energiewirtschaft werden für die Modellierung dieser Prozesse Energiesystemmodelle (ESM) verwendet. ESM werden zur Simulation von Energiesystemen eingesetzt und dienen unter Berücksichtigung von Kosten-, Umwelt- oder versorgungstechnischen Aspekten zur Entscheidungsunterstützung bei der strategischen Planung [BLESL 2002:5, STUIBLE 2002:14]. Für die Versorgungsunternehmen ist der Einsatz von ESM insbesondere für Investitionsplanungen von Bedeutung, da für die Planung und den Bau leitungsgebundener Versorgungsnetze wie Fernwärme- und Gasleitungsnetze ein hoher Investitionskostenanteil auf die Infrastruktur entfällt. Mit Hilfe von ESM lassen sich z.B. der Wärmebedarf eines Untersuchungsgebiets und die Grenzkosten für die Bereitstellung der Infrastruktur ermitteln. ESM leisten damit einen Beitrag für die ökonomische Betrachtung einer effizienten Versorgung und können klimapolitische Debatten sowie Entscheidungen zur Technologieentwicklung wesentlich beeinflussen.

In Abhängigkeit der zu untersuchenden Fragestellung werden alle relevanten Systembestandteile der Energiebereitstellung und Energienutzung wie Energiewandlung, -verteilung und -speicherung modellhaft abgebildet. Die das System beeinflussenden Parameter werden als mathematisches Modell repräsentiert. Veränderungen von Energieversorgungsanlagen werden als Szenarien durch die Variation der Parameter abgebildet. Der Status quo wird in der Regel als Referenzenergiesystem (RES) bezeichnet. Markus Blesl und Volker Krey geben in ihren Dissertationen jeweils einen typologischen Überblick zu bestehenden Energiesystemmodellen [BLESL 2002:5, KREY 2006:7f]. „Im Rahmen der strategischen Energieplanung wurden eine Reihe von Modellen (z.B. E3Net, IKARUS, MARKAL) entwickelt. Diese Energiesystemmodelle sind als Mehrperiodenmodelle konzipiert, damit in die Zukunft reichende Entwicklungen hinsichtlich ihrer Gestaltungs- und Beeinflussungsmöglichkeiten analysiert werden können, um Rückschlüsse auf heute zutreffende Entscheidungen zu ziehen.“ (..) Es handelt sich hierbei zumeist um Punktmodelle“ [BLESL 2002:5]. Für die Berücksichtigung geographischer Informationen und deren hierarchische Unterteilung wurden Flächenmodelle entwickelt, mit deren Hilfe eine kostenoptimale Wärmeversorgungsstruktur für Siedlungsgebiete bestimmt werden kann.

Die vom Deutschen Umweltbundesamt beauftragte Studie *Systematische Analyse der Eigenschaften von Energiemodellen im Hinblick auf ihre Eignung für möglichst praktische Politikberatung zur Fortentwicklung der Klimaschutzstrategie* gibt einen weiteren Überblick und eine Bewertung von ESM [KOCH ET AL. 2001]. Es werden dort die vier Modelltypen *allgemeine Gleichgewichtsmodelle, Input-Output-Modelle, Optimierungsmodelle* und *Simulationsmodelle* und deren Anwendung vorgestellt und systematisch verglichen. Schließlich werden die Gründe für die Unterschiedlichkeit von Ergebnissen am Beispiel von Beschäftigungswirkungen, der Kraft-Wärme-Kopplung und des Verkehrssektors erörtert.

Mit dem Modell URBS hat Stephan Richter in seiner Dissertation einen weiteren Ansatz zur Modellierung urbaner Energiesysteme entwickelt [RICHTER 2004]. In dem Modell werden die derzeitige, auf fossilen Energieträgern beruhende Energieversorgung in einem Referenzenergiesystem (RES) abgebildet und Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien in optimierten Energiesystemen

(OES) simuliert. Der methodische Ansatz besteht in einer Kombination der Eigenschaften von Energiesystemmodellen und Netzwerkflussmodellen in einem neu entwickelten Flächenmodell, das die Anforderungen an eine räumlich hoch aufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme erfüllt. Das Modell setzt sich aus vier funktionalen Untergruppen zusammen, die mit den Parametern Stadtentwicklung, Energienachfrage, Energietechnik und Umwelt in Form eigenständiger Module abgebildet und hinsichtlich verschiedener Entwicklungsszenarien untersucht werden (Abb. 4.1.5) [RICHTER 2004:6]. „Bei den OES handelt es sich um sehr komplexe Energiesysteme, in denen eine Reihe von Alternativen verfügbar sind: gekoppelte und ungekoppelte Produktion von Elektrizität und NT-Wärme, Versorgungstechniken mit einer regenerativen und fossilen Primärenergienutzung, Hausbrandsystemen und leitungsgebundenen Nahwärmesystemen. (...) Letztlich wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Es wird gezeigt, welche Einflussgrößen Auswirkungen auf die optimale Zusammensetzung des Technikparks haben und welche Auswirkungen auf die Emissions- und Kostenbelastung folgen“ [RICHTER 2004:97].
Das Modell dient insbesondere der Abbildung von KWK-Technologien. Durch das Umweltmodul werden u.a. die Feinstaubemissionen abgebildet, die ein Ausbau von dezentralen KWK-Anlagen auf Grundlage biogener Energieträger (Holz) nach sich ziehen. Das Modell wurde am Beispiel der Stadt Augsburg entwickelt und wird heute u.a. von den Münchener Stadtwerken zur Optimierung der Fernwärmesysteme eingesetzt. In der Anwendung auf die Stadt Augsburg wird ausschließlich der immobile Teil des Energiesektors (Gebäude) untersucht, wobei der Anteil an Prozesswärme zur industriellen Produktion der Baustoffe und Produkte nicht berücksichtigt wird. Der Verkehrssektor wird ebenfalls nicht in die Betrachtung einbezogen.

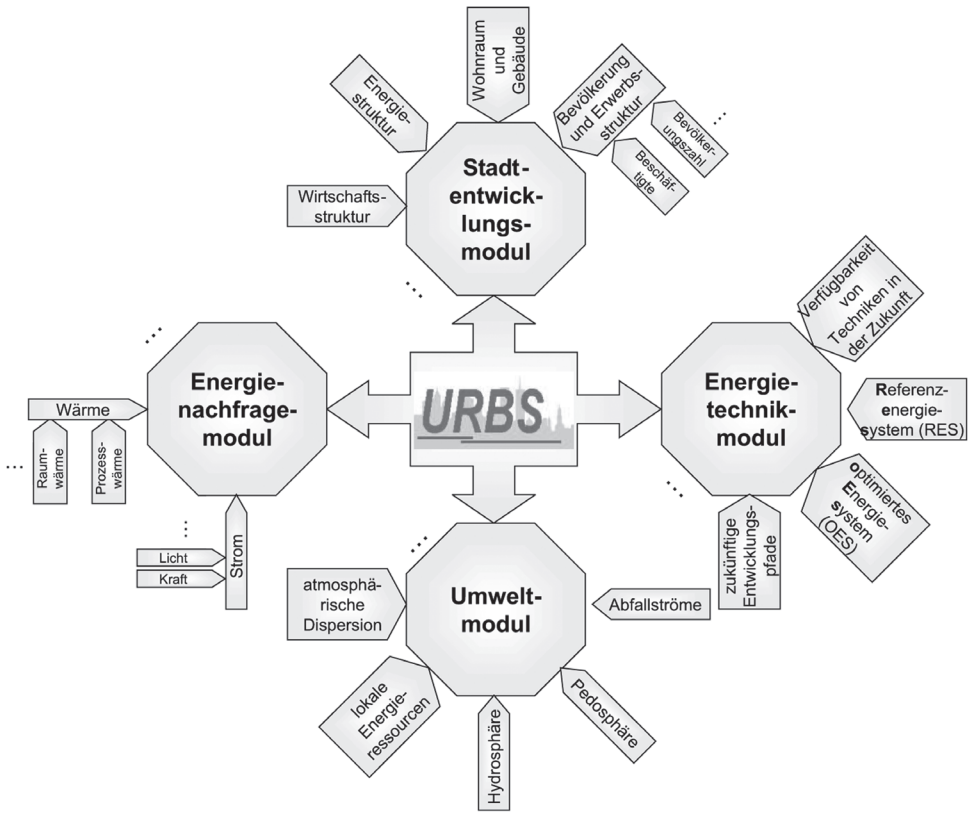


Abb. 4.1.4 Graphischer Überblick über die Methode URBS [RICHTER 2004:6]

4.1.6 Der Einsatz von GIS zur Ermittlung von Potenzialen erneuerbarer Energien

Ein Geoinformationssystem (GIS aus dem englischen für *Geographic Information System*) besteht aus einem rechnergestützten System, um raumbezogene Daten digital zu erfassen und für verschiedene Anwendungen nutzbar zu machen [LAKES 2006:21]. Es bildet eine Grundlage für raumbezogene Planungsinformationssysteme oder Umweltinformationssysteme (UIS) und wird für die Landschaftsanalyse und deren Bewertung verwendet. Aufgrund der Flächenabhängigkeit vieler erneuerbarer Energien ist GIS ein geeignetes Instrument für deren Potenzialabschätzung.

Zunächst sind verschiedene Potenzialbegriffe bei der Nutzung erneuerbarer Energien zu unterscheiden. Kleemann und Meliß unterscheiden vier verschiedene Potenzialbegriffe [KLEEMANN / MELISS 1993:19]:

• Das **theoretische Potenzial** beschreibt das gesamte physikalische Angebot eines erneuerbaren Energieträgers im betrachteten Untersuchungsgebiet zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. innerhalb eines bestimmten Zeitraumes. Da die Nutzungsmöglichkeit aufgrund klimatischer, saisonaler und anderer Faktoren stark schwankt, bezieht sich das theoretische Potenzial im Allgemeinen auf ein langjähriges Mittel des Energieangebots. Das theoretische Potenzial kann aufgrund technischer, struktureller und administrativer Restriktionen (z.B. Anlagenwirkungsgrad) zumeist nur zu sehr geringen Anteilen erschlossen werden.

• Das **technische Potenzial** bezeichnet den Anteil des theoretischen Potenzials, der unter Berücksichtigung der derzeitigen technischen, strukturellen und gesetzlichen Vorgaben nutzbar ist . Es werden technischen Möglichkeiten und die Standortverfügbarkeit z.B. im Hinblick auf konkurrierende Nutzungen und weitere nichttechnische Beschränkungen berücksichtigt.

• Das **wirtschaftliche Potenzial** ist der zeit- und ortsabhängige Anteil des technischen Potenzials, der im jeweils betrachteten Energiesystem wirtschaftlich erschlossen werden kann. Es beschreibt den maximalen Ertrag, der sich einstellt, wenn das betrachtete System die kostengünstigste Alternative darstellt. Da es verschiedene Möglichkeiten zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit gibt und Veränderungen der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wie z.B. des Ölpreises diese beeinflussen, existieren immer eine Vielzahl unterschiedlicher wirtschaftlicher Potenziale.

• Das **Erwartungspotenzial** oder **erweiterte wirtschaftliche Potenzial** berücksichtigt die Markteinführungsgeschwindigkeit, die Gesamtkosten unter Einbeziehung der Investitions-, Wartungs- und Betriebskosten sowie alle anderen wirtschaftlichen Einflussfaktoren wie staatliche Fördermaßnahmen und die Konkurrenzfähigkeit.

Auf der Grundlage von Geoinformationsdaten lassen sich zunächst die theoretischen Potenziale abschätzen. Durch die Ergänzung mit Modellen zur Bestimmung des technischen, wirtschaftlichen und erweiterten wirtschaftlichen Potenzials können Szenarien oder konkrete Nutzungskonzepte erneuerbarer Energien entwickelt werden. In der Praxis bestehen bereits Anwendungen zur Ermittlung der Potenziale aus aktiven Solarenergiesystemen zur Wärme- oder Stromerzeugung, aus landwirtschaftlicher Biomassenutzung und zur Optimierung netzgebundener Infrastrukturen.

Für die Ermittlung der **Solarenergiepotenziale** gab es bereits Anfang der 1990er Jahre eine Forschungsarbeit von Andreas Brockmöller zum *Einsatz dezentraler Photovoltaikanlagen auf den Berliner Dächern* [BROCKMÖLLER 1992]. Dagmar Everding entwickelte mit der *solaren Gütezahl* eine Methode, die das nutzbare Dachflächenpotenzial für den Einsatz aktiver solarer Energiesysteme im Verhältnis zum Nettobauland (Gebäudegrundfläche und nicht bebaute Grundstücksfläche) abbildet [EVERDING 2007:215f.]. Für verschiedene Stadtstrukturtypen wurden anhand empirischer Beispiele Kennzahlen ermittelt, die eine überschlägige Abschätzung des energetischen Potenzials ermöglichen. Da die lokale solare Orientierung der Gebäude nicht einbezogen wird, ist diese Abschätzung allerdings mit großen Ungenauigkeiten verbunden.
Im Auftrag der Berliner Senatsverwaltung wurde nach dieser Methodik 2006 ein solarer Rahmenplan für die Wärmeversorgung Berlins erstellt. Unter Berücksichtigung einer konkurrierenden Flächennutzung unter Einbeziehung von Fernwärme und Gas zur Wärmeversorgung und einer Wärmebedarfsreduzierung aufgrund baulicher Erneuerungszyklen ergibt sich demnach ein Erwartungspotenzial von ca. 12% für die solarthermische Nutzung und 12% für Photovoltaik als Beitrag zur Energieversorgung bis 2050 [EVERDING / LINDNER 2007:42]. Die Ergebnisse sind im Berliner Umweltatlas veröffentlicht [SENSTADT BERLIN 2008d].
Eine genauere Ermittlung der solaren Potenziale von urbanen Systemen ist durch die Verwendung von GIS-gestützten Studien möglich. Martina Klärle hat unter Verwendung der von ihr entwickelten Software *Sun Area* ein internetbasiertes Solardachkataster für die Stadt Osnabrück erstellt [KLÄRLE / LUDWIG 2006, 2007]. Das Programm berücksichtigt bei der Standortanalyse die Exposition zur Sonne, den Dachneigungswinkel und Verschattungen und erlaubt damit eine präzise Abschätzung des theoretischen Potenzials. Die Pilotstudie für Osnabrück zeigt, dass ca. 20% der Dachfläche sehr gut für die Nutzung von PV-Anlagen geeignet sind. Für das Untersuchungsgebiet ergibt sich ein potenzieller Stromertrag von über 227 Mio. kWh/a durch dachintegrierte PV-Anlagen. Bei einem Investitionsvolumen von 454 Mio. Euro für die PV-Anlagen ohne Berücksichtigung von Speichersystemen könnte damit ca. 97% des Strombedarfs der privaten Haushalte abgedeckt werden [KLÄRLE 2007:34].

Für die Ermittlung landwirtschaftlicher **Biomassepotenziale** zur Erzeugung erneuerbarer Energien wurde an der FH Eberswalde ein Biomasse-Ertragsmodell (*biomass-yield-model = bym*) entwickelt (Abb. 4.1.6). Auf der Grundlage von Geodaten mit hoher räumlicher Auflösung, die mit Klima- und Bodenparameter gekoppelt werden, kann mit dem Modell für regionalspezifische und standortangepasste Fruchtfolgen das jährliche theoretische Biomasseaufkommen berechnet werden. So können Anbaustrategien und die Standortwahl von Bioenergieanlagen ermittelt und bewertet werden. Es können auch die verschiedenen Nutzungspfade zur stofflichen oder energetischen Verwertung landwirtschaftlicher Erzeugnisse hinsichtlich der Flächenkonkurrenz zwischen Nahrungs- bzw. Futtermittelindustrie und der Produktion von Bioenergie miteinander verglichen werden. Landnutzungssysteme können damit hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit beurteilt werden, und die Abschätzung des Infrastrukturbedarfes ermöglicht eine ökologische und ökonomische Optimierung der Standortwahl von Biomassehöfen und eine Nutzungsoptimierung der nachwachsenden Rohstoffe [PIORR ET AL. 1998, BRONZIO ET AL. 2006, 2008].

Eine weitere Anwendung von GIS ist die Erstellung von **Wärmekatastern** zur Optimierung und zum Ausbau von Fern- oder Nahwärmenetzen in Verbindung mit Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung

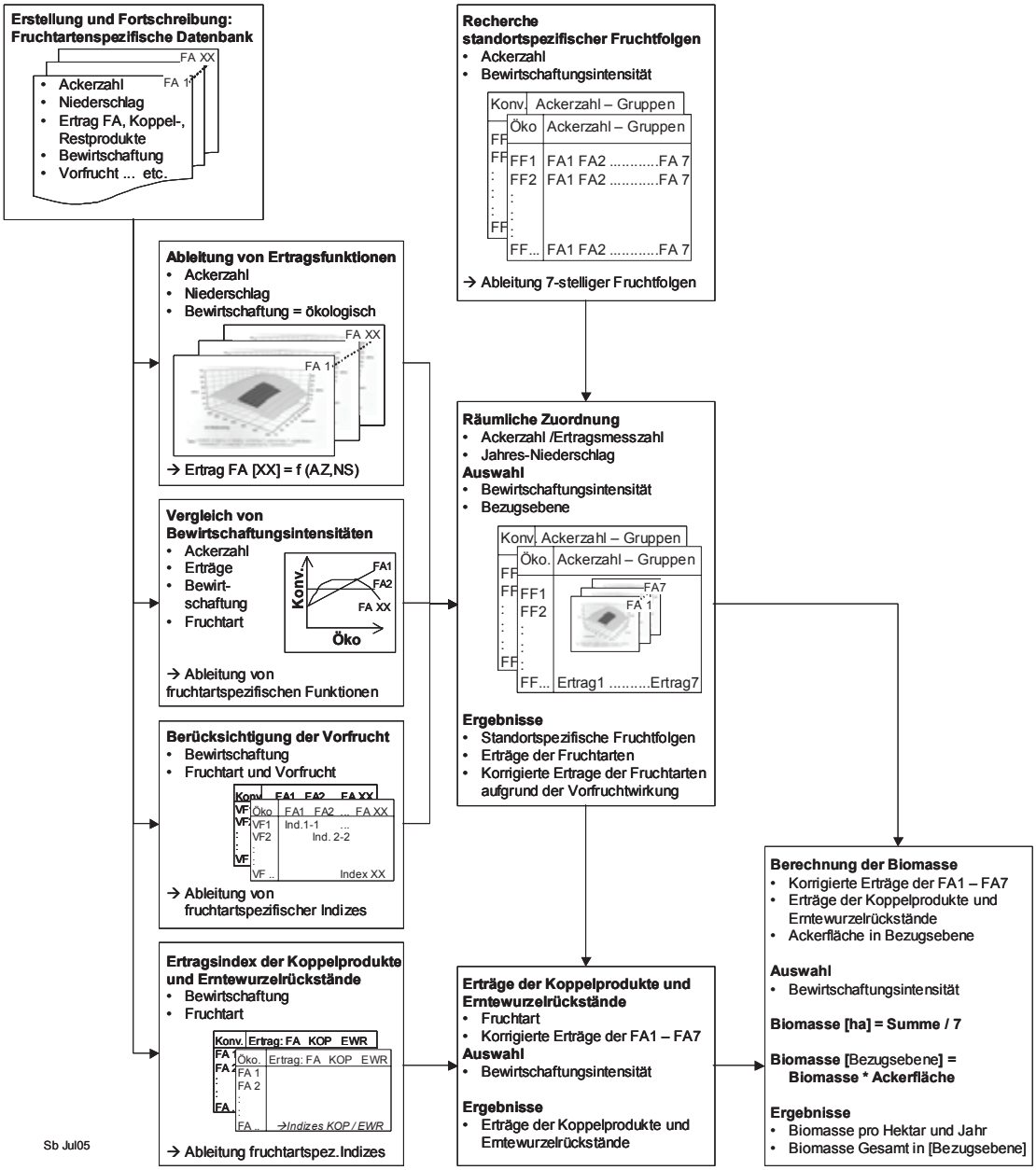


Abb. 4.1.5 Ermittlung von Biomasseerträgen, Ablaufdiagramm des *bym* [BRONZIO ET AL. 2006:46]

(KWK). In dem Forschungsprojekt der Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft (AGFW) *Pluralistische Wärmeversorgung* [AGFW 2004] wurden u.a. Verfahren zum Aufbau von digitalen Wärmekarten untersucht. Das Ziel der Erstellung von sogenannten GIS-gestützten Wärmeatlanten ist, differenzierte Aussagen zur Struktur des zukünftigen Kraftwerkparks und zu zukünftigen Energieversorgungssystemen unter Berücksichtigung von umwelt- und energiepolitischen Aspekten zu machen. Dafür werden bestehende Energiesystemmodelle durch GIS erweitert, um in Szenarien die Auswirkungen unterschiedlicher leitungsgebundener Versorgungsvarianten und des wachsenden Anteils erneuerbarer Energieträger zu untersuchen.

Ein Ergebnis dieser Studie ist, dass der Einsatz moderner KWK-Anlagen zu den kostengünstigsten Möglichkeiten für die Reduktion klimawirksamer Emissionen gehört. Hierfür können KWK-Anlagen unterschiedlicher Skalierungen in zentralen oder dezentralen Versorgungskonzepten eingesetzt werden. Eine Voraussetzung hierfür ist allerdings ein weitgehender Brennstoffwechsel von Kohle zu Gas [AGFW 2004, Bd.1:10].

4.2 Energieeffizientes Bauen

4.2.1 Zur Entwicklung gesetzlicher Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden

Die Entwicklung der gesetzlichen Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden zeigt, dass sich ausgehend von einem genügend starken Problembewusstsein (Ölpreiskrise und Klimaschutz) in einem relativ kurzen Zeitraum technologische Entwicklungen, die einer nachhaltigen Entwicklung dienen, zu einer Marktdurchdringung gelangen können, wenn der Gesetzgeber entsprechende Rahmenbedingungen schafft.
Abgesehen von der Berücksichtigung bauphysikalischer Mindeststandards (DIN 4108) gab es bis in die 1970er Jahre hinein keine gesetzlichen Einschränkungen des Energiebedarfs von Gebäuden. Mit der Ölpreiskrise 1973 setzte allmählich ein allgemeines Umdenken hinsichtlich der Nutzung fossiler Energieträger ein. Die Wahrnehmung der Endlichkeit fossiler Energieressourcen, die große Importabhängigkeit und der damit verbundene volkswirtschaftlich relevante finanzielle Kapitalabfluss führten auch zu ersten politischen Reglementierungen.1976 trat das *Energieeinspargesetz* in Kraft, auf dessen Grundlage 1977 die *Wärmeschutzverordnung* (WschVO) und *Heizanlagenverordnung* (HeizAnlV) verabschiedet wurden. Die WschVO galt für alle Gebäude mit normalen Innentemperaturen ohne Differenzierung nach der Nutzung (Wohn- oder Nicht-Wohngebäude). Als Bewertungskriterium war die Begrenzung der Transmissionswärmeverluste durch eine Vorgabe maximal zulässiger U-Werte und der Lüftungswärmeverluste durch die Begrenzung der Fugendurchlasskoeffizienten festgelegt. Mit der ersten Novellierung der WschVO 1984 wurden zusätzlich Anforderungen bei baulichen Veränderungen an bestehenden Gebäuden festgelegt. Die zweite Novellierung, die WschVO 1995, führte als Zielgröße den maximal zulässigen Jahres-Heizwärmebedarf ein, welche die bis dahin geltende Bewertung einer Begrenzung der maximal zulässigen U-Werte und der Begrenzung der Fugendurchlasskoeffizienten ablöste [HAUSER / MAAS 1994:2].

Mit der *Energie-Einsparverordnung* (EnEV) trat am 1.2.2002 eine neue Verordnung in Kraft, welche erstmalig die gegenseitigen Abhängigkeiten von Konstruktion und Gebäudetechnik in einer gesetzlichen Norm hinreichend berücksichtigte. Die EnEV führte Anforderungen an die Gebäudehülle aus der WschVO mit den wärmetechnischen Anforderungen aus der Heizanlagenverordnung zu einer ganzheitlichen Bilanzierungsmethode zusammen. Als Kriterium wurde eine Begrenzung des maximal zulässigen Primärenergiebedarfs für Heizung und Warmwasserbereitung festgelegt, wobei auch der Hilfsenergiebedarf für die haustechnischen Anlagen berücksichtigt wurde.

Die *Europäische Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden* vom 16.12.2002 legte auf europäischer Ebene fest, dass ab 2006 jedes Gebäude bei Erstellung, Verkauf oder Mieterwechsel einen Energiepass erhalten soll, um den Nutzern in ihren Kauf- oder Mietentscheidungen eine größere Wahlmöglichkeit zu geben. Ähnlich wie bei Deklarationen zum Energieverbrauch von Haushaltsgeräten erhofft sich der Gesetzgeber durch Transparenz bei der energetischen Qualität von Gebäuden über Marktmechanismen einen Investitions- und Innovationsanreiz zu mehr Energieeffizienz beim Neubau und der Altbausanierung zu schaffen. Mit der EnEV 2007 wurde diese Richtlinie in Deutschland im Neubau durch die Deklarationspflicht von *Bedarfsausweisen* und im Bestand weitgehend von *Verbrauchsausweisen* umgesetzt. Ein Bedarfsausweis wird auf der Grundlage von Energiebedarfsrechnungen erstellt, Verbrauchsausweise werden durch Verbrauchsabrechnungen

aus den vorhergehenden Jahren ermittelt. Für öffentliche Gebäude besteht zusätzlich eine Aushangspflicht. Gemäß EU-Richtlinie ist in einem Energiepass ein Energiekennwert anzugeben, der die Gesamtenergieeffizienz des Gebäudes repräsentiert. In Deutschland wurde dafür die DIN V 18599 Teil 1-10 entwickelt, die mit der EnEV 2007 für Nicht-Wohngebäude und mit der EnEV 2009 auch für Wohngebäude gilt. Für Wohngebäude gilt allerdings ein vereinfachtes Verfahren.

Mit jeder Novellierung der WschVO und der EnEV wurden die gesetzlich einzuhaltenden Grenzwerte gesenkt, um die Energieeinsparung zu erhöhen. Die Novellierung der EnEV 2007 erhob den Niedrigenergiehausstandard bei Neubauten zumindest rechnerisch zur Norm. Mit dem so genannten Referenzgebäudeverfahren wurde für Nicht-Wohngebäude auch ein neues Bilanzierungsverfahren eingeführt. Mit der Novellierung der aktuell gültigen EnEV 2009 wurde der Grenzwert nochmals um ca. 30% reduziert und das Referenzgebäudeverfahren wurde auch auf Wohngebäude ausgedehnt [BMJ 2009a]. Flankiert wurden die Verschärfungen der EnEV 2009 durch das *Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich* (EEWärmeG), das am 1.1.2009 in Kraft trat und 2011 novelliert wurde [BMJ 2011, TUSCHINSKI 2011]. Das Ziel des EEWärmeG ist der Klimaschutz und die Schonung fossiler Ressourcen durch eine Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Wärme (Raum-, Kühl- und Prozesswärme sowie Warmwasser). Bis zum Jahr 2020 soll der Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtbedarf für Wärme in Gebäuden auf 14% steigen. Zugleich soll damit die Weiterentwicklung von Technologien zur Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien gefördert werden. Das Gesetz sieht vor, dass bei Neubauten ein Mindestanteil des Wärmebedarfs durch erneuerbare Energien gedeckt werden muss, d.h. konkret: 15% bei solarthermischen Anlagen, 30% bei Nutzung gasförmiger Biomasse, 50% bei Nutzung flüssiger oder fester Biomasse, Geothermie oder Umweltwärme und 50% bei Nutzung von KWK-Anlagen (als zulässige Ersatzmaßnahme) [BMJ 2011:5]. Mit der Neufassung der EU-Gebäuderichtlinie 2010 werden in den EU-Ländern ab 2020 Neubauten nur noch Niedrigstenergiegebäude wie Passiv- und (Fast-) Nullenergiegebäude zulässig sein [EU 2010:21].
Die Entwicklung der gesetzlichen Anforderungen wurde von öffentlichen Forschungsprogrammen begleitet. Die Zusammenhänge des Energiehaushalts von Gebäuden sind heute wissenschaftlich sehr gut erforscht. Es wurden ganzheitliche Bilanzierungsmethoden entwickelt, die u.a. zu einer Verschiebung und Vergrößerung der Bilanzgrenzen vom System *Gebäude* zum System *Gebäude und Versorgungsebene* geführt haben. Es wird aber auch kritisiert, dass der Bilanzierungsaufwand mit der Steigerung der Komplexität zu aufwendig und in der praktischen Umsetzung kaum noch überprüfbar geworden ist. Zudem kann das Benutzerverhalten nur nicht unzureichend berücksichtigt werden, und die für die Herstellung der Baustoffe, Bauteile und Gebäude benötigten Energien werden in der heutigen Praxis nicht bewertet.

4.2.2 Energieeffiziente Gebäude – Standards und Pilotprojekte

Die Innovationen der letzten 30 Jahre in der Bautechnologie und in industriellen Fertigungsprozessen für Elemente der Baukonstruktion und Systeme der technischen Gebäudeausrüstung haben in Verbindung mit differenzierten Planungs- und Simulationswerkzeugen das energieeffiziente Bauen zumindest im Neubau zu einem Standard gemacht. Hoch beanspruchbare Dämmmaterialien, wärmebrückenfreie Konstruktionselemente, Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung, Erdreich-

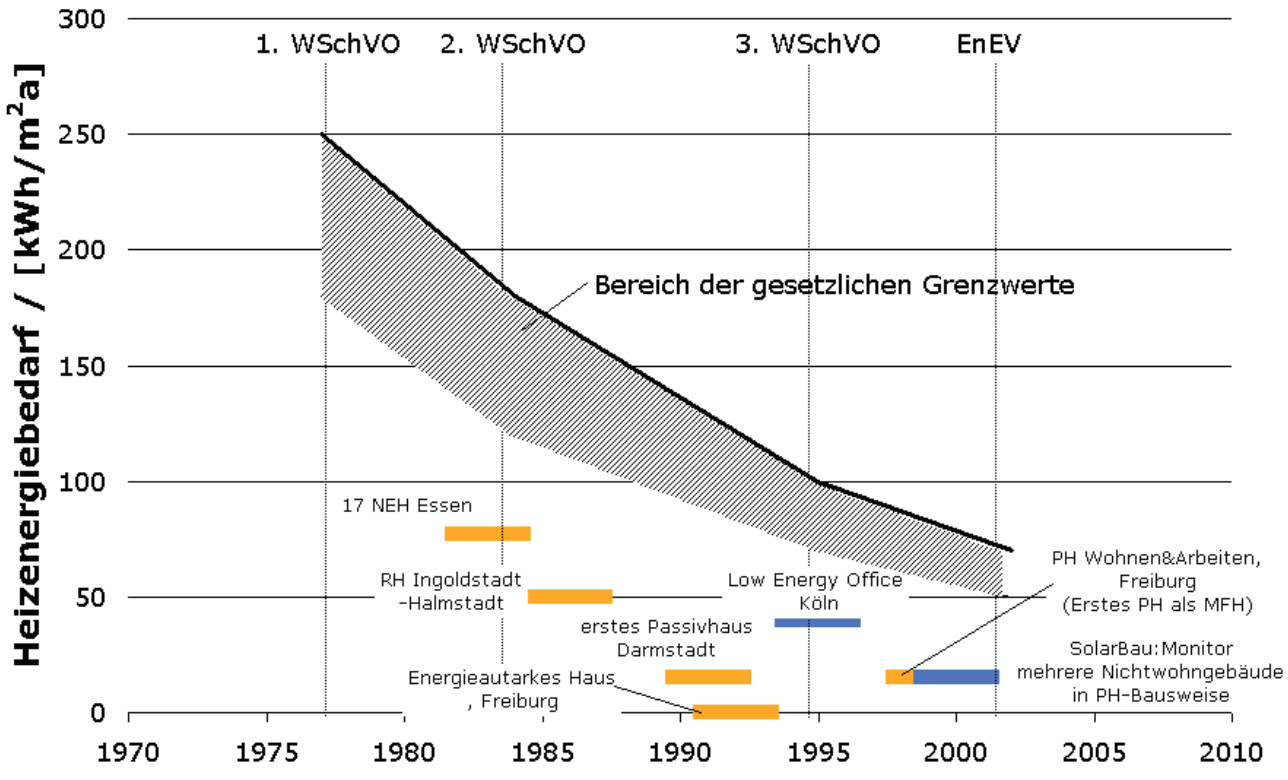


Abb. 4.2.1 Entwicklung der Anforderungen an den Heizenergiebedarf und Pilotprojekte zum energieeffizienten Bauen [Zero-Haus, URL: http://www.zero-haus.de/bilder/diagramm-qh.gif]

wärmetauscher, die Optimierung aktiver Systeme zur thermischen oder elektrischen Solarenergienutzung und deren Gebäudeintegration und vieles mehr sind heute Stand der Technik und Praxis. Vorangetrieben wurde diese Entwicklung durch zahlreiche Forschungsvorhaben und Pilotprojekte. Die normativen Vorgaben des Gesetzgebers in Form von Wärmeschutzverordnungen usw. hinken den in den sogenannten *best practice* - Beispielen realisierten technologischen Möglichkeiten etwa ein bis zwei Jahrzehnte hinterher (Abb. 4.2.1). Der Grund hierfür mag im langwierigen Prozess politischer Willensbildung, in der institutionellen Laufzeit politischer Abwägungs- und Umsetzungsverfahren und in der Rücksichtnahme auf Interessen in der Bau- und Immobilienwirtschaft liegen.
Im Folgenden werden kurz einige der wichtigsten Standards und Pilotprojekte für die Entwicklung in Deutschland beschrieben. Die Darstellung beschränkt sich auf Wohnungsbau, da eine Darstellung der Entwicklungen im Nicht-Wohnungsbau, z.B. Konzepte für *schlanke Gebäude* im Bürobau [VOSS ET AL. 2006], über die in dieser Arbeit untersuchten Fragestellungen hinausgeht.

4.2.3 Energiesparhäuser und Solararchitektur

Die Entwicklung des energieeffizienten Bauens war in Deutschland zunächst durch die Optimierung der passiven Solarenergienutzung geprägt. Dies erfolgte zunächst zumeist durch architektonisch-funktionale und baukonstruktive Maßnahmen wie die konsequente Südorientierung der Gebäude, Ergänzung von Wintergärten zum Wärmegewinn oder als thermische Puffer, Grundrisszonierung und Ausnutzung der thermischen Speicherfähigkeit des Gebäudes. Später folgten der Einsatz von Lüftungsanlagen, Niedertemperaturheizungen oder thermischen Solaranlagen zur Warmwasseraufbereitung oder Heizungsunterstützung.

Im Rahmen der *Internationalen Bauausstellung* (IBA) 1984-1987 in Berlin und der *Internationalen Gartenbauausstellung* (IGA) 1993 in Stuttgart wurden so genannte Energiesparhäuser oder Solarhäuser von den Architekten Hasso Schreck / IBUS aus Berlin, Dieter Schempp / log id und Joachim Eble aus Tübingen, Hegger/Hegger/Schleiff aus Kassel – um nur einige der damals wichtigsten Protagonisten zu nennen –, realisiert.
Die wohl herausragendste Persönlichkeit solaren und klimagerechten Bauens in Deutschland ist Thomas Herzog. Seit seiner Bürogründung 1972 befasste sich Herzog intensiv damit, den wissenschaftlichen und technologischen Forschritt und speziell die Nutzungsmöglichkeiten von Solarenergie in seine Entwürfe einzubeziehen. Aus den Anforderungen der Aufgabenstellung und den spezifischen Randbedingungen entwickelte Herzog mit besonderem Anspruch an die ästhetische Qualität systematisch und experimentell innovative Lösungen, die er als *Leistungsform* bezeichnet [http://www.herzog-und-partner.de/deutsch/allgemeines/firmenphilosophie.html]. Neben zahlreichen Wohnungs- und Nicht-Wohnungsbauprojekten entstanden auch städtebauliche Planungen, wie die Solarcity Linz in Zusammenarbeit mit Renzo Piano, Norman Foster und Richard Rogers (READ-Gruppe) [TREBERSPURG 2007].

Mit einem seiner ersten Gebäude, dem Wohnhaus in Regensburg (1977-1979), entwickelte Herzog gleichsam den Prototypen eines passiven Solarhauses (Abb. 4.2.2). Das Wohnhaus ist in thermisch abgestufte Zonen unterteilt. Die Erschließung liegt außerhalb des Gebäudes an der Nordseite.
Im Inneren schliesst sich eine Nebenraumzone mit Installationen an. Eine große, nach Süden orientierte Schrägverglasung sammelt in einem Wintergarten die Solarstrahlung. Die erwärmte Luft verteilt sich über die Durchgangsräume im Haus. Die Speichermasse der Bodenplatte nimmt die gesammelte Wärme auf und gibt sie zeitverzögert wieder ab. Während der beheizte Wohnbereich als kompakte Teilzone im Westen liegt, sind die Nebenräume als thermische Pufferzonen ausgebildet. Die Lüftung erfolgt passiv durch den natürlichen thermischen Auftrieb [Herzog 1992:18f.]. In späteren Gebäuden hat Herzog auch die Integration aktiver Solarenergienutzung thematisiert.

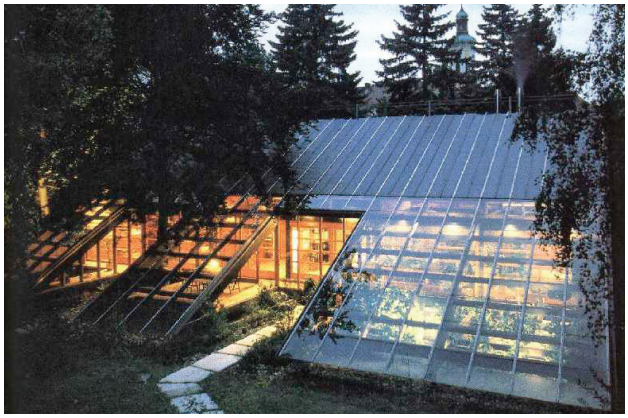


Abb. 4.2.2 Solarhaus in Regensburg
Architekt: Thomas Herzog
[Herzog 1992:18f.
Foto: Richard Schenkirz]

4.2.4 Niedrigenergiehäuser

In den 1970er und 80er Jahren waren es die skandinavischen Länder, insbesondere Schweden, die das Wissen um energieeffizientes Bauen weiterentwickelten. Bereits seit den 1970er Jahren arbeiteten einige Architekten und Wissenschaftler an der Verwirklichung von Nullenergiehäusern (KORSGAARD 1976, HÖRSTER 1980, SHURCLIFF 1981) [FEIST 1996:81]. Abgesehen von wenigen teuren Pilot- und Forschungsprojekten ließen sich diese aber nicht ökonomisch realisieren, da die Bautechnologie, insbesondere eine preisgünstige Herstellung hochwertiger Gläser und Fenster, noch nicht entwickelt war. Demgegenüber erwies sich die Niedrigenergiehaus (NEH)-Bauweise als

ein kostengünstiger und technisch einfach zu realisierender Standard. Anfang der achtziger Jahre waren in Schweden zahlreiche Niedrigenergiehäuser als Forschungs- und Demonstrationsprojekte gebaut worden, seit Mitte der achtziger Jahre wurden sie zu einer allgemeinen Baupraxis und seit 1991 zum gesetzlichen Standard [FEIST 1996:81].
Niedrigenergiehäuser haben einen Jahresheizwärmebedarf von maximal 70 kWh / (m^2a) bezogen auf die Wohnfläche. Sie werden heute ohne besonderen baulichen und ökonomischen Mehraufwand hergestellt und kommen mit einfachen und kostengünstigen Abluftanlagen aus. Die Zusammenhänge und Details der NEH-Bauweise sind ausführlich beschrieben worden [FEIST 1997, KAISER / HAISTINGS 1998]. Neben den Forschungsaktivitäten von Feist u.a. am Darmstädter Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) übernahm ab 1997 das Bundesland Nordrhein-Westfalen mit dem Förderprogramm *50 Solarsiedlungen in NRW* eine Vorreiterrolle bei der Entwicklung von Solarsiedlungen in Deutschland [ENERGIEAGENTUR NRW 2008]. Mit der Novellierung der EnEV 2007 ist der NEH-Standard auch in Deutschland zur rechtsverbindlichen Norm geworden.

4.2.5 Passivhäuser

Die technologische Konzeption des Passivhauses entstand 1988 aus der Zusammenarbeit von Wolfgang Feist, damals Mitarbeiter am Darmstädter Institut Wohnen und Umwelt (IWU), und Prof. Bo Adamson von der Universität Lund aus der konsequenten Weiterentwicklung des Niedrigenergiehauses [FEIST 2006:2].
Ein Passivhaus ist ein Gebäude, das durch die optimale Nutzung der durch die Fenster eingestrahlten Sonnenenergie und der inneren Wärmequellen im mitteleuropäischen Klima einen sehr geringen Heizwärmebedarf aufweist und daher keine aktive Heizung mehr benötigt.



Abb. 4.2.3 Passivhaus Darmstadt-Kranichstein
Architekt: Bott, Ridder, Westermeyer
[Foto: Prytula 2009]

Solche Häuser können allein durch eine geringfügige Frischlufterwärmung warm gehalten werden. Aufgrund der innenseitig höheren Oberflächentemperaturen der Hüllflächen und der kontrollierten Lüftung bietet es einen erhöhten Wohnkomfort bei einem Heizwärmebedarf von weniger als 15 kWh/(m^2a) und einem Primärenergiebedarf einschließlich Warmwasser und Haushaltstrom von unter 120 kWh/(m^2a). Im Vergleich zum NEH benötigt ein Passivhaus aber 80% und im Vergleich zu einem konventionellen Gebäude sogar über 90% weniger Heizenergie. Der theoretische Beweis für die Realisierbarkeit solcher Häuser wurde 1993 von Feist in seiner Dissertation *Passivhäuser in Mitteleuropa* [FEIST 1993] mit Hilfe von rechnergestützten Simulationen des Energiehaushaltes von Gebäuden erbracht [FEIST 2006:2].
Das erste Passivhaus in Deutschland wurde im Oktober 1991 in Darmstadt - Kranichstein fertiggestellt (Abb. 4.2.3). Es wurde von den Architekten Bott, Ridder und Westermeyer als dreigeschossiges Reihenhaus mit vier Wohneinheiten mit jeweils ca. 156 qm Nutzfläche und unter der wissenschaftlichen Leitung des IWU geplant und errichtet. Es wird seither von vier Familien bewohnt und wurde besonders in der Anfangsphase messtechnisch über mehrere Heizperioden hinweg begleitet. Der gemessene Heizenergieverbrauch liegt unter 15 kWh/(m^2a). Der gesamte Endenergieverbrauch für

den Betrieb einschließlich Heizen, Warmwasserbereitung und allen Stromanwendungen liegt bei ca. 30 kWh/(m²a). Es erfüllt damit auch im Gebrauch die für ein Passivhaus festgelegten Kriterien. „Die gute Luftqualität wurde in einer eigenen Untersuchung bestätigt, die Nutzerakzeptanz in einer sozialwissenschaftlichen Studie objektiviert [Rohrmann 1994]. Dank besonders gut dämmender und luftdicht schließender Schiebeläden als temporären Wärmeschutz war es sogar möglich, eine der Wohneinheiten von 1994 bis 1996 ohne jede Heizung als „Nullheizenergiehaus“ zu betreiben“ [Feist 2006:8]. Die technische Konzeption, bauliche Realisierung und Messergebnisse sind detailliert von Feist beschrieben [Feist 2006]. Die wesentlichen bau- und gebäudetechnischen Merkmale von Passivhäusern sind:

- kompakte Bauweise mit geringem A/V-Verhältnis;
- hoch wärmegedämmte Gebäudehülle zur Vermeidung von Wärmeverlusten, Außenwände und Kellerdecke mit U-Wert von ca. 0.15 W/m²K, Dach mit U-Wert von ca. 0,10 W/m²K;
- hochwertige Verglasung (Dreischeiben-Wärmeschutzglas) mit hochgedämmten Rahmen
- Optimierung passiver solare Gewinne durch große, südorientierte, im Winter unverschattete Fensterflächen
- sehr dichte Gebäudehülle, Luftdichtigkeit nL50 < 0,5 h-1;
- Minimierung von Wärmebrücken;
- Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, Wärmerückgewinnungsgrad > 80%;
- energetisch effiziente Warmwasserversorgung, häufig thermische Solarkollektoren;
- hocheffiziente Nutzung elektrischer Energie, sowohl in der Haustechnik (Lüftung, Heizung), als auch in der Beleuchtung und in Haushaltsgeräten.

Ausgehend vom Wohnungsbau werden mittlerweile auch viele Nicht-Wohngebäude wie Bürogebäude, Schulen, Sporthallen u.a. im Passivhausstandard errichtet oder modernisiert. In Abhängigkeit von Nutzung, Bauvolumen und lokalen Randbedingungen können sie sich in ihrer gestalterischen und technologischen Ausbildung erheblich voneinander unterscheiden. In der Schweiz wird der Passivhausstandard als Minergie-P bezeichnet.

4.2.6 Das energieautarke Solarhaus in Freiburg

Fast zeitgleich mit dem Passivhaus in Darmstadt nahm das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg 1992 das erste und bisher einzige energieautarke Solarhaus in Betrieb (Abb.4.2.4). Zusammen mit den Architekten Planerwerkstatt Hölken & Berghoff wurde ein Wohnhaus mit einer Wohnfläche von 145 m² gebaut, das neben den Charakteristiken eines Passivhauses durch den Einsatz einer transparenten Wärmedämmung, aktiver Solarenergienutzung durch Kollektoren und Photovoltaik, verschiedener Speichertechnologien sowie dem weltweit erstmaligen Einsatz einer Brennstoff-



Abb. 4.2.4 Energieautarkes Solarhaus Freiburg Architekt: Planerwerkstatt Hölken & Berghoff [Foto: Prytula 1993]

zelle als Kleinst-Blockheizkraftwerk eine vollständige autarke Energieversorgung realisierte [STAHL / GOETZBERGER / VOSS 1997, VOSS 1997]. Zum saisonalen Energietransfer wurde der sommerliche Überschuss an elektrischen Strom aus der Photovoltaikanlage genutzt, um durch eine Brennstoffzelle Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff zu spalten. Der Wasserstoff wurde in separaten Gastanks gespeichert und konnte in der Brennstoffzelle bei Bedarf im Winter unter Zuführung von Sauerstoff wieder in Strom und Wärme umgewandelt werden. In einer dreijährigen Forschungsphase konnte gezeigt werden, dass es im mitteleuropäischen Klima möglich ist, durch die konsequente Nutzung solarer Strahlung und interner Wärme Gebäude mit einem spezifischen Jahresheizwärmebedarfs von 10 kWh/(m^2a) und weniger zu realisieren [VOSS 1997]. Während der Forschungsphase war das Gebäude weder an das öffentliche Stromnetz angeschlossen, noch gab es eine externe nicht-solare Energiezufuhr. Allerdings hat diese Form der saisonalen Energiespeicherung einen hohen Preis. Selbst wenn man berücksichtigt, dass viele der technischen Komponenten Prototypen waren, sind die Bau- und Anlagenkosten mit ca. 920.000,- € recht beträchtlich.

Im Schlussbericht des Fraunhofer Instituts werden die technischen Details zur Konzeption, Simulation, Baukonstruktion und Gebäudetechnik ausführlich dargelegt [VOSS 1997]. In dem Bericht ist auch der Energiebedarf für die Erstellung des Gebäudes und aller Anlagenteile berücksichtigt worden, der auch als *graue Energie* bezeichnet wird [Spreng 1994]. Als Messgröße für den Vergleich verschiedener Gebäude über ihren gesamten Lebenszyklus wird der kumulierte Energieaufwand für die Herstellung (KEA_H) verwendet. Nach VDI 4600 *Kumulierter Energieaufwand. Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden* wird der KEA_H als die Summe der primärenergetisch

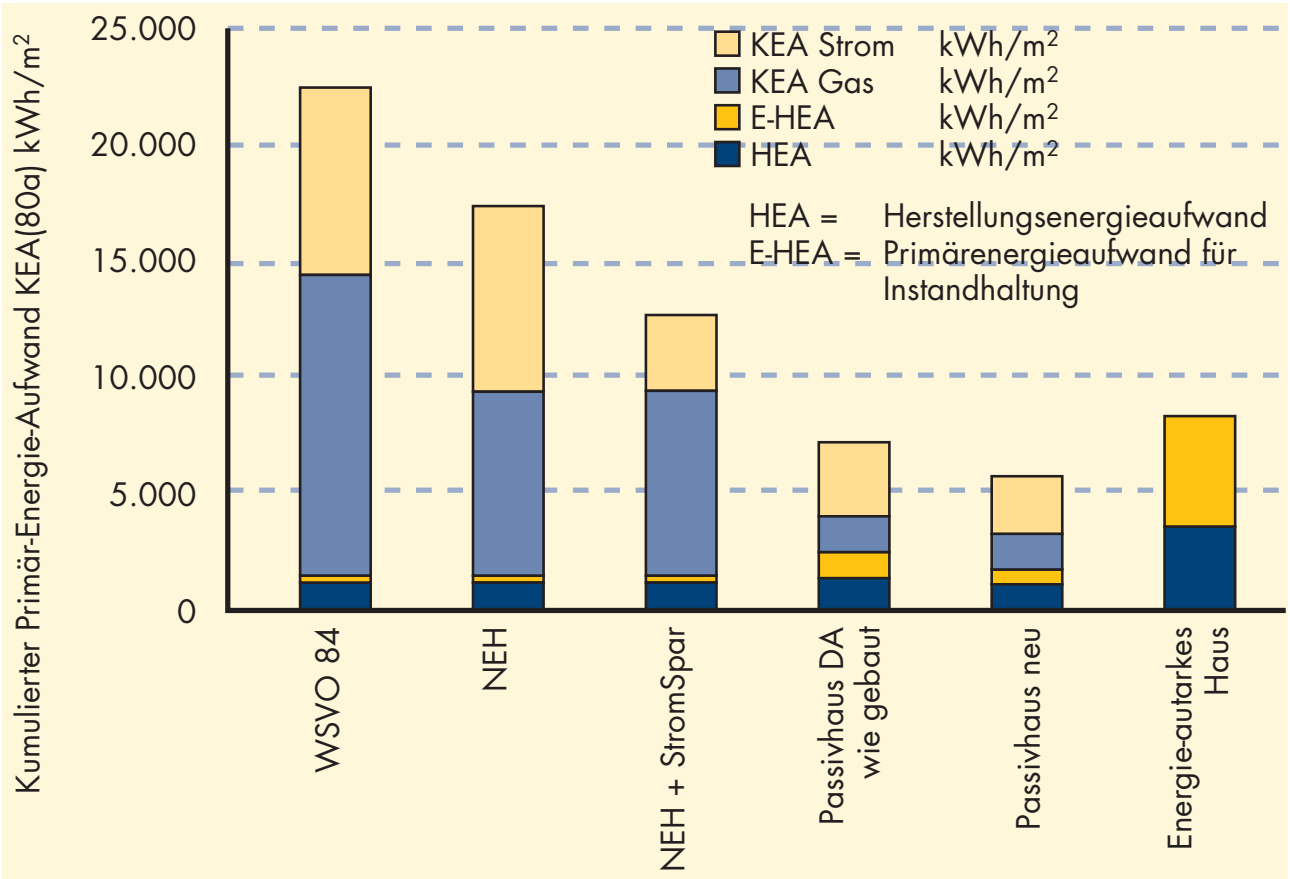


Abb. 4.2.5 Kumulierter Primärenergieaufwand (KEA) verschiedener Bauweisen über eine Nutzungsdauer von 80 Jahren (nach Feist) [BINE 1999:2]

bewerteten Energieaufwendungen genannt, die sich bei der Herstellung selbst sowie bei der Gewinnung, Verarbeitung, Herstellung und Entsorgung der Fertigungs-, Hilfs- und Betriebsstoffe und Betriebsmittel einschließlich der Transportaufwendungen für einen Gegenstand oder eine Dienstleistung ergeben [VDI 1997]. Hierbei werden auch die vorgelagerten Prozessketten, wie z.B. die Bereitstellung unterschiedlicher Endenergieträger, bei dieser Betrachtung einbezogen. Ein Vergleich des kumulierten Primärenergieaufwands des Passivhauses mit dem des energieautarken Solarhauses zeigt, dass der energetische Mehraufwand des energieautarken Solarhauses bezogen auf eine Nutzungsdauer von 80 Jahren größer ausfällt als beim Passivhaus (Abb. 4.2.5) [BINE 1999:2]. Insbesondere die Wandlungs- und Speichertechnologien der aktiven Solarenergienutzung wie Photovoltaik, Solarkollektoren, Brennstoffzelle, Speichertanks für Wasserstoff etc. fallen hierbei ins Gewicht [VOSS 1997].
Aufgrund seines experimentellen Charakters und den damit verbunden hohen Kosten dient das energieautarke Solarhaus weniger als Vorbild für einen möglichen neuen Baustandard, als vielmehr der wissenschaftlichen Untersuchung neuer Techniken wie der transparenten Wärmedämmung oder der Saisonalspeicherung solarer Energie auf Wasserstoffbasis. Aus ökonomischen und aus ökologischen Gründen ist daher eine autarke Energieversorgung nur in Ausnahmefällen sinnvoll. Gerade auch eine autarke elektrische Energieversorgung von Einzelgebäuden ist nur dann zweckmäßig, wenn ein Netzanschluss standortbedingt hohe Kosten verursacht.

4.2.7 Null- und Plusenergiegebäude

„Der Begriff ‚Nullenergiehaus' ist in den letzten Jahren national und international zum Inbegriff für die konsequente Zusammenführung von Maßnahmen zur drastischen Energieeinsparung und optimierter dezentraler Nutzung erneuerbarer Energien geworden" [VOSS ET AL. 2010:424]. Als Nullenergiehaus wird ein Gebäude bezeichnet, das rechnerisch in der Jahresbilanz nicht mehr Energie verbraucht, als es selbst durch aktive Solarenergienutzung erzeugt. Es ist kein energieautarkes Gebäude, das die große Herausforderung saisonaler Energiespeicherung dezentral und autark löst, sondern durch die Einspeisung von sommerlichen Überschüssen der Stromproduktion ins Stromnetz wird dieses gleichsam als Speicher genutzt. Bautechnisch entspricht ein Nullenergiehaus zumeist einem Passivhaus, das zur Deckung des Energiebedarfs zusätzlich mit einer Photovoltaikanlage ausgestattet ist. Bilanztechnisch werden im Jahresmittel mehr Energie erzeugt, als das Haus und seine Bewohner verbrauchen. Um dieses Ziel zu erreichen wird, auf der Ebene eines einzelnen Gebäudes immer ein zweistufiges Konzept verfolgt, wonach zunächst der Energieaufwand zu reduzieren ist, um im zweiten Schritt eine Optimierung der Systeme zur Wandlung und Netzeinspeisung von Energie vorzunehmen [VOSS ET AL. 2010:425]. Gebäude, die sogar mehr Energie bzw. Strom produzieren, als sie in der Jahresbilanz benötigen, werden als Plusenergiehäuser bezeichnet. Die zur Gebäudeerstellung benötige Energie wird (noch) nicht berücksichtigt.

Bisher gibt es weder national noch international ein anerkanntes Verfahren zur Bilanzierung von Null- oder Plusenergiehäusern, obwohl sie mittlerweile als zukunftsweisende Bauweise gepriesen werden. Auf deutsche Initiative hin wurde 2008 im Rahmen der Internationalen Energieagentur IEA eine Arbeitsgruppe für das Thema *Towards Net Zero Energy Solar Buildings* etabliert. In diesem Rahmen wurden mehr als 300 Projekten weltweit erfasst und ausgewertet [VOSS ET AL. 2010:425].

Dabei handelt es sich zumeist um Neubauten in Europa, es wurden aber auch bereits erste Bestandsgebäude zu Nullenergiehäusern saniert. Ausgehend von diesen Untersuchungen haben Karsten Voss und seine Mitarbeiter von der Universität Wuppertal einen Vorschlag zur ganzheitlichen Bewertung entwickelt, der die vier wesentlichen Kriterien Indikatorauswahl, Bewertungsverfahren (Umrechnungsfaktoren), Bilanzgrenze und Bilanzzeitraum berücksichtigt [VOSS ET AL. 2010:425, 430]. Als Indikator wird eine primärenergetische Betrachtung bzw. die damit verbundenen CO_2-Emissionen bzw. - Gutschriften vorgeschlagen, was auch mit dem übergeordneten Ziel eines klimaneutralen Gebäudes oder einer klimaneutralen Stadt konform geht. Eine Ausdehnung des Bilanzraumes auf Anlagen außerhalb der eigentlichen Baumaßnahme, z.B. durch Einkauf von Strom aus erneuerbaren Energiesystemen wie Windparks, wird als nicht sinnvoll erachtet, da diese Anlagen als Teil der Gesamtinfrastruktur die Systemgrenzen beliebig ausweitet. Eine umfassende Darstellung der technischen Konzeptionen aktueller Projekte findet sich in der Veröffentlichung *Nullenergiegebäude* von Karsten Voss und Eike Musall [VOSS / MUSALL 2011].

Als vermutlich ersten Prototypen eines Plusenergiehauses hat der Architekt Rolf Disch 1994 in Freiburg im Breisgau sein eigenes Wohnhaus, das *Heliotrop*, errichtet. Er ließ sich den Namen Plusenergiehaus als geschützte Marke eintragen. Von Rolf Disch entstand mit der Solarsiedlung *Am Schlierberg* in Freiburg von 1999 bis 2007 mit ca. 210 Häusern eine der größten und bekanntesten solaren Wohnsiedlungen Deutschlands (http://www.solarsiedlung.de/) (Abb. 4.2.6) [HAGEMANN 2007].



Abb. 4.2.6 Plusenergiehäuser *Am Schlierberg*
Architekt: Rolf Disch
[Foto: Prytula 2009]

Große Öffentlichkeitswirksamkeit erlangte das Konzept von Plusenergiegebäuden durch den in den USA durchgeführten internationalen Wettbewerb *Solar Decathlon*. Ein Studententeam der TU Darmstadt um Prof. Manfred Hegger konnte 2007 und 2009 den *Solar Decathlon* mit dem attraktivsten und energieeffizientesten Solarhaus für sich entscheiden. Das Gebäude von 2007 wurde mit Förderung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) weiterentwickelt und als transportables Ausstellungsgebäude in München (2009), Berlin (2009) und Hamburg (2009/10) publikumswirksam aufgestellt (Abb. 4.2.7).



Abb. 4.2.7 Solarhaus TU Darmstadt
Architekt: Studenten TU Darmstadt
[http://www.pressebox.de/pr-images/281399.jpg]

4.2.8 Kybernetik-Haus, Triple Zero® und ZeroEmission-LowEx

Neben der Niedrigenergie- und Passivhausbauweise gibt es weitere Konzepte energieeffizienten Bauens, die ihren Schwerpunkt aber weniger auf eine maximale Reduktion von Transmissionswärmeverlusten der Gebäudehüllflächen durch eine Maximierung von Wärmedämmung legen. Diese Ansätze loten andere Prinzipien einer optimalen Energie- und Ressourcennutzung aus, um letztlich auch das Ziel *Nullemissionshaus* zu erreichen.

Das **Kybernetik-Haus** ist ein konzeptioneller Ansatz, den die Architekten Günter Pfeifer und Christoph Kuhn in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen Delzer Kybernetik aus Lörrach entwickelt haben. In kritischer Haltung zur Entwicklung der gesetzlichen Wärmeschutzanforderungen fordern Pfeifer und Kuhn einen Paradigmenwechsel vom technologischen zum kybernetischen Prinzip. Sie wenden sich damit insbesondere gegen die *Entsinnlichung* und *Sinnentleerung* von Architektur, wenn der *genius loci* mit seiner Orientierung und solaren Ausrichtung oder die Zonierung eines Gebäudes aufgrund standardisierter Gebäudehüllen keine entscheidende Rolle mehr spielen [PFEIFER 2009].



Abb. 4.2.8 Patchwork-Haus in Müllheim, 2005
Architekt: Pfeifer / Kuhn
[http://www.pfeifer-kuhn.de/uploads/pics/03_01.jpg]

Demgegenüber formulieren Pfeifer Kuhn mit der kybernetischen Architektur einen architektonischen Anspruch, Gebäude zu entwickeln, „in denen das Verhältnis zwischen dem Teil und dem Ganzen kybernetischer Natur ist, also daraufhin angelegt, die strukturellen Eigenarten aller beteiligten Systeme – physikalischer, biologischer und technischer Art – so zueinander in Beziehung zu setzen, dass sie sich in ihren Wirkungen ergänzen“ [http://www.pfeifer-kuhn.de/index.php?id=3].

Ökologisches Bauen wird als ein vernetztes System verschiedenartiger Funktionselemente angesehen, die untereinander in Wechselwirkung stehen. Es ist die Aufgabe des Entwerfenden, die funktionalen Entwurfsanforderungen mit dem am Ort verfügbaren energetischen Ressourcenpotenzial in Einklang zu bringen, wie es letztlich auch die Handlungsmaxime klimagerechten Bauens vor dem Einsatz fossiler Energieträger war. Dafür kann er verschiedener Planungswerkzeuge einsetzen, wie das Konzept von Energiegärten zur solaren Energiegewinnung, Luftkollektoren, Hypokausten-Systeme, Bauteilaktivierung, den Einsatz von Wasser zur Kühlung, Speicherung und Lichtreflexion oder das Prinzip der adiabatischen Kühlung durch das Verdunsten von Wasser [PFEIFFER 2002:37f.]. Die Vernetzung der Elemente ist das eigentlich Kybernetische an dieser ökologischen Planungsstrategie [PFEIFER 2002:41]. Dem architektonischen Entwerfen und der damit verbundenen Risikobereitschaft, Kreativität, Neugierde, Experimentier- und Gestaltungslust wird eine große Bedeutung beigemessen für die Entwicklung nachhaltiger Gebäude. Allerdings werden in diesem Ansatz keine Kriterien in Form energetischer Kennzahlen zum Heiz-, End- oder Primärenergiebedarf wie beim NEH oder Passivhaus definiert. Das *Patchwork-Haus* in Müllheim (2003-2005) ist ein Beispiel, wo die Konzeption umgesetzt wurde (Abb. 4.2.8).

Mit **Triple Zero®** hat der Ingenieur und Architekt Werner Sobek einen Standard entwickelt, der umfassende Anforderungen an Gebäude hinsichtlich einer nachhaltigen Architektur formuliert. Triple Zero® bedeutet, dass Gebäude im Betrieb keine fossilen Energien nutzen, keine Emissionen abgeben und keinen Abfall erzeugen dürfen. Das wird durch eine ausgeglichene Jahresenergiebilanz sowie die vollständige Demontierbarkeit und Recyclingfähigkeit des Gebäudes erreicht. Der gesamte Bedarf an Primärenergie für Heizen, Warmwasser, Strom wird auf dem Grundstück durch eine PV-Anlage und die Nutzung von Umgebungswärme (Wärmepumpe) selbst erzeugt.



Abb. 4.2.9 Plusenergiehaus mit Elektromobilität
Architekt: Werner Sobek
http://www.uni-stuttgart.de/ilek/joomla/images/aktuelles/101109_PEH_Visualisierung_WernerSobek.jpg

Mit seinem eigenen Wohnhaus, dem R128 in Stuttgart (2001) und dem Wohngebäude in Meßstetten-Tieringen (2006) hat Sobek das Konzept und seine architektonische Entwurfshaltung praktisch umgesetzt [ARCH+ 2001, BLASER /HEINLEIN 2002]. Als Preisträger des Realisierungswettbewerbs *Plusenergiehaus mit Elektromobilität* des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) realisiert Sobek derzeit (2011) in Berlin ein Gebäude, das neben dem Energiebedarf zur Gebäudekonditionierung auch den gesamten Haushaltstrom für eine vierköpfige Familie einschließlich Elektromobilität abdeckt (Abb. 4.2.9).

Mit dem Ansatz **ZeroEmission-LowEx** verfolgt Hansjürg Leibundgut ein Konzept, das eine konsequente Eliminierung sämtlicher CO_2-Emissionen bei der Wärmeversorgung urbaner Systeme zum Ziel hat. Für Leibundgut, seit 2005 Professor für Gebäudetechnik an der ETH Zürich, besteht das übergeordnete Ziel darin, die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre auf einen Bereich von 500 – 550 ppm zu begrenzen, um die Klimastabilität zu erhalten [LEIBUNDGUT 2008:7]. Davon abgeleitet dürfen Gebäude im Jahr 2060 keine Prozesse mehr aufweisen, in denen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe CO_2-Emissionen entstehen.



Abb. 4.2.10 Wohnhaus B35 (Bolleystrasse 35)
Architekt: Johannes Leibundgut
[LEIBUNDGUT 2010:23]

Eine Nutzung fossiler Brennstoffe oder von Biomasse ist ausschließlich für Treibstoffe im Mobilitätssektor erlaubt. Alle Energieströme von Gebäuden oder Siedlungen, die von außen bezogen werden – also auch die Elektrizität –, sollen absolut emissionsfrei sein.
Durch die Nutzung von Solarstrahlung, Windenergie oder Geothermie steht grundsätzlich genügend Energie zur Verfügung, allerdings häufig nicht in geeigneter Form oder zur passenden Zeit. Da sich ein jedes Gebäude hinsichtlich Standort, Nutzung, Größe usw. von anderen unterscheidet sind die Strategien und Technologien zum Erreichen emissionsfreier Gebäude unterschiedlich.

Als Zielgröße wird allerdings eine Begrenzung der absoluten CO_2-Emissionen eines Gebäudes auf unter 1 kg $CO_2/(m^2\,a)$ festgelegt. Unter Berücksichtigung des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik mit der Unterscheidung von Exergie und Anergie eröffnen sich nach Leibundgut gänzlich neue Möglichkeiten, das Problem der Energieversorgung zu lösen. Das LowExergy-Konzept bewertet nicht nur die quantitativen, sondern auch den qualitativen Anteil (Exergie) von Energie, die sowohl vom Zustand des betrachteten Systems, als auch von dessen Umgebung abhängig ist. Ansätze hierzu gehen auf thermodynamische Theorien der 1950er Jahre zurück [SCHMIDT 2009:112].

Das Prinzip besteht darin, die für die Beheizung von Gebäuden und zur Aufbereitung des Warmwassers benötigte Wärme zu 80% durch lokal verfügbare Anergie in Form von Umgebungswärme zuzuführen. Der Restwärmebedarf wird dem Gebäude als Exergie in Form von elektrischem Strom durch den Einsatz von Wärmepumpen zugeführt. Dieser wird emissionsfrei durch erneuerbare Energien (PV-Anlagen oder Windenergie) lokal auf dem eigenen Grundstück, regional oder überregional erzeugt. Aufgrund der relativ geringen Übertragungsverluste beim Stromtransport kann die regenerative Stromerzeugung an ertragsreichen Standorten z.B. im Mittelmeerraum (PV) oder an Küstenstandorten (Wind) zu geringen Gestehungskosten erzeugt und in die Ballungsräume transportiert werden.

Voraussetzungen für eine wirkungsvolle Umsetzung des Konzepts sind relative geringe Transmissionswärmeverluste der Gebäudehülle und Wärmepumpen, die mit einem sehr hohen Wirkungsgrad betrieben werden. Der Wirkungsgrad einer Wärmepumpe (COP) lässt sich bei der Nutzung von Geothermie (bis 500 m) durch eine Erhöhung des Wärmeniveaus im Erdreich erreichen. Dabei wird der sommerliche Wärmeüberschuss aus der Gebäudekühlung oder aus Solarhybridkollektoren mit Hilfe von neuartigen 2-Zonen-Erdsonden in das Erdreich eingespeist, um die Temperatur des Erdspeichers über das natürliche Niveau anzuheben. Im Pilotprojekt Wohnhaus B35 (Bolleystrasse 35) (Abb. 4.2.10) wurde nach diesem Prinzip ein natürliches, aus dem umgebenden Gestein bestehendes Speichersystem aus vier voneinander getrennten und bewirtschafteten Erdspeichern in einer Tiefe von 150 bis 380 m angelegt [LEIBUNDGUT 2010:46]. Der Mittelwert der Temperatur liegt bei ca. 17°C, wodurch ein COP der Wärmepumpe von ca. 6,5 erreicht wird. 90% aller bestehenden Gebäude der Schweiz könnten nach Leibundgut innerhalb von 50 Jahren in Low-Ex-Gebäude umgebaut werden [LEIBUNDGUT 2008:15]. Durch eine Kombination aus energieeffizienten Gebäuden und einer Stromversorgung aus Solar- und Windenergie kann das Ziel emissionsfreier urbaner Systeme kostengünstig und unter Bewahrung kultureller Aspekte realisiert werden (Abb. 4.2.11).

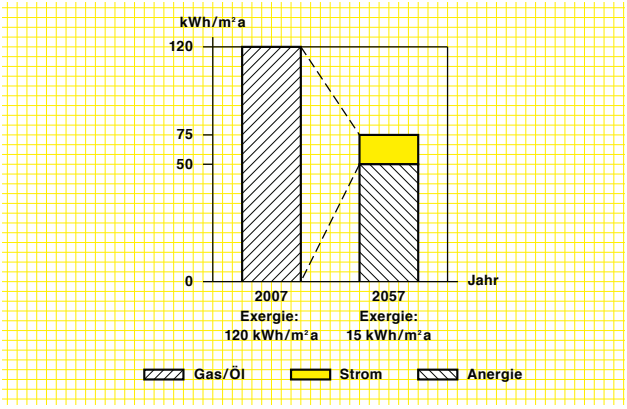


Abb. 4.2.11 Energiebilanz für Wärmeerzeugung 2007 und 2057 [LEIBUNDGUT 2008:16]

4.3 Konzepte zur nachhaltigen Wärmeversorgung von Siedlungen

4.3.1 Wärmebedarf, Marktsituation und politische Rahmenbedingungen

Der Sachstandsbericht des Umweltbundesamts *Nachhaltige Wärmeversorgung* [UBA 2007a] gibt einen Überblick zu Technologien, der aktuellen Marktsituation sowie möglichen Szenarien zur Wärmeversorgung bis zum Jahr 2030. Demnach entfallen in Deutschland für das Jahr 2004 von der verbrauchten Endenergie ca. 59% auf die Wärmeversorgung, 39% auf die mechanische Energie (zum Beispiel in Motoren) und 2% auf die Beleuchtung. Bei den privaten Haushalten liegt der Wärmeanteil sogar bei mehr als 90 Prozent. Beim Wärmebedarf dominiert der Anteil an Raumwärme vor der Prozesswärme für industrielle Produktionsprozesse. Aufgrund der starken Heterogenität des Marktes ist es im Wärmemarkt aber im Vergleich zum Strommarkt relativ schwierig, konsistente Daten zu erhalten und Entwicklungstendenzen zu bestimmen. Der Wärmebedarf Deutschlands in Höhe von 1.516,6 TWh (2004) wird zu 46% aus Erdgas, zu 23% aus Erdöl, zu 12% aus Strom, zu 9% aus Kohle, zu 6% aus Fernwärme und zu 4% aus erneuerbaren Energien gedeckt [UBA 2007a:26].

Angesichts des weltweit steigenden Energiebedarfs und der Preissteigerungen für fossile Energieträger wurde von der Bundesregierung am 5. Dezember 2007 das *Integrierte Energie- und Klimaprogramm* (IEKP) beschlossen. Es verfolgt das klimapolitische Ziel, den CO_2-Ausstoß bis 2020 im Vergleich zu 1990 um 40 Prozent zu senken. Hierfür sollen jährlich ab 2008 2,6 Milliarden Euro bereitgestellt werden. Das Programm umfasst 29 Maßnahmen, die vor allem mehr Energieeffizienz und eine Ausweitung der Nutzung erneuerbarer Energien beschreiben. Die Eckpunkte dieses Programms beruhen auf der Kabinettsklausur der Bundesregierung in Meseberg am 23. und 24. August 2007 (BMWI 2007). Folgende Maßnahmen betreffen insbesondere die Wärmeversorgung von Gebäuden und die Stromversorgung:

- Der Anteil von Strom aus der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird bis 2020 auf etwa 25% verdoppelt.
- Der Anteil erneuerbarer Energien aus Wind, Sonne und Biomasse soll von derzeit 13% an der Stromproduktion auf 25 bis 30% im Jahr 2020 steigen.
- Erhöhung des Anteils der Wärmeversorgung von Gebäuden aus erneuerbaren Energien durch das Erneuerbare-Wärme-Gesetz (EEWärmeG):
  - für Neubauten 15% des Wärmebedarfs
  - für Bestandsgebäude 10% des Wärmebedarfs
- Der stufenweise Austausch von Nachtstromöfen wird vorgeschrieben und gefördert.
- Erhöhung des Anforderungsniveaus der EnEV
- Stufe 1: Verschärfung der energetischen Anforderungen um ca. 30%, Novellierung EnEV 2009
- Stufe 2: weitere Verschärfung um ca. 30%, angestrebt für die Novellierung EnEV 2012
- Ausweitung einzelner Nachrüstungsverpflichtungen bei Anlagen und Gebäuden

Im Folgenden werden einige der wichtigsten Technolgien und Systeme dargestellt, die einen signifikanten Beitrag zu einer nachhaltigen Wärmeversorgung leisten. Allerdings können im Rahmen dieser Arbeit weder alle relevanten Wärmeversorgungssysteme (z.B. Geothermie, Wärmepumpen u.a.) noch die zahlreichen anderen Maßnahmen zum energieeffizienten Bauen wie Lüftungssysteme, Bauteilaktivierung oder Latentwärmespeicherung hinreichend behandelt werden.

4.3.2 Dezentrale Wärmeerzeugung in Gebäuden

Ein Großteil der Wärmeversorgung in privaten Haushalten und im Gewerbe erfolgt durch den Einsatz von Heizkesseln und Kleinfeuerungsanlagen. In Deutschland sind 2004 etwa 8,7 Mio. Gasheizkessel, 6,4 Mio. Ölheizkessel und 0,6 Mio. Heizkessel für feste Brennstoffe wie Kohle und Holz in Betrieb [UBA 2007a:6]. Bei **Gasfeuerungsanlagen** hat sich bereits seit einigen Jahren die Brennwerttechnik durchgesetzt, die eine hocheffiziente Nutzung des Brennstoffs ermöglicht. Gasfeuerungsanlagen sind auf eine leitungsgebundene Infrastruktur angewiesen. In dicht besiedelten, innerstädtischen Gebieten konkurrieren Gas- und die Fernwärmeversorgung miteinander. Abgesehen von Gebäuden mit einem sehr geringen Energiebedarf, wie z.B. bei Passivhäusern, ist eine leitungsunabhängige Versorgung durch Flüssiggasanlagen aufgrund des Herstellungsprozesses des Flüssiggases und dessen Transports durch Tankwagen zumeist weniger energie- und kosteneffizient. In ländlichen Gebieten bieten biogasgespeiste Mikrogasnetze eine Alternative zum Anschluss an die Erdgasversorgung, wenn die Wärmeabnehmer nicht zu weit entfernt von der Biogasanlage liegen.

Gasfeuerungsanlagen werden häufig durch solarthermische Anlagen zur Warmwassererzeugung ergänzt. **Solarthermische Anlagen** (Solarkollektoren) wandeln die solare Strahlungsenergie mittels eines Kollektors und Absorbermediums direkt in Wärmeenergie um. In Abhängigkeit von der Größe der Kollektorfläche wird mit Solarkollektoren bei Einfamilienhäusern eine Deckungsrate von 60 - 90% des Jahresenergiebedarfs zur Warmwassererzeugung oder 25 - 50% bei Warmwasser- und Raumwärmeerzeugung erreicht. Um auch im Winter eine vollständige Wärmeversorgung zu erzielen, ist eine große Kollektorfläche erforderlich, die im Sommer einen großen, zumeist nicht nutzbaren Wärmeüberschuss produziert. Eine Dimensionierung der Kollektorfläche auf die winterliche Vollversorgung ist daher zumeist nicht wirtschaftlich. Die effiziente Wärmenutzung in dezentralen Anlagen erfordert in der Regel **Kurzzeitwärmespeicher**, welche die Wärme über einen Zeitraum von einigen Stunden bis zu wenigen Wochen speichern. Diese Speicher nutzen Wasser als Speichermedium und haben ein Volumen von 500 bis 1.000 Liter. Beim Einsatz solarthermischer Anlagen sind sie unentbehrlich, aber auch bei dezentralen Feuerungsanlagen werden sie eingesetzt, um kurzfristige Schwankungen beim Wärmeangebot auszugleichen [UBA 2007a:19].

Neben Feuerungsanlagen für Erd- oder Biogas als Brennstoff gibt es einen wachsenden Marktanteil verschiedener Festbrennstoffanlagen mit **Holz als Brennstoff.** In Abhängigkeit von Leistung und Bedienkomfort kommen verschiedene Brennstoffformen zum Einsatz:

- Stückholzfeuerung, die entweder handbeschickt oder automatisch betrieben werden,
- Holzpellets, die aus unbehandelten Holzresten (Waldholzabfall, Hobelspäne, Sägespäne) bestehen, die in einer Pelletpresse verdichtet und zu kleinen Röllchen geformt in vollautomatischen Heizanlagen eingesetzt werden,
- Holzschnitzelfeuerung mit Hackschnitzel aus dem Wald oder maschinell zerkleinertes Holz für den automatischen Betrieb,
- sonstige feste Biomasse (Altholz, Waldrestholz oder Pflanzenreststoffe), die zur kombinierten Erzeugung von Strom und Wärme in Heizkraftwerken mit typischen Anlagengrößen von 5 bis 20 MW elektrischer Leistung in Verbindung mit Wärmenetzen eingesetzt werden.

Brennstoffe aus Biomasse wie Biogas, Rapsöl oder Holz werden zumeist als klimaneutral eingeschätzt, da das bei ihrer Verbrennung frei werdende CO_2 die globale CO_2-Bilanz nicht verändern. Aufgrund der Herstellungs- und Transportprozesse weisen Ökobilanzierungen für biogene Brennstoffe allerdings durchaus klimarelevante Einflüsse auf. Problematisch ist insbesondere die Gewinnung von biogenen Brennstoffen durch die Umwandlung von natürlichen Urwäldern in Brennstoffplantagen, da die Urwälder neben der regionalen Bedeutung für die Biodiversität eine wichtige Funktion im globalen Wasser- und Klimahaushalt haben. Eine nicht nachhaltige Bewirtschaftung von Biomasse führt nur zu einer Verlagerung ökologischer Probleme.

Bei energieeffizienten Gebäuden mit einer geringen spezifischen Heizlast lohnt sich auch der Einsatz von **Wärmepumpen**, welche die Latentwärme der Umgebung durch den Einsatz von Exergie in Form von elektrischem Strom oder Gas nutzbar machen. Elektrische Wärmepumpen sind hinsichtlich der Klimarelevanz (Emission von Treibhausgasen) sowie der Inanspruchnahme nichterneuerbarer Energieressourcen geringfügig günstiger als eine Erdgas-Brennwertheizung. Gasmotor-Wärmepumpen arbeiten ressourceneffizienter als elektrische Wärmepumpen, haben aber aktuell nur einen sehr geringen Anteil am deutschen Wärmemarkt.

4.3.3 Technologien zur Kraft-Wärme-Kopplung

Ein energetischer Wandlungsprozess, der gleichzeitig Strom und verwertbare Wärme erzeugt, wird als Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bezeichnet. Bei Verbrennungsprozessen mit hohen Temperaturen und hohem Druck, z.B. zum Erzeugen von Wasserdampf für den Antrieb von Turbinen zur Stromerzeugung oder eines Motors, entsteht ein hohes Potenzial an Wärmeenergie, das kaskadenförmig für weitere energetische Nutzungsmöglichkeiten auf niedrigerem Temperaturniveau wie z. B. zur Warmwassererwärmung oder Raumheizung eingesetzt werden kann. Die Stromerzeugung in fossilen oder nuklearen Kraftwerken bedarf eines Kühlprozesses, der die überschüssige Wärme zumeist über Kühltürme an die Atmosphäre oder durch Wasser von Flüssen ungenutzt an die Umwelt abgibt. Der Wirkungsgrad dieser Kraftwerke liegt heute zwischen 35 - 45%. In urbanen Systemen kann auch eine **Fernwärmeversorgung** als Kühlsystem eingesetzt werden. Die Beheizung von Gebäuden wirkt dann bezogen auf den Prozess der Stromerzeugung als Wärmesenke.

Durch die Mehrfachnutzung wird der eingesetzte Energieträger effizienter genutzt und kann einen Gesamtwirkungsgrad von ca. 80% bezogen auf die Umwandlung des chemischen Energiegehalts des eingesetzten Brennstoffs in Nutzenergie erreichen. Aus der Sicht der Ressourcenproduktivität und des Klimaschutzes sind die gekoppelten Energieerzeugungsprozesse zur Wärmelieferung den ungekoppelten Prozessen vorzuziehen, weil die freigesetzten CO_2-Emissionen pro Energieeinheit wesentlich geringer ausfallen. Daher leistet die KWK selbst bei Nutzung fossiler Brennstoffe einen Beitrag zu einer nachhaltigen Energieversorgung.



Abb. 4.3.1 KWK-Kohlekraftwerk Reuter West, Berlin-Charlottenburg [Foto: Prytula 2005]

Die Geschichte der Abwärmenutzung reicht zurück bis an den Beginn der Industrialisierung. Bereits James Watt beheizte um 1770 seine Fabrik- und Wohnräume mit Dampf. In New York (USA) wurde 1876 die weltweit erste Fernwärmeheizung gebaut. Das Hamburger Elektrizitätswerk leitete 1893 probeweise Dampf zum Heizen in das 300 Meter entfernte Rathaus. Dabei wurden Strom und Wärme erstmals gleichzeitig erzeugt. Das erste wasserdampfbetriebene Fernheizwerk Europas wurde 1900 in Dresden gebaut. In Deutschland ist die Fernwärmenutzung regional sehr unterschiedlich ausgeprägt. In den östlichen Bundesländern liegt der Anteil der mit Fernwärme versorgten Haushalte mit ca. 32% am Energiemarkt wesentlich höher als in den westlichen Bundesländern mit nur 9%. 2009 gibt es in Deutschland ca. 50.000 km Fernwärmeleitungen. Ein besonders hoher Anteil an Fernwärme ist in den skandinavischen Ländern installiert [FFI 2011].
Moderne Kraftwerke werden zumeist als erdgasbetriebene Gas-und-Dampfturbinen-Kraftwerke (GuD) erstellt. Diese Kombikraftwerke gehören zu den effizientesten konventionellen Kraftwerken mit elektrischen Wirkungsgraden von bis zu 60%. Neben dem Einsatz fossiler Brennstoffe ist aber auch die Nutzung von Biomasse oder Tiefengeothermie zur Kraft-Wärme-Kopplung möglich. Aufgrund der hohen Infrastrukturkosten für die Verlegung und Instandhaltung der Wärmeversorgungsleitungen ist eine Fernwärmeversorgung erst ab einer größeren baulichen Dichte rentabel. In Berlin versorgte der lokale Versorger Vattenfall 2008 ca. eine Million Wohneinheiten. Dafür betrieb Vattenfall ein Fernwärmenetz von 1.368 Kilometer Trassenlänge.

Für die Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung können Anlagen in unterschiedlichsten Skalierungen eingesetzt werden. Neben zentralen KWK-Anlagen haben sich für die Wärmeversorgung großer Mehrfamilienhäuser, von Betrieben oder eines Siedlungsverbunds mit einem Nahwärmenetz dezentrale Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, sogenannte **Blockheizkraftwerke** (BHWK), bewährt.
Diese werden zumeist mit Erdgas, aufbereitetem Biogas oder Rapsöl betrieben. Übliche BHKW-Module haben eine elektrische Leistung zwischen 5 kW und 5 MW und werden zumeist wärmegeführt betrieben. Die bei der Stromerzeugung anfallende Wärme wird über Pufferspeicher der Wärmeversorgung zugeführt. Der Wirkungsgrad bei der Stromerzeugung liegt je Anlagengröße zwischen 25% und 50%. Durch die lokale Nutzung der Abwärmenutzung liegt der Nutzungsgrad des Primärenergieträgers zwischen 80% bis über 90%. Für kleine Mehrfamilienhäuser oder große Einfamilienhäuser mit einem hohen Wärmebedarf und einer Nennleistung von bis zu 50 kW können **Mini-BHKW** eingesetzt werden. Das vermutlich bekannteste Gerät ist der *Dachs* von der 1996 gegründeten Firma SenerTec GmbH.
Seit kurzem gibt es auch Entwicklungen zum Einsatz von **Mikro-BHKW** im Wohnungs- und Einfamilienhausbereich mit einer Nennleistung von 15 - 20 kW. Im März 2007 startete in Berlin der örtliche Gasversorger GASAG ein zweijähriges Pilotvorhaben mit einem speziell für diesen Leistungsbereich entwickelten Mikro-BHKW der Firma WhisperGen™ (Abb. 4.3.2). Das Mikro-BHKW besteht aus einem Stirling-Motor mit einer Nennleistung von 1 kW_{el} und 12 kW_{th} und einem Wirkungsgrad von über 90%. Mit Ab-



Abb. 4.3.2 Mikro-BHKW WhisperGen [http:/www.gasag.de/DownloadPaper/ presse/technik_innovationen/whisper_gen1.jpg]

messungen von 48 x 56 x 84 cm (b/t/h) hat es die Größe handelsüblicher Küchengeräte und lässt sich daher problemlos in den Haushalt integrieren. Aufgrund der potenziellen Vernetzbarkeit zu einem *virtuellen Kraftwerk* bewirbt die GASAG den Betrieb dieser Geräte seit 2011 als *Klimakraftwerk*.
Ein ähnliches Konzept verfolgt der Stromanbieter *Lichtblick* mit dem *Schwarmstrom* . Die Grundlage bildet das *ZuhauseKraftwerk*, ein dezentrales, erdgasbetriebenes Mikro-BHKW, das vom Autohersteller Volkswagen produziert wird. Die über Funk und Computer gesteuerte Vernetzung von 100.000 dieser dezentralen Blockheizkraftwerke zu einem *virtuellen Gaskraftwerk* ermöglicht eine Leistung von 2.000 Megawatt, was einer Kapazität von zwei Atomkraftwerken entspricht. Die Leistung eines einzelnen *LichtBlick-ZuhauseKraftwerks* liegt mit 19 kW_{el} und 32 kW_{th} etwas höher als das Mikro-BHKW der Firma WhisperGen™ bei einem vergleichbaren Wirkungsgrad der Brennstoffausnutzung von 90% [LICHTBLICK 2010:7].
Eine weitere Option zur dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung ist die mit Ergas oder Wasserstoff betriebene **Brennstoffzelle**. Als Prototyp wurde sie bereits 1993 im energieautarken Solarhaus getestet, eine allgemeine Markteinführung ist allerdings noch nicht in Sicht.

Die Kombination von KWK-Fern- bzw. Nahwärmesystemen mit dem LowEx-Konzept beinhaltet ein weiteres Optimierungspotenzial. Heutige Fernwärmenetze werden als Zweileiter-Systeme mit verhältnismäßig hohen Vor- und Rücklauftemperaturen von 130°C/90°C und 110°C/70°C betrieben [DÖTSCH / BARGEL 2009:134]. Eine exergetische Betrachtung zur Optimierung der Netztemperaturen zeigt, dass die Leitungswärmeverluste im Verhältnis zum Pumpenstromaufwand und anderen Einflussfaktoren der dominierende Faktor ist. Theoretisch ist eine Absenkung der Vorlauftemperatur auf 65°C mit einer Rücklauftemperatur von 30°C bei gleicher Temperaturspreizung denkbar [DÖTSCH / BARGEL 2009:141]. Zukünftige Entwicklungen gehen sogar von einer Verlegung von Dreileiter- oder Vierleiter-Systemen aus, wo energieeffiziente Gebäude mit Niedertemperatursystemen aus dem Rücklauf mit Temperaturen von über 60° ausreichend Wärme beziehen können [HAUSLADEN 2010:14]. Der Vorteil dieser Systeme liegt u.a. darin, dass die Temperaturspreizung von Vor- und Rücklauf größer wird und der Wirkungsgrad beim KWK-Prozess gesteigert wird. Allerdings ist die Verlegung zusätzlicher Rohrleitungen kostenaufwendiger als bei einem Zweileiter-System und im Bestand nur im Zusammenhang mit dem Erneuerungszyklus kosteneffizient realisierbar.

4.3.4 Solare Nahwärmeversorgung mit Saisonalspeicher

In gemäßigten Klimazonen ist im Sommer ein großes Wärmepotenzial vorhanden. Wie lässt sich dieser sommerliche Wärmeüberschuss in die strahlungsarmen Wintermonate transferieren?
Eine technisch-physikalische Lösung besteht darin, den zumeist durch solarthermische Anlagen erzeugten sommerlichen Wärmeüberschuss in sehr große thermische Wärmespeicher, in sogenannte Saisonalspeicher, einzuspeisen und diese im Bedarfsfall wieder zu entleeren. Diese Speicherung von Wärme über einen Zeitraum von Wochen oder Monaten hinweg wird als saisonale Wärmespeicherung bezeichnet. Bei kleinen solarthermischen Anlagen ist dieses Konzept mit hohen Investitionskosten für die Installation von Kollektoren und Pufferspeichern verbunden. Mit wachsender Anlagengröße sinken allerdings diese Kosten. Aus diesen Überlegungen heraus entstand das Konzept einer solaren Nahwärmeversorgung mit Saisonalspeicher für große Mehrfamilienhäuser oder Wohnsiedlungen.

In Schweden wurden bereits 1978/79 erste Projekte mit saisonaler Wärmespeicherung realisiert. Erste Forschungsprojekte in Deutschland erwiesen sich als unwirtschaftlich und wurden daher zunächst nicht umgesetzt. Die Einführung der Task VII der International Energy Agency (IEA) mit dem Programmschwerpunkt *Solar Heating and Cooling* führte aber zu Forschungsprojekten, die seit 1979 länderübergreifend die technische und ökonomische Machbarkeit von *Solar unterstützten Nahwärmeversorgungssystemen mit Langzeit-Wärmespeichern* (*Central Solar Heating Plants with Seasonal Storage, CSHPSS*) untersuchten [MANGOLD 2010].

Das System einer solaren Nahwärmeversorgung besteht aus einer großflächigen, zumeist dachintegrierten thermischen Kollektoranlage, einem Nahwärmenetz zur Wärmeverteilung, einem saisonalen Wärmespeicher, Kurzzeit-Wärmespeicher (Pufferspeicher), Hausübergabestationen, einer Heizzentrale und Leitungsnetzen zur internen Wärmeverteilung in den Gebäuden. Als Saisonalspeicher werden Tank-Wärmespeicher (unterirdische, zumeist mit Wasser oder Kies-Wasser-Gemisch gefüllte Stahlbetonbehälter), Erdbecken-Wärmespeicher, Erdsonden-Wärmespeicher oder Aquifer-Wärmespeicher (unterirdische, wasserführende Gesteinsschichten) eingesetzt. Das Speichervolumen eines Tank-Wärmespeichers sollte mindestens 1.000 m^3 betragen, da die Größe einen großen Einfluss auf den Wirkungsgrad hat. Je größer der Speicher, desto kleiner ist sein A/V-Verhältnis und der erforderliche Aufwand für die Wärmedämmung. Als weitere Komponenten können eine Fernwärmeversorgung, Blockheizkraftwerke oder Wärmepumpen das System ergänzen.

Voraussetzung für einen ökonomischen Betrieb einer saisonalen Wärmespeicherung sind Gebäude, die im Niedrigenergiestandard errichtet und zumeist über Niedertemperaturheizungen beheizt werden. Eine effektive Nutzung der Sonnenenergie erfordert den Einsatz eines Wärmeverteilsystems auf niedrigem Temperaturniveau mit niedrigen Rücklauftemperaturen.
Als Standard bei der Wärmeverteilung ist eine Auslegung des Heizsystems auf 60°C Vorlauftemperatur und 30°C Rücklauftemperatur (60/30°C) anzusehen. Eine bessere Ausnutzung des Solarertrags ermöglichen Auslegungen mit 50/30°C oder der Einsatz von Fußbodenheizungen mit einer Auslegung von 40/25°C [MANGOLD 2010]. Auch bei richtig geplanten und ausgeführten Niedertemperatur-Wärmeverteilsystemen können Störungen, Defekte oder Erweiterungen des Versorgungsgebiets temporär oder langfristig zu einer Erhöhung der Netzrücklauftemperaturen führen, die den Speicherwirkungsgrad herabsetzen. Durch den Einsatz von Wärmepumpen kann die hohe Sensitivität des Systems gegen erhöhte Rücklauftemperaturen aus der Wärmeverteilung verbessert werden. Die Speichersysteme werden dadurch betriebssicherer [MANGOLD 2010].

Aufgrund der Komplexität dieser Planungsaufgabe sind alle beteiligten Akteure frühzeitig durch eine integrale Planung einzubeziehen. Bei Neubaugebieten sollten bereits bei der Erstellung des Bebauungsplans die Bedingungen dieses Wärmeversorgungskonzepts berücksichtigt werden, um eine wirtschaftliche Erstellung und einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen.
Von 1995 bis 2008 wurden in Deutschland im Rahmen der Forschungsprogramme *Solarthermie-2000* und *Solarthermie2000plus* elf Pilotanlagen mit solarthermischen saisonalen Wärmespeichern realisiert und wissenschaftlich begleitet [MANGOLD 2010]. Dazu gehören Siedlungen in Friedrichshafen (1996), Neckarsulm (1997/2001), Steinfurt-Borghorst (1998), Chemnitz (2000), Rostock (2000), Hannover-Kronsberg (2000), Attenkirchen (2002) und München (2007), deren Speicher mit Temperaturen zwischen 30 und 95 °C betrieben werden.

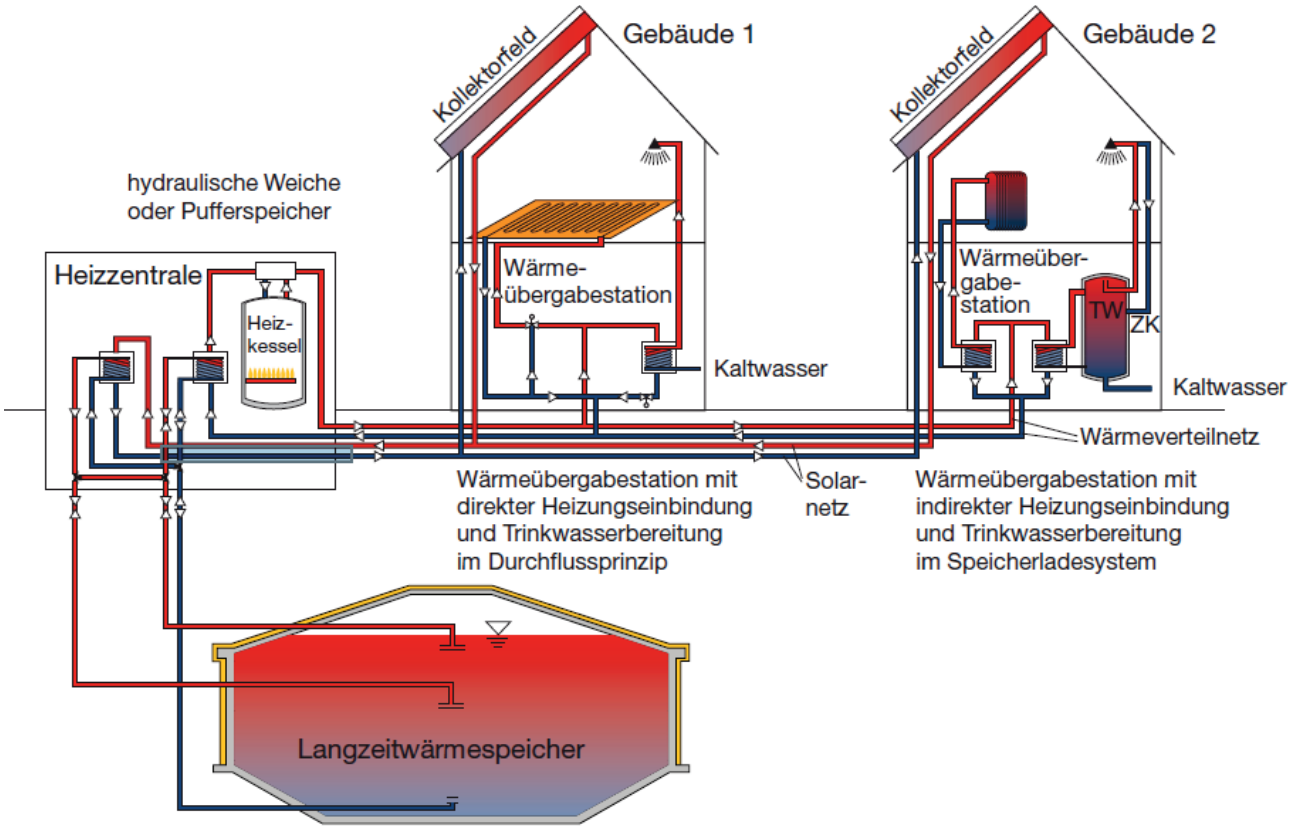


Abb. 4.3.3 Konzept einer solar unterstützten Nahwärmeversorgung mit Langzeitwärmespeicher [BINE 2001:2]

Durch die wissenschaftliche Begleitforschung konnten die Funktionstüchtigkeit demonstriert und der technische Betrieb zuverlässiger gestaltet werden.

Das Monitoring zahlreicher Forschungsvorhaben zeigt, dass besonders bei den frühen Anlagen aus den 1990er Jahren die Effektivität der Wärmenutzung hinter den Erwartungen zurückbleibt. Die Gründe hierfür liegen u.a. in Wärmeverlusten der Speicher- und Verteilungssysteme, die höher ausfallen, als in den Modellsimulationen erwartet wurde [FISCH ET AL. 2001].
Bisherige solare Nahwärmesysteme decken nur einen Teil des jährlichen Wärmebedarfs der angeschlossenen Gebäude, im Allgemeinen bis zu 50% des Jahrsbedarfs ab. Während eine vollständige solare Wärmeversorgung bei Niedrigenergiehäusern sehr aufwendig wäre, ist dies in Verbindung mit Gebäuden nach Passivhaus-Standard auch mit heute bewährten Technologien bereits möglich. Als erstes Nullheizenenergiegebäude der Schweiz wurde 2007 in Oberburg im Kanton Bern ein Mehrfamilienhaus mit acht Wohnungen fertig gestellt. Es wurde von der Firma Jenni Energietechnik AG in Minergie-Plus-Bauweise errichtet und hat eine 276 m² große, dachintegrierte solarthermische Anlage. Der Saisonalspeicher befindet sich innerhalb der thermischen Hülle und fasst 205.000 Liter Wasser [JENNI ENERGIETECHNIK AG 2007]. Aktueller Forschungsbedarf besteht weiterhin insbesondere beis der Steigerung der Speichereffizienz, der Erhöhung der Deckungsraten des Jahresheizwärmebedarfs und hinsichtlich der Kostensenkungen des Gesamtsystems, damit dieses Konzept am Markt etabliert werden kann [MANGOLD 2010].

4.4 Akteursorientierte Ansätze: Energieautarke Regionen

4.4.1 Zentrale oder dezentrale Energiesysteme?

Eine nachhaltige Energieversorgung muss die drei grundsätzlichen Kriterien Versorgungssicherheit, Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit erfüllen. Der Streit um russische Erdgaslieferungen an die Ukraine im Januar 2006 und 2008, einschneidende Unterbrechungen der Stromversorgung in Nordamerika und Italien infolge einer Überlastung von Stromnetzen im Sommer 2003 und die allgemein starke Abhängigkeit der deutschen Wirtschaft und Haushalte von Energieimporten aus politischen Krisenregionen hat der Diskussion um eine Stärkung der regionalen Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energiequellen neuen Auftrieb gegeben [PRYTULA 2009a]. Betrachtet man die räumliche Verortung der Energiequellen im Zusammenwirken mit Wandlungs-, Transport- und Speichersystemen stellt sich die Frage, ob die Transformation zu einem Energiesystem mit erneuerbaren Energien strukturell bedingt zu veränderten, dezentralen Infrastrukturen führen wird. Vor dem Hintergrund der Notwendigkeit, dass etwa 50% der in Deutschland installierten Kraftwerkskapazität in den nächsten Jahren zu erneuern ist, kommt der Klärung dieser Frage hinsichtlich richtungssicherer Investitionen in zentrale oder dezentrale Infrastrukturen eine große Bedeutung zu.

Auf der einen Seite steht das Szenario einer eher zentralen solaren Energiewirtschaft auf der Grundlage einer großräumlichen Vernetzung mit hoher internationaler Arbeitsteilung. Die Energiewandlung in den sonnenreichen Gegenden Südeuropas und Nordafrikas durch Parabolrinnenkraftwerke oder nachgeführte konzentrierende Solarthermiekraftwerke (CSP) versprechen aufgrund der hohen Globalstrahlung geringe Stromgestehungskosten. Der Energietransport erfolgt entweder als Strom über ein verlustarmes Hochspannungs-Gleichstrom-Netz oder durch die Konversion in andere, speicherfähige Energieträger wie z.B. solaren Wasserstoff, der durch Pipelines oder Tanker transportiert werden kann [NITSCH ET AL. 2002]. Bereits 1992 formulierten Joachim Luther und Joachim Nitsch die Vision einer Energieversorgung mit solarthermischen Kraftwerken in einem transeuropäischen Stromverbund [LUTHER / NITSCH 1992:90]. Die Weiterentwickelung dieser Idee führte zu dem Projekt DESERTEC (http://www.desertec.org/de/). Auf Initiative des Club of Rome, des Hamburger Klimaschutz-Fonds und des Jordanischen Nationalen Energieforschungszentrum (NERC) wurde 2003 das internationale Netzwerk TREC gegründet. In der ersten Phase konzentriert sich die Umsetzung der DESERTEC-Vision zunächst auf die sogenannte MENA-Region (Akronym für engl. Middle East + North-Africa) des Nahen Osten und Nordafrikas (Abb. 4.4.1).

Der Verbund solarthermischer Kraftwerke, Photovoltaik-, Windkraft und Biomasseanlagen soll nicht nur die Stromversorgung Nordeuropas aus erneuerbaren Energien gewährleisten, sondern die Abwärmenutzung bietet in der Erzeugerregion gleichzeitig die Möglichkeit einer großmaßstäblichen Meerwasserentsalzung. Grundlage des DESERTEC-Konzepts sind wissenschaftliche Studien des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) [DLR 2005]. Nach einer Studie von Greenpeace und EREC könnten im Jahr 2050 rund 20% des weltweiten Energiebedarfs aus der MENA-Region abgedeckt werden [GREENPEACE / EREC 2010a, GREENPEACE / EREC 2010b:42]. Als Hemmnisse bei der Realisierung werden derzeit neben Fragen der politischen Stabilität noch hohe Gesamtsystemkosten und technische Probleme u.a. im Umgang mit Wüstenwind und Flugsand angesehen.

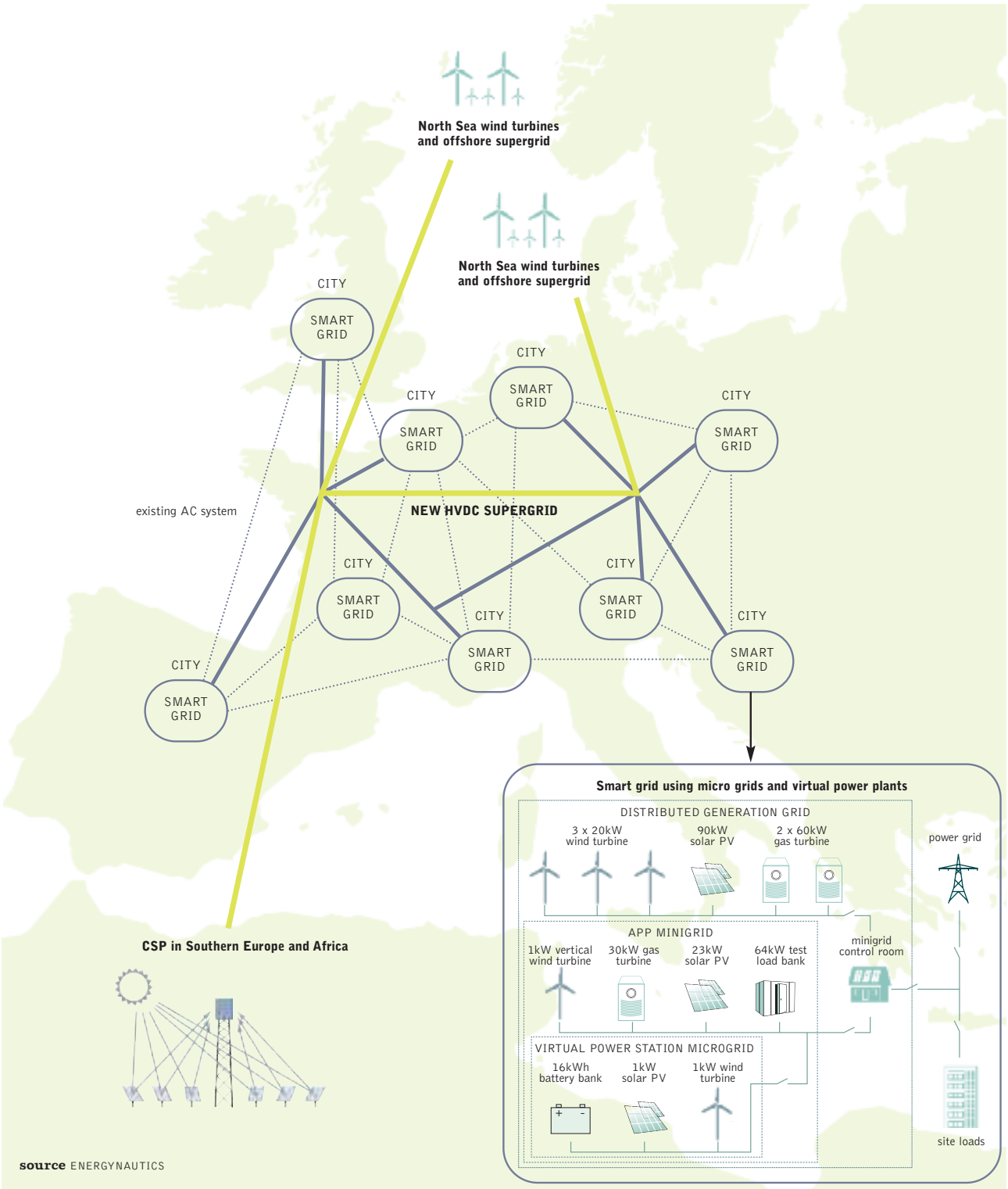


Abb. 4.4.1 Szenario einer zukünftigen Energieversorgung im Netzverbund mit Nordafrika durch ein Hochspannungs-Gleichstrom-Netz [GREENPEACE / EREC 2010b:42]

Kritiker einer zentralen Energieversorgung wie Hermann Scheer argumentieren hingegen, dass eine Weiterführung der zentralistischen Energiewirtschaft die geopolitischen Abhängigkeiten aufrechterhält und das ökonomische Potenzial regionaler Wertschöpfungsketten nicht genutzt wird [SCHEER 2002]. Scheer strebt eine vollständige Dezentralisierung der Energiesysteme mit eher kleinteiligen, regionalen Versorgungsnetzen oder sogar vollständig autarken Systemlösungen an. Die Nutzung fossiler Ressourcen führte historisch zu einer Konzentrierung und Monopolisierung der Energiewirtschaft auf wenige Großkonzerne, die einer nachhaltigen Transformation des Energiesystems zumindest bremsend entgegenstehen [SCHEER 2002:54f., 61].
Die strukturellen Eigenschaften erneuerbarer Energiesysteme mit ihrer Flächenabhängigkeit begünstigen eher mittelständisch orientierte Produktions- und Dienstleistungsunternehmen und fördern demonopolisierende Eigentums- und Entscheidungsstrukturen. „Die politische und wirtschaftliche Brisanz der erneuerbaren Energien liegt also in deren Dezentralität“ [SCHEER 2002:91].
Scheer begründet seine Thesen u.a. durch vergleichende Analysen fossiler und solarer Energiebereitstellungsketten [SCHEER 2002:83f.]. Die Wandlungs- und Speichertechnologien für eine regionale Energieautonomie und -autarkie sind vorhanden [SCHEER 2002:183f.]. Scheer sieht in der regionalen Energiewirtschaft eine wesentliche Voraussetzung zur Vermeidung zukünftiger Ressourcenkonflikte.

Der Weg in eine Zukunft mit erneuerbaren Energien wird voraussichtlich auf einer Synthese beider Strategien beruhen. In vielen europäischen Ländern wurden bereits seit einigen Jahren im ländlichen Raum auf der Grundlage von Biomassenutzung Konzepte einer energetischen Selbstversorgung umgesetzt. Seit Anfang der 1990er Jahre haben sich in der österreichischen Energieregion Oststeiermark viele Gemeinden mit der Nutzung von Bioenergie zunehmend von fossilen Energieträgern unabhängig gemacht. Die Gemeinde Güssing mit 4.000 Einwohnern im österreichischen Burgenland hat 1990 den Beschluss zu einem 100-prozentigen Ausstieg aus der fossilen Energieversorgung gefasst, der schrittweise umgesetzt wird. In der Steiermark gab es im Jahr 2000 bereits 177 Nahwärmenetze [IZNE: 2001]. Im Jahr 2004 wurden in Österreich ca. 25%, in Schweden und Finnland ca. 30% und in Lettland fast 45% des Primärenergiebedarfs durch erneuerbare Energien gedeckt – länderspezifisch zu einem überwiegenden Teil durch Biomasse [BMU 2006].

Ausgehend von diesen Vorbildern haben sich auch in Deutschland besonders im ländlichen Raum zahlreiche Initiativen gebildet, die eine Energieautarkie und -autonomie anstreben. Beispiele für diese Entwicklung sind das Zero-Emission-Village für die Verbandsgemeinde Weilerbach in Rheinland Pfalz [HECK 2003], die energieökologische Modellstadt Ostritz-St.-Marienthal in Sachsen, die Initiative eines energieautarken Wendlands und das Bioenergiedorf Jühnde (2005) (s. Kap. 4.4.2). Seit 2007 werden von dem BMU-geförderten Projekt *100ee-Regionen* alle Regionen und Initiativen in Deutschland dokumentiert, die ihre Energieversorgung langfristig vollständig auf erneuerbare Energien umstellen (www.100-ee.de). Derzeit gibt es bereits über einhundert Landkreise, Gemeinden und Regionalverbünde, die dieses Ziel verfolgen [MOSER 2010:3]. Demnach stellt sich weniger die Frage, ob Regionen und Kommunen eine 100% Vollversorgung mit erneuerbaren Energien erreichen können, sondern in welchem Zeitraum und wie das nachhaltig möglich ist. Hierbei wird kein Autarkieansatz verfolgt, sondern das Ziel ist eine ausgeglichene jährliche Gesamtenergiebilanz.

Hier stellt sich die Frage, welchen Beitrag bzw. Überschuss an Energie ländliche Regionen für die Energieversorgung urbaner Systeme leisten können und welche Form die infrastrukturelle Vernetzung annehmen wird. Im Folgenden werden daher die Charakteristika und Potenziale von 100%-EE-Regionen näher untersucht.

4.4.2 Das Bioenergiedorf Jühnde

Im niedersächsischen Jühnde ist die Vision einer nahezu CO_2-neutralen, energieautarken und nachhaltigen Energieversorgung bereits 2005 realisiert worden. *Energieautark* bedeutet hier allerdings keine Inselversorgung, sondern eine über das Jahr ausgeglichene Energiebilanz, die das Stromnetz als *Speicher* nutzt. Initiiert und geleitet wurde das Projekt von dem *Interdisziplinären Zentrum für Nachhaltige Entwicklung* (IZNE) an der Universität Göttingen unter Beteiligung verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen und Einrichtungen. Ausgehend von einem ersten Konzeptpapier im März 1998 folgte im Oktober 2000 der offizielle Projektbeginn. Nach zahlreichen Projektpräsentationen, Gemeinderatssitzungen und Dorfversammlungen wurde im Oktober 2001 u.a. aufgrund des starken Engagements der lokalen Akteure der Standort Jühnde zur Umsetzung ausgewählt.

Das Versorgungskonzept besteht aus einer nahwärmegekoppelten Biomassenutzung unter Verwendung lokaler Ressourcen wie Gülle und nachwachsende Rohstoffe (NaWaRo). Zentraler Bestandteil des Energiekonzepts ist ein BHKW, die Biogas (Methan) in elektrischen Strom und Wärme umwandelt. Das Biogas wird durch die Vergärung von Gülle und Pflanzensilage in einem Fermenter bei ca. 39°C Prozesstemperatur und dem zugehörigen Nachgärbehälter erzeugt. Täglich werden dem Fermenter ca. 29 m^3 Gülle und 32 t Feststoff aus NaWaRo zugeführt, um kontinuierlich Biogas in der benötigten Menge zu erhalten [KARPENSTEIN-MACHAN 2006, BIOENERGIEDORF JÜHNDE EG 2006]. Die Verbrennung des Biogases erfolgt durch einen Gasmotor mit einer Leistung von 700 KW_{elek} als BHKW. Der elektrische Strom wird in das Netz eingespeist, wobei die Stromproduktion größer als der Strombedarf des Dorfes ist. Die bei der Verbrennung freigesetzte Wärme wird zur Beheizung der Gebäude und zum Warmwasserbedarf eingesetzt, wobei ein Teil der Wärme als Prozesswärme für den Gärprozess benötigt wird.



Abb. 4.4.2 Biogasanlage - Fermenter
[Foto: Prytula 2006]

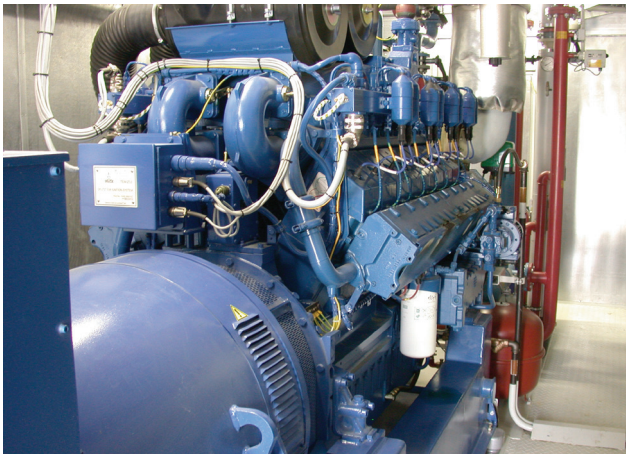


Abb. 4.4.3 Blockheizkraftwerk (BHKW)
[Foto: Prytula 2006]

Die Abwärme aus dem BHKW deckt etwa 60% des Heizwärmebedarfs. Der Restwärmebedarf im Winter wird durch einen zusätzlichen Heizkessel für Holzhackschnitzel bereitgestellt. Für den Spitzenbedarf oder beim Ausfall des BHKW wird durch einen Heizölkessel die Notversorgung sichergestellt. Die Anlagentechnik wurde werkseitig vorinstalliert, in Containern angeliefert und in kürzester Zeit angeschlossen. Der modulare Aufbau der Anlage sowie die *plug-and-play* - Installation führen zu einer hohen Wirtschaftlichkeit, regeln die Schnittstellen für Gewährleistungsfragen und ermöglichen Flexibilität bei möglichen Umbauten oder einer Systemerweiterung. Die Wärmeverteilung erfolgt über ein unterirdisches Nahwärmenetz aus Kupferrohren mit einer Länge von ca. 5,5 km und einem Leitungsdurchmesser von 2 cm - 20 cm bei Vorlauftemperaturen von 65-80°C. In jedem Gebäude befindet sich eine Hausübergabestation, die das Nahwärmenetz mit der Zentralheizung und der Warmwasserversorgung des Wärmekunden verbindet.

Eine Grundlage für die Finanzierung der neuen Energieversorgung ist das *Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien* (EEG) [BMJ 2009b]. Das Gesetz regelt die bevorzugte Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Quellen ins Stromnetz und garantiert den Erzeugern über festgelegte Anlagenlaufzeiten eine kostendeckende Einspeisevergütung. In Jühnde bekommt jede Kilowattstunde Strom, die im BHKW durch Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugt wird, eine Vergütung von ca. 17 Cent über eine Laufzeit von 20 Jahren. Die beim Energiewandlungsprozess freigesetzte Wärme wird als *Abfallprodukt* zusätzlich vermarktet. Eine weitere Voraussetzung ist die öffentliche Förderung in Höhe von insgesamt 1.500.000,- Euro, was etwa ein Drittel der Gesamtanlagenkosten und damit die Kosten für das Nahwärmenetz abdeckte. Bei Vertragsabschluss 2004 wurde ein Arbeitspreis für die bezogene Wärmeenergie von 4,9 Cent / kWh $_{\text{Wärme}}$ vereinbart. Unter Berücksichtigung der Investitionen und jährlichen Gesamtkosten ergibt sich ein Wärmevollkostenpreis von ca. 8 Cent / kWh, was einem Heizölpreis von ca. 35 bis 38 Cent pro Liter entsprechen würden [RUWISCH / FOLKER 2006, RUPPERT ET AL. 2007:15f., FNR 2010:45f.]. Aufgrund der gestiegenen Ölpreise der letzten Jahre ist eine Umsetzung dieses Wärmeversorgungskonzepts heute auch ohne eine zusätzliche Förderung möglich.
Im September 2005 wurde die Nahwärmeversorgung in Betrieb genommen. Mit insgesamt 142 Wärmekunden sind etwa 75% der Haushalte des Dorfes an das Nahwärmenetz angeschlossen. Seit Inbetriebnahme läuft die Anlage problemlos. Im ersten Betriebsjahr 2005/06 wurden mehr als 2,8 Mio. KWh elektrischer Strom erzeugt und ca. 3,5 Mio. KWh Wärme an das Dorf geliefert, wodurch mehr als 300.000 Liter Heizöl durch CO_2-neutrale Wärme ersetzt werden konnten [BIOENERGIEDORF JÜHNDE EG 2006]. Für die Bereitstellung der Biomasse werden ca. 200 ha Ackerfläche beansprucht. 700 Milchkühe und 1.500 Schweine produzieren insgesamt ca. 9.000 m³ Gülle im Jahr. Für die Holzhackschnitzel werden etwa 850 ha Laubwald bewirtschaftet. Abb. 4.4.4 gibt einen Überblick über die jährlichen Energie- und Stoffströme des Versorgungskonzepts sowie der Flächeninanspruchnahme für die Bereitstellung der Energieträger. Neben einer CO_2-neutralen Energieversorgung wird durch die Rückführung der organischen Rückstände aus dem Fermenter auf die Felder der Nährstoffkreislauf geschlossen. Die Fermentierung der Gülle hat zudem den positiven Effekt, dass weniger Nitrate aus den tierischen Ausscheidungen durch das direkte Aufbringen der Gülle auf die Felder in das Grundwasser gelangen. Eine landwirtschaftliche Begleitforschung untersucht u.a. die Optimierung der Fruchtfolge. Das Ziel ist eine dauerhafte Bodenbedeckung, um eine nachhaltige Bewirtschaftung der Böden bei gleichzeitiger Ertragsmaximierung durch mehrere Jahresernten zu erzielen.

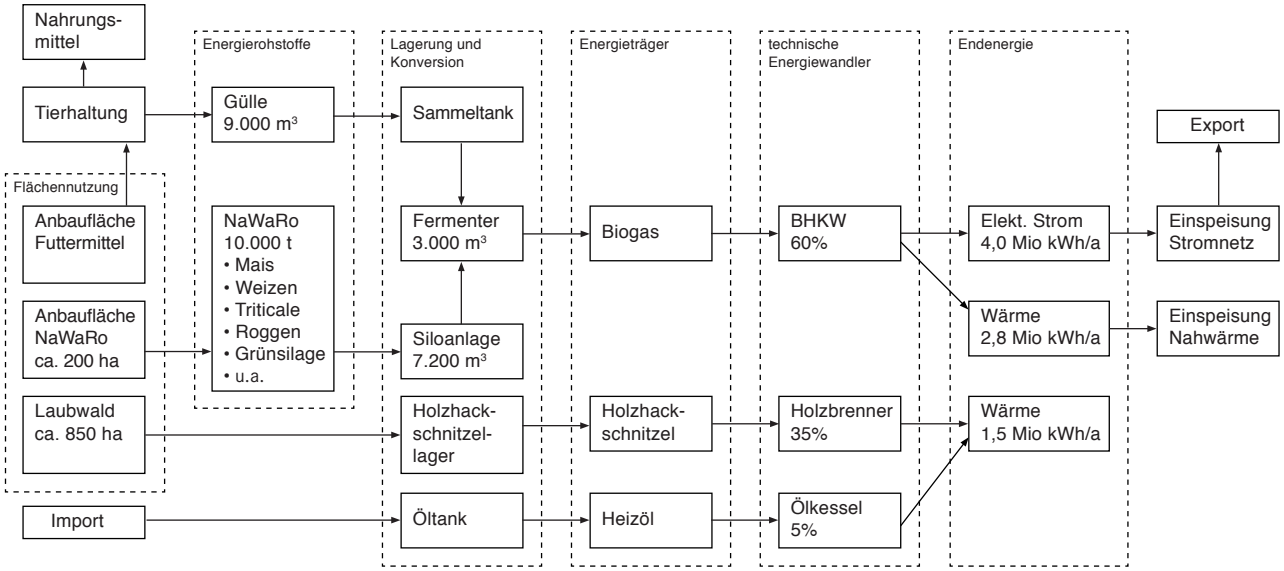


Abb. 4.4.4 Stoff- und Energieflussdiagramm Bioenergiedorf Jühnde, Stand 2006
Eigene Darstellung, Datenquelle: [BIOENERGIEDORF JÜHNDE EG 2006]

Die regionale Wertschöpfung durch die Nutzung der lokalen Biomasse wird auf insgesamt ca. 800.000,- Euro / Jahr geschätzt, die am Ort bleibt und langfristig Arbeitsplätze sichert. Durch den Verkauf von Energiepflanzen mit einem Gesamtumsatz von ca. 200.000,- Euro pro Jahr und durch langfristige Lieferverträge erzielen die Jühnder Landwirte stabile landwirtschaftliche Einkommen. Für den Anlagenbetrieb wurden 1,5 Vollzeitarbeitsstellen neu geschaffen. Neben dem Ziel einer effizienten und nachhaltigen Ressourcennutzung lassen sich positive Effekte auf die regionale Wertschöpfung verzeichnen.

Optimierungsmöglichkeiten bestehen dahingehend, dass noch keineswegs alle energetischen Potenziale ausgeschöpft worden sind. Durch eine energetische Optimierung der Gebäude ließe sich der Energiebedarf insgesamt herabsenken. Die Dachflächennutzung durch aktive Solarenergiesysteme stellt ein weiteres, bislang ungenutztes Potenzial dar. Andererseits liefert das BHKW im Sommer einen Wärmeüberschuss, für den es (noch) keinen sinnvollen Wärmeabnehmer gibt. Der Verkehrssektor wird bislang nicht durch erneuerbare Energien versorgt. Von Konrad Scheffer, der das Energiekonzept für Jühnde maßgeblich mitgestaltet hat, gibt es weitergehende Überlegungen zur Optimierung der Biomassenutzung [SCHEFFER 2007 und 2008]. Die im BHKW anfallende, ungenutzte Abwärme wird zur Pelletierung von Biomasseabfällen genutzt, wodurch eine Steigerung der Nutzungseffizienz der Biomasse und der Wirtschaftlichkeit der Anlage erzielt wird.

Dennoch ist das Bioenergiedorf Jühnde ein eindrucksvolles Beispiel, wie durch eine dezentrale Energieversorgung die ökologischen, ökonomischen und sozialen Ziele einer nachhaltigen Entwicklung miteinander im Einklang gebracht werden können. Eine ausführliche Beschreibung zur Entwicklung des Projekts von der Machbarkeitsstudie bis zur technischen Umsetzung mit detaillierten Ausführungen zu allen technologischen, rechtlichen und ökonomischen Aspekten wie Anlagentechnik, Lieferverträge, Finanzierungs- und Wärmekostenmodell ist in der Veröffentlichung *Wege zum Bioenergiedorf. Leitfaden für eine eigenständige Wärme- und Stromversorgung auf Basis von Biomasse im ländlichen Raum* [FNR 2010] sowie in weiteren Veröffentlichungen zu finden [IZNE 2001, PRYTULA 2006].

4.4.3 Energieautarke Regionen – Modelle für ein regionales Energiemanagement

Die Entwicklung von Bioenergiedörfern und Bioenergie-Regionen in den letzten 20 Jahren zeigt, dass ökonomisch und sozial tragfähige Konzepte für eine vollständige Energieversorgung durch erneuerbare Energien zumindest im ländlichen Raum vorhanden sind. Es handelt sich dabei um einen akteursorientierten Ansatz, der als angewandtes Stoffstrommanagement die Nutzung regionaler, energetischer und stofflicher Potentiale mit regionaler Wertschöpfung verbindet. Die dezentrale Nutzung erneuerbarer Energien fördert in einem umfassenden Sinne die nachhaltige Entwicklung dieser Lebensräume. Der Ausbau erneuerbarer Energien und insbesondere die Biomassenutzung sind zu einem Motor nachhaltiger Regionalentwicklung geworden. „Erneuerbare Energien ermöglichen es, Arbeitsplätze und Einkommen etwa aus den Erdölförderländern wieder „zurückzuholen“ in die europäischen (ländlichen) Regionen. Sie eröffnen Landwirten und anderen regionalen Unternehmen die Möglichkeit, ihre Einkommensquellen zu diversifizieren und zu stabilisieren“ [TISCHER ET AL. 2006:36].

Im März 2009 wurde von dem Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) in einem Bundeswettbewerb zum Aufbau regionaler Netzwerke im Bereich der Bioenergie von insgesamt 210 Bewerber-Regionen 25 Bioenergie-Regionen ausgezeichnet und durch weitere finanzielle Fördermittel unterstützt. Das BMELV verzeichnete 2010 bereits 78 Bioenergiedörfer in Deutschland. Auf der Internetseite des BMELV sind die Regionen mit den jeweiligen technologischen und organisatorischen Merkmalen ausführlich dargestellt (http://www.bioenergie-regionen.de/).

Folgende charakteristische Maßnahmen für eine CO_2-neutrale und nachhaltige Energieversorgung lassen sich in Bioenergiedörfern und Bioenergie-Regionen identifizieren:

- Nutzung der regionalen land- und forstwirtschaftlichen Ressourcen zur Erzeugung der Energieträger
- effiziente Nutzung der Energieträger durch dezentrale Energieerzeugungsanlagen mit KWK
- Netzeinspeisung elektrischer Energie als *Speicher* und lokale Nutzung der Wärme
- nachhaltige Landbewirtschaftung mit geschlossenen Nährstoffkreisläufen
- regionale Wertschöpfung mit positiven Beschäftigungseffekten
- regionale Stabilität durch die Sicherung von Subsistenzfunktionen

An der Universität Kassel wurden vom Verfasser im Zeitraum von 2006 bis 2008 studentische Seminare zum Thema *Energieautarke Regionen* durchgeführt. In Abb. 4.4.5 ist ein typisches Seminarbeispiel für eine Gemeinde in Oberfranken dargestellt, das auf Initiative von Matthias Böhm mit lokalen Akteuren zur Realisierung weiterentwickelt wurde. Das Beispiel ist insofern bemerkenswert, als dass es zeigt, wie durch die Initiative einzelner Akteure umfassende regionale Veränderungen bewirkt werden können. Die Besichtigung vorhandener Best-Practise-Beispiele dient hierbei als eine wichtige Quelle der Wissensvermittlung und Überzeugung von Akteuren und Entscheidungsträgern. Mittlerweile geben verschiedene Leitfäden und Handbücher praxisnah Auskunft über die Einflussfaktoren und Maßnahmen, die bei der Entwicklung solcher Initiativen zu beachten sind [FNR 2000, TISCHER ET AL. 2006]. Auf Initiative des Forschungsprojekts *100% ee-Region* findet seit 2009 jährlich ein Kongress in Kassel statt, wo alle Entwicklungen zu diesem Thema präsentiert und diskutiert werden (http://www.100-ee-kongress.de/startseite.html).

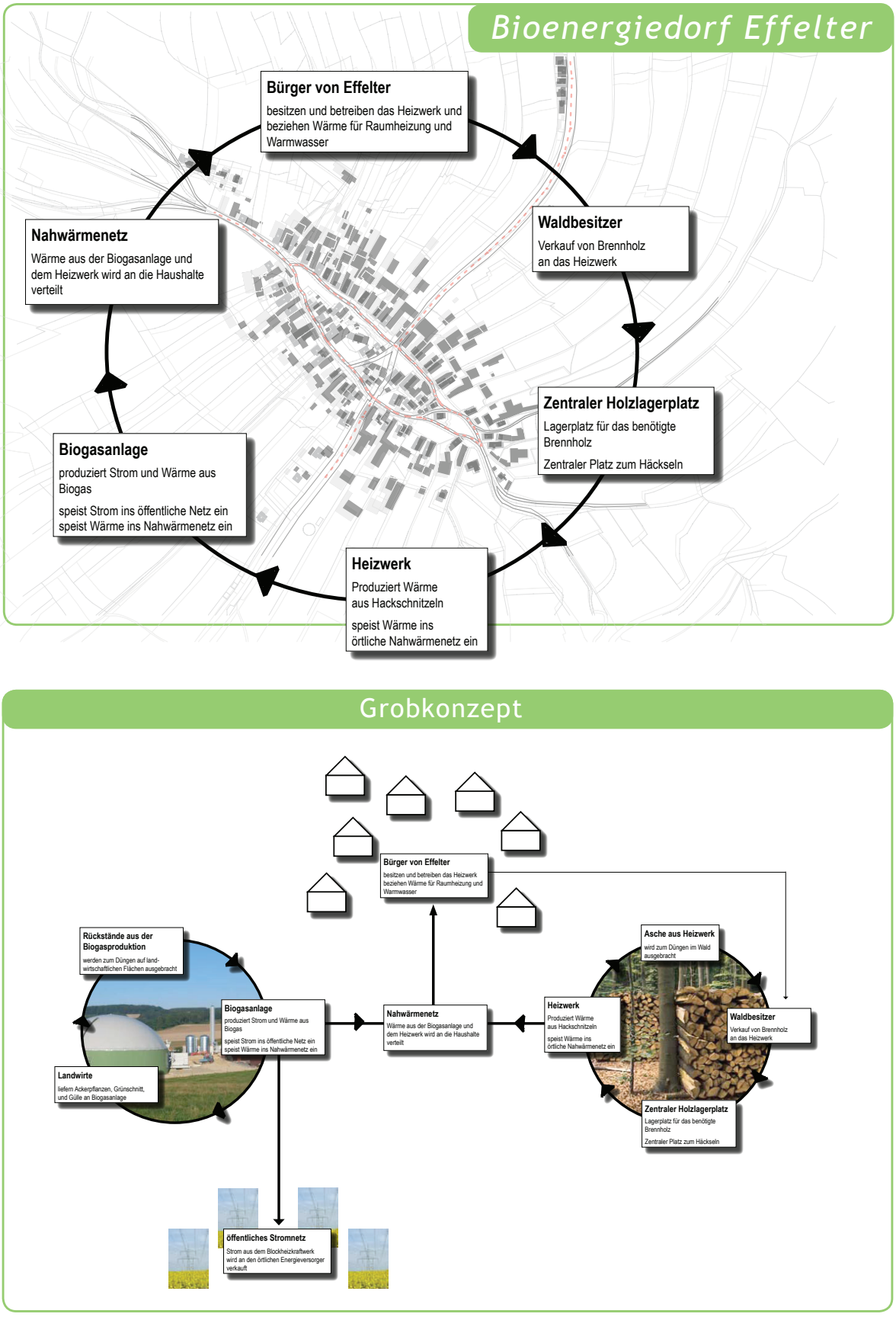


Abb. 4.4.5 Bioenergiedorf Effelter: Praxisorientiertes Projekt von Matthias Böhm [BÖHM 2006]
Seminar *Energieautarke Regionen* , FG TGA, Universität Kassel, 2006

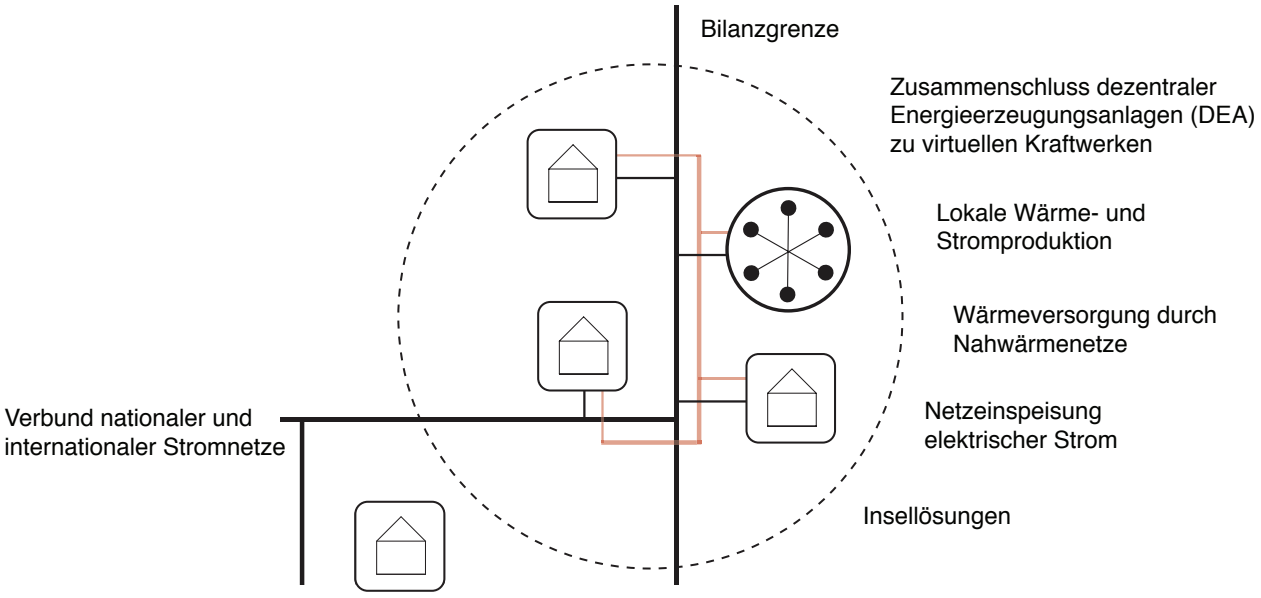


Abb. 4.4.6 Mikrostruktur einer regionalen Energieversorgung mit virtuellen Kraftwerken, lokalen Wärmenetzen und einem überregionalen Strom- und Gasnetz [Prytula 2007]

Im Rahmen des Forschungsprojekts *100% ee-Region* wurde folgendes Leitbild einer vorläufigen und im Laufe des Projekts noch zu spezifizierenden Vision einer „100%-EE-Idealregion“ entwickelt: „Eine 100%-Erneuerbare-Energie-Idealregion“ deckt ihren Energiebedarf vollständig aus EE, wirtschaftet ausgesprochen energieeffizient, und nutzt ihre regionalen Potenziale nachhaltig und akzeptiert. Somit ist die Energiebereitstellung umweltverträglich, nachhaltig und sicher und trägt zur regionalen Wertschöpfung bei. Die Einbindung regionaler Akteure ist realisiert und es gibt eine hohe Akzeptanz der Bevölkerung für diese Art der Energieversorgung. Regionale Schlüsselakteure haben gemeinsam mit Endnutzern, Erzeugern und Umsetzern den Entwicklungsprozess gestaltet, der zu einer umfassenden Energieversorgung mit EE führt. Zur Kostensenkung und Sicherstellung der Versorgungssicherheit arbeitet sie im Netzverbund mit anderen Idealregionen zusammen. Energieeffizienz, nachhaltige Energieproduktion und regionale Aktivitäten zum energiebewussten Verhalten sind für sie selbstverständlich“ [DEENET 2009:12].

In konsequenter Weiterentwicklung dieser Ansätze sind energieautarke Regionen denkbar, die nicht nur den regionalen Energiebedarf abdecken, sondern durch Export regenerativ erzeugter Energien einen Beitrag zur Deckung des Energiebedarfs urbaner Systeme leisten können. Durch die Nutzung von Windenergie sind manche Kommunen bereits heute zu Netto-Energieexporteuren geworden. Der Verbund vielfältiger *dezentraler Energieerzeugungsanlagen* (DEA) zu *virtuellen Kraftwerken* in Verbindung mit dem Ausbau der Elektrizitätsinfrastruktur zu *Smart Grids* erweist sich derzeit als ein technologisch und ökonomisch möglicher Weg in eine nachhaltige Energiewirtschaft (Abb. 4.4.6 - 8). Der Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien und deren räumlich-ästhetische Integration sind zu einer wichtigen Aufgabe der Regionalplanung geworden. Die Regionalplanung steuert eine Vielzahl raumwirksamer Interessen. Die Ausweisung von Windvorranggebieten oder der Genehmigung von PV-Freiflächenanlagen sind mit anderen Anforderungen der Raumentwicklung wie Landschaftsbild, Tourismus und Naturschutz miteinander in Einklang zu bringen. Im Forschungsprogramm *Modellvorhaben der Raumordnung* (MORO) des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

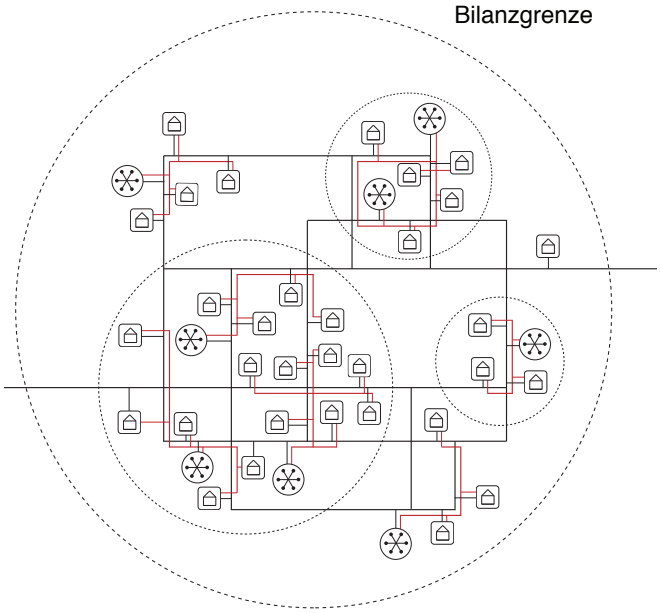


Abb. 4.4.7 Makrostruktur einer regionalen Energieversorgung [Prytula 2007]

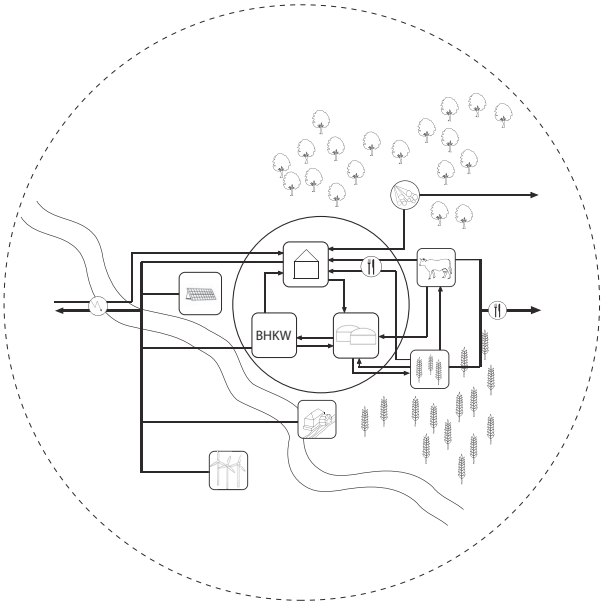


Abb. 4.4.8 Vernetzung verschiedener Energie- und Stoffströme für ein regionales Energiekonzept

(BMVBS) wurden seit 2008 in zwei Studien zur *Strategischen Einbindung regenerativer Energien in regionale Energiekonzepte* am Beispiel von vier Modellregionen (Friesland, Hannover, Trier und Nordschwarzwald) hinsichtlich der praktischen Umsetzung innovativer, raumordnerischer Handlungsansätze und Instrumente für die Entwicklung regionaler Energiekonzepte näher untersucht [BMVBS 2011a]. Eine integrierte Regionalentwicklung kann dazu beitragen, raumwirksame Konflikte zu vermeiden und die Akzeptanz der Bevölkerung beim Ausbau erneuerbarer Energien zu erhöhen.

Die *Verlusterfahrung Landschaft*, wie Gerhard Lenz die Veränderungen des Landschaftsbildes im mitteldeutschen Industrieraum um Bitterfeld infolge von Industrialisierung, Braunkohleabbau und der Entwicklung des chemischen Industriedistrikts seit Ende des 19. Jahrhunderts beschrieben hat [LENZ 1999], ist in anderer Form als Folge großflächiger Ausweitungen von Windkraftanlagen, PV-Freianlagen, Mais- oder Rapsmonokulturen oder Kurzumtriebsplantagen präsent. Ähnlich wie der Wandel vom agri-kulturellen zum fossilen Energiesystem ist auch die Entwicklung zum postfossilen Energiesystem mit einer Veränderung der Kulturlandschaft verbunden (Abb. 4.4.9, 4.4.10).



Abb. 4.4.9 Windenergiekonverter [Foto: Prytula 2006]



Abb. 4.4.10 PV-Freiflächenanlage Solarpark Münchberg / Oberfranken, Nennleistung 6,84 MW $_{peak}$ [Foto: Prytula 2010]

4.5 Szenarien für den Übergang ins zweite solare Zeitalter

4.5.1 Szenarien zur Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland

Bereits 2004 veröffentlichte das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) eine umfangreiche Studie zum ökologisch optimierten Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland [BMU 2004]. Es wurde untersucht, wie im Jahr 2050 die Hälfte des Energiebedarfs regenerativ gedeckt werden kann. Der Studie zufolge wird der Gesamtenergiebedarf in Deutschland aufgrund verschiedener Faktoren wie z.B. demographischer Wandel von derzeit 14.000 PJ/a um ca. 20% auf etwa 11.343 PJ/a zurückgehen. Davon lassen sich etwa 40% durch Effizienzmaßnahmen einsparen. Der verbleibende Energiebedarf kann dem Szenario zufolge zu ca. 44% durch erneuerbare Energien gedeckt werden. Mit fast 43% leistet die Biomasse fast die Hälfte des gesamten Beitrags zur Bereitstellung erneuerbarer Energien. Die in der Biomasse gespeicherte chemische Energie eignet sich im Gegensatz zur stochastisch schwankenden Verfügbarkeit aus anderen erneuerbaren Energien wie Windenergiekonverter (insbesondere bei Onshore-Anlagen) und Photovoltaikanlagen gut zur Wärme- und Strom-Grundlast-Erzeugung (Abb. 4.5.1, 4.5.2) [BMU 2004:191, 192].
Die Studie trifft allerdings nur wenige Aussagen zu den räumlichen Allokationsbeziehungen zwischen der Bereitstellung und Nutzung erneuerbarer Energien. Insbesondere bei der geringen Energiedichte der meisten biogenen Energieträger ist die räumliche Beziehung aber ein wichtiges Kriterium, da die effiziente Energiewandlung in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK) eine verbrauchernahe Erzeugung bedingt. Neben der Frage von Nutzungskonkurrenzen zwischen den Energiesektoren selbst (Wärme, Elektrizität, Treibstoffe) sowie zwischen energetischer oder stofflicher Nutzung kommt der Implementierung erprobter und neuer Energiesysteme eine große Bedeutung zu.

In der Weiterführung dieser Studie [BMU 2008, BMU 2010] wurden verschiedene Szenarien u.a. mit Varianten zu unterschiedlichen Restlaufzeiten von Kernkraftwerken oder des Ausbaus von Elektromobilität unter Berücksichtigung verschiedener Technologiepfade und aktualisierter ökonomischer Rahmenbedingungen untersucht. Neben dem Verkehrssektor lassen sich durch einen konsequenten Ausbau von Effizienzstrategien bei der Wärmebereitstellung durch KWK die größten Einsparungen in der Nutzung fossiler Energien erzielen. „Der Beitrag netzgebundener Wärme (Fern- und Nahwärme) steigt von derzeit 380 PJ/a bis 2030 auf 680 PJ/a und bis 2050 auf 875 PJ/a. An fossilen Brennstoffen werden im Jahr 2050 noch 1150 PJ/a benötigt, was 30% des heutigen Einsatzes entspricht“ [BMU 2010:8].

Die Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse in Deutschland wurden u.a. in einer Studie des Wuppertal Instituts in Zusammenarbeit mit dem Institut für Energetik und Umwelt GmbH Leipzig und dem Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik untersucht. Demnach könnten bis zum Jahr 2020 rund 12 Mrd. m^3 Bioerdgas aus Gülle, Mist und Energiepflanzen produziert werden. Diese Menge entspricht etwa 10% des aktuellen Erdgasverbrauchs in Deutschland. Unter diesen Annahmen wird die Nahrungsmittelproduktion nicht beeinflusst, da in der Studie nur zusätzliche Ackerflächen für die Energieproduktion berücksichtigt sind [RAMESOHL 2005:9]. Neben der Nutzung von Gülle und NaWaRo kann die Holzvergasung z.B. von Energieholz aus Kurzumtriebsplantagen eine weitere Quelle zur Erzeugung von Biomethan werden.

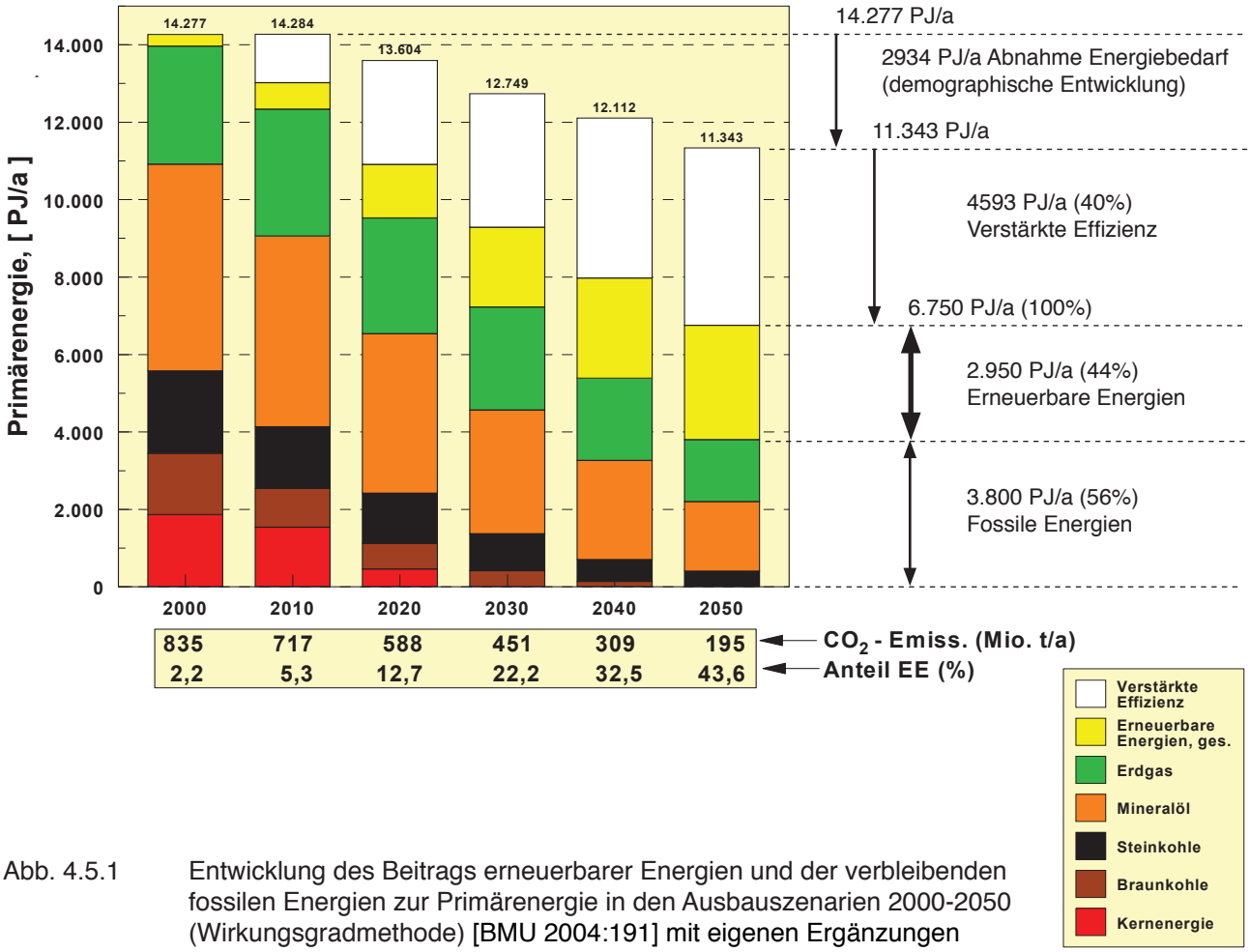


Abb. 4.5.1 Entwicklung des Beitrags erneuerbarer Energien und der verbleibenden fossilen Energien zur Primärenergie in den Ausbauszenarien 2000-2050 (Wirkungsgradmethode) [BMU 2004:191] mit eigenen Ergänzungen

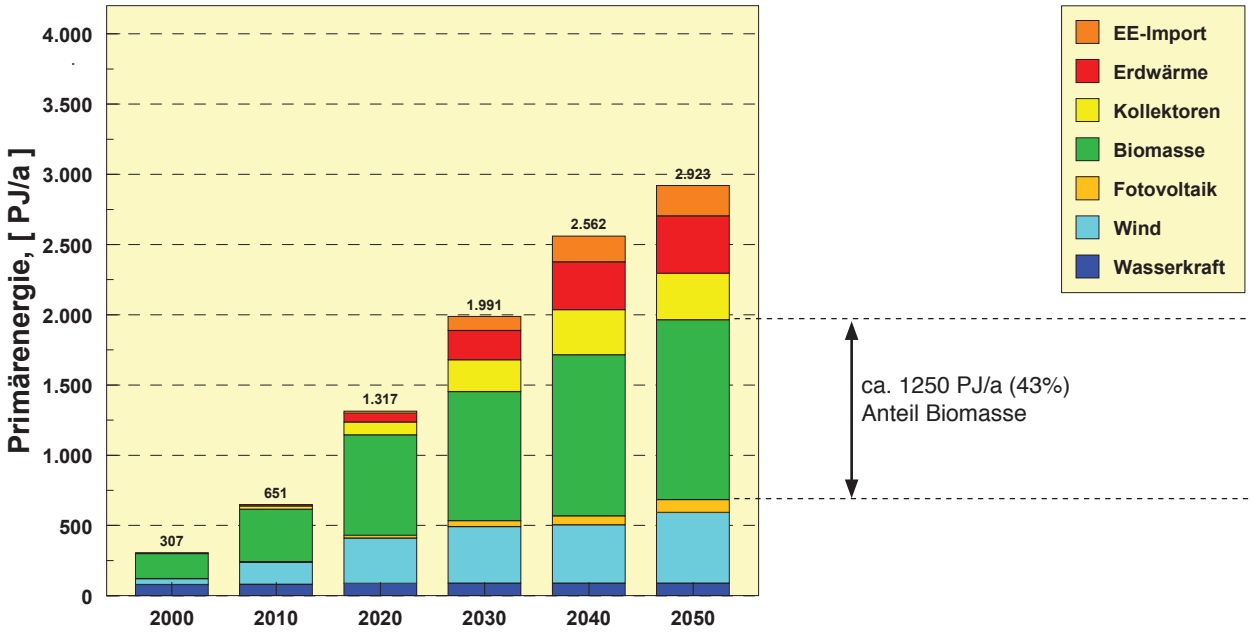


Abb. 4.5.2 Struktur des Primärenergiebeitrags erneuerbarer Energien (Wirkungsgradmethode) in den Ausbauszenarien am Beispiel des Szenarios NaturschutzPlus II [BMU 2004:192]

4.5.2 100% erneuerbare Energien zur Stromversorgung bis 2050

Für den Stromsektor gibt es aktuelle Szenarien, die besagen, dass eine vollständige Energieversorgung aus erneuerbaren Energien bis 2050 nicht nur technologisch, sondern auch ökonomisch realisierbar und anzustreben ist [SRU 2010, FVEE 2010]. Nach Aussage des Sachverständigenrats für Umweltfragen (SRU) kann die Stromversorgung in Deutschland bis zum Jahr 2050 vollständig, versorgungssicher und unter vertretbaren ökonomischen Bedingungen durch erneuerbare Energien gewährleistet werden. Die Aussage beruht auf einer Studie des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), die im Auftrag des SRU verschiedene technisch-ökonomische Szenarien einer vollständig regenerativen Stromversorgung berechnet hat [SRU 2010]. Die Szenarien gehen von der Prämisse einer vollständig regenerativen Stromerzeugung im Jahr 2050 aus, die unter verschiedenen Rahmenbedingungen hinsichtlich der eingesetzten Erzeuger- und Speichertechnologien sowie des Vernetzungsgrads mit dem Ausland realisiert werden können. In der Studie des SRU wurden drei Szenariofamilien untersucht:

Die **erste Szenariofamilie** betrachtet Deutschland als *elektrische Insel*, die unter autarken Bedingungen vollständig regenerativ versorgt wird. Die gesamte Stromnachfrage und die notwendige Zwischenspeicherung werden hierbei durch regionale erneuerbare Quellen und Speichersysteme abgedeckt. Ein Stromaustausch mit dem Ausland wird nicht zugelassen.

Die **zweite Szenariofamilie** modelliert Deutschland als Teil eines nordeuropäischen Stromverbunds mit Dänemark und Norwegen. Der Selbstversorgungsgrad kann in diesen Szenarien bis auf 85% sinken. Die Nutzung von Pumpspeicherpotenzialen in Norwegen sowie der Stromaustausch bzw. Nettoimport aus Skandinavien mit einem Anteil von jeweils 15% an der Gesamtjahresleistung tragen zu einer erheblichen Kostensenkung gegenüber einer vollständigen Autarkie bei. Die Analysen des einfachen Dreiländerverbundes erlauben auch Rückschlüsse auf größere europäische Verbundlösungen.

Die **dritte Szenariofamilie** erweitert den Stromverbund auf ganz Europa und die Region Nordafrika. In diesen Szenarien wird ebenfalls für jedes am Verbund beteiligte Land ein Nettoimport von maximal 15% der elektrischen Jahresarbeit zugelassen, um eine möglichst hohe Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Der größere Verbund ermöglicht es, auf sehr viel größere Potenziale regenerativer Energiequellen zurückzugreifen und regionale Schwankungen besonders im Angebot der Windenergie durch eine großräumige Vernetzung besser auszugleichen.

Für die Berechnung aller Szenariogruppen werden jeweils zwei Varianten des Strombedarfs mit einer Stromnachfrage von 500 TWh bzw. 700 TWh im Jahr 2050 auf der Basis eines skalierten, stündlich aufgelösten Jahreslastgangs angenommen:

Die **erste Variante** nimmt einen jährlichen Strombedarf (Nettostromverbrauch) in Deutschland im Jahr 2050 von ca. 500 TWh an. Dieser Bedarf ergibt sich, wenn konsequent alle Maßnahmen zur Energieeinsparung und Effizienzsteigerung bei konventionellen Stromnutzungen ausgeschöpft werden. In dem Szenario ist aber auch die Elektrifizierung des Individualverkehrs in einem signifikanten Umfang in Höhe der Hälfte der derzeitigen Verkehrsleistung einberechnet.

Die **zweite Variante** nimmt einen jährlichen Strombedarf von 700 TWh für Deutschland an, der unter den Voraussetzungen zu erwarten ist, wenn keine ehrgeizige Effizienzstrategie umgesetzt wird und zusätzlich der Individualverkehr weitestgehend durch elektrische Antriebe erfolgt. „Durch eine vollständige Elektrifizierung des Individualverkehrs wäre mit einer zusätzlichen Stromnachfrage von bis zu 100 TWh/a zu rechnen (vgl. WIETSCHEL und DALLINGER 2008). Bei einer erfolgreichen Umsetzung von Effizienzstrategien wäre es möglich, im Rahmen eines 700 TWh/a-Szenarios neben dem Individualverkehr auch den größten Teil des im Jahr 2050 verbleibenden Heizwärmebedarfs und einen deutlich größeren Anteil des industriellen Prozesswärmebedarfs elektrisch zu decken“ [SRU 2010:16].

Für die Erstellung der Szenarien wurde das Energiesystemmodell REMix verwendet, das mit einer hohen zeitlichen Auflösung arbeitet und die Stromerzeugung im Jahresverlauf stundengenau auf die Nachfrage abgestimmt abbildet. Um die Versorgungssicherheit im Stromsektor zu gewährleisten, muss zu jedem Zeitpunkt des Jahres entweder die zeitgleiche Produktion (regenerativer) Elektrizität oder der Einsatz zuvor gespeicherten Stroms gewährleistet sein. Das Modell setzt hierzu verschiedene Erzeugungsoptionen (Sonne, Wind, Biomasse, Wasserkraft und Geothermie) sowie Speichertechnologien (Pumpspeicherkraftwerke, Druckluftspeicher) ein und berechnet die jeweils kostenoptimale Zusammensetzung der verschiedenen Technologien. Die Zunahme zeitlich fluktuierender Erzeugung aus Wind- und Sonnenenergie im deutschen Stromnetz kann damit durch das Modell gut abgebildet werden [SRU 2010:82].

Eine vollständig regenerative nationale Selbstversorgung mit Strom wäre zwar möglich, ist aber vor dem Hintergrund des europäischen Binnenmarktes für Elektrizität keineswegs anzustreben. Durch europäische Verbundlösungen können die Kosten erheblich gesenkt und die Versorgungssicherheit erhöht werden. Die anstehende Erneuerung des Kraftwerkparks in Deutschland bietet eine besonders günstige Bedingung, eine Umstellung der Stromversorgung auf eine nachhaltige Nutzung erneuerbarer Energien kostengünstig und ohne Strukturbrüche umzusetzen. Der derzeitige Bestand an konventionellen Kraftwerken ist als *Brücke* zu einer regenerativen Stromversorgung ausreichend [SRU 2010:82]. Bei einer durchschnittlichen betrieblichen Laufzeit von 35 Jahren kann der Übergang schrittweise gestaltet werden. Hierfür muss der jährliche Zubau an regenerativen Erzeugungskapazitäten bis etwa 2020 in moderatem Umfang weiter gesteigert werden. Langfristig senkt eine anspruchsvolle Energiespar- und Effizienzpolitik die ökonomischen und ökologischen Kosten der deutschen Stromversorgung durch eine Versorgung mit erneuerbaren Energien.

4.5.3 Erdgas als Brücke ins regenerative Zeitalter

Nach einer Studie des Wuppertal Instituts wird für die Übergangszeit bis zur Vollversorgung durch erneuerbare Energien ab etwa Mitte des 21. Jahrhunderts Erdgas als derjenige fossile Energieträger gesehen, der in idealer Weise eine Brückenfunktion einnehmen kann [WUPPERTAL INSTITUT 2010]. Im Stromsektor kommt dem Erdgas sogar aufgrund einer hocheffizienten Stromerzeugung in Gas-und-Dampf-Kombikraftwerken (GuD) und KWK-Anlagen eine Schlüsselstellung zu. Erdgas ist im Vergleich zur Kohle ein deutlich kohlenstoff- und damit emissionsärmerer Brennstoff und bietet auch in technologischer Hinsicht viele Vorteile. Aufgrund der bereits gut ausgebauten Erdgasnetze und -speicher können sowohl zentrale als auch dezentrale Anlagen mit hoher Effizienz zur Kraft-

Wärme-Kopplung wie GuD-Anlagen, BHKW, Mikro-BHKW, Mikroturbinen, Brennstoffzellen) eingesetzt werden. Im Vergleich zu Kohle- oder Kernkraftwerken haben Erdgaskraftwerke gute Regeleigenschaften und werden schon heute bei Spitzenlasten und zur Netzstabilisierung eingesetzt. Bei einer weiterhin vorrangigen Einspeisung erneuerbaren Stromes löst sich die gegenwärtige Dreigliederung in Grund-, Mittel- und Spitzenlast auf. Grundlastkraftwerke im klassischen Sinn wird es zukünftig immer weniger geben, da die verbleibenden fossilen Kraftwerke verstärkt zur Regelung beitragen müssen [HOHMEYER 2010, WUPPERTAL INSTITUT 2010:14]. Im Vergleich zu anderen fossilen Kraftwerken weisen Gaskraftwerke die geringsten Kapitalkosten auf, so dass sie tendenziell auch bei einer geringeren Auslastung wirtschaftlich betrieben werden können [WUPPERTAL INSTITUT 2010:15]. Flexibel einsetzbare Blockheizkraftwerke mit Wärmespeichern ergänzen die dezentralen Strukturen virtueller Kraftwerke mit stochastischen Stromeinspeisungen aus Wind- und Solaranlagen sogar in idealer Weise.

Der Ausbau erneuerbarer Energien führt voraussichtlich ab ca. 2020 zu einem starken Anstieg von Überschussstrom aus fluktuierenden EE-Quellen im deutschen Stromnetz. „Bis 2050 wächst die Überschusskapazität auf maximal bis zu 40 GWel an (Sterner u. a., 2010). Dies bedeutet, dass nicht nur zur Deckung der positiven Residuallast eine ausreichende Anzahl schnell regelbarer Spitzenlastkraftwerke bereitstehen müssen. Zur Aufnahme der negativen Residuallast müssen zusätzlich Speichersysteme mit ausreichender Leistung und Kapazität ausgebaut bzw. neu entwickelt werden“ [WUPPERTAL INSTITUT 2010:17]. Für die Aufnahme der Überschusskapazität besteht mit dem „Power-to-Gas-Ansatz“ ein weiterer Lösungsbeitrag zur Systemintegration erneuerbarer Energien. „Bei diesem Verfahren wird im ersten Schritt mit dem EE-Überschussstrom mittels Elektrolyse Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Im zweiten Schritt reagiert der erzeugte Wasserstoff mit Kohlendioxid zu Methan. Auf diesem Wege kann regenerativer Überschussstrom in eine leicht speicherbare und universell im Erdgasnetz einsetzbare Energieform überführt werden. Die wesentlichen Vorteile dieser Option liegen darin, dass die gesamte vorhandene Erdgas-Infrastruktur (Speicher, Netze, Gaskraftwerke etc.) nahezu unverändert genutzt werden könnte. Somit stünde eine nationale, verlustarme Langzeitspeichermethode von sehr großer Kapazität zur Verfügung: Die vorhandenen Gasspeicher in Deutschland haben eine Gesamtkapazität von ca. 200 TWhth, daraus ließen sich theoretisch – z.B. über einen zentralen/dezentralen Gaskraftwerksmix – rund 100 TWh_{el} zurückverstromen. Bei einem derzeitigen Stromverbrauch von rund 600 TWh/a entspräche dies einer maximalen theoretischen Versorgungsreichweite von ca. zwei Monaten (Sterner u. a., 2010)“ [WUPPERTAL INSTITUT 2010:17]. Die Einspeisung von zu Erdgasqualität aufbereitetem Biomethan aus Vergärung (Fermentation) oder Vergasung von Biomasse ist eine weitere wichtige Option, das Erdgas zukünftig zu substituieren.

Trotz der hohen Importabhängigkeit insbesondere von Russland scheint die Erdgasversorgung Deutschlands unter geeigneten politischen Rahmenbedingungen mit hoher Wahrscheinlichkeit für die nächsten Jahrzehnte gesichert. Die Einsparpotenziale im Wärmemarkt, alternative Versorgungsrouten (z. B. Ostseepipeline) und Versorgungsoptionen wie LNG, Biogas und Biomethan aus erneuerbarem Stromüberschuss gewährleisten auch zukünftig den Einsatz von Erdgas ohne die Gefahr erhöhter Abhängigkeit. Somit bietet Erdgas die besten Voraussetzungen, um als eine Brückenlösung den Ausbau erneuerbarer Energien und den Umbau der Energieinfrastruktur richtungssicher und kostenoptimiert zu vollziehen.

4.6 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der sich abzeichnenden Krise des fossilen Energiesystems aufgrund der Endlichkeit der fossilen Ressourcen, der geopolitischen Risiken sowie der wahrnehmbaren Klimaveränderungen – die vor allem auf die Verbrennung fossiler Energieträger zurückgeführt werden – wurden in diesem Kapitel die Charakteristika und Potenziale erneuerbarer Energien und ihre technologische und sozioökonomische Integration in den anthropogenen Energiehaushalt beschrieben. Der Fokus liegt dabei auf der Wärmeversorgung von Gebäuden und Siedlungsstrukturen, die rund ein Drittel des Endenergieverbrauchs in Deutschland ausmachen.
Zur Analyse und Bewertung von Energiesystemen werden komplexe Energiesystemmodelle eingesetzt. Mit der Unterstützung von Geoinformationssystemen können die energetischen Potenziale ermittelt werden. Am Beispiel der Stadt Osnabrück wurde der Nachweis erbracht, dass allein durch die photovoltaische Nutzung der günstigsten Dachflächen bereits eine nahezu vollständige Versorgung des Strombedarfs der privaten Haushalte möglich ist [KLÄRLE 2007:34]. Wir verfügen heute über ein umfangreiches technologisches Wissen im Energiemanagement von Systemen in allen physiologischen Maßstabsebenen, angefangen bei bauphysikalischen und versorgungstechnischen Prozessen in Gebäuden bis hin zur Entwicklung regionaler Energiekonzepte für Bioenergiedörfer oder 100% EE-Regionen. Wir verfügen auch über die ökonomischen und juristischen Instrumente, dieses Wissen in der Praxis zu implementieren.
Die Bundesregierung hat mit dem *Integrierten Energie- und Klimaprogramm* (IEKP) vom Dezember 2007 das Ziel formuliert, den Anteil erneuerbarer Energien an der Strom- und Wärmeproduktion bis 2020 deutlich zu erhöhen. Für das Erreichen dieses Ziels wurden verschiedene Maßnahmen beschlossen, die einen konsequenten Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien für Gebäude- und Siedlungsstrukturen vorsehen. Eine große Herausforderung liegt in der energetischen Stadterneuerung. Bei einer aktuellen Erneuerungs- und Modernisierungsrate von weniger als ein Prozent wird die Transformation der gebauten Umwelt ohne erhebliche Finanzierungsanreize aber einen langen Zeitraum beanspruchen. Eine weitere Herausforderung ist die Entwicklung einer nachhaltigen Mobilität, was an dieser Stelle aber nicht weiter erörtert werden kann.
In der Diskussion über eher zentrale oder eher dezentrale Versorgungskonzepte finden sich Argumente für beide Positionen. Eine dezentrale Versorgung aus 100% EE-Regionen fördert durch regionale Wertschöpfung eine nachhaltige Regionalentwicklung, während ein internationaler Energieverbund besonders im Stromsektor aufgrund der höheren Speicherfähigkeit und günstigeren Stromgestehungskosten in solarstrahlungsreichen Gegenden eine deutliche Kostenoptimierung ermöglicht. Es bleibt auch zu prüfen, inwiefern eine dezentral-regionale Energieversorgung genügend Überschüsse für eine Versorgung urbaner Systeme erzielen kann. Der Schlüssel zu einer nachhaltigen Energieversorgung liegt in der intelligenten Vernetzung aller raumplanerischen, infrastrukturellen und bautechnischen Potenziale. Grundsätzlich zeigen zahlreiche Szenarien, dass eine vollständige Energieversorgung aus erneuerbaren Energien möglich ist. Für den Stromsektor in Deutschland ist das sogar unter Betrachtung ökonomischer Kriterien bis 2050 machbar und sinnvoll [SRU 2010, FVEE 2010]. Der Ausbau von modernen Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen – das IEKP sieht eine Verdopplung des Anteils von Strom aus KWK bis 2020 auf etwa 25% vor – ist aus volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten eine der kostengünstigsten Möglichkeiten zur Reduktion von Klimagasen. Erdgas erscheint dabei als die geeignete Brückentechnologie, da die Infrastruktur zukünftig weiterhin mit nachhaltig erzeugtem Biomethan aus Biomasse oder Kombikraftwerken genutzt werden kann.

5. EIN INTEGRALES ENERGIE- UND STOFFSTROMMODELL

5.1 Gebäudetypologien und Stadtstrukturtypen

5.1.1 Von der Biotop-Kartierung zur Analyse von Stadtstrukturtypen und Gebäudetypologien

Systematische Erhebungen raumbezogener Daten im städtischen Raum begannen in Deutschland in den 1930er Jahren. Zunächst standen die Bebauung, Verkehrsanlagen und Flächennutzungen im Mittelpunkt des Interesses. Seit Ende der 1970er Jahre etablierten sich vor allem Biotoptypenkartierungen in Großstädten und Ballungsräumen. Vorreiter hierbei waren Kartierungen in West-Berlin durch Werner Sukopp (1979) und in München durch Brunner et al. (1979) [LAKES 2006:44].
Bei der Stadtbiotoptypenkartierung werden zumeist terrestrische Erhebungen und Fernerkundungsdaten (GIS) ausgewertet. Anhand standort- und vegetationskundlicher Merkmale werden aus den gesammelten Datensätzen Biotoptypen voneinander unterschieden und hinsichtlich ökologischer Kriterien wie Eigenschaften der Böden, Zusammensetzung der Vegetation, Artenvielfalt oder Emissionen bewertet [LAKES 2006:45]. Zur Unterscheidung großstädtischer Flächennutzungen verwenden [SUKOPP / WITTIG 1998: 318] den Begriff der *Nutzungs- bzw. Baustrukturtypen* und nennen folgende sechs Hauptnutzungstypen mit ihren jeweils charakteristischen ökologischen Eigenschaften:

- Baugebietsflächen (mit unterschiedlich dichten Bebauungen sowie Teilbebauungen)
- Industrie- und Gewerbeflächen (inkl. Speicheranlagen, Großmärkte u.a.)
- Verkehrsflächen (Straßen, Plätze, Eisenbahngelände, Wasserstraßen und Häfen)
- innerstädtische Brachflächen
- Entsorgungsflächen (Mülldeponien, Rieselfelder)
- Grünflächen (Parks, Erholungsgebiete, Friedhöfe u.a.)

Ein Ergebnis der stadtökologischen Forschungen der 1970er und 1980er Jahre in Berlin war, dass Stadtstrukturtypen eine geeignete Maßstabsebene für die Analyse charakteristischer Umweltbelastungen und ökologischer Leistungspotenziale darstellen [DIEFENBACH ET AL. 2002:49].
Seit den 1980er Jahren wurden sie daher als eine Möglichkeit zur Analyse der räumlichen Differenzierung urbaner Siedlungsstrukturen weiterentwickelt. Als Stadtstrukturtypen werden urbane Flächennutzungen bezeichnet, die durch eine einheitliche physiognomische Ausprägung in ihrer Bebauungsstruktur und der Freiflächen charakterisiert sind [SCHILLER 2003].

Nach Ellen Banzhaf und Mike Martini wurde der Begriff *Stadtstrukturtyp* 1992 durch die methodische Vorgehensweise bei der Ausgliederung von Strukturräumen im Zuge der Raumanalyse Leipzigs von Evelyne Wickop [WICKOP ET AL. 1998] geprägt [BANZHAF / MARTINI 2006:2]. Durch Luftbilder und sehr hochauflösende Satellitenbilder wurden unterschiedliche bebaute und unbebaute Flächenstrukturen abgebildet und klassifiziert. Diese Methode der Raumtypisierung ermöglicht eine schnelle Erfassung typischer Merkmale. Sie nimmt eine Mittelstellung zwischen Makro- und Mikrobetrachtungen ein und ermöglicht somit sowohl ortsspezifische Aussagen als auch eine Übertragbarkeit auf typologisch ähnliche Orte. Durch die Erstellung von Szenarien auf der Grundlage von Stadtstrukturtypen werden diese auch als ein Bindeglied zwischen Planung und Forschung

gesehen [BANZHAF / MARTINI 2006:2]. Ein Beispiel hierfür ist die Verwendung von Stadtstrukturtypen als Monitoring- und Steuerungssystem einer nachhaltigen Stadtplanung in Halle [WERHEIT 2002]. Hierzu wurden Qualitätsziele, Indikatoren und Standards für das Flächenmanagement, für den Energiebedarf, für die Mobilität und verschiedene soziale Handlungsfelder definiert und auf die stadtstrukturellen Gebietstypen bezogen.

Eine wichtige Grundlage für die Analyse von Stadtstrukturtypen ist die Untersuchung von Gebäudetypologien. Neben der Wohnungsebene bilden sie die elementare bauliche Bezugsgröße zur Ermittlung sozialer, energetischer und stofflicher Parameter. Gebäude unterscheiden sich nach Bauform, Größe, Geschossanzahl, konstruktiver und gebäudetechnischer Ausstattung und ihrem Baualter. Die Gebäudetypologie wird zumeist nach Einfamilien-, Zweifamilien-, Reihen- und Mehrfamilien-, großen Mehrfamilien- und Hochhäusern unterschieden. Bei Gebäuden der Nachkriegszeit wird auch nach alten und neuen Bundesländern differenziert, da sich diese in der Bauform und Baukonstruktion (Großtafelbauweise) unterscheiden.

Der Wohnungsbestand in der Bundesrepublik Deutschland betrug im Jahr 2009 insgesamt rund 38 Mio. Wohnungen in ca. 18 Mio. Wohngebäuden bei insgesamt 3.409 Mill. m² Wohnfläche.

Ein- und Zweifamilienhäuser haben einen Anteil von 57,6 % an der Wohnfläche in Deutschland mit über 82 % aller Wohngebäude [BMVBS 2010]. Das nebenstehnde Bild Abb. 5.1.1 zeigt die prozentuale Verteilung von Gebäudearten, Wohnflächen und Wohnungen in Deutschland im Jahr 2000 [BMVBS 2006:10]. Diese Zahlen zeigen die Bedeutung dieser Gebäudetypologie.

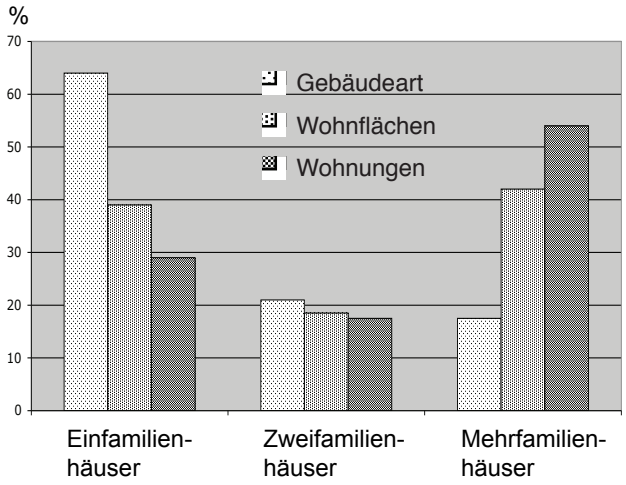


Abb. 5.1.1 Prozentuale Verteilung von Gebäudearten, Wohnflächen und Wohnungen in Deutschland (2000) [BMVBS 2006]

Für die genauere Beschreibung der typischen Merkmale der Gebäude werden nach Baualtersklassen klassifiziert. Folgende Baualtersklassen werden zumeist unterschieden und sind hier mit dem jeweiligen Anteil am deutschen Wohnungsbestand dargestellt (Abb. 5.1.2) [BMVBS 2006]:

- Baualtersklasse bis 1918 15%
- Baualtersklasse 1919 – 1948 13%
- Baualtersklasse 1949 – 1978 47%
- Baualtersklasse 1979 – 1990 14%
- Baualtersklasse 1991 – 2000 10%
- Baualtersklasse 2001 und später 1%

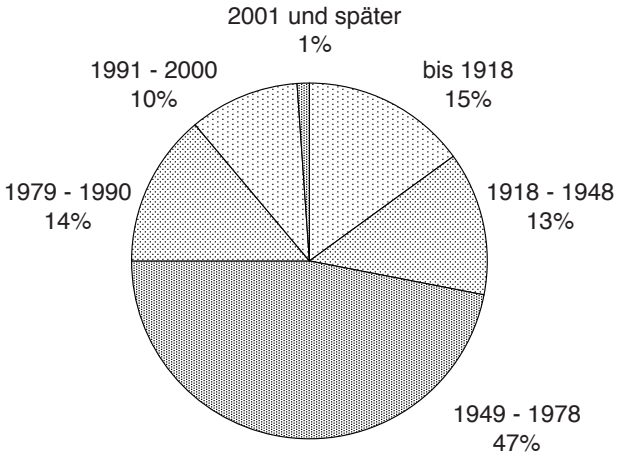


Abb. 5.1.2 Prozentuale Verteilung der Gebäudealtersklassen von Wohngebäuden in Deutschland [BMVBS 2006]

5.1.2 Datenblätter zur Erfassung der energetischen Qualität von Gebäudetypologien

Die Entwicklung einer systematischen Übersicht über den deutschen Gebäudebestand wurde insbesondere durch die Erfordernisse der Klimaschutzpolitik vorangebracht. Das Darmstädter Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) hat 1989 und 1993 im Auftrag der *Enquetekommission ‚Schutz der Erdatmosphäre' des deutschen Bundestages* (1987–1995) das Energiesparpotenzial durch Wärmeschutzmaßnahmen für den deutschen Gebäudebestand ermittelt [EBEL ET AL. 1991]. Der Gebäudebestand wurde hierfür nach Gebäudegröße und Baualtersklasse eingeteilt. Das Baualter ist ein wichtiges Merkmal, da jede Bauepoche allgemein übliche Konstruktionsweisen und eine typische Verteilung von Bauteilflächen (z.B. Fensterflächenanteil) aufweist, die den Heizwärmebedarf stark beeinflussen. Für jede dieser Klassen wurde durch ein typisches Beispielgebäude aufgrund seiner Geometrie, dem Fensterflächenanteil, der Baukonstruktion und der energetischen Qualität der Hüllflächen (Wärmedurchgangskoeffizienten / U-Werte) ein energetischer Kennwert für den Ausgangszustand des Gebäudes ermittelt und in Form von Hausdatenblättern dokumentiert.

Gebäudetypen*		Baualtersklassen										Summe	Anteil
		vor 1918	vor 1918	1919 - 1948	1949 - 1957	1958 - 1968	1969 - 1978	1979 - 1983	1984 - 1994	1995 - 2001	2002 - 2006		
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J		
	EFH												
	Wohnfläche in Tsd. m²	81.503	148.776	168.937	174.251	235.409	223.135	112.631	236.441	255.280	103.208	**1.739.571**	*52%*
	Anz. Wohneinh. in Tsd.	916	1.707	2.010	1.915	2.274	1.867	936	2.055	1.994	671	**16.345**	*42%*
	RH												
	Wohnfläche in Tsd. m²		14.543	31.450	21.993	35.996	61.478	24.503	32.951	33.366	11.675	**267.955**	*8%*
	Anz. Wohneinh. in Tsd.		145	326	231	348	517	202	281	285	83	**2.418**	*6%*
	MFH												
	Wohnfläche in Tsd. m²	31.974	109.337	135.827	117.051	149.881	122.930	61.044	118.019	154.740	24.267	**1.025.070**	*31%*
	Anz. Wohneinh. in Tsd.	462	1.501	2.034	1.912	2.210	1.677	821	1.712	2.240	296	**14.865**	*38%*
	GMH												
	Wohnfläche in Tsd. m²		31.549	10.160	38.936	47.501	46.124					**174.270**	*5%*
	Anz. Wohneinh. in Tsd.		448	169	703	784	697					**2.801**	*7%*
	HH												
	Wohnfläche in Tsd. m²					12.617	12.988					**25.605**	*1%*
	Anz. Wohneinh. in Tsd.					198	198					**396**	*1%*
	MFH NBL												
	Wohnfläche in Tsd. m²				14.324	24.418						**38.742**	*1%*
	Anz. Wohneinh. in Tsd.				329	408						**737**	*2%*
	GMH NBL												
	Wohnfläche in Tsd. m²						22.976	19.899	17.977			**60.852**	*2%*
	Anz. Wohneinh. in Tsd.						390	336	305			**1.031**	*3%*
	HH NBL												
	Wohnfläche in Tsd. m²						16.823	4.230				**21.053**	*1%*
	Anz. Wohneinh. in Tsd.						310	67				**377**	*1%*
Wohnfläche in Tsd. m²		**113.477**	**304.205**	**346.374**	**366.555**	**505.822**	**506.454**	**222.307**	**405.388**	**443.386**	**139.150**	**3.353.118**	
Anteil		*3%*	*9%*	*10%*	*11%*	*15%*	*15%*	*7%*	*12%*	*13%*	*4%*		
Anz. Wohneinh. in Tsd.		**1.378**	**3.801**	**4.539**	**5.090**	**6.222**	**5.656**	**2.362**	**4.353**	**4.519**	**1.050**	**38.970**	
Anteil		*4%*	*10%*	*12%*	*13%*	*16%*	*15%*	*6%*	*11%*	*12%*	*3%*		

*) EFH = Einfamilienhaus, RH = Reihenhaus, MFH = Mehrfamilienhaus, GMH = großes Mehrfamilienhaus, HH = Hochhaus, NBL = neue Bundesländer

Abb. 5.1.3 Deutsche Gebäudetypologie - Häufigkeit von Gebäudetypen unterschiedlichen Baualters [IWU 2007:17]

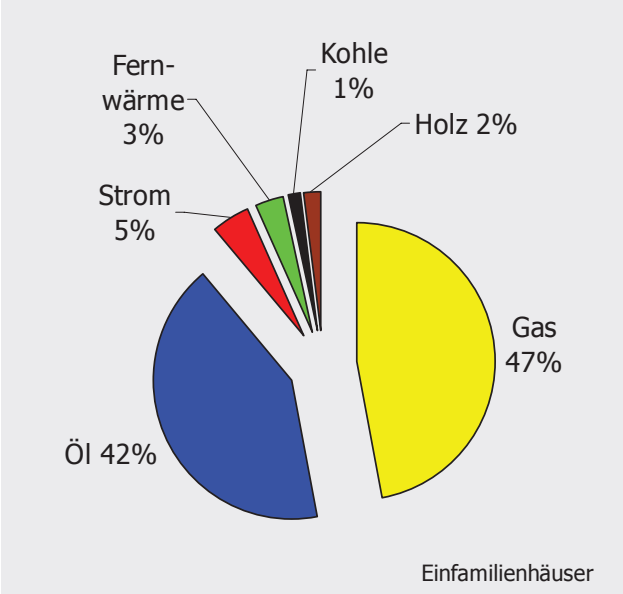


Abb. 5.1.4 Energieträgerstruktur in Einfamilienhäusern [IWU 2007:18]

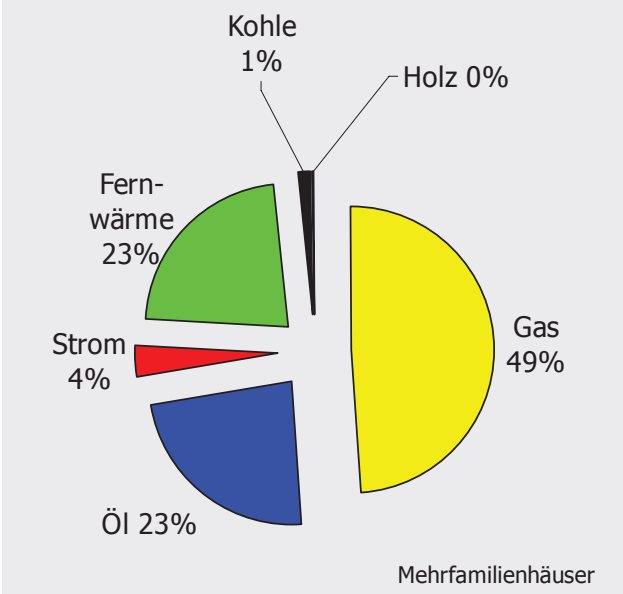


Abb. 5.1.5 Energieträgerstruktur in Mehrfamilienhäusern [IWU 2007:18]

Abb. 5.1.3 zeigt die absolute und prozentuale Verteilung von Wohnflächen und Wohneinheiten für die Gebäudetypen und den jeweiligen Baualtersklassen [IWU 2007].
Neben dem energetischen Kennwert gibt es zu jedem dieser Gebäudetypen Angaben zum Wärmeerzeuger bzw. zur Wärmeversorgung und deren statistische Häufigkeit (Abb. 5.1.4 - 5.1.6).
Die Gebäudetypologie ermöglicht schnelle Aussagen über typische Energiekennwerte und Szenarien für das Einsparpotenzial bei der energetischen Sanierung von Einzelgebäuden. Bei dieser Untersuchung hat sich aber auch gezeigt, dass erhebliche Informationsdefizite in den statistischen Erhebungen bestehen. Daher wurde in einer aktuellen Studie der Versuch unternommen, durch eine bundesweit repräsentative Erhebung bei Wohngebäudeeigentümern und Bezirksschornsteinfegermeistern die Datenqualität zu erhöhen und Informationslücken über den deutschen Wohngebäudebestand zu schließen [BEI / IWU 2010].
Neben der bundesweiten Gebäudetypologie des IWU gibt es weitere regionale und stadtbezogene Gebäudetypologien wie z.B. die Gebäudetypologie Düsseldorf [EBÖK 2005] und Gebäudetypologie Bayern [IWU 2006]. Diese Methode wird auch auf Städte in anderen Regionen angewandt. So beschreibt eine Forschungsarbeit am *Institut für ökologische Raumentwicklung* in Dresden das Konzept für die Ermittlung von Energiekennzahlen für Haushalte und Stadtstrukturtypen in Ho Chi Minh City [THINH ET AL. 2010].

5.1.3 Energie- und Stoffstromanalysen von Gebäudetypologien und Stadtstrukturtypen

Für eine weitergehende Betrachtung der Energie- und Stoffströme von Gebäuden über den Lebenszyklus und zur Ermittlung von Lebenszykluskosten (Life Cycle Costing) müssen weitere Parameter von Gebäuden erfasst werden. Im Rahmen einer Studie für die *Enquetekommission ‚Schutz des Menschen und der Umwelt'* (1994–1998) wurde ein erstes Modell des deutschen Gebäudebestandes für das Referenzjahr 1991 berechnet [HASSLER / KOHLER / WANG 1999:28]. Das Ziel bestand darin, die im Gebäudebestand verbauten Materialien, Kosten und den Energieverbrauch zu ermitteln, um die künftige Entwicklung des Bestandes unter bestimmten Rahmenbedingungen zu simulieren. Für

	EFH	MFH	gesamt
Sammelheizungen			
Gas-Zentralheizung alt	13%	12%	13%
Gas-Zentralheizung alt + el. WW	2%	2%	2%
Gas-Zentralheizung neu	28%	29%	29%
Gas-Zentralheizung neu +el.WW	4%	4%	4%
Öl-Zentralheizung alt	15%	7%	11%
Öl-Zentralheizung alt + el. WW	0%	2%	1%
Ölzentralheizung neu	23%	10%	17%
Ölzentralheizung neu + el. WW	1%	3%	2%
Fernwärme	1%	16%	9%
Fernwärme + el. WW	2%	6%	4%
Einzelheizungen			
Elektroheizung	5%	4%	4%
Ofenheizung Gas	1%	2%	2%
Ofenheizung Öl	2%	1%	1%
Ofenheizung Kohle	1%	1%	1%
Ofenheizung Holz	2%	0%	1%
Summe	100%	100%	100%

Abb. 5.1.6 Typen der Beheizung in Deutschland [IWU 2007:18]

die Modellierung der stofflichen Zusammensetzung wurden etwa 170 Gebäude mit 2.250 Elementen erfasst und mit der Methode der Ökobilanz auf ihre Umweltauswirkungen hin untersucht. Es zeigte sich auch hier, dass die statistischen Daten zum Umfang und zur Zusammensetzung des Bestandes sehr mangelhaft sind. Abgesehen von Teilmengen bestanden keine zusammenhängenden Daten zum Alter, zur Nutzung und zur Größe des Gebäudebestandes.

Aus den vorhandenen statistischen Daten wurde eine Übersicht zum deutschen Baubestand (Abb. 5.1.7) und die Umweltbelastungen über den Lebenszyklus ermittelt (Abb. 5.1.8). Die Untersuchungen zur Ökobilanz der Einzelgebäude und deren statistischen Verteilung ergaben folgende Ergebnisse [HASSLER / KOHLER / WANG 1999:31-37]:

- Die Nutzungsphase hat in allen Bewertungsgrößen mit einem Anteil von 80-90% die größten Auswirkungen auf die Umweltbelastung.
- Bezogen auf die Phasen Neubau, Erneuerung und Abriss verursacht die Erstellung ca. 60% der Umweltbelastungen. Die Umnutzung, Erneuerung und energetische Optimierung des Gebäudebestandes hat gegenüber Abriss und Neubau einen umweltentlastenden Einfluss, sofern auch andere funktionale Kriterien hinsichtlich der Benutzbarkeit wie Nutzungsflexibilität, Barrierefreiheit, Schallschutz etc. erfüllt sind.
- Die Altersklassen nach 1948 haben bei sämtlichen umweltrelevanten Bewertungsgrößen mit 80-90% den größten Anteil an den Belastungen.
- Der bei weitem größte Anteil an Nutzfläche ist den Einfamilienhäusern zuzuordnen, entsprechend hoch sind die Umweltauswirkungen dieser Gebäudetypologie insbesondere in der Nutzungsphase.
- Bei einer Erneuerungsrate des Bestandes von knapp 1% kommt der (energetischen) Ertüchtigung des Baubestandes eine herausragende Rolle zu.
- Die prinzipielle stoffliche Ressourcennutzung für Bauprozesse liegt nicht mehr in der Gewinnung von Primärbaustoffen aus der Natur, sondern im Baubestand (*Urban Mining*).

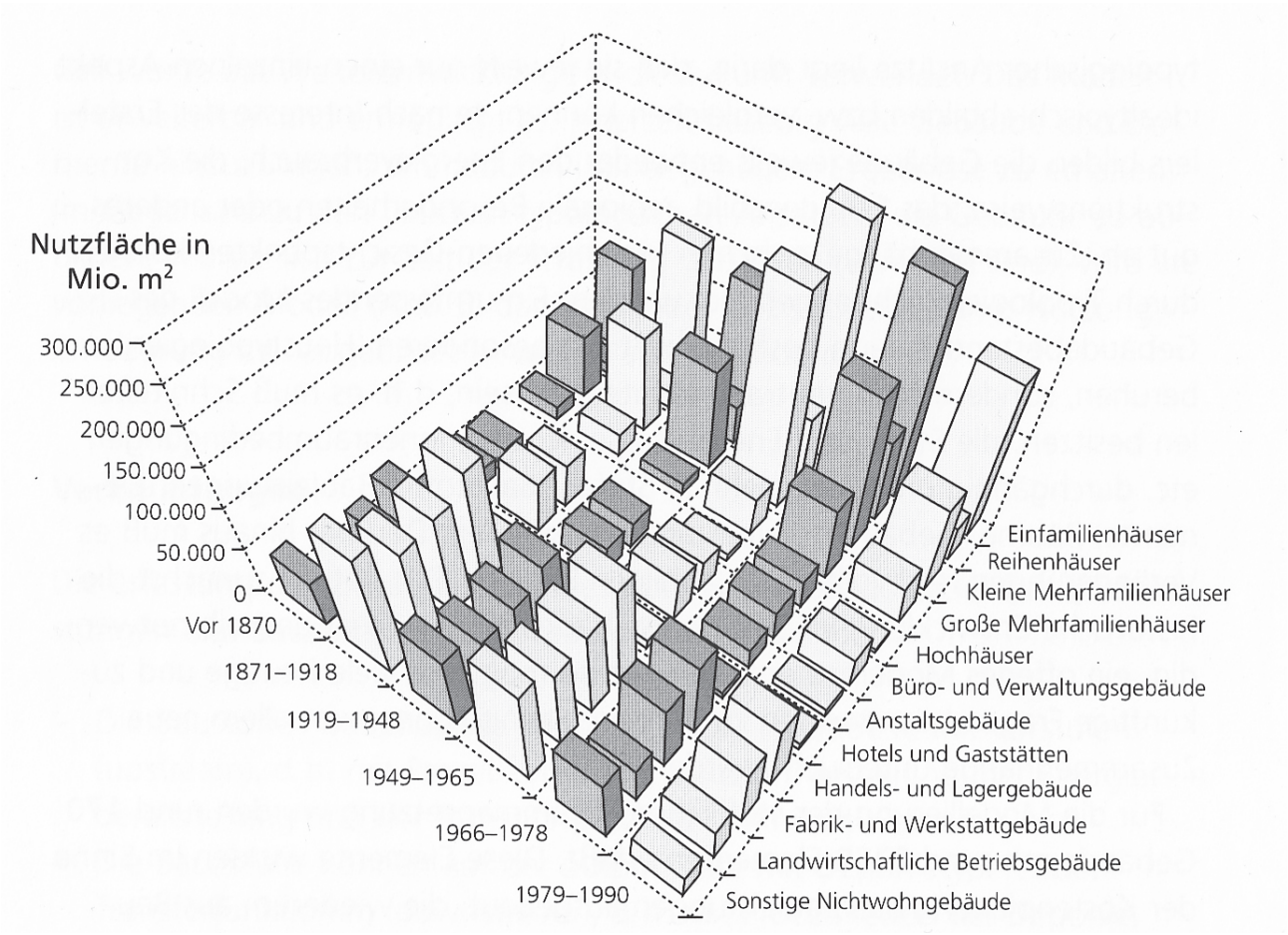


Abb. 5.1.7 Der deutsche Baubestand im Referenzjahr 1991 [HASSLER / KOHLER / WANG 1999:29]

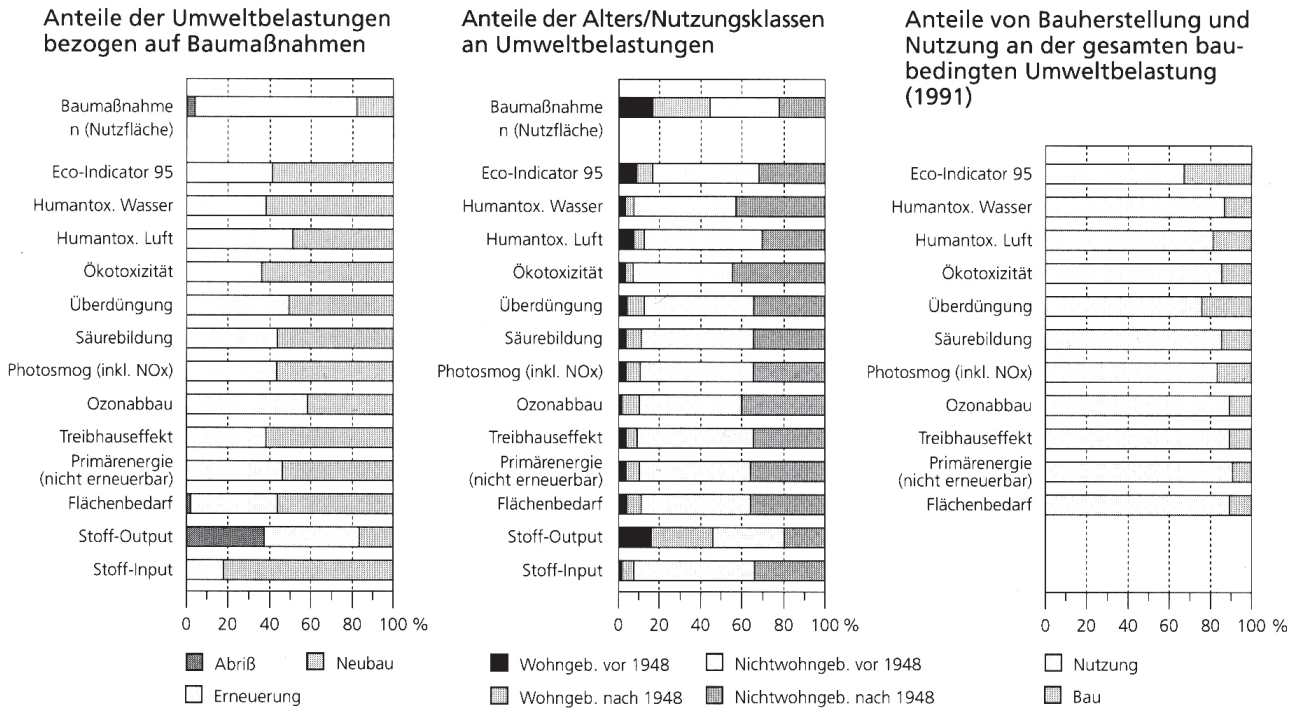


Abb. 5.1.8 Umweltbelastungen, hervorgerufen durch Nutzung und Bautätigkeit im Referenzjahr 1991 [HASSLER / KOHLER / WANG 1999:31]

Eine weitere Methode zur Ermittlung räumlich-ökologischer Auswirkungen des Gebäudebestandes ist die Ermittlung stofflich-energetischer Gebäudesteckbriefe, die vom Institut für Ökologische Raumentwicklung (IÖR) in Dresden entwickelt wurde (Abb. 5.1.9) [GRUHLER ET AL. 2002, DEILMANN 2004, DEILMANN / GRUHLER 2005]. Auf der Grundlage eines EXCEL-gestützten Baustoff-Berechnungs-Programms, das mit Ökobilanzdaten am Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme (GEMIS) gekoppelt ist, wurden empirisch stofflich-energetische Kennwerte zu acht unterschiedlichen Einfamilienhäusern aus der Bauzeit 1960-1990 und zehn Mehrfamilienhäusern aus der Bauzeit 1880-1990 ermittelt. Für jedes Gebäude wurden ein detailliertes Mengengerüst der Bauteile und deren stoffliche Zusammensetzung erstellt. Dabei wurde zunächst die absolute Größe des Stofflagers der Gebäude ermittelt, die dann in Bezug zur Nutzfläche oder zum umbauten Raum gesetzt als eine spezifische Kenngröße die Stoffintensität ergibt.
Die Dokumentation der Gebäudetypen hat den Charakter eines Kompendiums, das für die jeweiligen Gebäudetypen genaue Aussagen zu Bauteilaufbauten, Baustoffmengen, zum kumulierten Energieaufwand für die Herstellung, zum Heizenergiebedarf und zu ausgewählten Umweltindikatoren wie Treibhaus- und Versauerungspotenzial trifft. Mit Hilfe dieser Grunddaten können weitere Berechnungen und Szenarien für ein vorausschauendes Stoffstrommanagement des Wohngebäudebestandes vorgenommen werden. So lassen sich z.B. für die Bauindustrie aus der Zusammenstellung der Stoffmengen hinsichtlich des Abfallaufkommens, der Weiterverwendung oder des Recyclings von Baustoffen relevante Ergebnisse ermitteln.

2.1.4 Viergeschossiges Mehrfamilienhaus von 1919 bis 1945 in Ziegelbauweise – Typenvertreter IMZ 4

Allgemeine Beschreibung

Angaben zum Gebäude

Baujahresgruppe:	1919-1945
Bauweise:	Ziegelbauweise
Gebäudelänge:	16,00 m
Gebäudebreite:	11,80 m
Gebäudehöhe:	17,50 m (KG-Fußboden bis First)
Geschosszahl:	4 (plus KG und ungenutztes DG)
Außenwandkonstruktion:	Ziegelmauerwerk
Dachform:	Pultdach ca. 1,6° (ca. 3,5 %)
Dachdeckung:	Weichdeckung
Wohnungslage:	Zweispänner
Wohnungsanzahl:	8
Weitere Nutzung:	keine

Ausstattung

Energieträger:	Gas / Strom
Heizung:	Ofenheizung
Warmwasserversorgung:	dezentral
Sanitäre Ausstattung:	Bad / WC

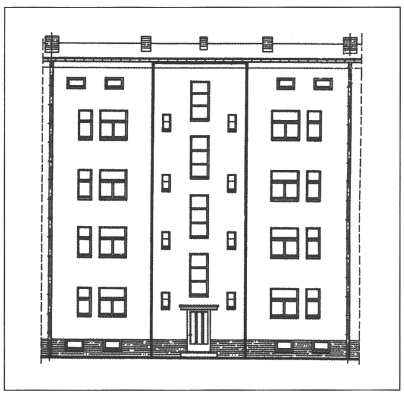


Abb. 2-25: Ansicht Typenvertreter IMZ 4 (Quelle: Schulze, Walther 1990a, 59)

Stoffliche Kennwerte

Bauteil- und baustoffgruppenbezogene Baustoffmengen

Tab. 2-22: Bauteil- und baustoffgruppenbezogene Baustoffmengen – Stofflager und Stoffintensität des Typenvertreters IMZ 4 (Quelle: Eigene Berechnung)

Zusammenfassung – Baustoffberechnung: Bauteile				
Bauteile	Stofflager		Stoffintensität	
	kg	t	t/m² HNF	t/m³ BRI
Gründung	78 396	78	0,15	0,03
Fundament	51 842	52	0,10	0,02
AW: Kellergeschoss	86 725	88	0,18	0,03
AW: Erd- und Obergeschosse	360 487	360	0,71	0,13
Fenster / Außentür	2 971	3	0,01	0,00
Innenwand	284 736	285	0,56	0,10
Innentür	2 340	2	0,00	0,00
Decke	328 957	329	0,65	0,12
Dach	8 433	8	0,02	0,00
Gesamt	**1 204 887**	**1 205**	**2,38**	**0,43**
Zusammenfassung – Baustoffberechnung: Baustoffgruppen				
Baustoffgruppen	Stofflager		Stoffintensität	
	t	m³	t/m² HNF	m³/m² HNF
Putze, Estriche, Mörtel	296	162	0,58	0,32
Betone	144	60	0,29	0,12
Mauersteine	605	349	1,19	0,68
Bauplatten	0	0	0,00	0,00
Holz, Holzwerkstoffe	15	26	0,03	0,05
Wärmedämmstoffe	0	0	0,00	0,00
Dachdeckungen	0	0	0,00	0,00
Beläge, Dichtungsbahnen	3	2	0,01	0,01
Sonst. Stoffe, Schüttungen	117	71	0,23	0,14
Metalle	25	3	0,05	0,01
Gesamt	**1 205**	**673**	**2,38**	**1,33**

Abb. 5.1.9 Stofflich-energetische Gebäudesteckbriefe [GRUHLER ET AL. 2002:58/63]

Die Untersuchung zeigt u.a., dass Einfamilienhäuser aufgrund eines größeren Außenwandanteils im Mittel 2,8 t/m² Hauptnutzfläche (HNF) größere Stoffintensitäten aufweisen als Mehrfamilienhäuser mit einer mittleren Stoffintensität von 2,2 t/m² HNF. Der Unterschied beträgt ca. 27%. Der kumulierte Energieaufwand liegt im Mittelwert für Einfamilienhäuser bei 1.700 kWh/m² HNF und für Mehrfamilienhäuser bei 1.600 kWh/m² HNF. Das ist ein Unterschied von ca. 6% [GRUHLER ET AL. 2002:232]. Am Beispiel von zwei sächsischen Mittelstädten (Freiberg, Zittau) und einer Großstadt (Leipzig) wurden mit dem Baustoff-Berechnungs-Programm Hochrechnungen durchgeführt. Die Beispielstädte wurden in zehn verschiedene Stadtstrukturtypen gegliedert. Durch eine statistisch repräsentative Zuordnung der Gebäudetypen auf die Stadtstrukturtypen wurde eine wohnflächenbezogene Stoffintensität und der kumulierte Energieaufwand für die jeweiligen Stadtstrukturtypen und für die Städte als Ganzes ermittelt. Ein Ergebnis dieser Studie ist, dass die Stoffintensität vorrangig durch die Bebauungsdichte bestimmt wird und ein nahezu linearer Zusammenhang zur Geschossflächenzahl besteht. Demnach entsprechen 0,1 Punkte Geschossflächenzahl einer mittleren Stoffintensität von ca. 1.900 t/ha Netto-Wohnbauland.

Ein dritter methodischer Ansatz ist die *ARK-Haus-Methode*, die zur Ermittlung der Größe und Qualität des regionalen Stofflagers des Bauwerks Stadt der Schweiz entwickelt wurde [LICHTENSTEIGER 2006]. Der Ansatz ähnelt dem von Hassler, Kohler und Wang beschriebenen Modell, beruht aber auf der Stoffflussanalyse. Die Bezeichnung ARK leitet sich von der gleichnamigen englischen Bezeichnung für Arche ab und bedient sich der Arche Noah als Metapher für die Stadt im Allgemeinen [LICHTENSTEIGER 2006:15]. Für das Modell wurde eine Matrix von vier Gebäudetypen mit je vier Baualtersklassen gewählt (Abb. 5.1.10). Pro Nutzungstyp und Baualter wird ein fiktives ARK-Haus als Typenvertreter mit einem charakteristischen Gebäudevolumen, typischen Konstruktionsweisen und Materialgehalten analysiert. Für jedes ARK-Haus werden ein typisches Mengengerüst und die stoffliche Zusammensetzung für die Bauteile und Bausysteme (Dach, Wände, Decken, Fundament, Gebäudetechnik usw.) ermittelt. Ein ARK-Haus bildet damit das Lager pro Gebäude dieses Nutzungstyps ab und wird in Verbindung mit der Gebäudestatistik auf das Gesamtsystem Schweiz hochgerechnet.

Als Grundlage für die ARK-Methode dient eine allgemeine Systembeschreibung für den Energie-, Stoff- und Güterhaushalt eines regionalen Bauwerks (Abb. 5.1.11) [BACHINI / BADER 1996]. Sie beschreibt die Systembeziehungen der elementaren Prozesse für die Herstellung, den Betrieb und Rückbau von Gebäude und Infrastrukturen, die durch Stoffflussanalysen bestimmt werden. Hierdurch lassen sich für die gewählten räumlichen und zeitlichen Systemgrenzen die Lagerbestände und -zuwächse ermitteln.

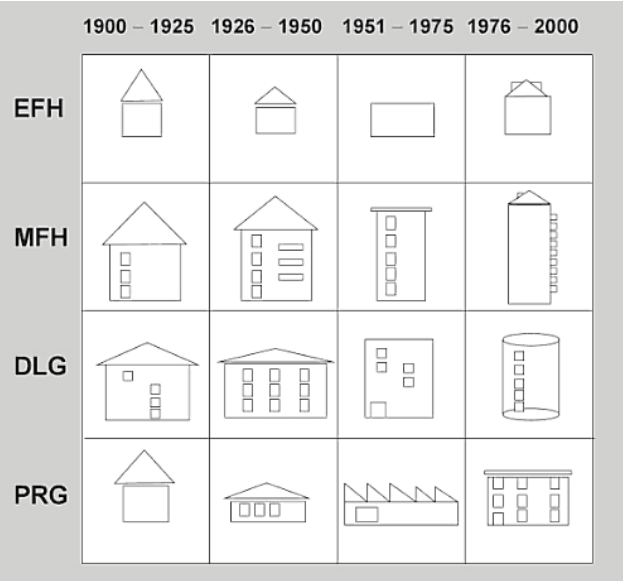


Abb. 5.1.10 Matrix der ARK-Haus-Methode [LICHTENSTEIGER 2006:15]

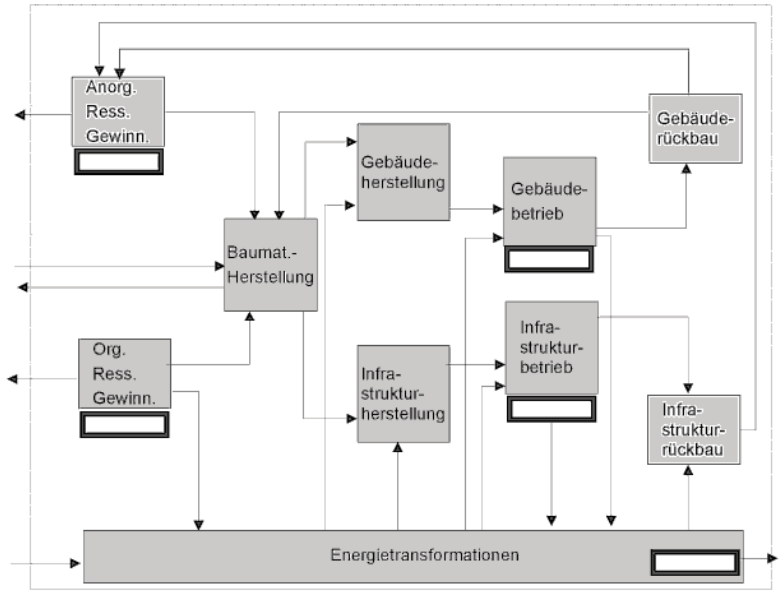


Abb. 5.1.11
Systembeschreibung für den Energie-, Stoff- und Güterhaushalt eines regionalen Bauwerks nach [BACCHINI / BADER 1996] [LICHTENSTEIGER 2006:8]

Für die ARK-Methode werden die Stoffflüsse von sieben Materialgruppen abgebildet, die zusammen rund ca. 90% der Gebäudemasse ausmachen [LICHTENSTEIGER 2006:13]:

1. Beton (Zement, Kies / Sand, Wasser)
2. Mörtel- und Zementwaren
3. Mauer- und Dachziegel
4. Felsgesteine
5. Holz
6. Eisenmetalle
7. Gips

Neben diesen Hauptstoffen werden bei der Datenerfassung auch Spurenstoffe, wie z.B. Kupfer, erfasst, da diese eine kritische Funktion im Bauwesen (Elektro-, Kommunikations-, Sanitär und Dachbereich) darstellen. Über die Nutzung und Verteilung von Kupfer im regionalen Ressourcenhaushalt der Schweiz gibt es eine eigene Forschungsarbeit [WITTMER 2006].

Aus der Abschätzung mit der ARK-Methode ergeben sich mit Referenzjahr 2000 für das Bauwerk Schweiz Lagerbestände für Kies in Höhe von 95 to / Person [LICHTENSTEIGER 2006:20]. Die urbane Kupferlagerstätte in der Schweiz umfasst ca. 270 kg / Person, davon 80 kg / Person in Gebäuden, 105 kg / Person in der Infrastruktur, 35 kg / Person in Mobilien und 50 kg / Person in Deponien [LICHTENSTEIGER 2006:21].
Nach Baccini beträgt das gesamte Materiallager in Wohngebäuden am Ende des 20. Jahrhunderts für Gesellschaften mit ähnlichem Lebensstandard wie in Mitteleuropa ca. 100 Tonnen pro Kopf [LICHTENSTEIGER 2006:10]. Unter Berücksichtigung dieser großen Lagerbestände und der Tatsache, dass z.B. die weltweite Kupfermenge in den urbanen Systemen bereits die Größenordnung der noch verfügbaren Primärressourcen in den natürlichen geologischen Lagerstätten erreicht hat, wird die Exploration urbaner Lagerstätten und die Nutzung von Sekundärrohstoffen – das *Urban Mining* – aus ökologischer und ökonomischer Sicht immer mehr an Bedeutung gewinnen.

5.1.4 Stadtstrukturtypen und urbane Infrastrukturen

Neben der Analyse von Gebäude- und Siedlungstypologien eignet sich der Stadtstrukturtypenansatz auch für die Untersuchung infrastruktureller Fragestellungen. Die optimale Abstimmung von Siedlungs- und Infrastruktur ist von erheblichem volkswirtschaftlichen und ökologischen Interesse.
Die Wärmeversorgung mit rohrleitungsgebundenen Versorgungssystemen wie Fernwärme und Gasheizungen ist mit erheblichen Erstellungskosten für das Verteilnetz verbunden. Diese rechnen sich wirtschaftlich erst ab einer gewissen Größenordnung des Energiebezugs. Da sich Wärme nur begrenzt transportieren und speichern lässt, sind die räumlichen Aspekte der Wärmeversorgung von raumordnungs- und städtebaupolitischer Bedeutung. Insbesondere für Neuerrichtung oder Erweiterung von Fernwärmenetzen werden mit Hilfe von Energiesystemmodellen Szenarien zur räumlich bezogenen Energiedichte und den infrastrukturellen und ökonomischen Aufwendungen erstellt.

Die Studie *Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen* [ROTH ET AL. 1980] untersuchte bereits Ende der 1970er Jahre die räumlichen Auswirkungen neuer energiesparender und umweltfreundlicher Systeme zur Wärmeversorgung von Siedlungen. Das Ziel der Studie war, eine optimale Zuordnung von Wärmeversorgungssystemen zu Raum- und Siedlungsstrukturen hinsichtlich der Minimierung des Primärenergieeinsatzes unter Berücksichtigung optimierter Jahreskosten zu ermitteln. Die Ergebnisse sollten versorgungspolitische, städtebauliche und raumplanerische Empfehlungen ermöglichen.
Ausgehend von einem Raumtypenmodell mit den vier Raumtypen *Kernstadt, Außenzone, Mittelstädte* außerhalb der Stadtregion mit mehr als 10.000 Einwohnern und *Ländlicher Raum* wurden neun wärmeversorgungsrelevante Siedlungstypen unterschieden, für die typische Datenprofile erstellt wurden (Abb. 5.1.12 - 5.1.13). Diese Methode entspricht den bereits dargestellten Studien zu Gebäude- und Stadtstrukturtypen. Weiterhin wurden die Möglichkeiten zur Energieeinsparung durch bauliche Maßnahmen und verschiedene Systeme zur Wärmeversorgung untersucht.
Als Versorgungsvarianten wurden Fernwärme, Solartechnik, Wärmepumpen, Wärmerückgewinnungsanlagen, Blockheizkraftwerke, Holzschnitzelfeuerung, Elektrospeicherheizungen, Gaskessel, Ölkessel und Biogastechnik quantitativ auf ihre regions- und siedlungsspezifischen Ausbaupotenziale hin überprüft.

Hieraus ergab sich eine Matrix von neun Siedlungstypen – unterschieden nach Bestand und Neubau –, mit 12 Versorgungsvarianten. Eine Bewertung hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit der Wärmeversorgungssysteme ist in Abb. 5.1.14 dargestellt.
Ein Ergebnis der Studie war, dass eine Investitionsverschiebung weg von großtechnischen Versorgungssystemen hin zu Bauwerksanierungen innerhalb eines Erneuerungszyklus von 20-30 Jahren sowohl marktwirtschaftlich als auch volkswirtschaftlich und umweltpolitisch

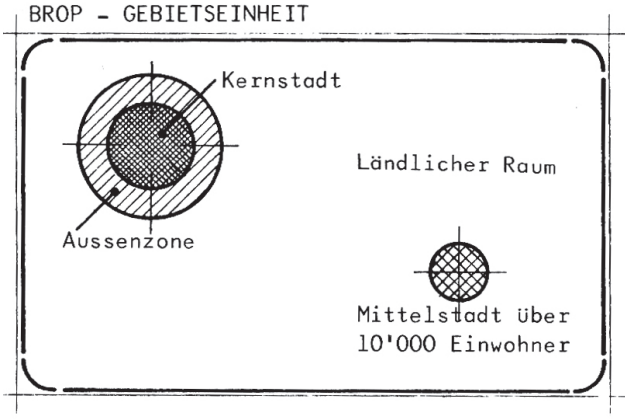


Abb. 5.1.12 Raumtypenmodell mit Zuordnung der vier Raumtypen [ROTH ET AL. 1980:25]

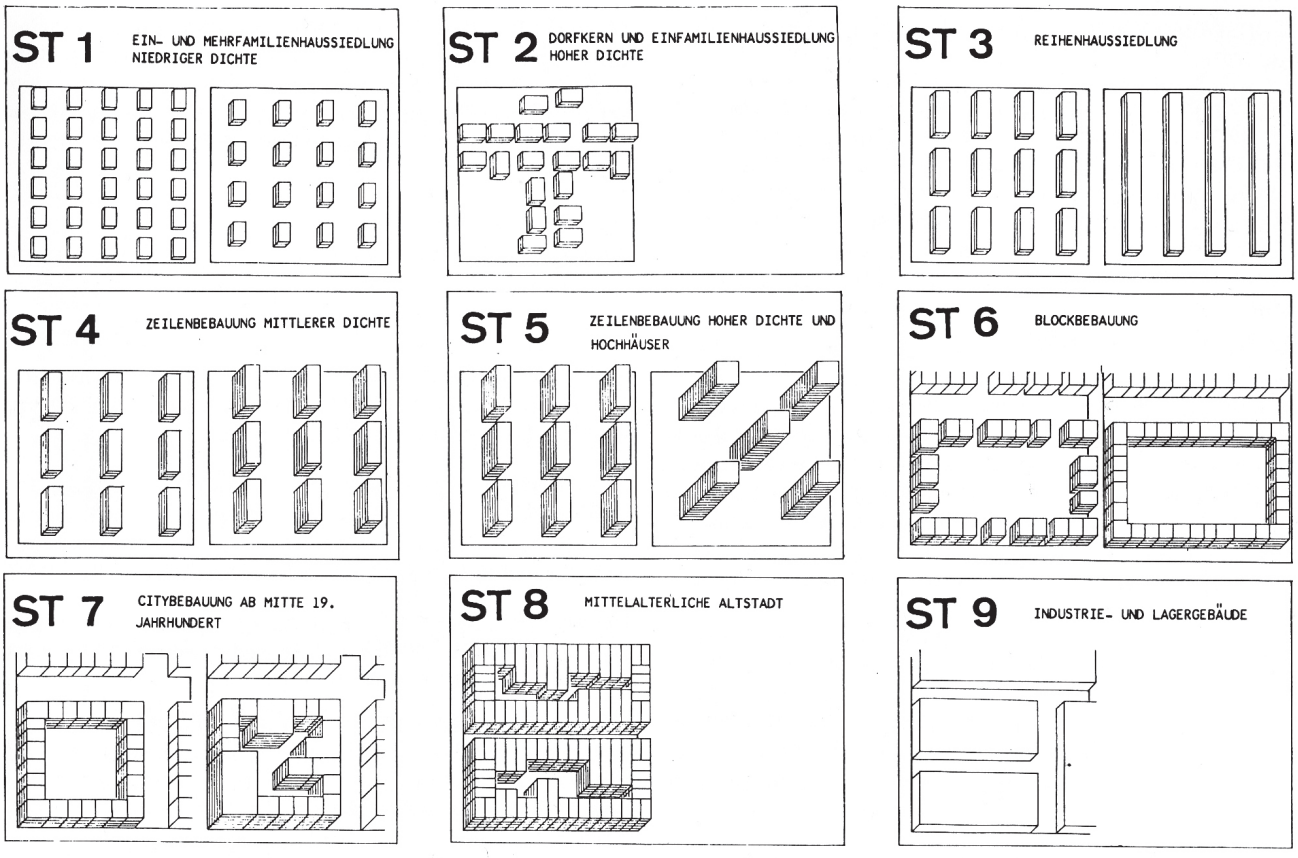


Abb. 5.1.13 Die neun wärmeversorgungsrelevanten Siedlungstypen [ROTH ET AL. 1980:25]

sinnvoll und von größter energiepolitischer Bedeutung ist. Es wurde ein Einsparungspotenzial an Primärenergie von bis zu 50% errechnet. Die Technologie der Kraft-Wärme-Kopplung als Nah- oder Fernwärme wurde aufgrund ihrer erheblichen Effizienzsteigerung in der Ausnutzung der Energieträger trotz höherer Infrastrukturkosten und auch bei steigenden Energiekosten gesamtwirtschaftlich günstiger als die leitungsunabhängigen Systeme eingeschätzt, die sich auf Holz, Biogas und Sonne stützen [ROTH ET AL. 1980:253]. Gleichwohl steht für jeden Siedlungstyp eine relativ große Anzahl an Versorgungstechnologien zur Verfügung. Die Wahl wird durch die konkreten Randbedingungen bestimmt. Der Anteil erneuerbarer Energien (Holz, Biogas und Sonne) zur Deckung des Raumwärmebedarfs wurde auf ca. 15% geschätzt.

Ende der 1990er Jahre wurde vom Ökoinstitut mit einer bedürfnisfeldorientierten Stoffstromanalyse der Wohnungsbestand und der Wohnungsneubau bilanziert. Mit Hilfe des Stoffstrommodells *BASiS-1* wurden alle Stoffströme erfasst, die durch die Beheizung, Errichtung, Instandhaltung, Modernisierung und den Abriss von Wohngebäuden verursacht wurden [BUCHERT ET AL. 1999]. Die Rohstoff- und Energieaufwendungen der Bebauungsformen sowie für die Verkehrserschließung und die technische Infrastruktur blieben zunächst unberücksichtigt. Erste Abschätzungen hierzu zeigten jedoch, dass insbesondere die Menge mineralischer Rohstoffe für die Erschließungssysteme der Wohngebäude einen signifikanten Einfluss auf die Umweltinanspruchnahme haben.
In der Nachfolgestudie *Stoffflussbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung* [BUCHERT ET AL. 2004] wurde das Modell durch die Einbindung der technischen Infrastruktur und der Flächeninanspruchnahme für die Erschließung von Wohngebäuden erweitert.

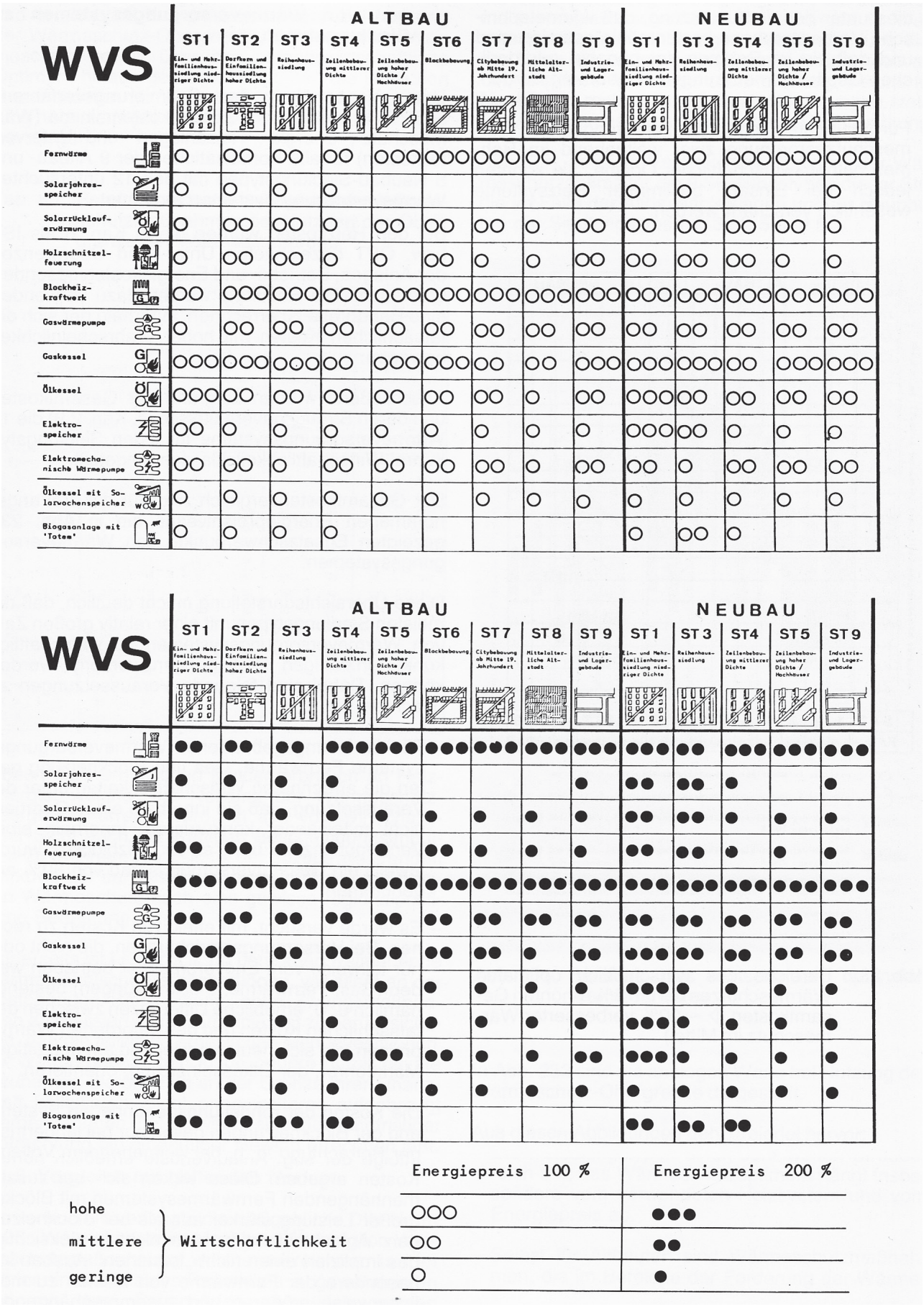


Abb. 5.1.14 Wirtschaftlichkeit der Wärmeversorgungssysteme [ROTH ET AL. 1980:233]

In dem Modell wird der Wohngebäudebestand nach sieben idealtypischen Siedlungsstrukturen unterschieden. Diese Stadtstrukturtypen werden hier als Bebauungsleittypen bezeichnet (Abb. 5.1.15). Für jeden der Bebauungsleittypen werden charakteristische Materialzusammensetzungen und Stoffmengen ermittelt und differenziert nach Baualtersklassen der Gebäude- und Wohnungsbestandsstatistik zugeordnet. Die Berechnung der Stoffströme für die Infrastrukturen erfolgt mit Hilfe von Infrastrukturbauelementen, die bezogen auf die Bebauungsleittypen typische Stoffkennwerte für Straßen, Rohrleitungen der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung, Fernwärme- und Gasnetze usw. abbilden. Durch ein Dichtemodell werden für die Bebauungsleittypen das Nettowohnbauland und eine typische Verkehrserschließungsfläche ermittelt. Über diese städtebaulichen Kennzahlen lassen sich die spezifischen Stoffstrommengen für die Infrastrukturen bezogen auf die städtebaulichen Nutzungskennzahlen ermitteln.

Für den Zeitraum 2000 bis 2025 wurden ein Referenzszenario und ein Nachhaltigkeitsszenario für die Stoffströme im Bereich Bauen und Wohnen in Deutschland gerechnet. Die Ergebnisse der Szenarien werden durch die Festlegung verschiedener Parameter beeinflusst, wie der Anteil der Innenentwicklung (Bebauung von Brachflächen, Nachverdichtung) und die Entwicklung der suburbanen Räume, der Umfang von Abriss, Umwidmung und Zusammenlegung alter Wohneinheiten, die wärmetechnische Sanierungsrate des Gebäudebestandes und die Entwicklung der Beheizungsstruktur sowie die Recyclingrate von Baustoffen und der Holzbauanteil beim Neubau von Ein- und Zweifamilienhäusern. Die Ergebnisse der Szenarien zeigen, dass die wärmetechnische Sanierung des Gebäudebestandes einen wesentlichen Einfluss auf die Ressourcenströme hat. Die Einsparpotenziale an Heiz- und Endenergie im Gebäudebestand durch Wärmedämmung, Austausch von Fenstern etc. werden als sehr hoch eingeschätzt. Die mineralische Rohstoffinanspruchnahme für den Hochbau (Wohnhäuser) und für den Tiefbau (Verkehrserschließungsflächen und Ver- und Entsorgungsleitungen) liegen in einer vergleichbaren Größenordnung. Der erforderliche Materialaufwand für die Erstellung und den Erhalt der Infrastruktur ist somit eine signifikante Größe. Mit dem Ausbau der Infrastruktur, z.B. durch fortgesetzte Zersiedelung, wächst der Instandhaltungsaufwand weiter an, was langfristig nicht nur zur weiteren Ressourceninanspruchnahme, sondern auch zu hohen Instandhaltungskosten führt [BUCHERT ET AL. 2004:114f.].

Zusammenfassend erweisen sich folgende Handlungsfelder als besonders relevant für eine nachhaltige Entwicklung im Bereich Bauen und Wohnen [BUCHERT ET AL. 2004:137]:

- Effizientere Nutzung des Wohngebäudebestandes durch energetische Sanierung und deutliche Aufwertung z.B. durch Wohnungsvergrößerungen,
- Förderung einer verstärkten Innenentwicklung der Siedlungsgebiete durch Nachverdichtung und Brachflächenaktivierung bei gleichzeitiger Revitalisierung der Siedlungskerne insbesondere in den Kernstädten,
- Forcierung des Einsatzes nachwachsender Rohstoffe wie Holz für Konstruktion und Beheizung der Wohngebäude,
- Forcierter Einsatz von Fern-/Nahwärme mit KWK für die Beheizung der Wohngebäude,
- Verstärkte Förderung des Einsatzes von Recyclingbaustoffen (z. B. Beton mit Rezyklatzuschlägen) zur Schonung nicht erneuerbarer mineralischer Rohstoffe.

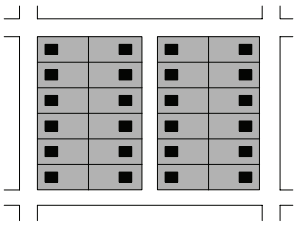
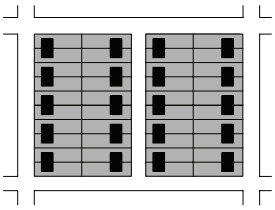
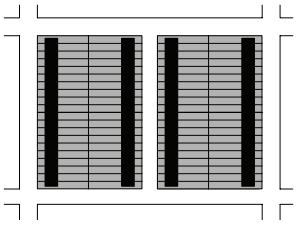
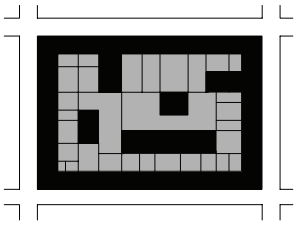
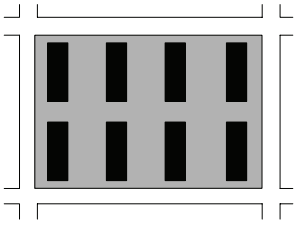
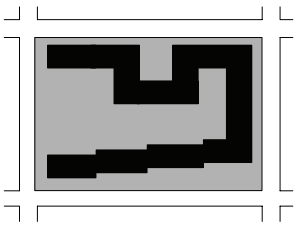
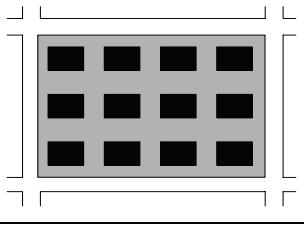
Leittyp der Bebauung	Abk.	Erscheinungsform	GFD von ... bis	
Freistehende Ein- und Zweifamilienhäuser	EFB-1		0,1	0,4
Ein- und Zweifamilienhäuser als Doppelhäuser	EFB-2		0,2	0,5
Ein- und Zweifamilien häuser in Reihenhaus- und Gartenhofbauweise	EFB-3		0,4	0,8
Verdichtete Blockstrukturen	MFB-1		1,2	3,5
Zeilenstrukturen	MFB-2		0,5	1,3
Geschosswohnungsbau in offener Baustruktur	MFB-3		0,8	2,5
Aufgelockerte Blockstrukturen	MFB-4		0,5	1,8

Abb. 5.1.15 Bebauungsleittypen des Wohngebäudebestandes und ihre angenommenen Spannbreiten der Geschossflächendichte (Zuordnung nach IÖR) [BUCHERT ET AL. 2004:22]

5.2 Modellbeschreibung

5.2.1 Forschungsziel und Modellbildung

Ausgangspunkt dieser Arbeit ist die Fragestellung, wie urbane Systeme mit einer hohen Bevölkerungs- und Energiedichte nachhaltig mit Energie versorgt werden. Um diese Frage zu beantworten wird hier ein Modell entwickelt, das auf der physiologischen Ebene den Ressourcenbedarf für die urbane Subsistenz durch ein Gebäude- bzw. Stadtstrukturtypenansatz exemplarisch abbildet und das nach *somatischer* und *extra-somatischer Energie* unterscheidet [BOYDEN 1979:13]. Der Schwerpunkt der Betrachtung liegt auf dem Zusammenhang zwischen Gebäudetypologien und Versorgungssystemen zur Wärmeversorgung. Erste Untersuchungen hierzu wurden bereits von Ueli Roth [ROTH ET AL. 1980] und Martin Küenzlen [KÜENZLEN 1985] vorgenommen.

Stadtstrukturtypen, wie sie in dieser Arbeit verwendet werden, bestehen aus einem Gefüge ähnlicher Gebäudetypen, die aufgrund ihrer Typologie und Altersklasse typische Konstruktionen, gebäudetechnische Ausstattungen und damit einen typischen Energiebedarf aufweisen. Angefangen bei der Studie *Wärmetechnische Gebäudetypologie für den deutschen Gebäudebestand* des Instituts für Wohnen und Umwelt in Darmstadt [EBEL ET AL. 1991] mit dem Ziel, das Energiesparpotenzial durch Wärmeschutzmaßnahmen für den deutschen Gebäudebestand zu ermitteln, gibt es mittlerweile zahlreiche Studien zu Gebäudetypen für verschiedene Städte und Regionen [IWU 2003, EBÖK 2005, IWU 2006]. Hierbei wird der Bestand zumeist nach Baualter und Gebäudegröße in Klassen eingeteilt. Diese *energetischen Steckbriefe* werden durch Analysen von Baustoffströmen in Form *stofflich-energetischer Gebäudesteckbriefe* [GRUHLER ET AL. 2002] ergänzt.

Das vorliegende Modell erweitert diesen Ansatz durch die Ermittlung des Flächenbedarfs zur Bereitstellung somatischer und extra-somatischer Energie. Somatische Energie bezeichnet alle Nahrungs- und Futtermittel, die für den organischen Stoffwechsel der Lebewesen innerhalb der betrachteten Systemgrenzen notwendig sind. Die extrasomatische Energie umfasst alle sonstigen Energieflüsse, die für das Funktionieren der urbanen Systeme benötigt werden, wie z.B. für die thermische Gebäudekonditionierung oder die Transport- und Herstellungsprozesse von Gütern. Die gemeinsame Betrachtung somatischer und extrasomatischer Energie ist deshalb von Bedeutung, weil sie – zumindest in großen Teilen –, über Landnutzungssysteme bereitgestellt werden und somit um die limitierte Ressource *Fläche* in Konkurrenz stehen.

Entgegen der zur Zeit üblichen Verwendung von Kohlendioxid als Indikator für energiebezogene Umweltbewertungen wird als Messgröße zur Bewertung ein Flächenindikator gewählt, der ressourcenorientiert den Bedarf und die Bereitstellung somatischer und extrasomatischer Energie integral als Flächengröße abbildet. Differenzierter als die häufig verwendete Methode des *Ökologischen Fußabdrucks* [WACKERNAGEL / REES 1997] werden durch dieses Modell die raum-zeitlichen Beziehungen und Technologien zur Ressourcenbereitstellung und -nutzung betrachtet. Der Flächenindikator leistet damit einen Beitrag zur Richtungssicherheit bei der Auswahl infrastruktureller Technologiepfade. Die vor- und nachgelagerten Prozessketten zur Herstellung der infrastrukturellen und gebäudetechnischen Anlagen bleiben in der Bilanzierung allerdings unberücksichtigt, da ihre Untersuchung den Umfang dieser Arbeit übersteigt.

Folgende Kriterien sind für die Entwicklung eines Energie- und Stoffstrommodells zu beachten [BADER 2005]:

1. Das Modell muss so einfach wie möglich und so umfassend wie nötig sein.
2. Das Modell muss die Observierbarkeit und Steuerbarkeit des Systems ermöglichen.
3. Wie fließen Energie und Stoffe? Wie werden dynamische Prozesse abgebildet?
4. Die Redundanz ist im Modell möglichst gering zu halten.

Aus der skizzierten Ausgangslage ergeben sich folgende Forschungsfragen:

1. In welchem Maße lässt sich die Energieflussrate urbaner Systeme herabsenken, um eine nachhaltige Versorgung mit erneuerbaren Energieträgern insbesondere zur Wärmeversorgung zu ermöglichen?

2. Wie hoch kann der Deckungsbeitrag aus erneuerbaren Energien – insbesondere regionaler Energieträger aus Biomasse – sein und welche anderen Technologien oder Energieimporte sind zur Deckung notwendig?

3. Welche Auswirkungen hat das auf die infrastrukturellen Systeme der Gebäude-, Siedlungs- und Stadttechnik zur Energie- und Wärmeversorgung?

5.2.2 Systemgrenzen, Modellebenen und Arbeitsschritte

Für die Ermittlung des Flächenbedarfs werden als zeitliche Systemgrenze die jährlichen Energie- und Stoffströme betrachtet. Die räumliche Systemgrenze wird durch die Auswahl des jeweiligen Untersuchungsgebietes definiert, die sich aus sinnvollen geographischen (z.B. Entfernungsradien, Wassereinzugsgebiete u.a.) oder verwaltungstechnischen (statistische Erhebungen, soziale oder ökonomische Systeme u.a.) Grenzen ergeben. In diesem Modell werden die Austausch- und Versorgungsbeziehungen in urbanen Systemen über alle Maßstabsebenen hinweg betrachtet. Auf der Gebäude- und Siedlungsebene wird der empirische Energie- und Flächenbedarf ausgewählter Stadtstrukturtypen ermittelt (*Bottum-up*), dem auf der Regionalebene die Potenziale zur Energie- und Flächenversorgung gegenübergestellt werden (*Top-down*). Als Systemgrenze für die Ermittlung des Ressourcenbedarfs wird im vorliegenden Fall das geographisch- und verwaltungsrechtliche Gebiet der Region Berlin-Brandenburg gewählt (Kapitel 6).

Im Folgenden werden die Systembeziehungen anhand der verschiedenen Modellebebenen sowie die Vorgehensweise zur Modellbildung und Bilanzierung dargestellt.

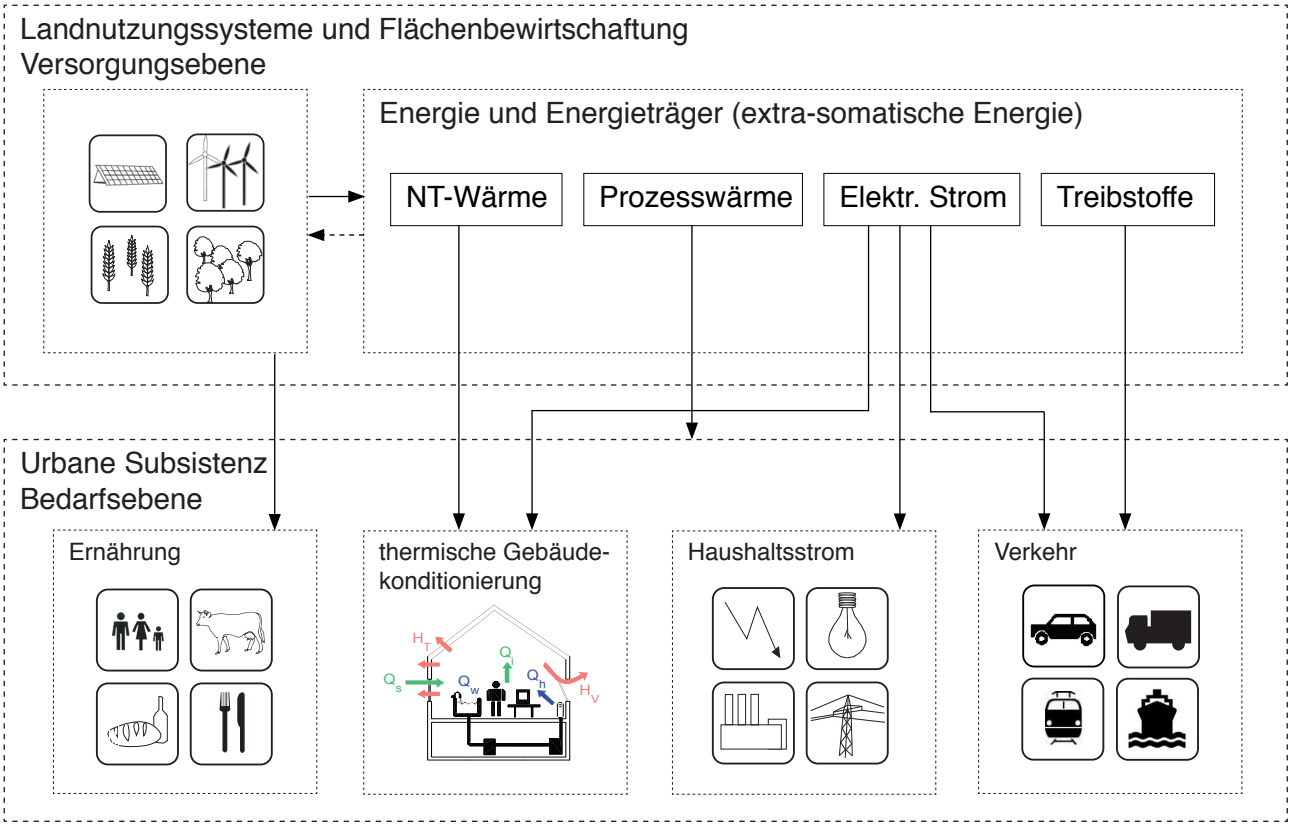


Abb. 5.2.1 Modellebene 1: Versorgung und Bedarf urbaner Subsistenz bezogen auf den Energiehaushalt EWSV - Modell (Ernährung - Wärme - Strom - Verkehr)

Modellebene 1

Abb. 5.2.1 zeigt die grundlegenden Beziehungen zwischen Versorgungs- und Bedarfsebene in Form von Landnutzungssystemen bzw. Technologien zur Energieerzeugung und den funktionalen Teilsystemen zur Sicherung der urbanen Subsistenz (EWSV - Modell: Ernährung - Wärme - Strom - Verkehr).

Die urbane Subsistenz wird durch vier Subsysteme der Ressourcennutzung abgebildet:

1. Nahrungs- und Futtermittel zur Ernährung,
2. Energie für die thermische Gebäudekonditionierung,
3. Energie für Haushaltsstrom und
4. Energie für den Bereich Transport und Mobilität.

Die Flächenkenndaten zur Ressourcenbereitstellung von Nahrungs- und Futtermitteln (somatische Energie) werden in Kapitel 5.3, der Flächenbedarf für die Bereitstellung von Energie zur thermischen Gebäudekonditionierung, für den Haushaltsstrom und für Mobilität (extra-somatische Energie) in Kapitel 5.4. näher bestimmt.

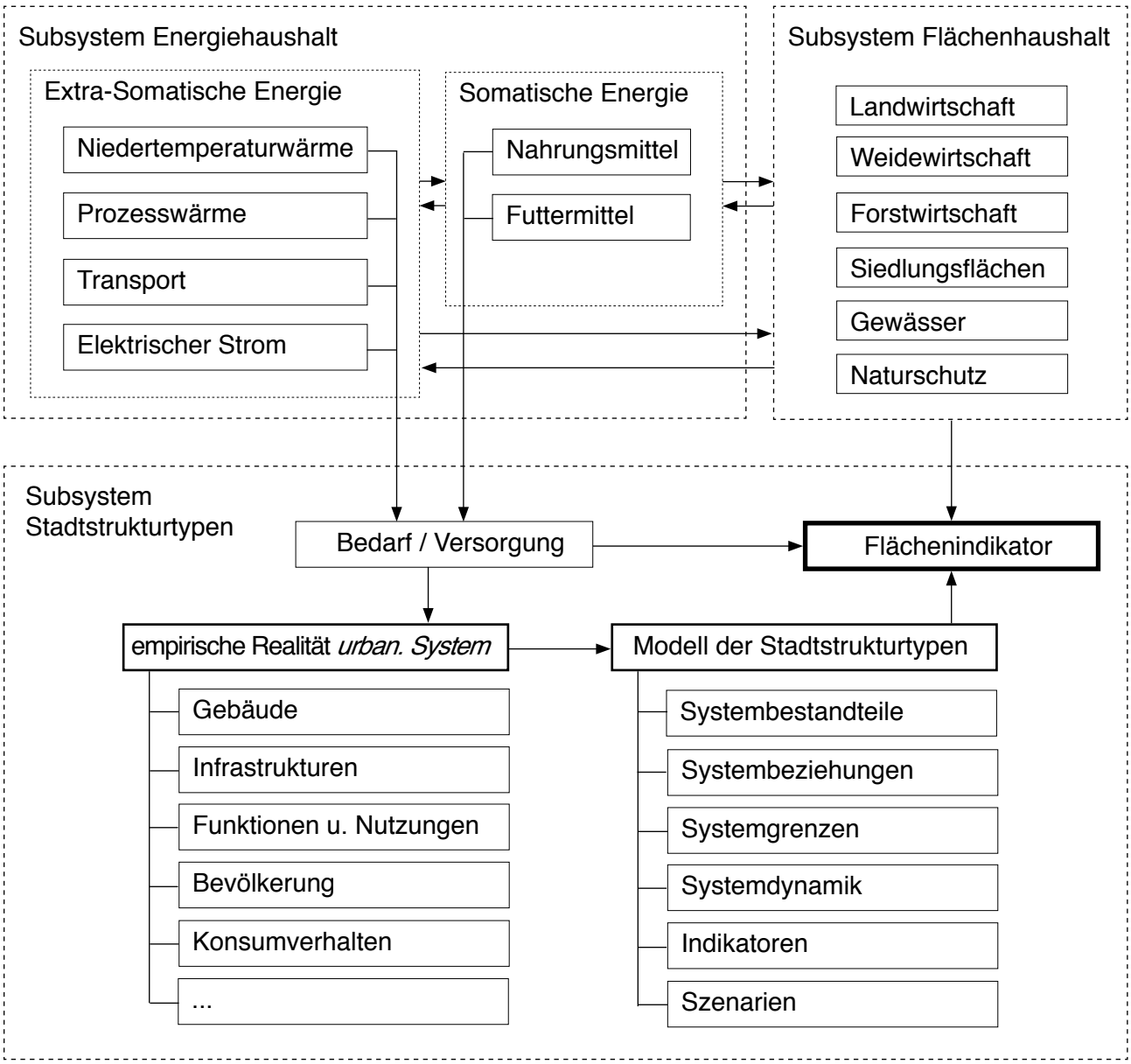
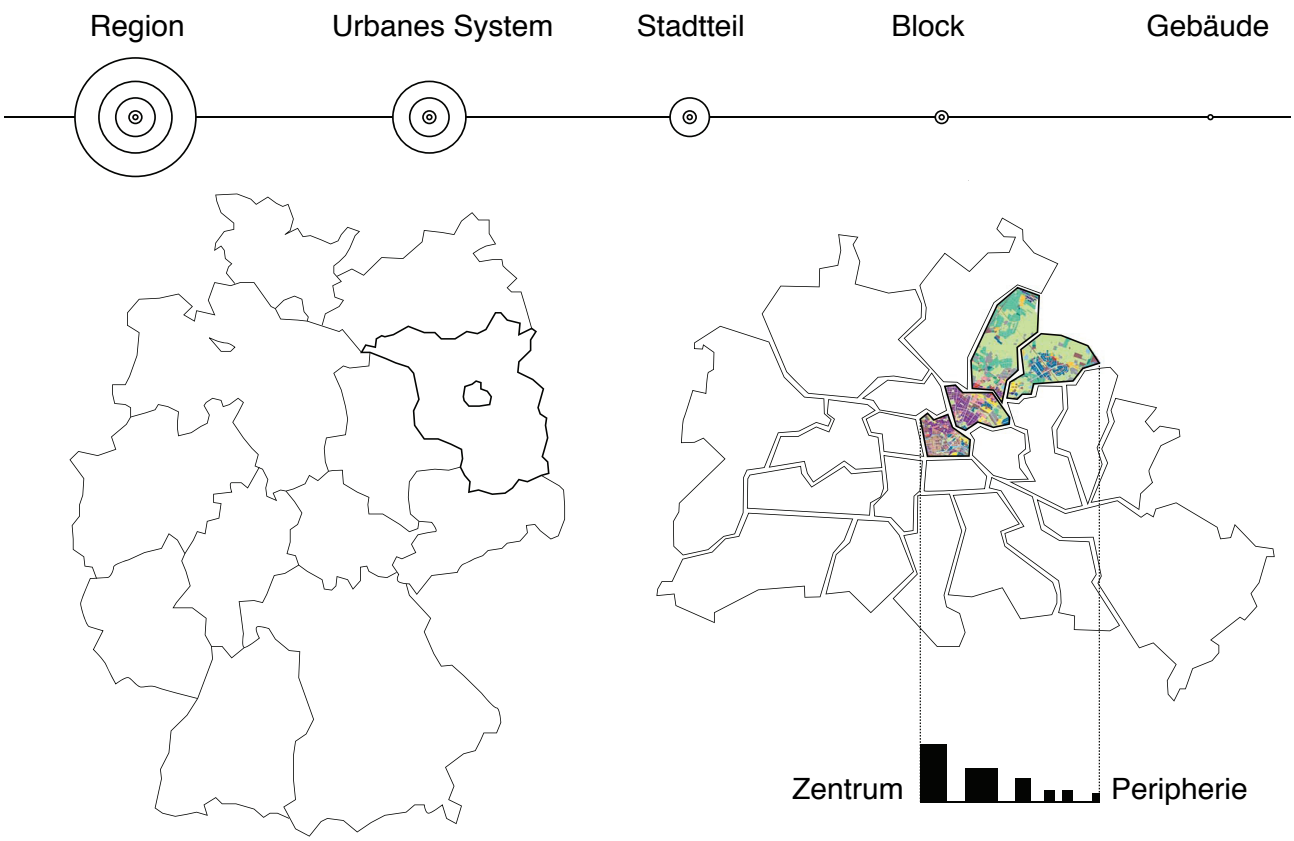


Abb. 5.2.2 Modellebene 2: Beziehungen zwischen den Subsystemen Energiehaushalt, Flächenhaushalt und Stadtstrukturtypen in Verbindung mit dem Flächenindikator

Modellebene 2

Abb. 5.2.2 beschreibt die Beziehungen des Energie- und Flächenhaushalts auf der Versorgungsebene zur empirischen Realität urbaner Systeme und deren modellhaften Abbildung anhand von *Stadtstrukturtypen*. In der Realität gibt es eine große Anzahl unterschiedlichster Gebäude- und Stadtstrukturen, die sich in Bebauungstypologie, Form, Funktion, Nutzung sowie eine Vielzahl von Mischformen, die sich in baukonstruktiver und gebäudetechnischer Ausbildung voneinander unterscheiden.
Ein Modell kann diese Komplexität nur sehr begrenzt abbilden. Entscheidend ist, dass die gewählten Parameter das System hinreichend genau beschreiben, um durch die Untersuchung sinnvoller Szenarien mögliche zukünftige Zustände abzubilden. Auf die Definition von Stadtstrukturtypen wurde bereits in Kapitel 5.1 näher eingegangen.



Modellebene 3

Abb. 5.2.3 zeigt die räumlichen Maßstabsebenen des Modells und die Auswahl von Stadtstrukturtypen, wie sie von der Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung verwendet wird. Hier werden zunächst dreizehn Strukturtypen mit überwiegender Wohnnutzung unterschieden [SENSTADT 2008a:5, HANSCHKE / BEDDING 1995/2005]:

1. Blockrandbebauung der Gründerzeit mit Seitenflügeln und Hinterhäusern
2. Blockrandbebauung der Gründerzeit mit massiven Veränderungen
3. Blockrand- und Zeilenbebauung der 20er und 30er Jahre
4. Zeilenbebauung seit den 50er Jahren
5. Hohe Bebauung der Nachkriegszeit
6. Blockrand- oder Zeilenbebauung der 80er und 90er Jahre in Ost-Berlin
7. Kompakte, hohe Siedlungsbebauung und aufgelockerte, niedrige Siedlungsbeb. der 90er Jahre
8. Kompakte, hohe Siedlungsbebauung der 90er Jahre
9. Aufgelockerte niedrige Siedlungsbebauung der 90er Jahre
10. Niedrige Bebauung mit Hausgärten
11. Villenbebauung mit parkartigen Gärten
12. Bebauung mit Gärten und halbprivater Umgrünung
13. Dörfliche Bebauung

Der hier gewählte Modellansatz beschränkt sich exemplarisch auf vier elementare Stadtstrukturtypen, die als Grundtypen alle weiteren in sich vereinen und die bezogen auf das Berliner Stadtgebiet statistisch erfasst sind (Abb. 5.2.4) [SENSTADT 2008a:11]:

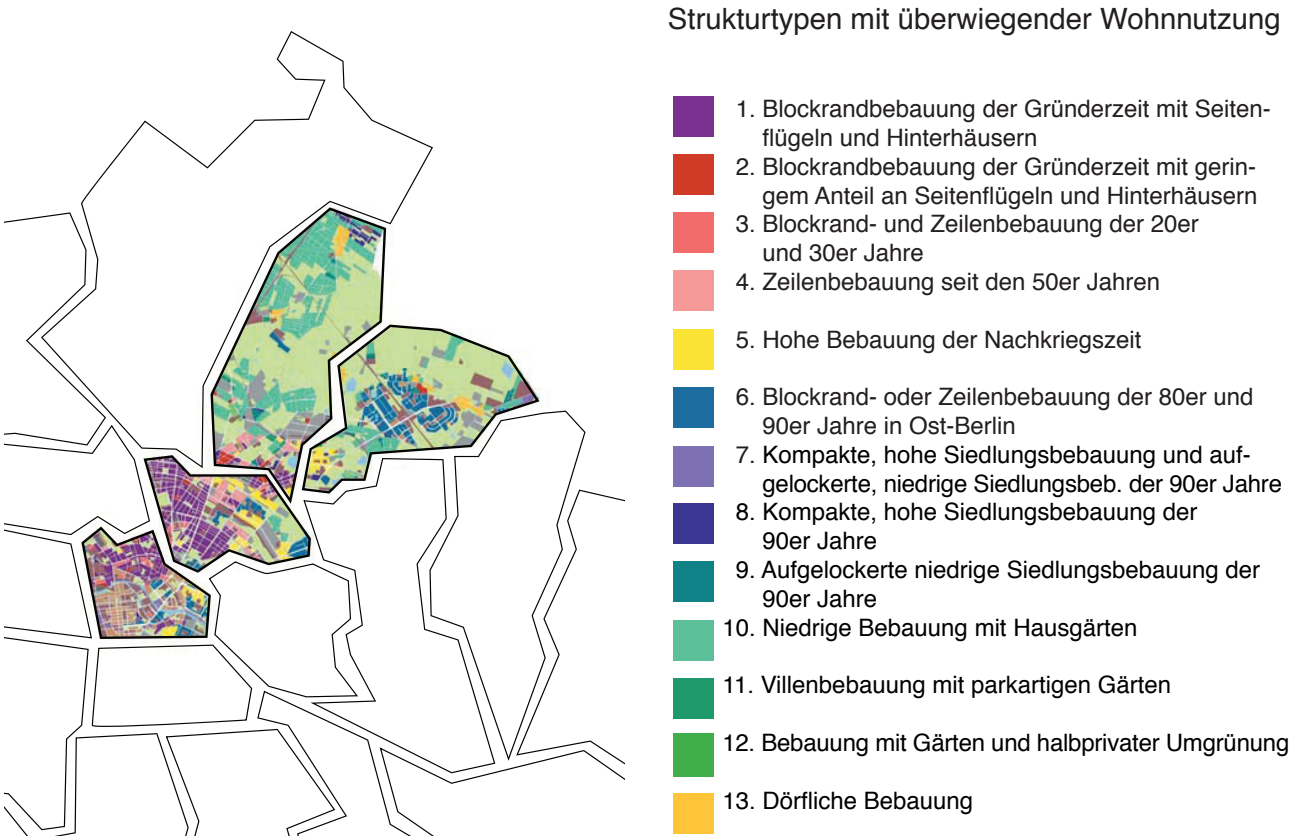


Abb. 5.2.3 Modellebene 3: Betrachtung aller räumlichen Maßstabsebenen sowie Auswahl und räumliche Verteilung der Stadtstrukturtypen [SENSTADT 2008a:5, HANSCHKE / BEDDING 1995/2005]

Stadtstrukturtyp 1 - Niedrige Bebauung mit Gartenstruktur (Strukturtypen 9-13)
Stadtstrukturtyp 2 - Zeilenbebauung der 1920er und 30er und 50er Jahre (Strukturtypen 3-4)
Stadtstrukturtyp 3 - Blockrandbebauung der Gründerzeit (Strukturtypen 1-2)
Stadtstrukturtyp 4 - hohe Bebauung der Nachkriegszeit (Strukturtypen 5-8)

Theoretisch kann das Modell durch weitere Stadtstrukturtypen erweitert werden, z.B. um eine differenziertere Betrachtung zu ermöglichen. Meine Auswahl beschränkt sich aber auf die vier Elementartypen, da diese das System hinreichend beschreiben und durch bereits vorhandene statistische Angaben quantifiziert werden können. In Verbindung mit der amtlichen Gebäude- und Wohnraumstatistik, der Gebäudezählung sowie weiteren Informationen zur wärmetechnischen Versorgungsstruktur lässt sich hieraus eine quantitative Abschätzung der räumlichen Verteilung des Energiebedarfs herleiten.

Modellebene 4

Abb. 5.2.5 beschreibt das Subsystem *Thermische Gebäudekonditionierung*. In der Abbildung sind die wesentlichen Einflüsse auf den Energiebedarf von Wohngebäude dargestellt, wie sie im Modell bilanziert werden. Der Primärenergiebedarf von Gebäuden wird maßgeblich durch die Typologie, Form, Baukonstruktion sowie durch die Anlagentechnik bestimmt. Das Nutzerverhalten, das besonders bei Gebäuden mit sehr niedrigem Energiebedarf einen großen Einfluss auf den

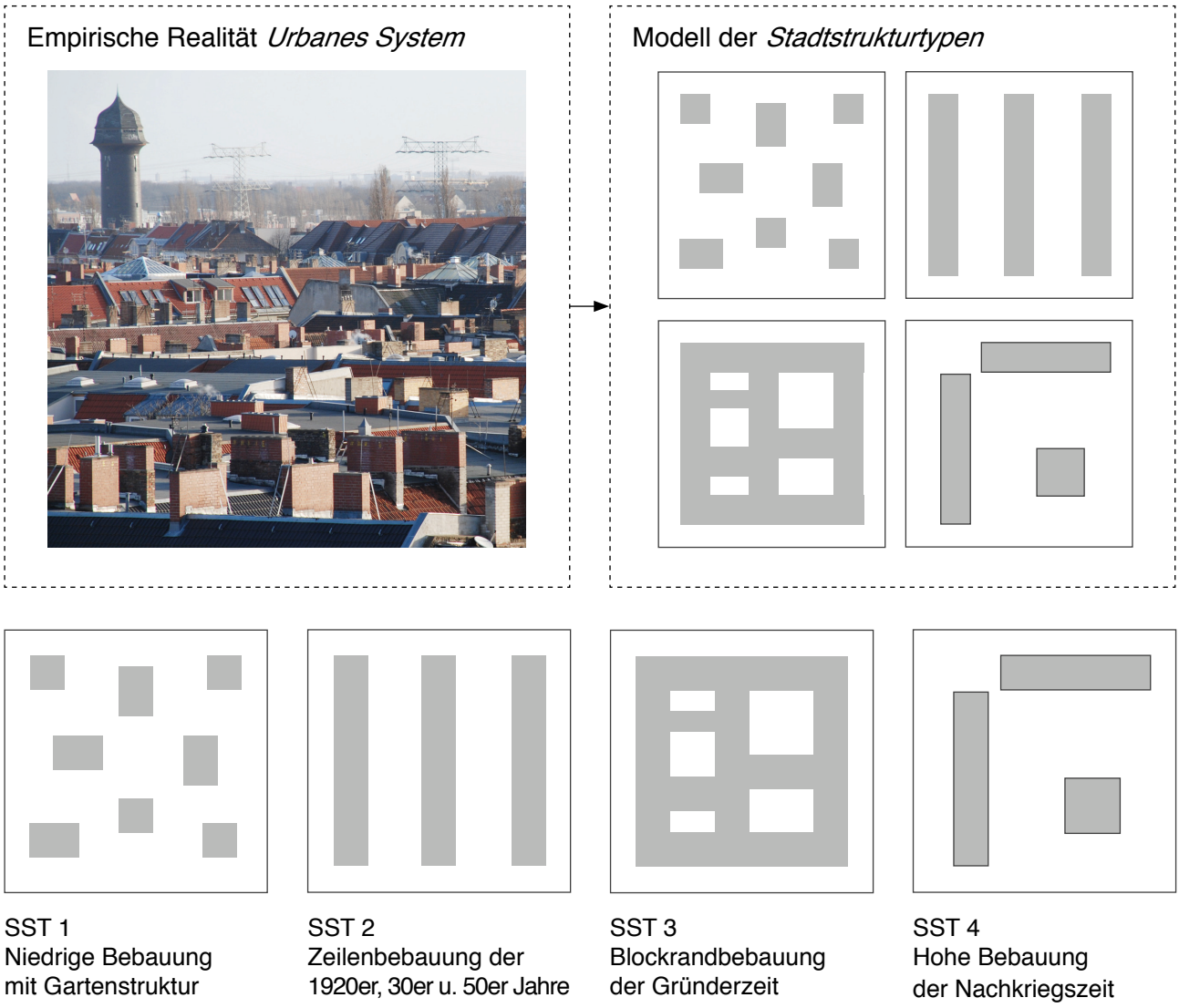


Abb. 5.2.4 Modellebene 3: Darstellung der vier elementaren Stadtstrukturtypen

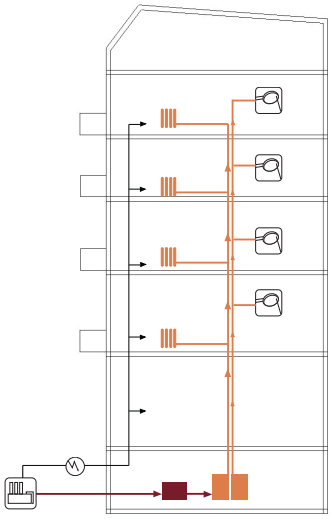
realen Energieverbrauch hat, wird in dieser Untersuchung nicht einbezogen. Die Gebäudeform (A/V-Verhältnis), Größe und Orientierung transparenter Bauteile und die bauphysikalische Qualität der Hüllflächen (U-Werte der Außenwände, Dächer und Fenster usw.) beeinflussen vor allem den Heizwärmebedarf. Die Anlagentechnik hat einen starken Einfluss auf den End- und Primärenergiebedarf als Ganzes. Durch den Einsatz erneuerbarer Energien kann z.B. eine energetisch schlechtere Ausführung der Gebäudehüllfläche primärenergetisch kompensiert werden. Bei meiner Betrachtung ist aber der Endenergiebedarf die entscheidende Kenngröße, da sich durch diesen der Bedarf an Energieträgern ermitteln lässt.

Die **Berechnung des Energiebedarfs** erfolgt nach *DIN V 4701-10 – Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen* [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 2004] mit der Bilanzierungssoftware *EPASS Helena Version 5.4.0.10 Professional* des Zentrums für Umweltbewusstes Bauen (ZUB) auf der Grundlage der EnEV 2009. Diese Software entspricht den aktuellen normativen und rechtlichen Anforderungen an einen öffentlich-rechtlichen Nachweis zur Energieeinsparverordnung (EnEV 2009) [BMJ 2009a].

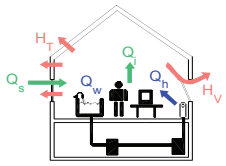
Empirische Realität *Gebäude*



Modell *Thermische Gebäudekonditionierung*



thermische Gebäude-konditionierung



Parameter des Energiebedarfs

1. Gebäudekonzeption
- Städtebauliche Struktur und Orientierung
- Gebäudetypologie
- A/V- Verhältnis
- Fensterflächenanteil
- Tageslichtnutzung

2. Baukonstruktion
- Bauphysikalische Qualität der Hüllflächen
- leichte oder schwere Bauweise
- Luftdichtigkeit
- Wärmebrücken

3. Gebäudetechnik
- Heizungssystem
- Lüftungssystem
- Kühlsystem
- Warmwasserbereitstellung

4. Nutzereinflüsse
- Behaglichkeitsempfinden
- Lüftungsverhalten
- Wartung und Instandhaltung
- sonstiges

Modellebene

Stadtstrukturtyp
SST 1
SST 2
SST 3
SST 4

Baukonstr. Opt.
E1
E2
E3

Anlagenvarianten
V1
V2
V3
V4

Abb. 5.2.5 Modellebene 4: Einflüsse auf den Energiebedarf von Wohngebäuden und Abbildung dieser Parameter im Modell, Auswahl der baukonstruktiven und gebäudetechnischen Varianten

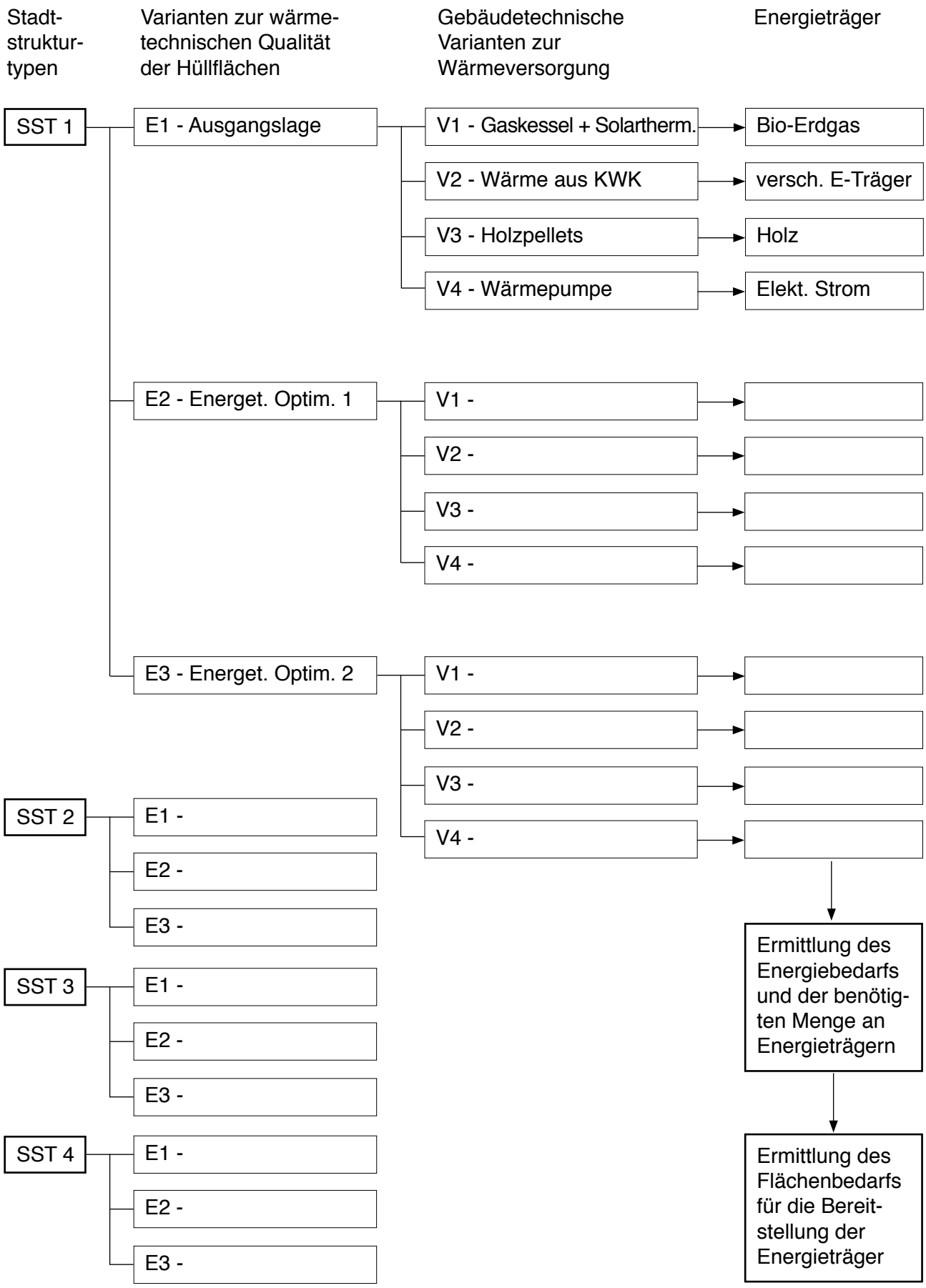
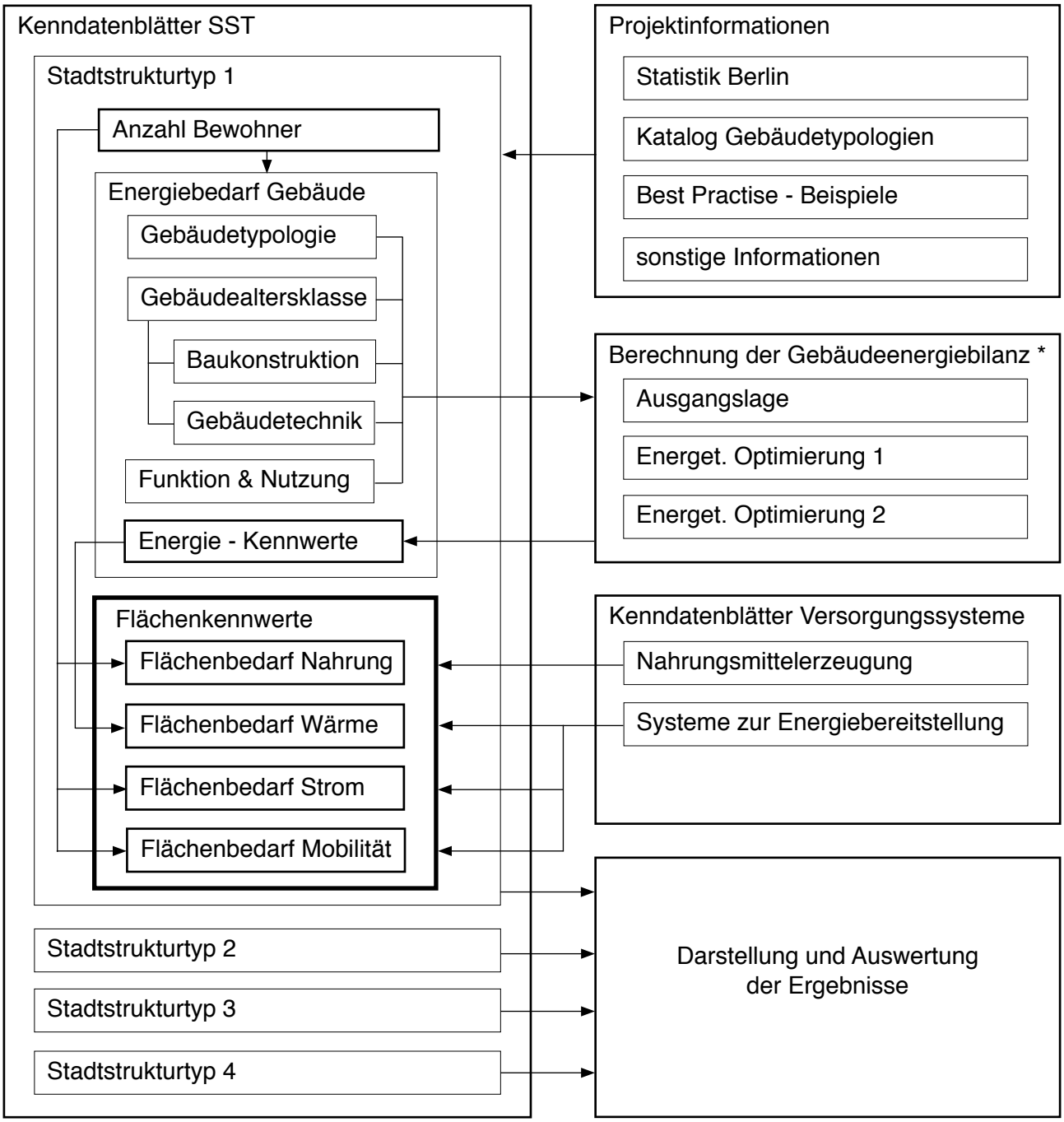


Abb. 5.2.6 Übersicht zu den Parametervariationen für die Ermittlung des Energiebedarfs der SST



* Berechnungen mit Software EPASS Helena

Abb. 5.2.7 Übersicht zur Methodik für die Ermittlung der Flächenkennwerte der Stadtstrukturtypen

Die durch die **Parametervariation** (Abb. 5.2.6) gewonnenen Endenergiekennwerte der vier Stadtstrukturtypen werden den statistisch ermittelten Gesamtwohnflächen für Berlin zugeordnet und mit den Flächenbedarfskennwerten für die Energieerzeugung kombiniert.
Auf der Grundlage dieser Daten werden Szenarien zur Ressourcennutzung unterschiedlicher Varianten zur Wärmeverersorgung untersucht. Abschließend werden die Flächenkennwerte für Ernährung, Haushaltsstrom und Verkehr in die Bilanzierung des Flächenbedarfs einbezogen, um so den Gesamtflächenbedarf zu ermitteln. Dieser wird mit dem Flächenpotenzial zur regionalen Versorgung verglichen. Eine Übersicht zur **Methodik** ist in Abb. 5.2.7 dargestellt.

5.3 Flächenbedarf für Ernährung

5.3.1 Umweltauswirkungen des Bedarfsfeldes Ernährung

Eine ausreichende und gesunde Ernährung ist eine der wesentlichen Voraussetzungen für ein gesundes Leben. Jeder Mensch sollte zu jeder Zeit und an jedem Ort physisch und wirtschaftlich den Zugang zu ausreichenden und gesundheitlich unbedenklichen Nahrungsmitteln haben. Die Ernährungssicherheit auf der individuellen, regionalen, nationalen und internationalen Ebene ist ein zentraler Anspruch einer nachhaltigen Entwicklung [WOITOWITZ 2007:3].

Im Jahr 2008 waren weltweit etwa 963 Millionen Menschen unterernährt, fast jeder siebte Mensch auf der Erde [FAO 2008]. Nahezu 90% dieser Menschen leben in Indien, China, den anderen asiatischen und pazifischen Ländern sowie in afrikanischen Ländern südlich der Sahara (Abb. 5.3.1).

Während in einigen Regionen der Welt Menschen unter Hunger und Mangelernährung leiden, sind viele Menschen in den Industrieländern fehl- und überernährt. Neben der globalen Verteilungsfrage von Hunger und Überfluss werden in den Industrieländern vor allem Fragen der Nahrungsmittelqualität, die Belastung von Nahrungsmitteln durch gesundheitsschädliche Substanzen und die Umsetzung gesunder Ernährungsweisen diskutiert.

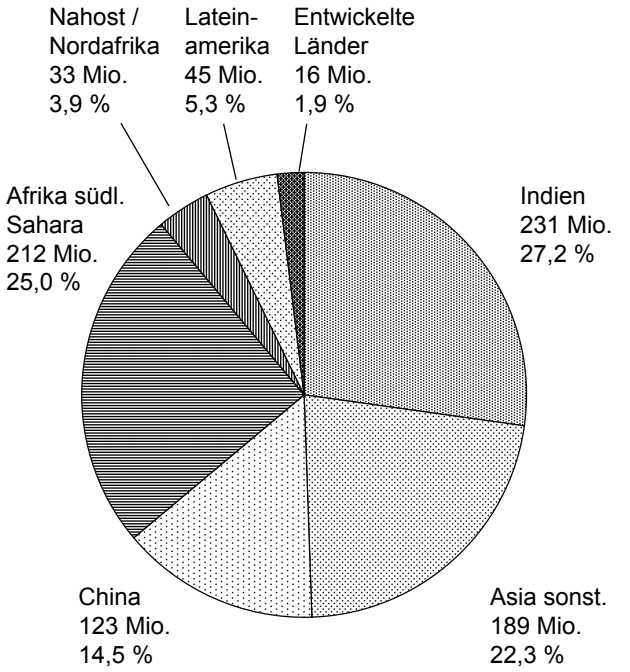


Abb.5.3.1 Mangel- und Unterernährung, weltweit [FAO 2008]

Das Bedarfsfeld Ernährung ist in entwickelten Ländern mit einem Anteil von ca. 15 - 20% an Material- und Energieströmen nach dem Wohnen das nächst ressourcenintensivste Bedarfsfeld [BUND / MISEREOR 1997:103, JUNGBLUTH 2000:5]. Die meisten Studien zu den Umweltauswirkungen des Bedarfsfeldes Ernährung beruhen auf Ökobilanzen [JUNGBLUTH 2000, TAYLOR 2000, WOITOWITZ 2007] oder auf Stoffflussanalysen [FAIST 2000, EBERL ET AL. 2005]. Daneben gibt es Berechnungen zum ökologischen Fußabdruck, wo die durchschnittlichen Produktions- und Energieflächen auf der Grundlage von Handelsstatistiken ermittelt werden, die den absoluten Nahrungsmittelverbrauch der Bevölkerung in der Untersuchungsregion und die landwirtschaftlichen Erträge zumeist unter Berücksichtigung eines globalen Ertragsfaktors zueinander in Beziehung setzen [SCHNAUSS 2001, TREFFNY 2003].

Als Indikatoren zur Beschreibung der Umweltauswirkungen werden zumeist der Primärenergieverbrauch, CO_2-Äquivalente als Treibhauspotenziale (Kohlendioxid, Lachgas und Methan), SO_2-Äquivalente als Versauerungspotenziale, Stoffausträge (Stickstoff, Phosphor und Kalium) und die Flächeninanspruchnahme für die Nahrungsmittelproduktion herangezogen. Aufgrund der komplexen Prozessketten bei der landwirtschaftlichen Produktion von Nahrungsmitteln, deren Weiter-

verarbeitung und Vertrieb ist die Ermittlung der Umweltauswirkungen durch Lebenszyklusanalysen recht aufwendig. Zudem ist ein großer Anteil der Flächennutzung durch den Import von Nahrungs- und Futtermitteln in andere Regionen und andere Klimazonen ausgelagert, so dass eine eindeutige Allokalisierung der Umweltauswirkungen nicht einfach zuzuweisen ist.

Durch die landwirtschaftliche Produktion entsteht weltweit auch der größte Wasserbedarf. Neben dem direkt messbaren Wasserverbrauch für die Nahrungsmittelerzeugung und Verarbeitung gibt es durch den Import von Nahrungsmitteln einen indirekten Wasserverbrauch, der analog zum ökologischen Fußabdruck als Waterfootprint [CHAPAGAIN / HOEKSTRA 2004] oder als virtuelles Wasser [HUMMEL ET AL. 2006] bezeichnet wird. Im Rahmen dieser Arbeit beschränke ich mich auf die Ermittlung der Flächeninanspruchnahme durch die Nahrungsmittelerzeugung und den in allen Prozessketten entstehenden Energieverbrauch (Abb. 5.3.2).

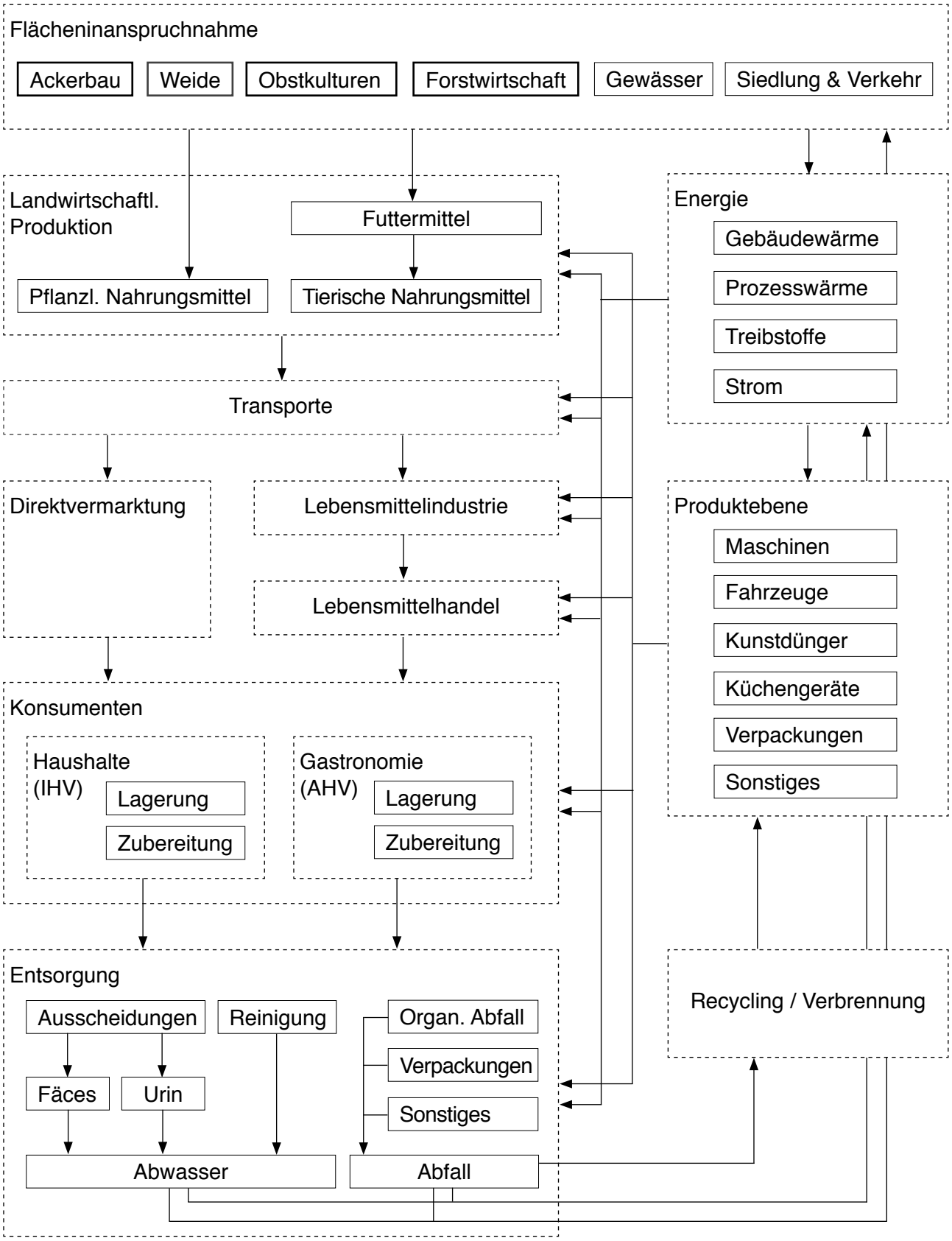
5.3.2 Zur Ernährungsphysiologie des Menschen

Bei der Ermittlung der Flächenintensität des Bedarfsfelds Ernährung sind mehrere Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Zunächst lässt sich der menschliche Nahrungsmittelbedarf über die physiologischen Erfordernisse näher bestimmen. Für den Aufbau, den Erhalt und das Erbringen von Leistungen des Körpers durch den physiologischen Stoffwechsel nimmt der Mensch chemische Stoffe in Form von Nahrungsmitteln auf, die nach Nährstoffen, Ballaststoffen sowie Farb-, Duft -und Geschmacksstoffen unterschieden werden. Der gesamte Prozess der Nahrungsaufnahme wird auch als Ernährung bezeichnet. Der menschliche Körper besteht zu 60-70% aus Wasser, zu 20% aus Eiweiß, zu 4 bis 10% aus Fett, zu 1% aus Kohlenhydraten und zu 4 bis 5% aus Mineralstoffen und Vitaminen (Anteile bezogen auf die Körpermasse) [SCHLIEPER 1997:12].

Bei den Nährstoffen unterscheidet man nach Baustoffen (Eiweißstoffe, Mineralstoffe und Wasser), Brennstoffen (Fette und Kohlehydrate) und Wirkstoffen (Vitamine und Mineralstoffe). Die Baustoffe dienen dem Körperaufbau und dessen Erhaltung. Die Brennstoffe liefern dem Körper vorwiegend Energie für den Wärmehaushalt und die Bewegung. Die Wirkstoffe regeln die Körpervorgänge. Die Ballaststoffe sind die unverdaulichen Bestandteile der Nahrung, welche die Transitmenge erhöhen und dadurch die Darmbewegung für die Verdauungsprozesse fördern. Die Farb-, Duft -und Geschmacksstoffe sind appetitanregende Begleitstoffe. Wasser kommt in der Körperphysiologie eine besondere Bedeutung zu, da es dem Aufbau und dem Erhalt des Körpers sowie als Transport- und Lösungsmittel dient.

Der Gesamtenergiebedarf eines Menschen setzt sich aus dem Grundumsatz und dem Leistungsumsatz zusammen. Der Grundumsatz ist die Energiemenge, die ein Mensch bei völliger Ruhe, im Liegen, leicht bekleidet in einem Raum von 20°C und 12 Stunden nach der letzten Nahrungsaufnahme durchschnittlich benötigt. Üblicherweise wird der Grundumsatz für 24 Stunden berechnet. Der Grundumsatz wird wesentlich von den Faktoren Alter, Geschlecht, Größe und Gewicht, Hormone, Klima und individuellen Faktoren beeinflusst [SCHLIEPER 1997:16].

Für die Berechnung des Grundumsatzes eines 25-jährigen Erwachsenen nimmt man als Richtwert 4 kJ / Kilogramm Körpergewicht pro Stunde bzw. 100 kJ / Kilogramm Körpergewicht pro Tag an.



IHV = Inhausverzehr
AHV = Außerhausverzehr

Abb. 5.3.2 Systemdarstellung Bedarfsfeld Ernährung

Bei einem erwachsenen Menschen beträgt der Anteil am Grundumsatz für das Gehirn 25 %, für den Margen-Darm-Trakt, Leber und Niere 35%, für die Skelettmuskeln 20%, für das Herz 6% und für den Rest des Körpers 14%. Der Leistungsumsatz wird zunächst durch die Muskeltätigkeit (Arbeitsleistung) bestimmt. Jede Muskeltätigkeit und geistige Aktivität verursacht einen zusätzlichen Energiebedarf. Bei der Berechnung des Leistungsumsatzes wird vereinfachend zwischen Arbeitsumsatz und Freizeitumsatz unterschieden. Die Deutsche Gesellschaft für Ernährung (DGE) klassifiziert den Leistungsumsatz nach den Tätigkeitsgruppen Leicht- (2-4 (kJ*h)/kg Körpergewicht), Mittelschwer- (4-8 (kJ*h)/kg) Schwer- (8-12 (kJ*h)/kg) und Schwerstarbeiter (> 12 (kJ*h)/kg).

Insgesamt werden ca. 12% der gesamten Energiezufuhr für die Verdauung und die Stoffwechselvorgänge benötigt, wobei ca. 94% der in der Nahrung gespeicherten Energie verwertet werden kann [SCHLIEPER 1997:19]. In Abhängigkeit der persönlichen Disposition kann die Energieverwertung aus der Nahrungsmittelaufnahme zwischen Personen mit hohem und niedrigem Energieverbrauch um den Faktor 3 bis 4 schwanken [Coley et al. (1997) nach [JUNGBLUTH 2000:6]]. Auf der Grundlage des Gesamtenergiebedarfs wird die tägliche Grundnährstoffzufuhr eines Menschen berechnet. Der Energie- und Nährstoffbedarf ist für jeden Menschen aufgrund der genannten Einflussgrößen – Grundumsatz, Leistungsumsatz und persönliche Disposition –, sehr unterschiedlich. Die Tabelle 5.3.1 zeigt beispielhaft den empfohlenen Gesamtenergiebedarf einer Frau mit einer Größe von 165 cm und einem Körpergewicht von 60 kg bei leichter Arbeit.
Die Zusammensetzung der Energiezufuhr unterscheidet sich stark durch die Ernährungsweisen in den verschiedenen Ländern und hat sich in Deutschland seit dem 2. Weltkrieg stark verändert. Die durchschnittliche Gesamtenergiezufuhr ist heute etwa doppelt so hoch wie 1946.

Energiequelle	Empf. Gesamtenergiebedarf (1) Frau, 165 cm, 60 kg, leichte Arbeit		%	Empfohlen (2) %	1946 (3) %	1990 (3) %
Eiweiß	74 g	1.260 kJ	15	10 -15	15	14
Fette	65 g	2.520 kJ	30	30	9	40
Kohlenhydrate	272 g	4.620 kJ	55	60 - 55	76	42
Alkohol	. / .	. / .	. / .	. / .	. / .	4
Gesamtenergiezufuhr	411 g	8.400 kJ	100	100	100	100

Tab. 5.3.1 Durchschnittlicher und empfohlener Gesamtenenergiebedarf für die Ernährung

(1) [SCHLIEPER 1997:21]
(2) [SCHLIEPER 1997:21]
(3) [SCHLIEPER 1997:388]

Eine gesunde Ernährung besteht aus einer ausgewogenen Kost. Prinzipiell wird der Verzehr weitgehend naturbelassener Lebensmittel empfohlen, da Verfahren der Lebensmittelverarbeitung, wie z.B. Erhitzungsverfahren zur Konservierung, zu einer Verminderung essenzieller und gesundheitsfördernder Inhaltsstoffe führen. Diese Verfahren erhöhen zwar die Energiedichte der Nahrungsmittel, zugleich wird aber deren Nährstoffdichte vermindert [KOLLATH 2001].

Der tatsächliche Pro-Kopf-Verzehr von Nahrungsmitteln in Deutschland kann über Agrarstatistiken [DESTATIS 2008, LLM 2007], Einkommens- und Verbrauchsstichproben (EVS) und über empirische Untersuchungen zum Ernährungsverhalten, die über einen Mikrozensus erhoben werden [MAX RUBNER-INSTITUT 2008a&b], annäherungsweise ermittelt werden.

Die Ergebnisse aus der *Nationalen Verzehrstudie II*, einer bundesweit repräsentativen Erhebung zur Ernährungssituation von Jugendlichen und Erwachsenen, zeigen eine durchschnittliche Nahrungsaufnahme in Deutschland bei Männern von 1.550 g/Tag und bei Frauen von 1.374 g/Tag (Tab. 5.3.2). An Getränke kommen bei Männern 2.659 g/Tag und bei Frauen 2.366 g/Tag hinzu [MAX RUBNER-INSTITUT 2008b]. Die durchschnittliche Energiezufuhr in Deutschland liegt bei Männern mit 2.413 kcal/Tag (= 10.110 kJ/Tag) und bei Frauen mit 1.833 kcal/Tag (= 7.680 kJ/Tag) in etwa für die empfohlene Energiezufuhr bei niedriger körperlicher Aktivität wie sie bei moderner Bürotätigkeit üblich ist [MAX RUBNER-INSTITUT 2008b:92]. Anderen Studien zufolge liegt die Höhe der Energiezufuhr durchschnittlich um etwa 15 % über den empfohlenen Werten. Besonders die Nahrungsaufnahme an Protein und Fett aus tierischen Nahrungsmitteln liegt über den aus wissenschaftlicher Sicht angeratenen Mengen. Der gegenwärtige Fleischverzehr in Deutschland beträgt pro Person und Jahr etwa 60 kg Fleisch, hinzu kommen 330 kg aus Milchprodukten und ca. 13 kg Eier [Woitowitz 2007:202]. Nach Empfehlungen der *Deutschen Gesellschaft für Ernährung* sollte der durchschnittliche Verzehr an Nahrungsmitteln tierischer Herkunft auf etwa 20 kg Fleisch, 210 kg Milch und 6 kg Eier pro Person und Jahr begrenzt werden. Die empfohlene Reduzierung des Konsums tierischer Lebensmittel würde u.a. zu einer Reduzierung des gegenwärtigen Nutztierbestandes bei Beibehaltung der Haltungsformen auf weniger als die Hälfte führen [Woitowitz 2007:202].

5.3.3 Flächenbedarf zur Produktion von Nahrungsmitteln

Von der weltweit vorhandenen Landfläche stehen knapp 5 Mrd. ha (38%) für eine landwirtschaftliche Nutzung zur Verfügung. Davon werden ca. 3,4 Mrd. ha (69%) als Weideland, 1,4 Mrd. ha (28%) als Ackerfläche und 0,138 Mrd. ha (3%) als Dauerkulturen genutzt. Neben dem Weideland wird etwa ein Drittel des Ackerlandes für die Futtermittelproduktion beansprucht. Somit dient der größte Anteil landwirtschaftlicher Flächen mit einem Anteil von etwa 80% an der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche der Viehhaltung. Trotz der großen Flächeninanspruchnahme haben tierische Lebensmittel im Jahr 2003 nur einen Anteil von ca. 17% an der weltweiten Nahrungsversorgung [KOERBER ET AL. 2008:6].

Obwohl im Zeitraum von 1963-2003 die weltweit landwirtschaftlich bewirtschafteten Flächen um knapp 460 Mio. ha vergrößert wurden (eine Zunahme von ca. 9%) ist aufgrund der globalen Bevölkerungszunahme die durchschnittlich inländisch verfügbare landwirtschaftliche Fläche pro Person von 1,43 ha (1962) auf 0,8 ha pro Person (2002) gesunken [KOERBER ET AL. 2008:7].
Die Zunahme erfolgte um 155 Mio. ha beim Ackerland (und bei Dauerkulturen) sowie um rund 300 Mio. ha beim Weideland. Ab Mitte der 1990er Jahre hat sich die Zunahme abgeschwächt. Sie findet nahezu ausschließlich in den Entwicklungsländern statt und wird überwiegend zur Produktion von Exportagrargütern genutzt [KOERBER ET AL. 2008:7]. Insbesondere aufgrund von Futtermittelimporten für die Intensivtierhaltung (z.B. Sojabohnen) nutzen die Industrieländer mehr

Tab. 5.3.2 Pro-Kopf-Verzehr von Nahrungsmitteln in Deutschland 2007, Nationale Verzehrstudie II [MAX RUBNER-INSTITUT 2008a und 2008b]

Lebensmittelgruppen	Männer g/Tag	Männer kg/a	Frauen g/Tag	Frauen kg/a
1. Brot und Getreideerzeugnisse (Backwaren)				
Brot	178	65,0	133	48,5
Gerichte auf Basis von Brot	2	0,7	1	0,4
Backwaren	46	16,8	33	12,0
Getreide und Getreideerzeugnisse	36	13,1	33	12,0
Gerichte auf Basis von Getreide u.Getreideprodukten	50	18,3	40	14,6
Summe	**312**	113,9	**240**	87,6
2. Gemüse, Pilze, Hülsenfrüchte				
Gemüse (roh + erhitzt)	104	38,0	121	44,2
Gemüseerzeugnisse	7	2,6	6	2,2
Sonstiges	1	0,4	2	0,7
Gerichte auf Basis von Gemüse	110	40,2	114	41,6
Summe	**222**	81,0	**243**	88,7
3. Kartoffeln				
Kartoffeln und Kartoffelerzeugnisse	83	30,3	65	23,7
Gerichte auf Basis von Kartoffeln	8	2,9	6	2,2
Summe	**91**	33,2	**71**	25,9
4. Obst und Obsterzeugnisse				
Obst	222	81,0	270	98,6
Obsterzeugnisse	8	2,9	8	2,9
Trockenobst	1	0,4	1	0,4
Summe	**230**	84,0	**278**	101,5
5. Nüsse und Samen				
Nüsse und Samen	2	0,7	2	0,7
Nüsse und Nussmischungen (gesalzen, geröstet)	2	0,7	1	0,4
Summe	**4**	1,5	**3**	1,1
6. Fette				
Butter	16	5,8	10	3,7
Margarine	11	4,0	7	2,6
sonstiges	2	0,7	3	1,1
Summe	**29**	10,6	**20**	7,3
7. Milch, Milcherzeugnisse und Käse				
Milch und Milchmischgetränke	131	47,8	98	35,8
Milcherzeugnisse	75	27,4	88	32,1
Käse und Quark	43	15,7	41	15,0
Gerichte auf Basis von Milch und Milcherzeugnissen	17	6,2	17	6,2
Summe	**265**	96,7	**244**	89,1
Milch ohne Käse	222	81,0	203	74,1
8. Eier				
Eier	16	5,8	12	4,4
Gerichte auf Basis von Eiern	5	1,8	5	1,8
Summe	**21**	7,7	**17**	6,2

Lebensmittelgruppen	Männer g/Tag	Männer kg/a	Frauen g/Tag	Frauen kg/a
9. Fleisch, Wurstwaren und Fleischerzeugnisse				
Fleisch	42	15,3	23	8,4
Wurstwaren/Fleischerzeugnisse	61	22,3	30	11,0
Gerichte auf Basis von Fleisch	57	20,8	30	11,0
Summe	**160**	58,4	**83**	30,3
10. Fisch				
Fisch, Fischerzeugnisse und Krustentiere	15	5,5	13	4,7
Gerichte auf Basis Fisch / Krustentiere	14	5,1	10	3,7
Summe	**29**	10,6	**23**	8,4
11. Suppen und Eintöpfe				
Summe	**91**	33,2	**75**	27,4
12. Soßen und würzende Zutaten				
Summe	**33**	12,0	**24**	8,8
13. Süßwaren				
Süßigkeiten	23	8,4	21	7,7
Speiseeis	7	2,6	6	2,2
Süße Aufstriche	19	6,9	17	6,2
Süßungsmittel	6	2,2	3	1,1
Summe	**55**	20,1	**48**	17,5
14. Knabberartikel				
Summe	**8**	2,9	**5**	1,8
15. Alkoholfreie Getränke				
Wasser	1110	405,2	1119	408,4
Kaffee und Tee (grün/schwarz)	571	208,4	506	184,7
Kräuter-, Früchtetee	149	54,4	318	116,1
Obstsäfte/Nektare	270	98,6	232	84,7
Gemüsesäfte	4	1,5	4	1,5
Limonaden	224	81,8	88	32,1
Fruchtsaftgetränke	15	5,5	13	4,7
Sonstiges (alkoholfreies Bier)	8	2,9	5	1,8
Summe	**2351**	858,1	**2285**	834,0
16. Alkoholische Getränke				
Bier	253	92,3	39	14,2
Wein, Sekt	47	17,2	38	13,9
Spirituosen	4	1,5	1	0,4
Sonstiges (Alkopops, alkoholische Cocktails)	4	1,5	3	1,1
Summe	**308**	112,4	**81**	29,6
Summe Nahrungsmittel ohne Getränke	**1550**	565,8	**1374**	501,5
Summe Getränke	**2659**	970,5	**2366**	863,6

landwirtschaftliche Flächen, als sie im eigenen Land besitzen [STEGER 2005].
In einer niederländischen Studie wurde der Bedarf an Produktionsflächen für die Erzeugung einzelner Produktgruppen von Nahrungsmitteln und die Veränderungen im Konsum in den letzten 40 Jahren untersucht (Tab. 5.3.3) [GERBENS-LEENES / NONHEBEL 2002]. Demnach betrug der durchschnittliche Flächenbedarf zur Ernährung eines Menschen in den Niederlanden im Jahr 1990 etwa 2.230 m^2/(P*a). Während die Menge des Gesamtkonsums von 612 kg/(P*a) (1950) auf 681 kg/(P*a) (1990) nur um ca. 11% gestiegen ist, hat der Flächenbedarf von 1.551 m2 m^2/(P*a) auf 2.231 m^2/(P*a) um 44% zugenommen. Der Grund hierfür liegt vor allem in der Zunahme beim Verzehr von Fleisch- und Milchprodukten, deren Herstellung besonders flächenintensiv ist. Der Flächenbedarf zur Erzeugung tierischer Nahrungsmittel ist von 808 m^2/(P*a) (1950) auf fast 1.300 m^2/(P*a) (1990) um 60% gestiegen. Der Flächenbedarf für Getränke hat sich durch einen erhöhten Konsum an Kaffee, Bier und Wein von 58 m^2/(P*a) (1950) auf 229 m^2/(P*a) (1990) fast vervierfacht. Insgesamt entfallen fast 60% der Flächennutzung auf Fleisch- und Milchprodukte. Weitere 20% werden für die Herstellung von Pflanzenöl und Margarine benötigt, etwa 10% entfallen auf Getränke (Bier, Wein, Kaffee und Tee) und knapp 10% auf Obst, Gemüse und Brot (Tab. 5.3.3, Abb. 5.3.3 und Abb. 5.3.4).

Nach einer Studie des Ökoinstituts liegt der Flächenbedarf für die Produktion des jährlichen Nahrungsmittelbedarfs für Deutschland mit knapp 2.400 m^2/(P*a) in einer ähnlichen Größenordnung [EBERL ET AL: 2005:34]. Der Wert ergibt sich durch eine Hochrechnung über die Lebensmittelnachfrage und berücksichtigt auch alle Flächen für importierte Nahrungs- und Futtermittel. Bei einer Bevölkerung von 82 Mio. Einwohnern (2008) liegt der Gesamtflächenbedarf in Deutschland damit mit knapp 200.000 km^2 pro Jahr um 12.000 km^2 höher als die 2008 verfügbare landwirtschaftliche Nutzfläche von knapp 188.000 km^2 [DESTATIS 2009]. 60% der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland wird für den Anbau von Futtermitteln und für die Nutzung von Grünland für die Produktion tierischer Nahrungsmittel beansprucht. Vom Ackerland wird ein Drittel ausschließlich für den Anbau von Futtermitteln benötigt. Getreide nimmt 39 % der Fläche ein, Obst und Gemüse liegen bei 10 % [EBERL ET AL: 2005:34]. Statistisch betrachtet stehen somit nur knapp 2.300 m^2/(P*a) zur Erzeugung des deutschen Nahrungsmittelbedarfs zur Verfügung. Wird die Flächeninanspruchnahme für Erzeugnisse zur stofflichen und energetischen Verwertung noch berücksichtigt, nimmt jeder Mensch in der *EU-15* pro Jahr ca. 4.400 m^2 Agrarfläche in Anspruch [STEGER 2005, EBERL ET AL. 2005:35]. Deutschland ist somit ein *Flächenimporteur*.

In einer Studie zu den regionalen Biomassepotenzialen in Thüringen werden geringere Kennwerte für den Flächenbedarf zur Erzeugung von Nahrungsmitteln verwendet [THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT 2010]. Allerdings ist in der Studie nur der Ackerflächenbedarf und nicht der Weideanteil für die Tierhaltung berücksichtigt worden. Mit einem Flächenkennwert von 600 m^2/(P*a) für die Erzeugung von tierischen Lebensmitteln liegt dieser weit unter der Annahme anderer Studien mit 1.200 m^2/ (P*a) [WOITOWITZ 2007:191] bis 1.300 m^2/(P*a) [GERBENS-LEENES / NONHEBEL 2002:189 / 192]. Wird hier mit 1.200 m^2/(P*a) ein höherer Flächenkennwert zugrunde gelegt, steigt der Flächenanteil zur Erzeugung von tierischen Lebensmitteln ebenfalls auf ca. 60% (Tab. 5.3.4, Abb. 5.3.5 und Abb. 5.3.6).

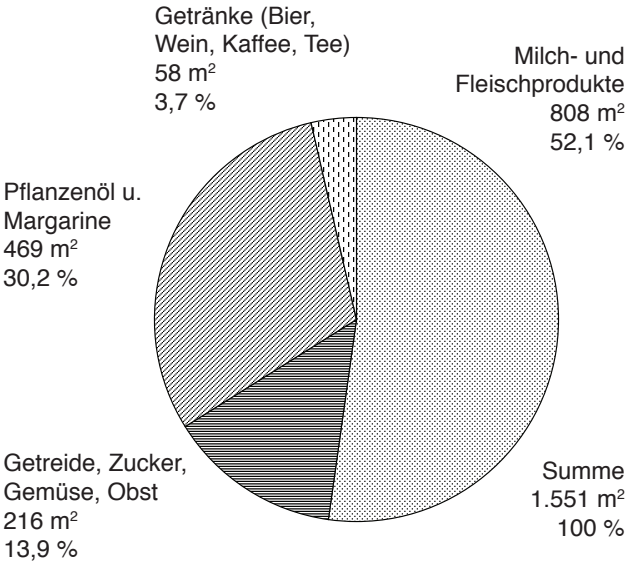


Abb. 5.3.3 Flächenbedarf Niederlande 1950
[GERBENS-LEENES / NONHEBEL 2002:189/192]

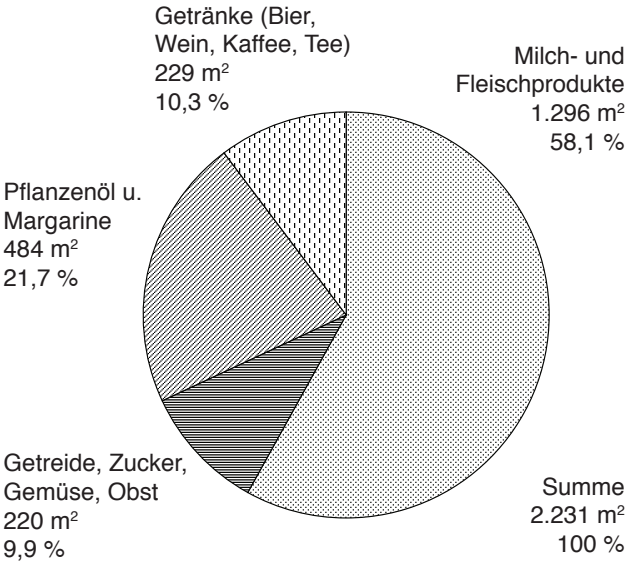


Abb. 5.3.4 Flächenbedarf Niederlande 1990
[GERBENS-LEENES / NONHEBEL 2002:189/192]

Produktkategorie		**1950**			**1990**		
	Flächen-bedarf	**Konsum**	**Flächen-bedarf**	**Flächen-anteil**	**Konsum**	**Flächen-bedarf**	**Flächen-anteil**
	m^2/kg/a	kg/ Jahr	m^2/Jahr	%	kg/ Jahr	m^2Jahr	%
Rindfleisch	20,9	14	292,6	18,9	20	418,0	18,7
Schweinefleisch	8,9	19	169,1	10,9	45	400,5	18,0
Geflügel	7,3	2	14,6	0,9	20	146,0	6,5
Vollmilch	1,2	188	225,6	14,5	42	50,4	2,3
Fettarme Milch	0,9	0	0,0	0,0	62	55,8	2,5
Butter	13,8	3	41,4	2,7	3	41,4	1,9
Käse	10,2	5	51,0	3,3	15	153,0	6,9
Eier	3,5	4	14,0	0,9	9	31,5	1,4
Getreide	1,4	81	113,4	7,3	66	92,4	4,1
Zucker	1,2	35	42,0	2,7	37	44,4	2,0
Kartoffeln	0,2	129	25,8	1,7	87	17,4	0,8
Gemüse	0,3	66	19,8	1,3	63	18,9	0,8
Obst	0,5	30	15,0	1,0	95	47,5	2,1
Pflanzenöl	20,7	5	103,5	6,7	13	269,1	12,1
Margarine	21,5	17	365,5	23,6	10	215,0	9,6
Bier	0,5	11	5,5	0,4	91	45,5	2,0
Wein	1,5	1	1,5	0,1	15	22,5	1,0
Kaffee	15,8	1	15,8	1,0	8	126,4	5,7
Tee	35,2	1	35,2	2,3	1	35,2	1,6
Summe		**612**	**1.551,3**	**100,0**	**681**	**2.230,9**	**100,0**
Anteile		100 %	100 %		111 %	144 %	

Tab. 5.3.3 Bedarf an Produktionsflächen von Nahrungsmitteln in den Niederlanden 1950 - 1990
[GERBENS-LEENES / NONHEBEL 2002:189/192]

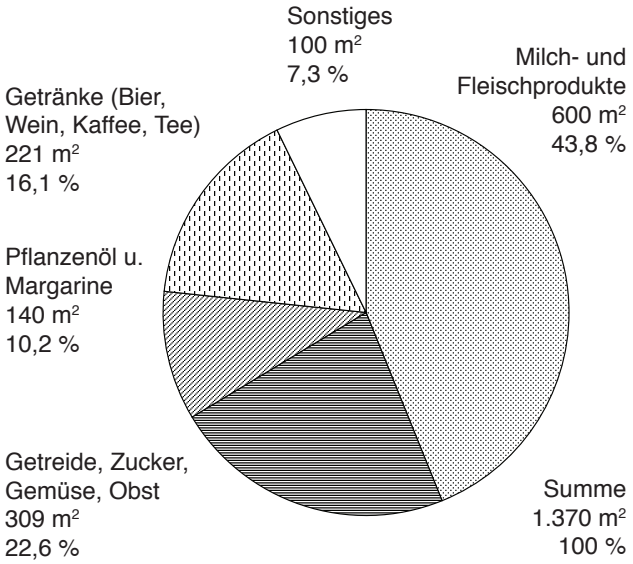


Abb. 5.3.5 Anteile Flächenbedarf Thüringen (1)

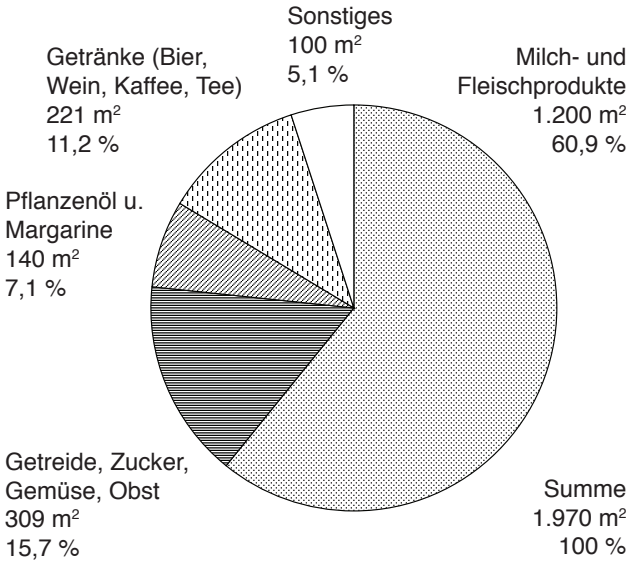


Abb. 5.3.6 Anteile Flächenbedarf Thüringen (2)

Produktkategorie	**Flächenbedarf (1)**		**Flächenbedarf (2)**	
	m^2/(P*a)	%	m^2/(P*a)	%
Fleisch, Milch, Eier, Butter, Käse	600	43,8	1200	60,9
Öle und Fette	140	10,2	140	7,1
Getreide (Mehl)	170	12,4	170	8,6
Hülsenfrüchte	3	0,2	3	0,2
Kartoffeln	15	1,1	15	0,8
Zucker	29	2,1	29	1,5
Gemüse	30	2,2	30	1,5
Obst	26	1,9	26	1,3
Bier	72	5,3	72	3,7
Wein	24	1,8	24	1,2
Reis (Import)	10	0,7	10	0,5
Zitrusfrüchte	26	1,9	26	1,3
Kaffee	120	8,8	120	6,1
Tee	5	0,4	5	0,3
Sicherheitszuschlag	100	7,3	100	5,1
Summe	**1370**	**100**	**1970**	**100**

Tab. 5.3.4 Bedarf an Produktionsflächen von Nahrungsmitteln in Thüringen
[THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT 2010]
(1) Angaben für tierische Nahrungsmittel gem. Studie (Ackerflächenbedarf)
(2) Angaben für tierische Nahrungsmittel nach [WOITOWITZ 2007:191]

Weitaus höhere Werte für die Flächeninanspruchnahme werden bei Berechnungen zum ökologischen Fußabdruck zugrunde gelegt (Tab. 5.3.5). In Anlehnung an die Berechnungsmethodik von Gösta Jancke für die Stadt Hamburg erfolgte eine Berechnung des ökologischen Fußabdrucks für Berlin mit 3.414.293 Einwohnern für das Bezugsjahr 1998 [SCHNAUSS 2001]. Die Berechnung wurde auf der Grundlage der Einkommens- und Verbrauchsstichprobe des statistischen Bundesamtes für Deutschland im Jahr 1993 durchgeführt. Demnach werden bei konventionellen Anbaumethoden etwa 16.551 m^2/(P*a) für die Erzeugung aller Nahrungsmittel benötigt. Wenn man diesen Wert um 2.528 m^2/(P*a) für die Flächenkategorie Meer reduziert, um eine annähernde Vergleichbarkeit zu den anderen Studien zu erhalten, ergibt sich ein Flächenbedarf von 14.023 m^2/(P*a), davon 11.877 m^2/(P*a) für die Produktion und 2.146 m^2/(P*a) für den Energiebedarf von Nahrungs und Futtermitteln. Die Erzeugung tierischer Nahrungsmittel beansprucht demnach etwa 76% der gesamten Flächen (Abb. 5.6.7). Bei ökologischen Anbaumethoden ließe sich der Flächenbedarf um etwa 2.500 m^2 (ca.15%) auf 14.100 m^2/(P*a) bzw. 11.570 m^2/(P*a) reduzieren [SCHNAUSS 2001].

Auch für die Ermittlung des ökologischen Fußabdrucks der Stadt München mit dem Bezugsjahr 2001 [TREFFNY 2003] werden mit insgesamt 8.095 m^2/(P*a) wesentliche größere Flächen für die Nahrungsmittelerzeugung angenommen als bei den zuvor genannten Studien. Für die Flächeninanspruchnahme zur Nahrungsmittelerzeugung (Produktionsfläche) wird eine Fläche von 5.487 m^2/(P*a) ermittelt. Hinzu kommen weitere 2.708 m^2/(P*a) für den Energieaufwand für die weiteren Prozessketten bei der Nahrungsmittelerzeugung und für den Transport und Handel (Energiefläche). Die Erzeugung tierischer Nahrungsmittel beansprucht auch hier ca. 76% der gesamten Flächen (Abb. 5.3.8).

Die in Tab. 3.5.6 - 3.5.8 dargestellten eigenen Berechnungen basieren auf dem in der *Nationalen Verzehrstudie II* (NVS II) ermittelten Nahrungsmittelkonsum [MAX RUBNER-INSTITUT 2008 a & b] und den in der Studie von Gerbens-Leens und Nonhebel angegebenen Flächenkennwerten zur Produktion der Nahrungsmittel [GERBENS-LEENES / NONHEBEL 2002]. Da die in der NVS II-Studie angegebenen Werte den jeweiligen Nettoverzehr angeben, wurden die Werte für den Fleischkonsum durch einen Kennwert auf das Schlachtgewicht hochgerechnet. Der Gewichtsanteil von Knochen und Schlachtabfällen liegt beim Fleischkonsum bei ca. 46%. Zusätzlich wurden 20% des Gesamtkonsums an Verzehrverlusten hinzugerechnet [WOITOWITZ 2007:30]. Ergänzend hierzu wurden einige Angaben zum Konsum aus folgenden, in der Tabelle indizierten Quellen entnommen:

(1) http://www.suedzucker.de/de/Zucker/Zahlen-zum-Zucker/Deutschland/
(2) http://www.d-e-f.de/produktinfos/kompendium_rapsoel/verbrauch.htm
(3) http://www.presseportal.de/pdf.htx?nr=1384333
(4) http://www.welt.de/die-welt/article3993645/Teekonsum-steigt-leicht-auf-25-5-Liter-pro-Kopf-und-Jahr.html

Auf Grundlage dieser Angaben errechnet sich ein mittlerer Flächenkennwert von 2.165 m^2/(P*a), bzw. 2.512 m^2/(P*a) für Männer und 1.818 m^2/(P*a) für Frauen. Der Flächenanteil zur Erzeugung tierischer Produkte liegt danach insgesamt bei ca. 56%. Für Männer liegt der Konsumanteil tierischer Produkte bei knapp 60%, für Frauen bei 51%.

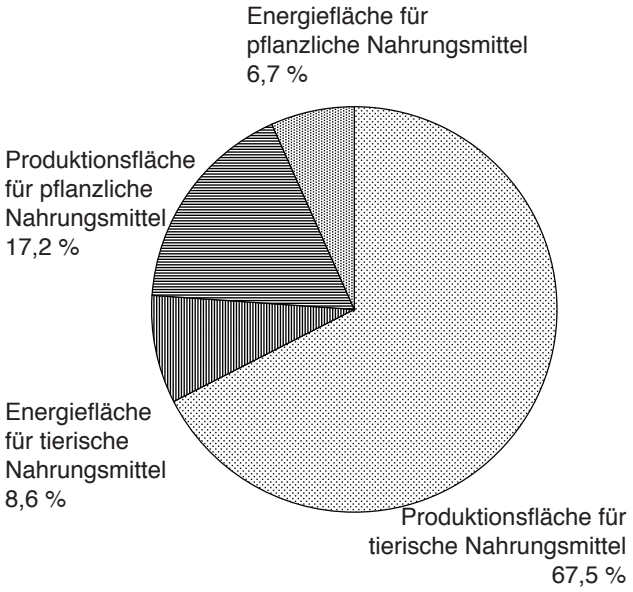


Abb. 5.3.7 Anteile Flächenbedarf ÖF Berlin [SCHNAUSS 2001]

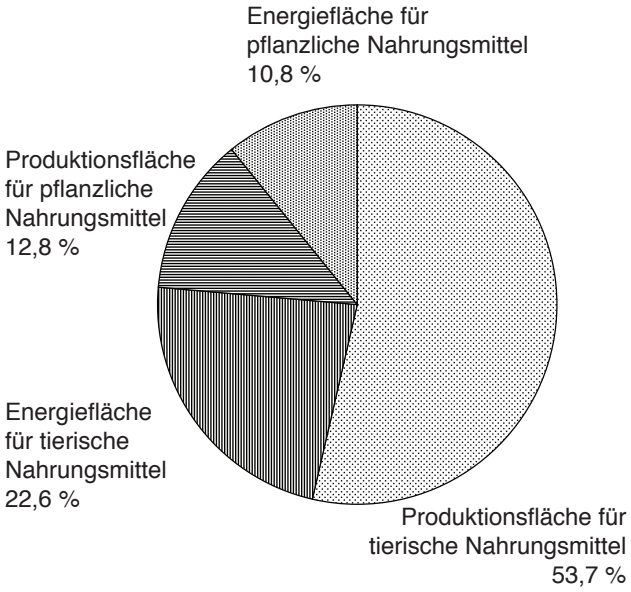


Abb. 5.3.8 Anteile Flächenbedarf ÖF München [TREFFNY 2003]

Flächenkategorien	**Gesamtfläche**	**Fläche**	**Anteil**
Ökologischer Fußabdruck für Berlin	ha/a	m^2/(P*a)	%
Fußabdrucksfläche tierische Ernährung	**3.640.629**	**10.663**	**76,0**
- davon Produktionsfläche für tierische Nahrungsmittel	3.229.958	9.460	67,5
- davon Energiefläche für tierische Nahrungsmittel	410.671	1.203	8,6
Fußabdrucksfläche pflanzliche Ernährung	**1.147.066**	**3.360**	**24,0**
- davon Produktionsfläche für pflanzliche Nahrungsmittel	825.150	2.417	17,2
- davon Energiefläche für pflanzliche Nahrungsmittel	321.917	943	6,7
Fußabdrucksfläche in der Kategorie Ernährung	**4.787.696**	**14.023**	**100**

Flächenkategorien	**Gesamtfläche**	**Fläche**	**Anteil**
Ökologischer Fußabdruck für München	ha/a	m^2/(P*a)	%
Fußabdrucksfläche tierische Ernährung	**778.853**	**6.178**	**76,0**
- davon Produktionsfläche für tierische Nahrungsmittel	548.237	4.349	53,7
- davon Energiefläche für tierische Nahrungsmittel	230.616	1.829	22,6
Fußabdrucksfläche pflanzliche Ernährung	**241.460**	**1.915**	**23,7**
- davon Produktionsfläche für pflanzliche Nahrungsmittel	130.836	1.038	12,8
- davon Energiefläche für pflanzliche Nahrungsmittel	110.624	878	10,8
Fußabdrucksfläche in der Kategorie Ernährung	**1.020.313**	**8.094**	**100**

Tab. 5.3.5 Vergleich des Flächenbedarfs für Ernährung nach Berechnungen des ökologischen Fußabdrucks für Berlin* und München (*ohne Berücksichtigung der Flächenkategorie Meer)
Berlin 1998 für 3.414.293 Einwohner [SCHNAUSS 2001]
München 2001 für 1.260.597 Einwohner [TREFFNY 2003]

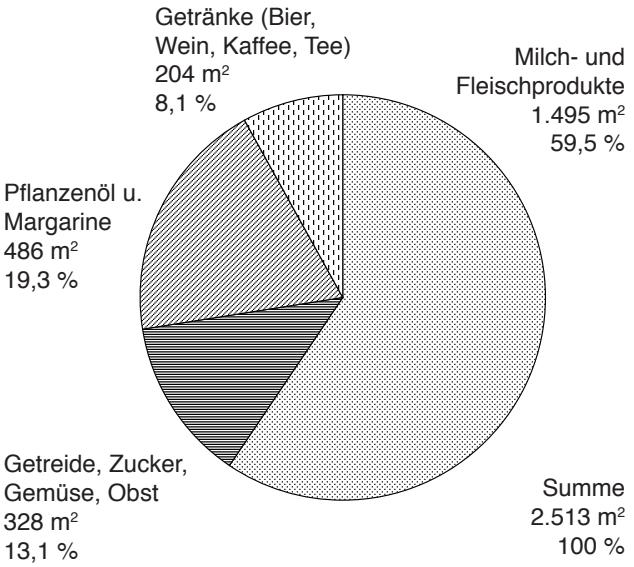


Abb. 5.3.9 Anteile des Flächenbedarfs (Verzehr Männer), eigene Berechnung

Produktkategorie (Verzehr Männer)	**Fläche** m^2/kg	**Konsum** kg/(P*a)	**Fläche** m^2/(P*a)	**Anteil** %	**Anteil** %
Rind- und Kalbfleisch	20,9	12,2	254,6	12,2	59,5
Schweinefleisch	8,9	58,4	519,6	24,8	
Geflügelfleisch	7,3	14,7	107,4	5,1	
Vollmilch	1,2	81,0	97,2	4,6	
Butter	13,8	5,8	80,0	3,8	
Käse	10,2	15,7	160,1	7,6	
Eier	3,5	7,7	27,0	1,3	
Getreide	1,4	113,9	159,5	7,6	13,1
Zucker (1)	1,2	34,3	41,2	2,0	
Kartoffeln	0,2	33,2	6,6	0,3	
Gemüse	0,3	81,0	24,3	1,2	
Obst	0,5	84,0	42,0	2,0	
Pflanzenöl (2)	20,7	15,4	318,8	15,2	19,3
Margarine	21,5	4,0	86,0	4,1	
Bier	0,5	92,3	46,2	2,2	8,1
Wein	1,5	17,2	17,2	0,8	
Kaffee (3)	15,8	6,3	99,5	4,8	
Tee (4)	35,2	0,2	7,0	0,3	
Summe			**2.094,0**	**100**	**100**
20% Verzehrverluste			418,8		
SUMME			**2.512,8**		

Tab. 5.3.6 Flächenbedarf für die Nahrungsmittelproduktion, Deutschland 2007, Verzehr Männer eigene Berechnung auf Datenbasis [GERBENS-LEENES / NONHEBEL 2002:189/192, MAX RUBNER-INSTITUT 2008b]

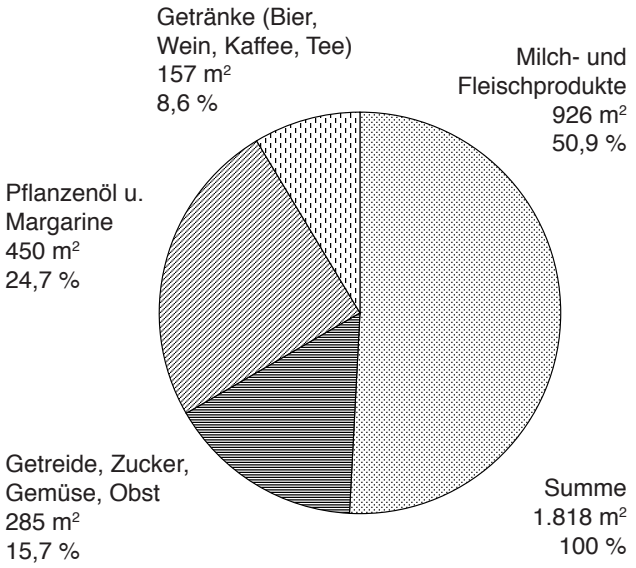


Abb. 5.3.10 Anteile des Flächenbedarfs (Verzehr Frauen)
eigene Berechnung

Produktkategorie (Verzehr Frauen)	**Fläche** m^2/kg	**Konsum** kg/(P*a)	**Fläche** m^2/(P*a)	**Anteil** %	**Anteil** %
Rind- und Kalbfleisch	20,9	6,3	132,1	8,7	50,9
Schweinefleisch	8,9	30,3	269,5	17,8	
Geflügelfleisch	7,3	7,6	55,7	3,7	
Vollmilch	1,2	74,1	88,9	5,9	
Butter	13,8	3,7	51,1	3,4	
Käse	10,2	15,0	153,0	10,1	
Eier	3,5	6,2	21,7	1,4	
Getreide	1,4	87,6	122,6	8,1	15,7
Zucker (1)	1,2	34,3	41,2	2,7	
Kartoffeln	0,2	25,9	5,2	0,3	
Gemüse	0,3	81,0	24,3	1,6	
Obst	0,5	88,7	44,4	2,9	
Pflanzenöl (2)	20,7	15,4	318,8	21,0	24,7
Margarine	21,5	2,6	55,9	3,7	
Bier	0,5	14,2	7,1	0,5	8,6
Wein	1,5	13,9	17,2	1,1	
Kaffee (3)	15,8	6,3	99,5	6,6	
Tee (4)	35,2	0,2	7,0	0,5	
Summe			**1.515,1**	**100**	**100**
20% Verzehrverluste			303,0		
SUMME			**1.818,2**		

Tab. 5.3.7 Flächenbedarf für die Nahrungsmittelproduktion, Deutschland 2007, Verzehr Frauen
eigene Berechnung auf Datenbasis [GERBENS-LEENES / NONHEBEL 2002:189 / 192] und [MAX RUBNER-INSTITUT 2008b]

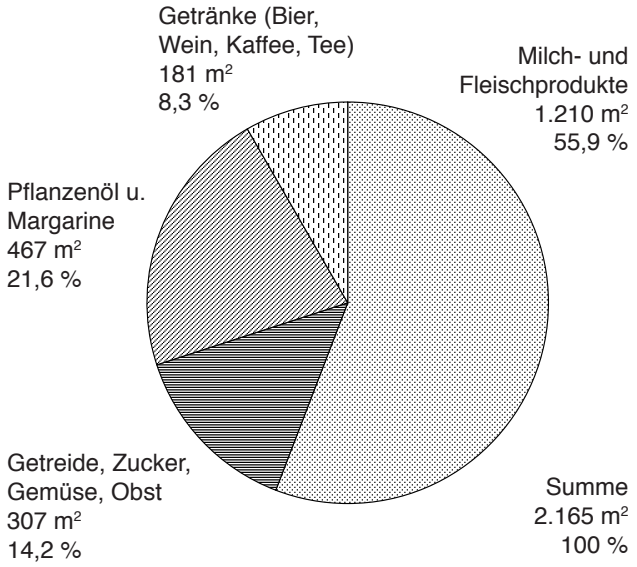


Abb. 5.3.11 Anteile des Flächenbedarfs (Verzehr Durchschnitt), eigene Berechnung

Produktkategorie (Verzehr Durchschnitt)	**Fläche** m^2/kg	**Konsum** kg/(P*a)	**Fläche** m^2/(P*a)	**Anteil** %	**Anteil** %
Rind- und Kalbfleisch	20,9	9,2	193,3	10,7	55,9
Schweinefleisch	8,9	44,3	394,5	21,9	
Geflügelfleisch	7,3	11,2	81,5	4,5	
Vollmilch	1,2	77,6	93,1	5,2	
Butter	13,8	4,8	65,6	3,6	
Käse	10,2	15,3	156,5	8,7	
Eier	3,5	7,0	24,3	1,3	
Getreide	1,4	100,8	141,1	7,8	14,2
Zucker (1)	1,2	34,3	41,2	2,3	
Kartoffeln	0,2	29,6	5,9	0,3	
Gemüse	0,3	81,0	24,3	1,3	
Obst	0,5	86,4	43,2	2,4	
Pflanzenöl (2)	20,7	15,4	318,8	17,7	21,6
Margarine	21,5	3,3	71,0	3,9	
Bier	0,5	53,3	26,6	1,5	8,3
Wein	1,5	15,6	17,2	1,0	
Kaffee (3)	15,8	6,3	99,5	5,5	
Tee (4)	35,2	0,2	7,0	0,4	
Summe			**1.804,6**	**100**	**100**
20% Verzehrverluste			360,9		
SUMME			**2.165,5**		

Tab. 5.3.8 Flächenbedarf für die Nahrungsmittelproduktion, Deutschland 2007, Verzehr im Durchschnitt eigene Berechnung auf Datenbasis [GERBENS-LEENES / NONHEBEL 2002:189 / 192] und [MAX RUBNER-INSTITUT 2008b]

5.3.4 Energiebedarf im Bedarfsfeld Ernährung

Der Energiebedarf für die Nahrungsmittelerzeugung (Düngerherstellung, Betrieb von landwirtschaftlichen Maschinen, Beheizung von Gewächshäusern), für den Transport (von Erzeugern zu weiterverarbeitenden Betrieben, zum Handel und zum Verbraucher), für die Weiterverarbeitung und Verpackung sowie für die Haushaltsprozesse ist eine weitere wichtige Einflussgröße im Bedarfsfeld Ernährung. Durch Prozesskettenanalysen lässt sich der jeweilige Primärenergieverbrauch (PEV) für die genannten Teilsysteme oder einzelnen Produktgruppen näher bestimmen. Da die Energiebereitstellung selbst als flächenbezogene Größe darstellbar ist, lässt sich aus dem Energiebedarf im Weiteren ein Flächenkennwert ableiten. Für die Berechnung im Gesamtmodell wird der Flächenbedarf für die Haushaltsphase nicht in die Berechnung einbezogen, da dieser bereits im Haushaltsstrom enthalten ist. Hier erfolgt eine Systemabgrenzung, um eine Redundanz bei der Berechnung der Flächeninanspruchnahme auszuschließen.

Einen Überblick über aktuelle Studien gibt die Arbeit von Peter Rose [ROSE 2007]. Als Bewertungsmethoden werden dort Ökobilanzen, Stoffstromanalysen, Prozesskettenanalysen oder ökonomische Analysen, z.B. Hybridanalyse als eine Kombination von Massenbilanzen und dem Geldwert der Produkte, herangezogen. Corinna Taylor untersucht mit der Methode der Ökobilanz verschiedene Ernährungsweisen [TAYLOR 2000]. Auf der Grundlage der Nationalen Verzehrsstudie (NVS) wurden für das Bezugsjahr 1996 eine durchschnittliche, eine nicht-vegetarische aber Fleisch reduzierte und eine vegetarische Variante (Vollwerternährung) miteinander verglichen [TAYLOR 2000:20]. Als Indikatoren wurden der Primärenergieverbrauch, CO_2- und SO_2- Äquivalente sowie Stoffausträge in der landwirtschaftlichen Produktion verwendet.

Mit einer Stoffstromanalyse untersuchten Dietlinde Quack und Ina Rüdenauer die Umweltauswirkungen zehn definierter Produktgruppen [QUACK / RÜDENAUER 2007]. Hierfür wurde die Konsumstatistik eines bundesdeutschen Durchschnittshaushalts mit dem Bezugsjahr 2001 für die Produktgruppen Haus und Wohnung, Mobilität, Lebensmittel, Küche, Textilien, Bad, Kommunikationsgeräte, Unterhaltungselektronik, grüner Strom und nachhaltige Geldanlagen ausgewertet. Als Indikatoren wurden der kumulierte Energieaufwand (KEA) sowie die üblichen Ökobilanzindikatoren Treibhaus-, Versauerungs-, Eutrophierungspotential und Photooxidantienbildung herangezogen.

Eine akteursbezogene Stoffflussanalyse zur Ressourceneffizienz in der Aktivität Ernähren für die Schweiz gibt sehr differenzierte Angaben zum PEV der verschiedenen Prozessketten [FAIST 2000]. Die Studie erfolgte auf der Grundlage der Verkaufszahlen von Nahrungsmitteln der regionalen Migros-Genossenschaft Aargau/Solothurn (GMAS) für das Referenzjahr 1996. Mit einem Marktanteil von 2,4% am schweizerischen Gesamtaufkommen und einer versorgten Einwohneranzahl von ca. 185.000 Menschen kann diese Untersuchung als repräsentativ für den durchschnittlichen schweizer Verbrauch angesehen werden [FAIST 2000:29]. Als zentraler Indikator für die Stoffflussanalyse wurde Energie gewählt. Für die Teilsysteme wurde auch der anteilige Energiebedarf an elektrischem Strom und fossilen Energieträgern (Treib- und Brennstoffe) ermittelt.

Eine eindeutige Bestimmung des PEV der jeweiligen Teilsysteme Produktion, Transporte, Verarbeitung und Haushaltsphase ist auf der Grundlage der vorhandenen Studien nicht möglich, da

die gewählten Systemgrenzen und Vorannahmen stark voneinander abweichen. Die natürlichen Parameter Klima, Niederschläge und Bewässerung, Bodenfruchtbarkeit, Fruchtfolgen aber auch die regional unterschiedlichen Anbaumethoden (konventioneller oder ökologischer Anbau) haben einen starken Einfluss auf die durchschnittlichen Jahreserträge. Ebenso sind bei der Weiterverarbeitung, den Transporten und für die Haushaltsphase unterschiedliche Systemgrenzen gezogen worden. Dennoch lassen sich aus den ausgewerteten Studien plausible Annahmen über den PEV ableiten, da die Ergebnisse in der Gesamtbewertung durchaus übereinstimmende Trends und Größenordnungen aufweisen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die landwirtschaftlichen **Herstellungsprozesse** wie Land- und Weidewirtschaft, Futtermittelproduktion und Viehhaltung zwischen 30 und 50% des kumulierten Primärenergieverbrauchs ausmachen. Auf die Nahrungsmittelherstellung selbst entfallen insgesamt etwa 57% des PEV, davon 60% auf tierische und 40% auf pflanzliche Erzeugnisse [TAYLOR 2000]. Bei vegetarischen Nahrungsmitteln spielen die Herstellung über Gewächshäuser und die Transportwege (z.B. aus Spanien) und die Art des Transports (Schiff, LKW, Flugzeug) eine wichtige Rolle. Bei der Erzeugung tierischer Nahrungsmittel haben die Betriebsgröße, die Art der Tierhaltung und die Auswahl der Futtermittel einen großen Einfluss auf die Bilanzierung des PEV.
Mehr als 60% der verkauften Nahrungsmittel sind verarbeitet. Die Verarbeitungstiefe hat einen großen Einfluss auf den Energiebedarf der verschiedenen Nahrungsmittelgruppen. Eine höhere Verarbeitungstiefe geht mit höheren Energieaufwendungen einher. Die Zunahme von *Convenience Food* (hohe Qualität und großer Nutzen mit möglichst geringem Aufwand bei der Zubereitung zu einem angemessenen Preis) spiegelt dabei eine steigende gesellschaftliche Individualisierung in Form von Singlehaushalten und differenzierten Arbeitsverhältnissen wider.

Beim **Transport** wird der überwiegende Energieverbrauch durch LKWs verbraucht (ca. 76%). Überseetransporte (ca. 19%), Binnenschifffahrt (ca. 4%) und Zugtransport (ca. 1%) machen einen geringeren Anteil aus. Der private Lebensmitteleinkauf macht einen vergleichsweise geringen Anteil aus [TAYLOR 2000:140]. Die Zentralisierung von Verteilzentren hat einen negativen Einfluss auf die Energiebilanz [FAIST 2000].

Für das Teilsystem **Haushalt** wird der Anteil des Energiebedarfs zwischen 27% [FAIST 2000, TAYLOR 2000] und 40% [QUACK / RÜDENAUER 2007] angegeben. Hier dominiert der Strombedarf für die Lagerung und Zubereitung. Kühlschrank und Gefriergerät verbrauchen aufgrund ihres kontinuierlichen Bedarfs mehr Energie als der Elektroherd, der nur zeitweise zum Einsatz kommt. Auch auf Vertriebsebene ist der Energiebedarf für die Kühlung im Verteilzentrum mit ca. 40% und in Filialen mit ca. 50% der größte Faktor [FAIST 2000].

Der Primärenergieverbrauch für die Nahrungsmittelerzeugung beträgt etwa 7.400 MJ / (P*a) [Kramer et al. 1994 nach ROSE 2007:21]. Nach neuesten Untersuchungen beträgt der Gesamtprimärenergieverbrauch für die Bereitstellung von Nahrungsmitteln in der Schweiz etwa 3.000 Megajoule pro Person und Monat. Das entspricht 10.000 kWh / Person und Jahr bzw. einem Äquivalent von mehr als 960 Liter Benzin pro Jahr. Die Aufwendungen für Kühlung, Zubereitung, Entsorgung und Transporte durch die Haushalte sind darin nicht enthalten [JUNGBLUTH 2010:1]. Dieser Wert ist aber im Vergleich zu den anderen Studien als sehr hoch einzuschätzen.

	PEV 185.000 EW	**Primärenergieverbrauch** [FAIST 2000]		
	GJ/a	MJ/(P*a)	kWh/(P*a)	%
Landwirtschaft	**936.705**	**5.063**	**1.408**	**31,4**
Dünger und Pestizide	190.264	1.028	286	6,4
Anbau	331.261	1.791	498	11,1
Stahl	233.561	1.262	351	7,8
Gewächshaus	181.619	982	273	6,1
Industrielle Prozesse	**1.003.267**	**5.423**	**1.508**	**33,7**
Verteilung	440.425	2.381	662	14,8
- Verteilzentrum	58.584	317	88	2,0
- Verteiltransport	29.350	159	44	1,0
- Filiale	352.491	1.905	530	11,8
Verpackung	203.262	1.099	305	6,8
Verarbeitung	323.562	1.749	486	10,9
Lagerung	36.018	195	54	1,2
Transporte	**222.932**	**1.205**	**335**	**7,5**
Landwirtschaft zum Abnehmer	157.133	849	236	5,3
Verarbeitung und Verteilung	13.962	75	21	0,5
Verteilung und Haushalte	51.837	280	78	1,7
Haushalt	**816.716**	**4.415**	**1.227**	**27,4**
Kühlen	350.021	1.892	526	11,7
Tiefkühlen	175.010	946	263	5,9
Kochen	291.684	1.577	438	9,8
Summe	**2.979.620**	**16.106**	**4.477**	**100**

Tab. 5.3.9 Primärenergieverbrauch im Bedarfsfeld Ernährung [FAIST 2000: B-31]

	Primärenergie-verbrauch insgesamt		**Anteil Strom**			**Anteil fossile Energieträger**		
	MJ/(P*a)	kWh/(P*a)	%	MJ/(P*a)	kWh/(P*a)	%	MJ/(P*a)	kWh/(P*a)
Landwirtschaft	5.063	1.408	19	962	267	81	4.101	1.140
Industrielle Prozesse	5.423	1.508	34	1.844	513	66	3.579	995
Transporte	1.205	335	2	24	7	98	1.181	328
Haushalt	4.415	1.227	94	4.150	1.154	6	265	74
Summe	**16.106**	**4.477**		**6.980**	**1.940**		**9.126**	**2.537**
Summe ohne Haushalt	11.691	3.250		2.830	786		8.861	2.463

Tab. 5.3.10 Anteile von Strom und fossilen Energieträgern am Primärenergieverbrauch [FAIST 2000: B-31]

5.3.5 Der Einfluss von Ernährungsgewohnheiten auf den Flächenbedarf

Einen großen Einfluss auf den Flächenbedarf im Bedarfsfeld Ernährung hat, wie bereits gezeigt wurde, der Konsum tierischer Produkte in Form von Fleisch und Milchprodukten. Jedes Lebewesen akkumuliert die Energie anderer Lebewesen, um seinen hohen Grad an *Ordnung* aufrechtzuerhalten. Dabei erzeugt es durch die Energiedissipation eine größere *Unordnung* in der Umgebung. Durch die Stoffwechselvorgänge werden in jeder Trophiestufe nur ca. 10 - 20% der Nahrung im Gewebe des entsprechenden Tieres zum Transfer auf die nächste Stufe der Nahrungskette umgesetzt. Ungefähr 80 - 90% der aufgenommenen Energiemenge geht als Wärmeenergie verloren [RIFKIN 1985: 66]. Die Trophiestruktur von Nahrungsketten in Ökosystemen wird durch so genannte ökologische Pyramiden abgebildet [ODUM 1999:95].
Für die Erzeugung der gleichen Menge an Nahrungskalorien werden aufgrund der Veredelungsverluste für tierische Lebensmittel wesentlich mehr Flächen benötigt, als für pflanzlichen Lebensmittel, wobei ein mäßiger Verzehr von Rindfleisch und Milchprodukten aufgrund der Nutzung von Weideland durchaus sinnvoll ist. Bereits 1941 schrieb der Ernährungswissenschaftler Werner Kollath, dass „die ungehemmte Fleischproduktion ein riesiges Verlustgeschäft ist: denn nahezu alle tierischen Produkte, die uns zur Nahrung dienen, erfordern zu ihrer Erzeugung ein Vielfaches an Kalorien mehr, als sie an Fleisch liefern. (...) Soweit wir heute die Entwicklung der Technik überschauen können, wird eine zukünftige Menschheit in einer bevorzugt laktvegetabilen Kost wahrscheinlich ihre besten Lebensmöglichkeiten finden" [KOLLATH 2001: 280/281].

„Über ein Drittel der Weltgetreideernte wird an Tiere verfüttert, um Fleischwaren, Milch und Eier zu produzieren. In Deutschland sind es sogar 67%. Aus energetischer Sicht ist die Umwandlung pflanzlicher Lebensmittel, die auch der Mensch direkt verzehren könnte, in tierische Produkte höchst ineffektiv: Für die Erzeugung von 1 kcal in Form von tierischen Lebensmitteln werden durchschnittlich 7 kcal aus pflanzlichen Futtermitteln gebraucht. Dabei gehen 65 - 90% der Nahrungsenergie aus den Futterpflanzen als sog. ‚Veredelungsverluste´ verloren" [KOERBER / KRETSCHMER 2006:180].

	Nutz-energie	Futterenergie zur Erzeugung	
Quellen:		[1]	[2]
Pflanzliche Lebensmittel	1 kJ	1 kJ	. / .
Tierische Lebensmittel i.D	1 kJ	7 kJ	. / .
Schweinefleisch	1 kJ	3 kJ	6 kJ
Hühnerfleisch	1 kJ	4 kJ	. / .
Eier	1 kJ	4 kJ	4 kJ
Milch	1 kJ	5 kJ	. / .
Rindfleisch	1 kJ	10 kJ	24 kJ

Tab. 5.3.11 Energiemengen zur Erzeugung pflanzlicher u. tierischer Lebensmittel
[1] [SCHLIEPER 1997:369]
[2] [KOLLATH 2001:280]

Einer Fallstudie für den US-Bundesstaat New York zufolge beansprucht eine Ernährungsweise ohne Fleisch 1.800 m^2/(P*a) Acker- und Weideland, eine Ernährung mit mittlerer Fleischmenge 4.800 m^2/(P*a) und eine stark fleischhaltige 8.600 m^2/(P*a). Eine stark fleischhaltige Ernährung beansprucht der Studie zufolge fünfmal mehr so viel Fläche wie eine ohne Fleisch [VON KOERBER ET AL. 2008:V]. In Deutschland werden für den derzeitigen Nahrungsmittelverbrauch ca. 17,2 Mio. ha Land benötigt, was einen Flächenbedarf von 0,215 ha/(P*a) entspricht. Diese Fläche entspricht in etwa der gesamten in Deutschland vorhandenen landwirtschaftlichen Nutzfläche [KOERBER ET AL. 2008:9]. Dabei stammen 39% der Nahrungskalorien aus tierischen Lebensmitteln. Für die Erzeugung von Fleisch- und Milchprodukten werden allein 46% der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Anspruch

genommen. Weitere 11% der Fläche für Getränke insbesondere Kaffee, Tee und alkoholische Gertränke - mehr als für die Produktion der Grundnahrungsmittel Gemüse, Obst, Kartoffeln und Brot zusammen [KOERBER ET AL. 2008:10].
Nach Aussage der Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) ist der Fleischkonsum in Deutschland in den letzten 40 Jahren von 64,0 kg/(P*a) (1961) um ca. 18 kg auf 82 kg/ Kopf Jahr (2001) gestiegen. Dem steht die Aussage des statistischen Bundesamtes gegenüber, wonach der durchschnittliche Fleischkonsum der Bundesbürger von 64,0 kg/(P*a)(1991) auf um 5,7 Kilogramm auf 58,4 kg/(P*a) (2006) gesunken ist. Der tatsächliche Konsum von Nahrungsmitteln scheint aber erheblich unter der durch Produktions-statistiken angegebenen Menge zu liegen. Die großen Differenzen ergeben sich zumeist aus unterschiedlichen Bezugsgrößen. Die höheren Angaben beziehen sich auf den Verbrauch in Schlachtgewicht, die niedrigen Wert auf den menschlichen Verzehr nach Abzug von Knochen, Futter, industrieller Verwertung und Verlusten. So ergeben sich Durchschnittswerte im Jahr 2006 von 87,1 kg/(P*a) für den Verbrauch im Schlachtgewicht und 59,6 kg/(P*a) für den Nettoverbrauch [LLM 2007:14].

	1957/61		**1980**		**1990**		**2000**		**2006**	
	kg/a	g/Tag	kg/a	g/Tag	kg/a	g/Tag	kg/a	g/Tag	kg/a	g/Tag
Fleisch insgesamt Verbrauch in Schlachtgewicht	63,8	175	102	279	100,3	275	90,7	248	87,1	239
menschl. Verzehr nach Abzug Knochen etc.	o.A.	o.A.	o.A.	o.A.	65,9	181	61	167	59,6	163

Tab. 5.3.12 Entwicklung des jährlichen Fleischverbrauchs in Deutschland von 1957 - 2006 [LLM 2007:145]

Diese Werte korrespondieren auch mit den Ergebnissen aus empirischen Untersuchungen der Nationalen Verzehrstudie II. Beim Verzehr von Fleisch gibt es zudem starke geschlechtsspezifische Unterschiede. Der Fleischkonsum beträgt bei männlichen Konsumenten demnach durchschnittlich 58 kg/(P*a), während Frauen mit 30 kg/(P*a) nur etwa halb soviel Fleisch und Fleischprodukte konsumieren [MAX RUBNER-INSTITUT 2008b:44].

	Männer (kg/a)	**Frauen** (kg/a)	**Summe** (kg/a)	**Männer** (g/Tag)	**Frauen** (g/Tag)	**Summe** (g/Tag)
Fleisch	15	8	**12**	42	23	**32,5**
Wurstwaren/Fleischerzeugnisse	22	11	**17**	61	30	**45,5**
Gerichte auf Basis von Fleisch	21	11	**16**	57	30	**43,5**
Summe	**58**	**30**	**44**	**160**	**83**	**121,5**

Tab. 5.3.13 Pro-Kopf-Verzehr von Männern und Frauen in Deutschland [MAX RUBNER-INSTITUT 2008b:44]

Ein vollständiger Verzicht auf Fleisch- und Milchprodukte könnte eine Verminderung der Bodennutzung von bis zu 50% und des Primärenergiebedarfs von bis zu 25% bewirken [FAIST 2000:108]. Ein alleiniger Verzicht auf Fleisch führt allerdings nur zu geringfügigen Einsparungen im Flächenbedarf von etwa 4%. Die Reduzierung der Flächeninanspruchnahme durch verminderte Futtermittelproduktion und einen geringeren Bestand an Nutztieren in Deutschland könnte zusätzliche Fläche für die Erzeugung von nachwachsenden Rohstoffen zur stofflichen oder energetischen Verwertung bereit stellen.

5.4 Flächenbedarf für die Bereitstellung von Energie

5.4.1 Stromverbrauch im Haushalt

Obwohl die Energieeffizienz von Haushaltsgeräten steigt, ist durch die Zunahme besonders in der Unterhaltungselektronik und durch Stand-by-Funktionen der durchschnittliche Gesamtverbrauch von elektrischer Energie in Haushalten während der letzten Jahre gestiegen.

Der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) und die HEA-Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung ermittelten in einer Erhebung von 2010, dass die wachsende Zahl der Single-Haushalte den Strombedarf der deutschen Haushalte erhöht [BDEW 2010].
Ein Ein-Personen-Haushalt verbraucht durchschnittlich 2.050 kWh Strom im Jahr. In einem Zwei-Personen-Haushalt liegt der Pro-Kopf-Verbrauch dagegen bei 1.720 kWh. Der BDEW ermittelte 2009 außerdem, dass sich der Stromverbrauch seit Anfang der 50er Jahre aufgrund der Zunahme elektronischer Haushaltsgeräte vervierfacht hat. Von 1954 bis 2008 erhöhte sich der jährliche Stromverbrauch pro Haushalt von durchschnittlich 869 kWh auf 3.514 kWh. Seit ca. 2005 sinkt der Stromverbrauch wieder. Nach Ansicht des BDEW ist diese Entwicklung auf die zunehmende Zahl an energiesparenden Haushaltsgeräten und auf den sparsameren Umgang mit den Geräten zurückzuführen.

	Jährlicher Stromverbrauch in Haushalten (2)		Flächenbedarf für Stromerzeugung (1)	
			Wind 0,057 m^2 / kWh a	KWK-Biomasse 1,024 m^2 / kWh a
	kWh / Haushalt a	kWh / Einwohner a	m^2 / Einwohner a	m^2 / Einwohner a
1 Person	2.050	2.050	117	2.099
2 Personen	3.440	1.720	98	1.761
3 Personen	4.050	1.350	77	1.382
4 und mehr Personen	4.940	1.235	70	1.265

Tab. 5.4.1 Durchschnittsverbrauch von Strom in Haushalten und der Flächenbedarf bei der Erzeugung aus Erneuerbaren Energien (1) [BOSCH & PARTNER ET AL. 2006:19] (2) [BDEW 2010]

5.4.2 Flächenbedarf für die Bereitstellung von Elektrizität aus Biogas

Der untere Heizwert von einem Kubikmeter Biogas, der maßgeblich vom CH_4-Gehalt bestimmt wird, liegt je nach Gasqualität bei 21,5 bis 23,5 MJ (5,5 bis 6,0 kWh/m³); im Durchschnitt kann von ca. 5,8 kWh/m³ ausgegangen werden. Dies entspricht einem Heizöläquivalent von ca. 0,58 l Öl je m³ Gas. Pro Kubikmeter lassen sich damit etwa 2 kWh Strom oder 3-4 kWh Wärme erzeugen.

Der Energiegehalt von einem Liter Heizöl liegt bei 10kWh. Dies entspricht 1,1 m³ Erdgas oder 1,72 m³ Biogas (60% Methangehalt). Beispielsweise kann das Biogas aus einer Tonne organischer Reststoffe oder drei Tonnen Gülle/Festmist ca. 60 L Heizöl oder 120 kWh Strom ersetzen. Aus einem Hektar Silomais lassen sich 16 MWh Strom erzeugen genug, um fünf Haushalte ein Jahr lang vollständig zu versorgen [DVL / NABU 2007:1, FNR 2009a]. Eine Kuh produziert pro Tag etwa 10-20 kg Mist. Daraus können 1-2 m³ Biogas hergestellt werden. Die Biomasse, welche eine Kuh in einem Jahr erzeugt, entspricht der Energie von ca. 300 Liter Heizöl.

Biomasse	**Biogasertrag**
1 Hektar Maissilage	5.535 m³
1 Hektar Getreide-Ganzpflanzensilage	3.914 m³
1 Hektar Kleegrassilage	3.516 m³
1 Hektar Grassilage	2.811 m³

Zum Betreiben einer 500 kW_{el}- Anlage werden 250 ha Silomais oder 450 ha reine Grassilage benötigt. Eine Biogasanlage mit einer Leistung von 500 kWh_{el} (bei 8.000 Betriebsstunden) deckt den Jahresbedarf von ca. 1.000 Vier-Personen-Haushalten.

Energieträger	Unterer Heizwert		Durchschnittswert	Heizöläquivalent	Biogasausbeute
	MJ	kWh/m^3	kWh/m^3	Liter Öl / m^3 Gas	oTS/m^3/d
Biogas	21,5 - 23,5	5,5 - 6,0 bei 55 - 60% Methan/m^3)	5,8	ca. 0,58	4,0 kg

Tab. 5.4.2 Kennwerte zu Biogas [DVL/NABU 2007, FNR 2009a]

5.4.3 Energieverbrauch im Verkehrssektor

Der Gesamtverbrauch an Endenergie für Verkehr beträgt in Deutschland 2.568.720 Terrajoule [AGEB 2010]. Dies entspricht etwa 8.730 kWh/EW*a. In Berlin liegt der Gesamtverbrauch bei 67.004 TJ und in Brandenburg bei 78.561 TJ. Der Pro-Kopf-Verbrauch liegt in Berlin mit 5.389 kWh/EW*a unter dem Bundesdurchschnitt und in Brandenburg mit 8.696 kWh/EW*a im Bereich des deutschen Durchschnitts. Vom Gesamtverkehr entfallen etwa 75% des Verkehrsaufkommens und des Energieverbrauchs auf den Personenverkehr, 25% auf den Güterverkehr.

5.4.4 Flächenbedarf für die Bereitstellung von Kraftstoffen

In die Berechnung des Flächenbedarfs für die Bereitstellung von Kraftstoffen gehen die statistisch ermittelten Werte des Endenergieverbrauchs für Verkehr (Tab. 5.4.3. Endenergieverbrauch für Verkehr in Deutschland, Berlin und Land Brandenburg 2007 / 2008), sowie der Energieertrag pro Hektar Anbaufläche für den jeweiligen Kraftstoff und die Einwohnerzahl des jeweiligen Betrachtungsgebietes ein.

		Anteil	Einwohner	Endenergieverbrauch Verkehr		
			(1)	in TJ	in kWh	kWh/EW a
Deutschland (2)	Gesamtverbrauch	100%	81.802.000	2.568.720	714.104.160.000	8.730
	Personenverkehr	75%		1.926.540	535.578.120.000	6.547
	Güterverkehr	25%		642.180	178.526.040.000	2.182
Berlin (3)	Gesamtverbrauch	100%	3.456.264	67.004	18.627.112.000	5.389
	Personenverkehr	75%		50.253	13.970.334.000	4.042
	Güterverkehr	25%		16.751	4.656.778.000	1.347
Brandenburg (4)	Gesamtverbrauch	100%	2.511.500	78.561	21.839.958.000	8.696
	Personenverkehr	75%		58.921	16.379.968.500	6.522
	Güterverkehr	25%		19.640	5.459.989.500	2.174
Berlin-Brandenburg	Gesamtverbrauch	100%	5.967.764	145.565	40.467.070.000	6.781
	Personenverkehr	75%		109.174	30.350.302.500	5.086
	Güterverkehr	25%		36.391	10.116.767.500	1.695

(1) Energiebilanz Deutschland 2008 in Terrajoule, [AGEB 2010]
(2) Energiebilanz Berlin 2007 in Terrajoule, [AMT FÜR STATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2010d:8/9]
(3) Energiebilanz Brandenburg 2007 in Terrajoule, [AMT FÜR STATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2010c:8/9]
(4) Bevölkerung von Deutschland, Stand 31.12.2009 [AMT FÜR STATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2010a]

Tab. 5.4.3 Endenergieverbrauch für Verkehr in Deutschland, Berlin und Land Brandenburg (2007 / 2008)

Kraftstoff	Endenergieverbrauch Verkehr (100%) (1)		Energieertrag pro Hektar Jahr (2)	Benötigte Anbaufläche	Einwohnerzahl (3)	Benötigte Anbaufläche pro Einwohner
	in TJ	in kWh	in kWh/ha	in ha		in ha/EW
Endenergieverbrauch Verkehr (100%)						
Gesamt	2.568.720	714.104.160.000			81.802.000	
Biodiesel			11.000	64.918.560		0,794
Btl-Diesel			23.000	31.048.007		0,380
Bioethanol			17.700	40.344.868		0,493
Anteil Endenergieverbrauch Personenverkehr (75%)						
Gesamt	1.926.540	535.578.120.000			81.802.000	
Biodiesel			11.000	48.688.920		0,595
Btl-Diesel			23.000	23.286.005		0,285
Bioethanol			17.700	30.258.651		0,370
Anteil Endenergieverbrauch Güterverkehr (25%)						
Gesamt	642.180	178.526.040.000			81.802.000	
Biodiesel			11.000	16.229.640		0,198
Btl-Diesel			23.000	7.762.002		0,095
Bioethanol			17.700	10.086.217		0,123

(1) Energiebilanz Deutschland 2008 in Terrajoule [AGEB 2010]
(2) [MICHEL 2008:83]
(3) Bevölkerung von Deutschland, Stand 31.12.2009 [AMT FÜR STATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2010a]
Umrechnung: 1TJ = 278.000 kWh

Tab. 5.4.4 Endenergieverbrauch für Verkehr in Deutschland (2008)

Kraftstoff	Endenergieverbrauch Verkehr (100%) (1)		Energieertrag pro Hektar Jahr (2)	Benötigte Anbaufläche	Einwohnerzahl (3)	Benötigte Anbaufläche pro Einwohner
	in TJ	in kWh	in kWh/ha	in ha		in ha/EW
Endenergieverbrauch Verkehr (100%)						
Gesamt	67.004	18.627.112.000			3.456.264	
Biodiesel			11.000	1.693.374		0,490
Btl-Diesel			23.000	809.874		0,234
Bioethanol			17.700	1.052.379		0,304
Anteil Endenergieverbrauch Personenverkehr (75%)						
Gesamt	50.253	13.970.334.000			3.456.264	
Biodiesel			11.000	1.270.030		0,367
Btl-Diesel			23.000	607.406		0,176
Bioethanol			17.700	789.284		0,228
Anteil Endenergieverbrauch Güterverkehr (25%)						
Gesamt	16.751	4.656.778.000			3.456.264	
Biodiesel			11.000	423.343		0,122
Btl-Diesel			23.000	202.469		0,059
Bioethanol			17.700	263.095		0,076

(1) Energiebilanz Berlin 2007 in Terrajoule, [AMT FÜR STATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2010c:8/9]
(2) [MICHEL 2008:83]
(3) Bevölkerung von Deutschland, Stand 31.12.2009 [AMT FÜR STATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2010a]
Umrechnung: 1TJ = 278.000 kWh

Tab. 5.4.5 Endenergieverbrauch für Verkehr in Berlin (2007)

Kraftstoff	Endenergieverbrauch Verkehr (100%) (1)		Energieertrag pro Hektar Jahr (2)	Benötigte Anbaufläche	Einwohnerzahl (3)	Benötigte Anbaufläche pro Einwohner
	in TJ	in kWh	in kWh/ha	in ha		in ha/EW
Endenergieverbrauch Verkehr (100%)						
Gesamt	78.561	21.839.958.000			2.511.500	
Biodiesel			11.000	1.985.451		0,791
Btl-Diesel			23.000	949.563		0,378
Bioethanol			17.700	1.233.896		0,491
Anteil Endenergieverbrauch Personenverkehr (75%)						
Gesamt	58.921	16.379.968.500			2.511.500	
Biodiesel			11.000	1.489.088		0,593
Btl-Diesel			23.000	712.173		0,284
Bioethanol			17.700	925.422		0,368
Anteil Endenergieverbrauch Güterverkehr (25%)						
Gesamt	19.640	5.459.989.500			2.511.500	
Biodiesel			11.000	496.363		0,198
Btl-Diesel			23.000	237.391		0,095
Bioethanol			17.700	308.474		0,123

(1) Energiebilanz Brandenburg 2007 in Terrajoule, [AMT FÜR STATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2010d:8/9]
(2) [MICHEL 2008:83]
(3) Bevölkerung von Deutschland, Stand 31.12.2009 [AMT FÜR STATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2010a]
Umrechnung: 1TJ = 278.000 kWh

Tab. 5.4.6. Endenergieverbrauch für Verkehr in Brandenburg (2007)

Die benötigte Anbaufläche zur 100%-igen Deckung des jährlichen Energiebedarfs für den Gesamtverkehr in Deutschland mit Biodiesel würde beispielsweise 64,9 Mio ha betragen. Das entspricht fast der 3,5-fachen landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland. Würde man den Bedarf mit Bioethanol abdecken, dafür 40,3 Mio ha bzw. die 2-fache landwitschaftlich Nutzfläche notwendig. Diese Flächenzahlen resultieren aus der theoretischen Annahme der 100%-igen Bedarfsdeckung und dienen deshalb lediglich der Veranschaulichung und dem Vergleich der Zahlen untereinander.

Zu berücksichtigen ist auch, dass sich der durchschnittliche Ethanolertrag verschiedener Biomasseprodukte sehr voneinander unterscheiden. So liegt der Ertrag von Zuckerrohr (Brasilien) bei 6.460 Litern pro Hektar Anbaufläche, Zuckerrüben liegen im Durchschnitt bei 6.240, Mais bei 3.520 und Weizen bei 2.760 Liter Ethanol pro Hektar Anbaufläche [FNR 2009]. Die Ausbeute an Rapsöl beträgt 0,8 bis 2 Tonnen pro Hektar und Jahr, die Ausbeute von Palmöl hingegen liegt bei 4 bis 6 Tonnen pro Hektar und Jahr. Biodiesel aus diesen Pflanzenölen weist gute Verbrennungseigenschaften auf und kann problemlos als Beimischung zu herkömmlichen Diesel in allen Dieselmotoren eingesetzt werden, lediglich die Dichtungen und Leitungen müssen aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens des Biodiesels auf Kunststoffe umgerüstet werden. Alledings sind die Umweltauswirkungen der großflächigen Pflanzenölgewinnung sehr kritisch zu betrachten, wenn diese zu Lasten natürlicher Regenwälder geht.

Der *Wissenschaftliche Beirat für globale Umweltfragen* (WBGU) hat in dem Hauptgutachten *Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung* die Ergebnisse zu Untersuchungen der globalen Nutzungspotenziale von Biomasse und den Technologiepfaden veröffentlicht [WBGU 2008]. Biokraftstoffe der ersten Generation wie Biodiesel aus Raps oder Bioethanol aus Mais werden hinsichtlich des Klimaschutz als ungeeignet für die Substitution fossiler Kraftstoffe eingeschätzt.
Abb. 5.4.1 zeigt einen Auszug der Ergebnisse dieses Gutachtens [WBGU 2008:172].

5.4.5 Zusammenstellung der Flächenkennwerte für Haushaltsstrom und Verkehr

Zusammenfassend finden sich in Tab. 5.4.7 auf Seite 165 Flächenkennwerte zur Bereitstellung von Strom, Wärme und Treibstoffen für verschiedene Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien. Die Kennwerte sind der Studie *Flächenbedarfe und kulturlandschaftliche Auswirkungen regenerativer Energien am Beispiel der Region Uckermark-Barnim* [BOSCH & PARTNER ET AL. 2006:19 und GIENAPP 2006] entnommen. Diese Kennwerte wurden für eine typische Region im Bundesland Brandenburg erhoben und bieten daher eine belastbare Datengrundlage für die Berechnungen im empirischen Teil dieser Arbeit (Kapitel 6).

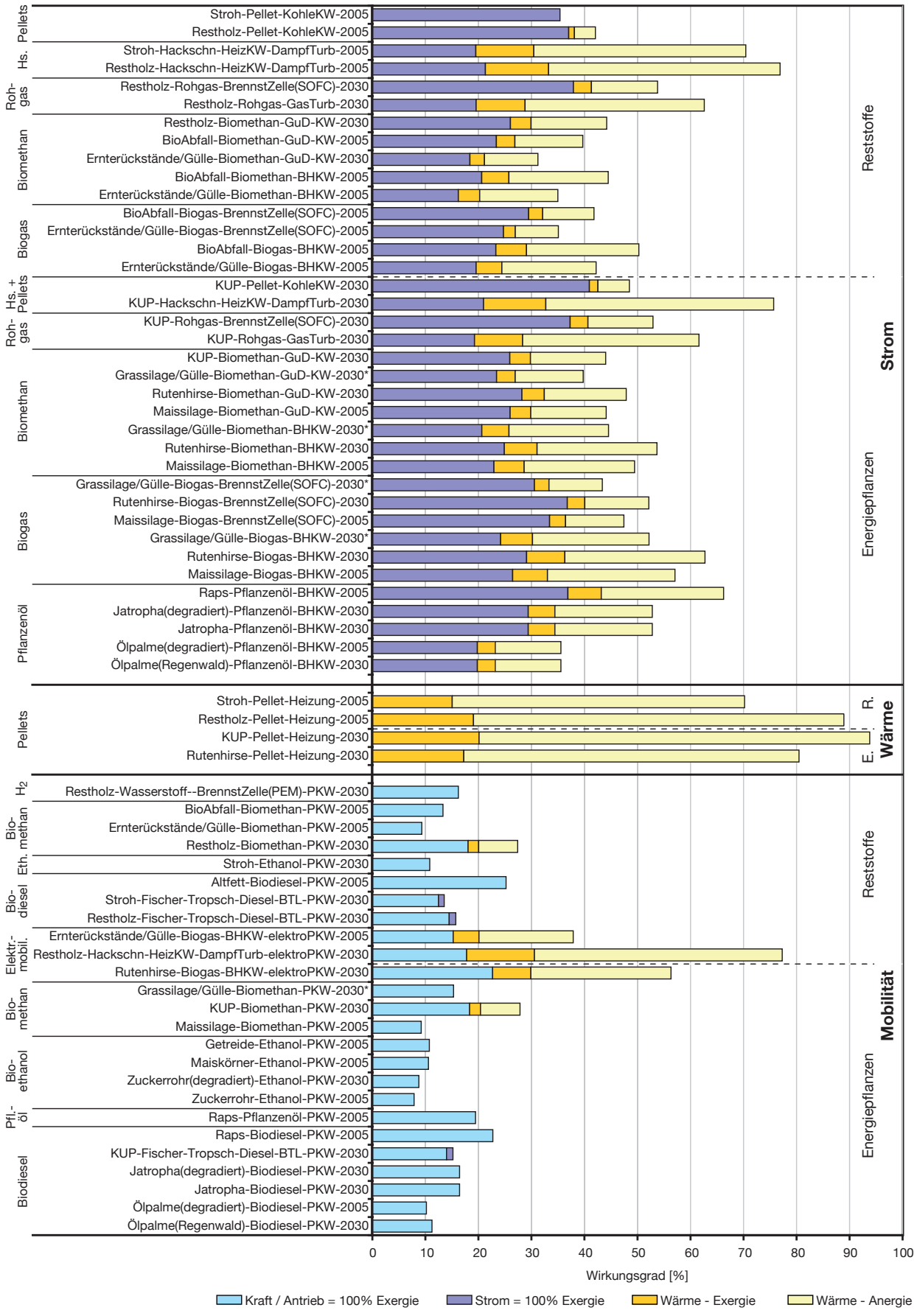


Abb. 5.4.1 Überblick zu exergetischen und energetischen Wirkungsgraden bei verschiedenen Bioenergienutzungspfaden [WBGU 2008:172]

Endenergie	Wandlungstechnologie	1	2	3	4	5	6
		ha/ GWh a	m^2/ kWh a	ha/ GWh a	m^2/ kWh a		
Strom	PV Freifläche	4,4	0,0440	4,4	0,0440	keine	(1)
	PV Dachanlagen	0,0	0,0000	0,0	0,0000	keine	(1)
	Laufwasserkraftwerke	0,0	0,0000	0,0	0,0000	keine	(1)
	Windenergie (80 m)	6,96	0,0696	6,96	0,0696	keine	(1)
	Windenergie (100 m)	5,7	0,0570	5,7	0,0570	keine	(1)
	Tiefen-Geothermie	0,08	0,0008	0,08	0,0008	Wärme	(1)
	KWK-Verbrennung fester angebauter Biomasse	105,7	1,0570	39,0	0,3900	Wärme	(1)
	KWK-Verbrennung fester Biomasse (Reststoffe)	0,0	0,0000	0,0	0,0000	Wärme	(1)
	KWK-Verbrennung von Biogas (Anbau)	102,4	1,0240	45,1	0,4510	Wärme	(1)
	KWK-Verbrennung von Biogas (Reststoffe)	0,0	0,0000	0,0	0,0000	Wärme	(1)
Wärme	Solarthermie, Dachkollektoren	0,0	0,0000	0,0	0,0000	keine	(1)
	Tiefen-Geothermie	0,0	0,0000	0,0	0,0000	Elektr.	(1)
	Wärmepumpen (oberflächennah)	0,0	0,0000	0,0	0,0000	keine	(1)
	KWK-Verbrennung fester angebauter Biomasse	61,9	0,6190	39	0,3900	Elektr.	(1)
	KWK-Verbrennung fester Biomasse (Reststoffe)	0,0	0,0000	0,0	0,0000	Elektr.	(1)
	KWK-Verbrennung von Biogas (Anbau)	80,7	0,8070	45,1	0,4510	Elektr.	(1)
	KWK-Verbrennung von Biogas (Reststoffe)	0,0	0,0000	0,0	0,0000	Elektr.	(1)
	Holz, Weiden (Kurzumtrieb)	24,5	0,2451	0,0	0,0000	keine	(2)
	Holz, Pappeln (Kurzumtrieb)	15,1	0,1508	0,0	0,0000	keine	(2)
	Stroh (Kurzumtrieb)	29,2	0,2915	0,0	0,0000	keine	(2)
	Miscanthus (Kurzumtrieb)	20,7	0,2070	0,0	0,0000	keine	(2)
Treibstoffe	Biodiesel aus Raps	86,4	0,8640	38,3	0,3830	Wärme, Elektr.	(1)
	Ethanol aus Zuckerrüben	33,1	0,3310	26,7	0,2670	Wärme, Elektr.	(1)
	Ethanol aus Weizen	72,3	0,7230	43,3	0,4330	Wärme, Elektr.	(1)

1 / 2 Flächenbedarf (zusätzliches Freiland) in ha für jährlich 1 GWh Endenergie, bei Nutzung nur eines Endenergieträgers in ha/Wh abzw. m2/kWh
3 / 4 Flächenbedarf (zusätzliches Freiland) in ha für jährlich 1 GWh Endenergie, bei Nutzung bei gleichzeitiger Nutzung aller möglichen Endenergieträger in [ha/GWh a] und [m2/kWh a]
5 weitere mögliche Endenergieträger aus Nebenprodukten
6 Quellenangaben: 1 [BOSCH & PARTNER ET AL. 2006:19]
2 [GIENAPP 2006]

Tab. 5.4.7 Zusammenstellung von Flächenkennwerten zur Erzeugung von Endenergie
(1) [BOSCH & PARTNER ET AL. 2006:19] (2) [GIENAPP 2006]

5.5 Zusammenfassung

Ausgehend von Biotoptypenkartierungen in Großstädten und Ballungsräumen haben sich seit Anfang der 1990er Jahre Stadtstrukturtypen als eine geeignete Maßstabsebene zur Analyse urbaner Systeme für verschiedene raumplanerische Disziplinen erwiesen. Die Grundlage von Stadtstrukturtypen bilden Gebäudetypologien, die durch gemeinsame Merkmale von Bauform, Bebauungsdichte, Baualtersklasse u.a. charakterisiert sind. Stadtstrukturtypen fassen phänomenologisch, konstruktiv, gebäudetechnisch und funktional ähnliche bauliche Strukturen zu repräsentativen Typen zusammen. Sie unterscheiden sich von Gebäudetypologien insbesondere durch eine höhere Aggregation an Informationen hinsichtlich Nutzung, Sozialstrukturen, Biotoptypen u.a. Die Ermittlung erfolgte früher auf der Grundlage topographischer Karten, heute geschieht dies zumeist über Photoscreaning und Geoinformationssysteme (GIS). Die Systematik für die Gliederung und Abgrenzung von Stadtstrukturtypen wird vorrangig von der wissenschaftlichen Fragestellung und der statistischen Datenverfügbarkeit bestimmt. Mit ihrer Hilfe lassen sich energetische, stoffliche, infrastrukturelle, ökonomische oder soziologische Entwicklungen unter raumplanerischen Gesichtspunkten abbilden.
Die Klassifizierung von Stadtstrukturtypen ermöglicht es, mit verhältnismäßig geringem Erhebungsaufwand repräsentative Aussagen über den *Status Quo* und *Szenarien* einer zukünftigen Entwicklung urbaner Systeme zu treffen. In Verbindung mit ökologischen Bewertungsmethoden wie der Ökobilanz oder Stoffflussanalysen können anhand von Stadtstrukturtypen charakteristische Umweltbelastungen und ökologische Leistungspotenziale aufgezeigt werden.
Aufbauend auf Forschungen von Roth, Ebel, Gruhler u.a. [ROTH ET AL. 1980, EBEL ET AL. 1991, GRUHLER ET AL. 2002] wurde in diesem Kapitel ein Modell vorgestellt, das den Ressourcenbedarf für die urbane Subsistenz anhand der vier Teilsysteme Ernährung, thermische Gebäudekonditionierung, Haushaltsstrom sowie Transport und Mobilität durch einen Stadtstrukturtypenansatz exemplarisch abbildet. Als Indikator wird der Flächenbedarf für die Bereitstellung von Nahrungs- und Futtermitteln und der Energieträger herangezogen. Die Fläche wirkt als eine limitierende Ressource, da für eine nachhaltige Bereitstellung von somatischer und extra-somatischer Energie eine Flächenkonkurrenz besteht. Auf der Grundlage verschiedener Studien [GERBENS-LEENES / NONHEBEL 2002:195, EBERL ET AL. 2005:34, KOERBER ET AL. 2008:9] wird für die Modellrechnung in Kapitel 6 ein mittlerer Flächenbedarf zur Lebens- und Futtermittelproduktion von 2.400 m^2/ Person und Jahr zugrunde gelegt. In Deutschland werden derzeit etwa 187.000 km^2 (52,5% des Staatsgebiets) landwirtschaftlich genutzt. Damit stehen jedem Bürger statistisch nur ca. 2.300 m^2 / Person und Jahr zur Verfügung. Berücksichtigt man die Inanspruchnahme weiterer Flächen zur stofflichen Nutzung wie Kleidung und Gebrauchsgüter, ist Deutschland ein *Flächenimporteur* [STEGER 2005:5]. Die energetische Nutzung von Biomasse aus nachwachsenden Rohstoffen ist zu Zeit nur möglich, weil viele Lebens- und Futtermittel sowie Konsumgüter importiert werden. Große landwirtschaftliche Produktionsflächen sind zur Produktion von *cash crops* – häufig in Entwicklungsländer – ausgelagert, wo diese mit der heimischen Nahrungsmittelproduktion konkurrieren [STEGER 2005:29]. Allein 55-60% des Flächenbedarfs für die Ernährung entfallen auf die Milch- und Fleischproduktion. Eine Reduktion des Fleischkonsums und anderer Wohlstandsgüter wie Kaffee, Alkohol und Zucker auf ein auch physiologisch verträgliches Maß würde beträchtliche Flächen zur Sicherung einer globalen Grundernährung freisetzen. Neben dem Flächenbedarf für Ernährung wurden Flächenkennwerte für die Bereitstellung von Strom, Wärme und Treibstoffen aus erneuerbaren Energien für die weiteren Berechnungen ermittelt.

6. BEISPIEL REGION BERLIN - BRANDENBURG

6.1 Systembeschreibung Berlin - Brandenburg

6.1.1 Kenngrößen zur Bevölkerung und Flächennutzung

Für die nachfolgenden Bilanzierungen wurden die aktuell verfügbaren statistischen Daten verwendet. Für die Bevölkerungs- und Wohnflächenentwicklung und die Energieversorgung liegen Statistiken für die Bezugsjahre 2006, 2007 oder 2009 vor. Für einige Bereiche gibt es nur ältere Datenerhebungen. Da in den meisten der hier betrachteten Bilanzbereichen – abgesehen von der Nutzung erneuerbarer Energien – nur geringfügige Dynamiken zu verzeichnen sind, bestehen keine methodischen Probleme, diese Daten gleichermaßen in die Systembetrachtung einzubeziehen.

In Deutschland lebten Ende des Jahres 2009 ca. 81.802.000 Menschen (Tab. 6.1.1) [AMT FÜR STATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2010a].

Deutschland umfasst eine Fläche von 357.111 km². Davon werden
- 187.645 km² (52,5%) landwirtschaftlich und
- 107.348 km² (30%) forstwirtschaftlich genutzt.

Die Gebäude-, Betriebs-, Erholungs- und Verkehrsflächen beanspruchen zusammen 48.449 km² das sind 13,5% (Tab. 6.1.2) [DESTATIS 2010b].

		Deutschland	Berlin (2)	Brandenburg	Berlin-Brandenb.
Einwohner	Anzahl	81.802.000	3.456.264	2.511.500	5.967.764
Fläche	km^2	357.111	890,85	29.478,61	30.369,46
Einwohner	EW / km^2	229	3.880	85	197

Tab. 6.1.1 Bevölkerung und Fläche von Deutschland, Berlin und Brandenburg, Stand 31.12.2009 [AMT FÜR STATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2010a] (2) [STATISTISCHES LANDESAMT BERLIN 2010]

Das Berliner Stadtgebiet umfasst eine Fläche von knapp 891 km^2, das sind 0,25% der Fläche Deutschlands. In Berlin gibt es seit der Verwaltungsreform 2001 zwölf Verwaltungsbezirke mit insgesamt ca. 3.442.700 Menschen. Das ist eine durchschnittliche Bevölkerungsdichte von 3.879 EW/km².
Die Landesfläche von Brandenburg umfasst 29.481 km^2, das sind 8,26% der Fläche Deutschlands. Brandenburg ist in 14 Landkreise aufgeteilt und besitzt 4 kreisfreie Städte mit einer Gesamtbevölkerung von ca. 2.511.500 Einwohnern. Das ist eine durchschnittliche Bevölkerungsdichte von 85 EW/km². Das Land Brandenburg weist damit eine bundesweit sehr geringe Bevölkerungsdichte auf.
Der gesamte Bilanzraum Berlin-Brandenburg (BE-BB) umfasst mit 30.373 km^2 ca. 8,51% der Fläche Deutschlands mit einer Gesamtbevölkerung von insgesamt ca. 5.954.200 Einwohnern und einer durchschnittlichen Bevölkerungsdichte von 197 EW/km² (Tab. 6.1.2) [DESTATIS 2010b].

Nutzungsart	Deutschland		Berlin		Brandenburg		Berlin-Brandenb.	
	km^2	%	km^2	%	km^2	%	km^2	%
Gebäude- und Freifläche	24.416	6,84	368	41,35	1.353	4,59	1.721	5,67
Betriebsfläche	2.456	0,69	6	0,67	398	1,35	404	1,33
Erholungsfläche	3.787	1,06	101	11,35	172	0,58	273	0,90
Verkehrsfläche	17.790	4,98	137	15,39	1.062	3,60	1.199	3,95
Landwirtschaftsfläche	187.646	52,55	41	4,61	14.535	49,30	14.576	47,99
Waldfläche	107.349	30,06	162	18,20	10.452	35,45	10.614	34,95
Wasserfläche	8.482	2,38	59	6,63	1.006	3,41	1.065	3,51
Flächen anderer Nutzung	5.185	1,45	16	1,80	502	1,70	518	1,71
Bodenfläche insgesamt	357.111	100,00	890	100,00	29.480	100,00	30.370	100,00
Bebaute Fläche	44.662	12,51	511	57,42	2.813	9,54	3.324	10,95

Tab. 6.1.2 Flächennutzung in Deutschland und Berlin-Brandenburg, Stand 31.12.2009 [DESTATIS 2010b]

	Brandenburg				Berlin		Berlin und Brandenburg	
	insgesamt		engerer Verflechtungsraum					
	in km2	%	in km2	%	in km2	%	in km2	%
Gebäude- und Freifläche	1.324	4	423	10	363	41	1.687	6
Verkehrsfläche	1.047	4	227	5	136	15	1.183	4
Landwirtschaftsfläche	14.593	50	1.947	44	43	5	14.636	48
Waldfläche	10.372	35	1.456	33	161	18	10.533	35
Wasserfläche	1.006	3	188	4	60	7	1.066	4
Erholungsfläche	125	0	34	1	103	12	228	1
Betriebsfläche	390	1	28	1	8	1	398	1
Flächen anderer Nutzung	622	2	126	3	18	2	640	2
Gesamtfläche	29.479	100	4.429	100	892	100	30.370	100

Tab. 6.1.3 Anteile der Nutzungssektoren an den Gesamtflächen (Erstellung am 03.10.07)

6.1.2 Kenngrößen zum Berliner Wohnungsbestand und zum Energieverbrauch

In Berlin gab es zum Jahresende 2006 knapp 1,9 Mio. Wohnungen in knapp 310.000 Wohngebäuden. Über die Hälfte der 309 630 (54%) sind Ein- und Zweifamilienhäuser. Knapp 1% aller Wohnungen befinden sich in Nichtwohngebäuden [AMT FÜR STATISTIK 2007:6 (FII4-j 06)].

In Berlin gibt es gemäß der Fortschreibung des Wohngebäude- und Wohnungsbestandes mit Stichtag 31.12.2009 insgesamt 1.894.564 Wohnungen mit 133.506.400 m² Wohnfläche. Bezogen auf die Bevölkerung sind das durchschnittlich 38,8 m² Wohnfläche je Einwohner (Tab. 6.1.4) [AMT FÜR STATISTIK 2010:7].

Bezirk	Einwohner Stand 31.10.2010	Wohnungen 1)		Wohnfläche		
		insgesamt	je 1 000 Einwohner	insgesamt	je Wohnung	je Einwohner
	Anzahl	Anzahl	Anzahl	m^2	m^2	m^2
Mitte	333.011	191.032	573	12.528.800	65,6	37,6
Friedrichshain-Kreuzberg	269.576	146.001	543	9.686.200	66,3	35,9
Pankow	369.775	204.768	560	14.032.400	68,5	37,9
Charlottenburg-Wilmersdorf	320.291	190.976	597	14.385.100	75,3	44,9
Spandau	225.665	118.252	529	8.438.500	71,4	37,4
Steglitz-Zehlendorf	295.550	157.639	537	12.781.000	81,1	43,2
Tempelhof-Schöneberg	336.030	185.576	554	13.461.200	72,5	40,1
Neukölln	311.468	165.147	529	11.297.700	68,4	36,3
Treptow-Köpenick	242.423	128.645	534	8.869.800	68,9	36,6
Marzahn-Hellersdorf	249.729	130.798	527	9.098.200	69,6	36,4
Lichtenberg	261.340	142.922	550	9.093.000	63,6	34,8
Reinickendorf	241.406	132.808	551	9.834.400	74,0	40,7
Berlin	3.456.264	1.894.564	550	133.506.300	70,5	38,6

1) Wohn- und Nichtwohngebäuden, ohne Wohnheime

Tab. 6.1.4 Wohnungsbestand in Berlin nach Bezirken, Stand 31.12.2009
Einwohner in Berlin nach Bezirken, Stand 31. 10.2010
[AMT FÜR STATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2010a]
[STATISTISCHES LANDESAMT BERLIN 2010]

Energiebilanz Berlin 2007			Zeile	Steinkohlen		Braunkohlen			Mineralöle			
				Kohle	Briketts	Kohle	Briketts	And. Braunkohlenprod.	Rohbenzin	Ottokraftstoffe	Dieselkraftstoffe	Flugturbinenkraftstoffe
in Terajoule				Terajoule								
Primärenergiebilanz		Gewinnung	1									
		Bezüge	2	42 175	7	12 005	264	269	924	24 558	24 017	13 140
		Bestandsentnahmen	3	1 725		8						
		Energieaufkommen	4	43 901	7	12 013	264	269	924	24 558	24 017	13 140
		Lieferungen	5									
		Bestandsaufstockungen	6	5		0					0	
		Primärenergieverbrauch	**7**	**43 896**	**7**	**12 013**	**264**	**269**	**924**	**24 558**	**24 016**	**13 140**
Umwandlungsbilanz	Umwandlungseinsatz	Wärmekraftwerke der allgemeinen Versorgung (ohne KWK)[1]	8	24 374		140						
		Heizkraftwerke der allgemeinen Versorgung (nur KWK)[2]	9	18 073		11 832						
		Windkraft-, Photovoltaik- und andere Anlagen	10									
		Heizwerke[1]	11	1 441		41		107				
		Sonstige Energieerzeuger	12									
		Umwandlungseinsatz insgesamt	**13**	**43 889**		**12 013**		**107**				
	Umwandlungsausstoß	Wärmekraftwerke der allgemeinen Versorgung (ohne KWK)[1]	14									
		Heizkraftwerke der allgemeinen Versorgung (nur KWK)[2]	15									
		Windkraft-, Photovoltaik- und andere Anlagen	16									
		Heizwerke[1]	17									
		Sonstige Energieerzeuger	18									
		Umwandlungsausstoß insgesamt	**19**									
	Verbrauch i.d.Energiegew. u.i.d.Umwandlungsbereichen	Kraftwerke, Heizwerke	20									
		Sonstige Energieerzeuger	21									
		Energieverbrauch im Umwandlungsbereich insgesamt	22									
		Fackel- und Leitungsverluste	23									
		Energieangebot nach Umwandlungsbilanz	**24**	**6**	**7**	**0**	**264**	**161**	**924**	**24 558**	**24 016**	**13 140**
		Nichtenergetischer Verbrauch	25					97	924			
		Statistische Differenzen	26									
Endenergieverbrauch		**Endenergieverbrauch**	**27**	**6**	**7**	**0**	**264**	**64**		**24 558**	**24 016**	**13 140**
	nach Sektoren	Gew. v. Steinen u. Erden, sonst. Bergbau u. Verarb. Gewerbe insg.	28					59			2	
		Schienenverkehr	29								253	
		Straßenverkehr	30							24 175	22 120	
		Luftverkehr	31									13 140
		Küsten- und Binnenschiffahrt	32								228	
		Verkehr insgesamt	33							24 175	22 601	13 140
		Haushalte[3]	34									
		Gewerbe, Handel, Dienstleistungen u. übrige Verbraucher[3]	35								1 413	
		Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und übrige Verbraucher insgesamt	**36**	**6**	**7**	**0**	**264**	**5**		**383**	**1 413**	

1 einschließlich ungekoppelte Erzeugung in Heizkraftwerken; bis 2002 einschließlich KWK

2 einschließlich Industriewärmekraftwerke

3 sofern für diese Merkmale darstellbar

und Mineralölprodukte				Gase	Erneuerbare Energien					Elektrischer Strom u.a. Energieträger			Energie-träger ins-gesamt	Zeile
Heizöl		And. Mineral-ölpro-dukte	Flüs-sig-gas	Erdgas	Wind-kraft, Photo-voltaik	Bio-mas-se	Bio-die-sel	Ab-fälle	Sons-tige	Strom	Fern-wärme	Müll (fossiler Anteil)		
leicht	schwer													
Terajoule														
					87	953		1 560	103			1 040	3 743	1
29 809	185	1 826	439	92 773			3 369			18 581			264 341	2
344	1		0										2 079	3
30 153	185	1 826	440	92 773	87	953	3 369	1 560	103	18 581		1 040	270 162	4
														5
	45			288			0						339	6
30 153	**140**	**1 826**	**440**	**92 486**	**87**	**953**	**3 369**	**1 560**	**103**	**18 581**		**1 040**	**269 824**	**7**
201	82			7 480				12				8	32 298	8
284	44			26 662		2		1 548				1 032	59 477	9
					19	483							502	10
524				5 971		184							8 268	11
		121											121	12
1 009	**126**	**121**		**40 113**	**19**	**669**		**1 560**				**1 040**	**100 667**	**13**
										14 136			14 136	14
										17 503	29 997		47 500	15
										502			502	16
											8 088		8 088	17
														18
										32 141	**38 085**		**70 226**	**19**
										2 431	566		2 997	20
										3	5		8	21
										2 434	570		3 005	22
										707	513		1 220	23
29 143	**14**	**1 705**	**440**	**52 373**	**68**	**284**	**3 369**		**103**	**47 581**	**37 002**		**235 158**	**24**
		1 653		84									2 759	25
											63		63	26
29 143	**14**	**52**	**440**	**52 289**	**68**	**284**	**3 369**		**103**	**47 581**	**37 065**		**232 463**	**27**
3 891	14	38	22	5 699		6	0			7 553	1 755		19 040	28
							11			3 498			3 762	29
			66	223			3 280						49 865	30
													13 140	31
							10						238	32
			66	223			3 301			3 498			67 004	33
				18 479		278				14 934	34 575		68 266	34
				27 888			68			21 596	735		51 700	35
25 253		**13**	**351**	**46 367**	**68**	**278**	**68**		**103**	**36 529**	**35 310**		**146 419**	**36**

Tab. 6.1.5 Energiebilanz Berlin 2007 in Terajoule
[AMT FÜR STATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2010b:8/9]

Energiebilanz des Landes Brandenburg 2007 in Terajoule			Zeile	Steinkohlen			Braunkohlen			Mineralöle und		
				Kohle (roh)	Briketts	Koks, andere Steinkohlenprodukte	Kohle (roh)	Briketts	andere Braunkohlenprodukte	Erdöl (roh)	Rohbenzin	Ottokraftstoffe
				Terajoule								
Primär-energiebilanz		Gewinnung im Inland	1				347 512			801		
		Bezüge	2	3 120	20	35 899	1 138	242	46	445 742		
		Bestandsentnahmen	3	187		128	79	266	7			
		Energieaufkommen im Inland	4	3 307	20	36 027	348 729	508	54	446 543		
		Lieferungen	5					5 668	9 029		176	78 578
		Bestandsaufstockungen	6			1	22					
		Primärenergieverbrauch im Inland	7	3 307	20	36 026	348 707	– 5 160	– 8 975	446 543	– 176	– 78 578
Umwandlungsbilanz	Umwandlungseinsatz	Kokereien	8									
		Steinkohlen- und Braunkohlenbrikettfabriken	9				23 624	3	0			
		Wärmekraftwerke der allgemeinen Versorgung (ohne KWK)	10				311 726		1 727			
		Wärmekraftwerke der allgemeinen Versorgung (nur KWK)	11				12 919		6 173			
		Industriewärmekraftwerke (nur Strom)	12									
		Kernkraftwerke	13									
		Wasserkraftwerke	14									
		Windkraft-, Photovoltaik- und andere Anlagen	15									
		Heizwerke	16			•			160			
		Hochöfen, Konverter	17			•						
		Raffinerien	18							446 543	4 928	
		Sonstige Energieerzeuger	19									
		Umwandlungseinsatz insgesamt	20			11 947	348 268	3	8 061	446 543	4 928	
	Umwandlungsausstoß	Kokereien	21									
		Steinkohlen- und Braunkohlenbrikettfabriken	22					6 728	18 984			
		Wärmekraftwerke der allgemeinen Versorgung (ohne KWK)	23									
		Wärmekraftwerke der allgemeinen Versorgung (nur KWK)	24									
		Industriewärmekraftwerke (nur Strom)	25									
		Kernkraftwerke	26									
		Wasserkraftwerke	27									
		Windkraft-, Photovoltaik- und andere Anlagen	28									
		Heizwerke	29									
		Hochöfen, Konverter, Raffinerien	30								21 692	107 377
		Sonstige Energieerzeuger	31									
		Umwandlungsausstoß insgesamt	32					6 728	18 984		21 692	107 377
	Verbrauch in der Energiegewinnung und in den Umwandlungsbereichen	Kokereien	33									
		Steinkohlenzechen, Braunkohlengruben, Brikettfabriken	34									
		Kraftwerke, Heizwerke	35									
		Erdöl- und Erdgasgewinnung	36									
		Raffinerien	37									
		Sonstige Energieerzeuger	38									
		E.-Verbrauch im Umwandlungsbereich insgesamt	39									
		Fackel- und Leitungsverluste	40									
		Energieangebot nach Umwandlungsbilanz	41	3 307	20	24 079	439	1 566	1 948		16 588	28 799
		Nichtenergetischer Verbrauch	42						467		16 588	
		Statistische Differenzen	43					431	1 223			
Endenergieverbrauch		**Endenergieverbrauch**	44	3 307	20	24 079	439	1 997	2 704			28 799
		Gewinng. v. Steinen u. Erden, sonst. Bergbau u. Verarb.Gewerbe insg.	45	3 152		24 079	439	1	2 691			
		Schienenverkehr	46									
		Straßenverkehr	47									28 542
		Luftverkehr	48									44
		Küsten- und Binnenschiffahrt	49									
		Verkehr insgesamt	50									28 586
		Haushalte	51					1 413				
		Gewerbe, Handel, Dienstleistungen u. übrige Verbraucher	52					582				
		Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und übrige Verbraucher	53	155	20			1 995	13			213

Mineralölprodukte							Gase	Erneuerbare Energieträger						Strom und andere Energieträger				Energieträger insgesamt	Zeile
Dieselkraftstoffe	Flugturbinenkraftstoff	Heizöl	Petrolkoks	andere Mineralölprodukte	Flüssiggas	Raffineriegas		Klärgas und Deponiegas	Wasserkraft	Windkraft	Solarenergie	Biomasse	Sonstige	Strom	Fernwärme	Müll (fossiler Anteil)	Andere		
Terajoule																			
							246	3 263	53	21 975	161	79 145	540			3 258	5 809	462 764	1
		0			0		110 526											596 733	2
1		283	4		1							23						979	3
1		283	4		1		110 772	3 263	53	21 975	161	79 168	540			3 258	5 809	1 060 476	4
92 032	11 347	40 163	1 224	18 280	6 333		11 967					16 576		105 005	690			397 068	5
							12					107						142	6
– 92 031	– 11 347	– 39 880	– 1 220	– 18 280	– 6 332		98 793	3 263	53	21 975	161	62 484	540	– 105 005	– 690	3 258	5 809	663 267	7
																			8
																		23 627	9
		275					5 025					4 469	0			2 103	419	325 744	10
		186					7 643					892	0			16	767	28 597	11
		•				•	•					3 891						34 516	12
																			13
									53									53	14
								3 105		21 975	82	17 412						42 574	15
		171			0		•					129	2				295	•	16
																		•	17
				5 296								6 299						463 066	18
		4 409					4 409											8 819	19
		•		5 296	0	•	•	3 105	53	21 975	82	33 093	2			2 119	1 481	946 302	20
																			21
																		25 713	22
														126 364				126 364	23
														7 660	13 623			21 283	24
														14 413				14 413	25
																			26
														53				53	27
														27 167	190			27 358	28
															6 671			6 671	29
133 949	17 023	•	1 224	31 730	8 758	•	•					6 299						451 921	30
														3 528				3 528	31
133 949	17 023	•	1 224	31 730	8 758	•	•					6 299		179 186	20 485			677 304	32
																			33
														3 171	389		3 610	7 171	34
														10 290	776			11 066	35
							179							4				182	36
		•				•								4 315				39 822	37
							110	137						147	23			417	38
		•				•	288	137						17 927	1 189		3 610	58 658	39
							4 088	22						4 020	2 115			10 244	40
41 919	5 677	15 134	4	8 153	2 426	– 544	68 963				79	35 691	538	52 233	16 491	1 139	718	325 367	41
		508		8 144		1 009	1 217					1 695						29 629	42
						1 553	– 0								171			3 378	43
41 919	5 677	14 626	4	9	2 426		67 745				79	33 996	538	52 233	16 663	1 139	718	299 116	44
88		3 155	4		304		26 056					10 586	186	23 757	5 306	1 139	718	101 662	45
1 581												70		608				2 259	46
36 108					497		157					5 207						70 511	47
	5 677																	5 720	48
69												3						72	49
37 758	5 677				497		157					5 280		608				78 561	50
							30 434					17 946		11 938	5 568			67 300	51
4 073							11 098					184		15 931	5 788			37 655	52
4 073		11 471		9	1 625		41 532				79	18 130	353	27 869	11 356			118 893	53

Abb. 6.1.6 Energiebilanz im Land Brandenburg 2007 in Terajoule
[AMT FÜR STATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2010c:8/9]

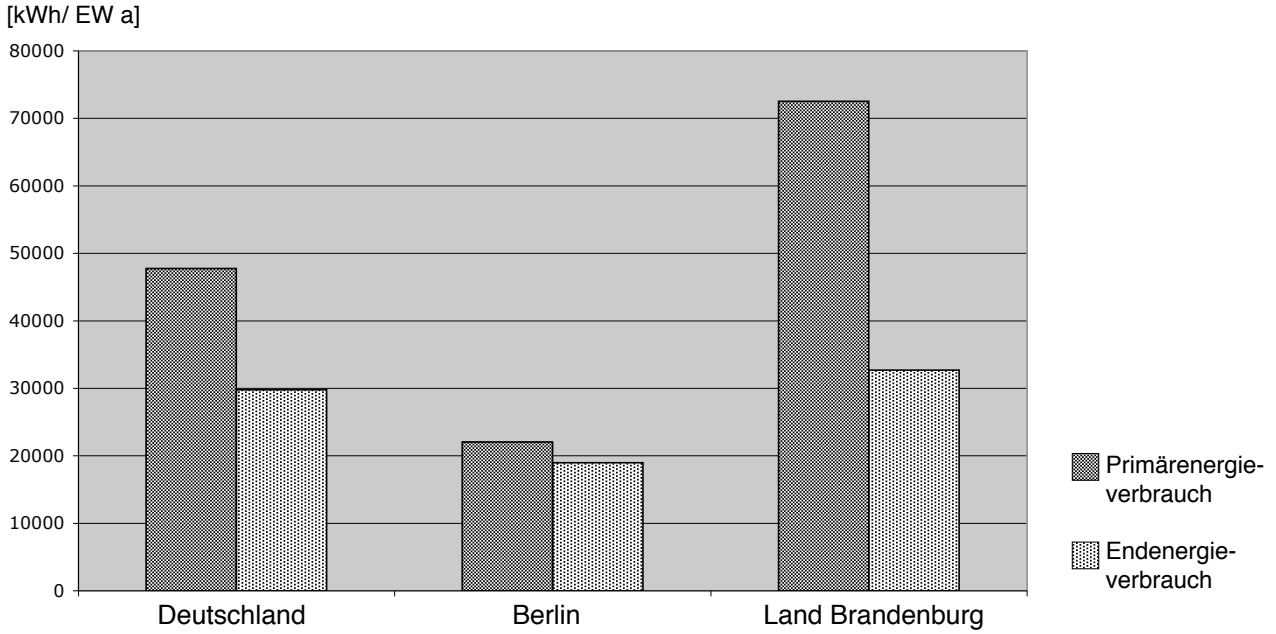
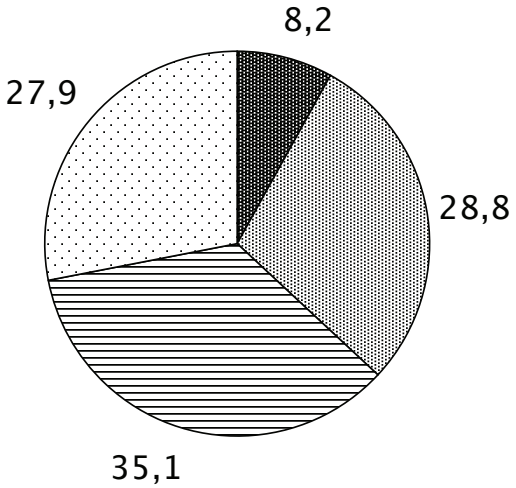
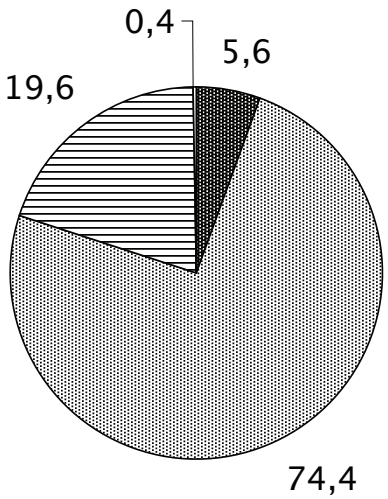


Abb. 6.1.1 Primär- und Endenergieverbrauch pro Einwohner und Jahr in Deutschland, Berlin und Land Brandenburg für das 2007



Produktion	19.040 TJ
Verkehr	67.004 TJ
Haushalte	81.493 TJ
Gewerbe	64.926 TJ
Summe	232.463 TJ

Abb. 6.1.2 Endenergieverbrauch in Berlin 2007 Anteiliger Verbrauch nach Sektoren (Angaben in %)



Schienenverkehr	3.762 TJ
Straßenverkehr	49.865 TJ
Luftverkehr	13.140 TJ
Küsten- und Binnenschiffahrt	238 TJ
Summe	67.004 TJ

Abb. 6.1.3 Endenergieverbrauch für den Sektor Verkehr in Berlin 2007 Anteiliger Verbrauch nach Verkehrsarten (Angaben in %)

6.1.3 Beschreibung der Stadtstrukturtypen in Berlin

Alle Informationen über die reale Flächennutzung in Berlin werden im *Informationssystem Stadt und Umwelt* (ISU) der *Senatsverwaltung für Stadtentwicklung* verwaltet und bearbeitet. Dieses Informationssystem ermöglicht eine graphische Datenverarbeitung aller Sachdaten auf der Grundlage eines einheitlichen räumlichen Bezugssystems. Die Berliner Stadtfläche ist hier vollständig in ca. 25.000 Teil- bzw. Blockflächen erfasst. Im digitalen Berliner Umweltatlas sind diese Informationen als Karte und mit einer Kartenbeschreibung für die acht Themenbereiche Boden, Wasser, Luft, Klima, Biotope, Flächennutzung, Verkehr / Lärm und Energie veröffentlicht [http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/iinhalt.htm].

Es werden insgesamt 62 verschiedene Flächentypen unterschieden. Eine differenzierte Definition und Beschreibung der Flächentypen findet sich bei Hanschke und Bedding [HANSCHKE / BEDDIG 1995 / 2005]. Die Flächentypen werden nach überwiegender Wohnnutzung und nach anderen Nutzungen unterschieden. Es werden 13 Strukturtypen mit überwiegender Wohnnutzung anhand ihrer typischen Bau- und Freiraumstruktur sowie ihrer Entstehungszeit differenziert. Jeder Flächentyp ist u.a durch seinen Bebauungsgrad – d.h. seine bauliche Dichte und seinen Versiegelungsgrad und die Verteilung unterschiedlich durchlässiger Oberflächenbeläge – charakterisiert.
Die Bezugsflächen entsprechen den statistischen Blöcken, die in der Regel durch Straßen begrenzt sind und vom Amt für Statistik Berlin-Brandenburg auch mit einer Einwohnerstatistik geführt werden. Einer Block- bzw. Blockteilfläche wurde grundsätzlich nur ein Flächentyp zugeordnet. Bei unterschiedlichen Flächentypen innerhalb einer Block- bzw. Blockteilfläche wird der dominante Flächentyp angegeben [SENSTADT BERLIN 2008a].

Die 13 Strukturtypen mit überwiegender Wohnnutzung sind zu vier Haupttypen zusammengefasst [SENSTADT BERLIN 2008a]:

1. Niedrige Bebauung mit Gartenstruktur
2. Zeilenbebauung der 1920er, 30er und 50er Jahre
3. Blockrandbebauung der Gründerzeit
4. Hohe Bebauung der Nachkriegszeit

Für diese vier Haupttypen existiert ein statistisches Mengengerüst, das die Flächengröße und die jeweiligen Anteile an der bebauten Fläche für die Berliner Bezirke bezogen auf die Verwaltungsbezirke vor der Gebietsreform 2001 erfasst. Die Stadtstrukturtypen umfassen die gesamte Fläche mit Überbauung, Hof- bzw. Gartenflächen sowie den Straßenanteil. Die Stadtstrukturtypen beinhalten auch andere Nutzungen. Eine unmittelbare Zuordnung der Wohnflächen auf die Strukturtypen ist daher nicht möglich. Auf dieser Datengrundlage lässt sich aber durch eine Korrelation von baulicher Dichte, städtebaulichen Kennwerten und der Einwohnerdichte eine Zuordnung der Wohnflächen auf die Stadtstrukturtypen ermitteln. Das methodische Vorgehen hierfür wird in Kapitel 6.3 erläutert.

Im folgenden Kapitel werden diese vier Stadtstrukturtypen exemplarisch anhand von realen städtischen Blöcken mit ihrer baulichen Charakteristik beschrieben.

6.2 Auswahl und Beschreibung der gewählten Stadtstrukturtypen

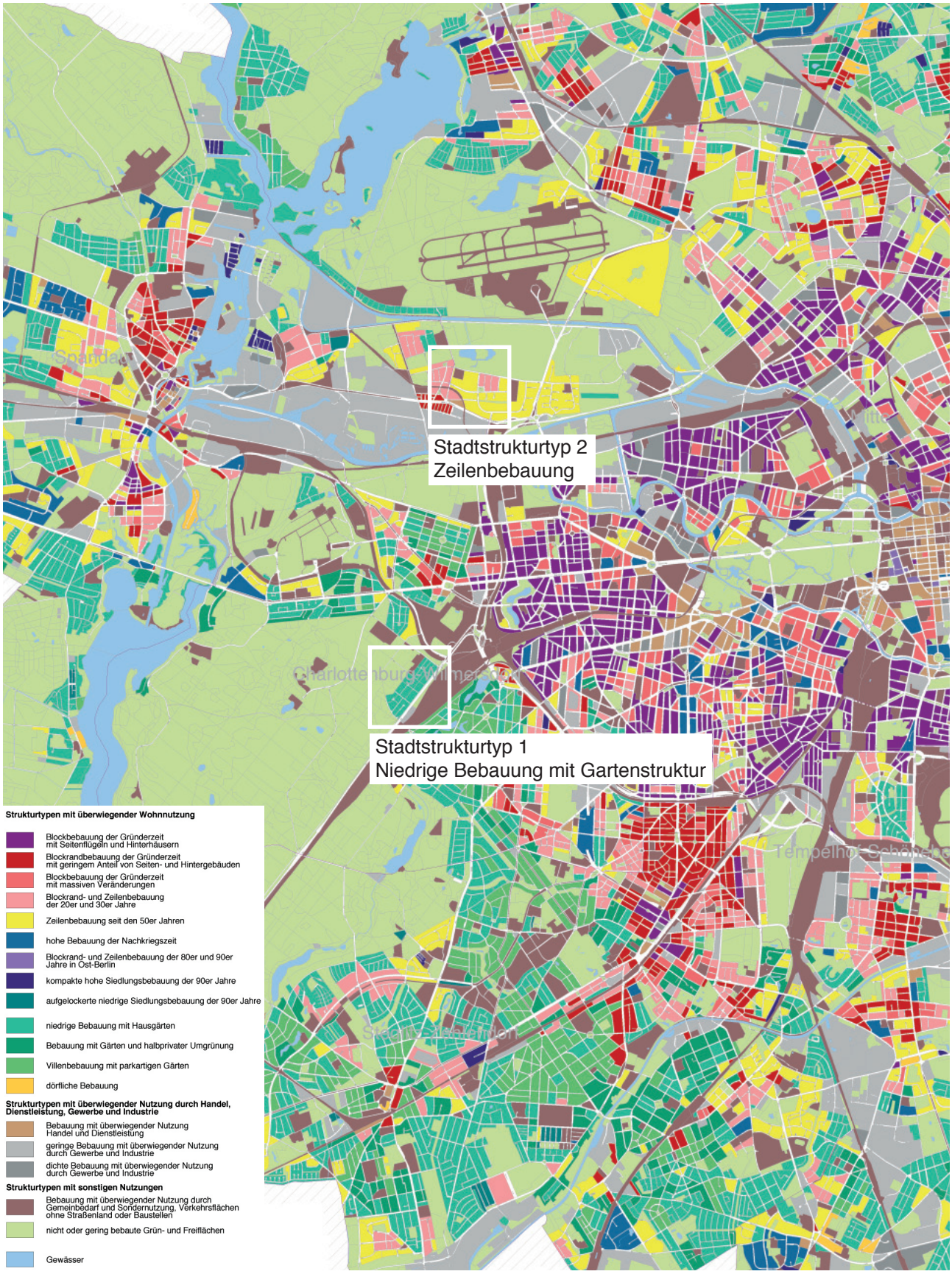


Abb. 6.2.1 Stadtstrukturtypen im Berliner Umweltatlas. Kartenausschnitt Maßstab 1 : 100.000 [SENSTADT BERLIN 2007]



6.2.1 Stadtstrukturtyp 1 - Niedrige Bebauung mit Gartenstruktur

Beispiel: Doppelwohnhaus Falterweg 17 / 19, Berlin - Eichkamp

Kurzbeschreibung

Der Stadtstrukturtyp *Niedrige Bebauung mit Gartenstruktur* repräsentiert die Vielzahl unterschiedlicher, überwiegend ein- bis zweigeschossiger Wohngebäude. Der Typ umfasst Einfamilien- und Doppelhäuser, Reihenhausbebauungen, Stadtvillen und kleine Mehrfamilienhäuser, die zumeist in offener Bauweise errichtet sind. In Deutschland (2009) gibt es ca. 18 Mio. Wohngebäude mit insgesamt 3.409 Mill. m² Nutzfläche, davon 11,4 Mio. Gebäude mit einer Wohnung (63 %) und 3.5 Mio. Gebäude mit zwei Wohnungen (19,9 %). Ein- und Zweifamilienhäuser machen mit einem Anteil von ca. 55% an der Gesamtnutzfläche des deutschen Wohnungsbestandes den Großteil an Wohnbauten aus [DESTATIS 2010c]. In Berlin liegt der Anteil von Gebäuden mit einer Wohnung bei nur 47,8 %, mit zwei Wohnungen bei 6,9 %. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes (2008) haben Einfamilienhäuser eine durchschnittliche Wohnfläche von 121 m², Zweifamilienhäuser von 178 m². Einer Auswertung von Energieausweisen zufolge liegen die durchschnittlichen Größen von Einfamilienhäusern bei 166 m², bei Zweifamilienhäusern bei 255 m² [WEISS / DUNKELBERG 2009:18].

Exemplarisch wurde eine Siedlung gewählt, die eine für diesen Stadtstrukturtypen typische bauliche Mischung und Dichte aufweist. Die Märkische Heimstätten GmbH beauftragte 1919 den Architekten Max Taut (1884-1967) mit einem städtebaulichen Entwurf für ein 133 ha großes Areal der Revierförsterei Eichkamp im Grunewald westlich der AVUS. Der Entwurf umfasste 1.700 Wohnungen als Doppel- und Reihenhäuser mit durchschnittlich je 550 m² großen Selbstversorgergärten. Das Vorhaben wurde in dieser Größe nicht genehmigt, aber nach einer Überarbeitung konnte 1920 mit der Bebauung einer ca. 25 ha großen Fläche am nordöstlichen Rand des Geländes begonnen werden. Im Auftrag von sieben verschiedenen Baugesellschaften und Baugenossenschaften entstanden bis 1929 von den Architekten Max und Bruno Taut, Martin Wagner, Franz Hoffmann u.a. ca. 650 Wohnungen als Einfamilien-, Doppel- und Reihenhäuser für ca. 1.800 Bewohner, zudem ein Gemeindehaus, ein Postamt und kleine Läden für Dinge des täglichen Bedarfs. Das für die Bilanzierung ausgewählte Doppelhaus im Falterweg wurde durch die Gemeinnützige Baugesellschaft Berlin - Heerstrasse mbH zwischen 1928-30 errichtet [KÜHNHENRICH ET AL. 2004].

Technische Details:

- Tragende Wände aus verputztem Mauerwerk mit Klinker im hochgezogenen Kellergeschoss
- Holzbalkendecken mit Dielung
- Ausgebautes Walmdach als Sparrendach mit Biberschwanzdeckung
- Holzkastenfenster



Abb. 6.2.2 Straßenansicht Falterweg 17 [KÜHNHENRICH ET AL. 2004]

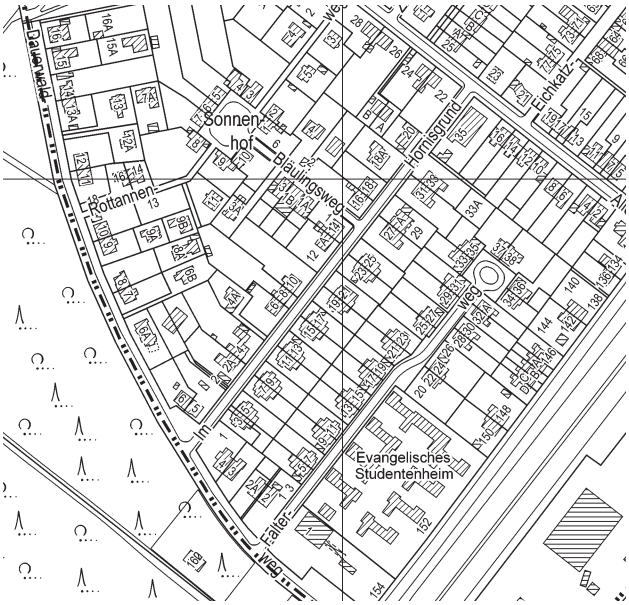


Abb. 6.2.3 SST 1 - Niedrige Bebauung mit Gartenstruktur, Maßstab 1 : 5.000

Kenndaten Gebäudetyp

1	Baualtersklasse	1919 - 1948	
2	Bauweise	Mauerwerk, massiv	
3	Anzahl der Vollgeschosse	2	
4	Anzahl der Wohneinheiten	2	
5	Anzahl der Bewohner	10	
6	Nutzung	wohnen	
7	Bruttovolumen Ve	2.599	m^3
8	Nettovolumen V	1.975	m^2
9	Nutzfläche AN	660	m^3
10	A / Ve - Verhältnis	0,36	
11	Bruttogrundrissfläche	216	m^2
12	Bruttogeschossfläche	432	m^2
13	Grundstücksfläche	825	m^2
14	GRZ	0,26	
15	GFZ	0,52	
16	Wohnfläche / Bewohner	44	m^2

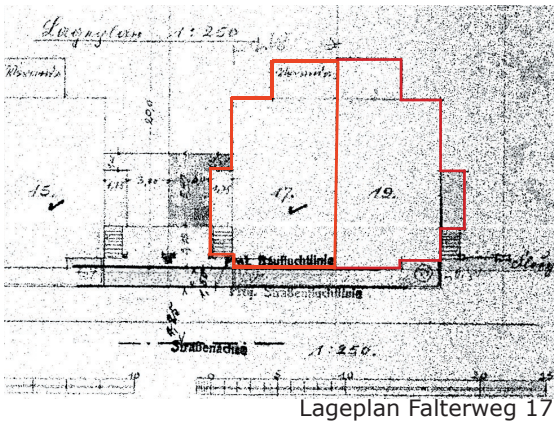
Kenndaten Stadtstrukturtyp

17	Gesamtfläche SST	18.935	m^2
18	Bruttowohnbaufläche	15.096	m^2
19	Straßenfläche	3.839	m^2
20	Bruttogrundrissfläche SST	10.395	m^2
21	Bruttogeschossfläche SST	31.185	m^2
22	Nettogeschossfläche SST	10.890	m^2
23	Anzahl der Bewohner SST	165	
24	mittlere GRZ SST	0,69	
25	mittlere GFZ SST	2,07	
26	Bruttowohnbaufäche / Gesamtfläche	0,80	
27	Straßenfläche/ Gesamtfläche	0,20	
28	Gesamtfläche SST / Bewohner	114,76	m^2
29	BWBF / Bewohner	91,49	m^2

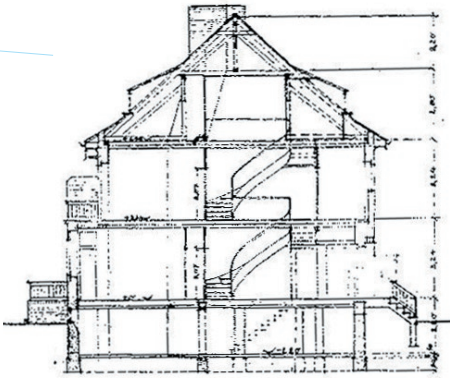
Tab. 6.2.1 Kenndatenblatt Stadtstrukturtyp 1



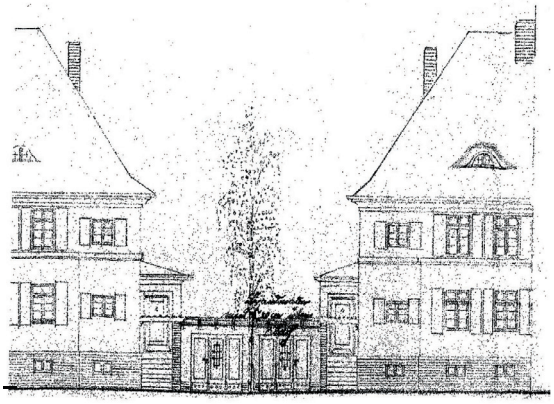
Abb. 6.2.4 SST 1 - Niedrige Bebauung mit Gartenstruktur Maßstab 1 : 2.000



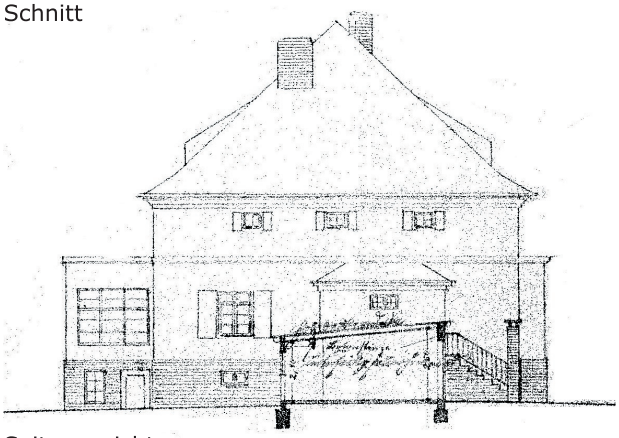
Lageplan Falterweg 17



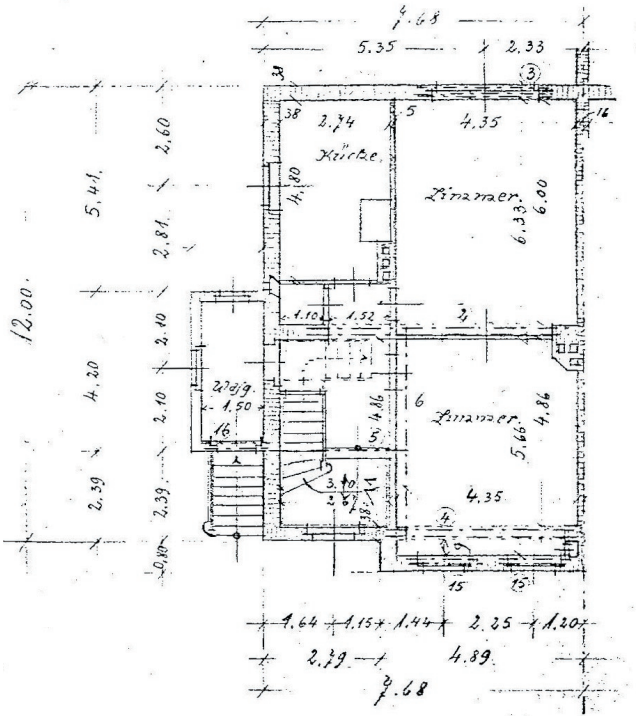
Schnitt



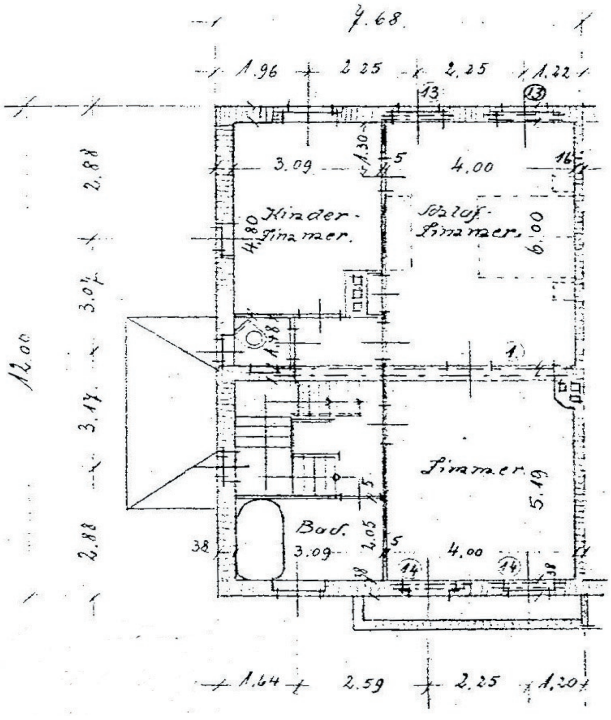
Straßenansicht



Seitenansicht



Grundriss EG



Grundriss OG

Abb. 6.2.5 Grundrisse und Ansichten der Doppelwohnhaushälfte Falterweg 17, Berlin - Eichkamp [KÜHNHENRICH ET AL. 2004]

6.2.2 Stadtstrukturtyp 2 - Zeilenbebauung der 1920er, 30er und 50er Jahre

Beispiel: Siemensstadt - Bauteil Walter Gropius, Jungfernheideweg 21-45, Berlin - Siemensstadt

Kurzbeschreibung

Anfang des 20. Jahrhunderts entstand als Reaktion auf die dicht bebauten Stadtblöcke des 19. Jahrhunderts die Typologie des modernen Zeilenbaus. Nach dem Ende der Wirtschaftskrise infolge des 1. Weltkrieges entstanden europaweit – aber besonders eindrucksvoll in Berlin – zahlreiche Großsiedlungen nach den Prinzipien des modernen Städtebaus. Die Avantgardisten der modernen Architektur wie Le Corbusier, J.P.P. Oud, Walter Gropius u.a. propagierten und realisierten Siedlungen, die Licht, Luft und Sonne für jede Wohnung vorsahen und eine Durchgrünung der Stadt ermöglichten. Die Wohnzeilen wurden zumeist ost-west-orientiert errichtet, um den Bewohnern morgens und abends eine maximale Besonnung zu gewährleisten. Standardisierung und Typisierung bei der Grundrissgestaltung und der baulichen Ausführung führten zu kürzeren Planungs- und Bauzeiten und somit zu Kostensenkungen bei der Herstellung von Wohnungen. Die Funktionalisierung der Wohnung nach betriebstechnischen Abläufen in den 1920er Jahren wurde zu einem sozialpolitischen Beitrag für die Linderung der Wohnungsnot.
1933 wurde auf dem IV. Kongress des *Congrès International d'Architecture Moderne* (CIAM) in Athen unter Federführung von Le Corbusier die *Charta von Athen* verabschiedet. Le Corbusier formulierte hier die Ziele und Methoden der funktionalen Stadtplanung, die auf der Entflechtung städtischer Funktionsbereiche und Entwicklung lebenswerter Wohn- und Arbeitsorte beruhte.
Die gegliederte und aufgelockerte Stadt [GÖDERITZ ET AL:1957] entwickelte dieses städtebauliche Leitbild mit dem Konzept dezentraler Nachbarschaften und des organischen Städtebaus weiter. Obwohl erst nach dem 2. Weltkrieg veröffentlicht, wird es als ein *retrospektives Manifest* des modernen Bauens der 1920er Jahre gesehen [BOLLERY ET AL. 1990:363].

Die Ring-Siedlung Siemensstadt entstand unter Beteiligung namhafter moderner Architekten nach dem städtebaulichen Plan von Hans Scharoun (1893 - 1972) und Martin Wagner (1885 - 1957). In zwei großen Bauabschnitten wurden in den Jahren 1928 - 1931 insgesamt 1.370 Wohnungen, 11 Läden, 5 Büros und eine Schule gebaut. Sie ist eine prototypische Wohnsiedlung des Neuen Bauens mit überwiegend ost-west-orientierten Wohnzeilen, öffentlichen Grünflächen, gemeinschaftlichen Anlagen und einer zentralen Wärmeversorgung durch ein eigenes Heizkraftwerk. Der für die Bilanzierung ausgewählte Bauabschnitt wurde von Walter Gropius (1883 - 1969) geplant. Gropius hat sich intensiv mit der Optimierung von Wohnungsgrundrissen für Minimalwohnungen, mit Zeilenbau (Siedlungen in Dessau-Törten, Karlsruhe-Dammerstock u.a.) und mit den Bedingungen industrieller Vorfertigung beschäftigt. Der viergeschossige, ost-west-orientierte Zeilenbau ist als Zweispänner konzipiert und enthält 48 3 1/2 - Zimmer-Wohnungen mit je 69 m^2 Wohnfläche [HUSE 1987:164-165].

Technische Details:

- Tragende Wände aus beidseitig verputztem Mauerwerk (38 cm)
- Stahlsteindecken
- Doppelkastenfenster mit Holzrahmen



Abb. 6.2.7 Straßenansicht Zeilenbebauung von Walter Gropius

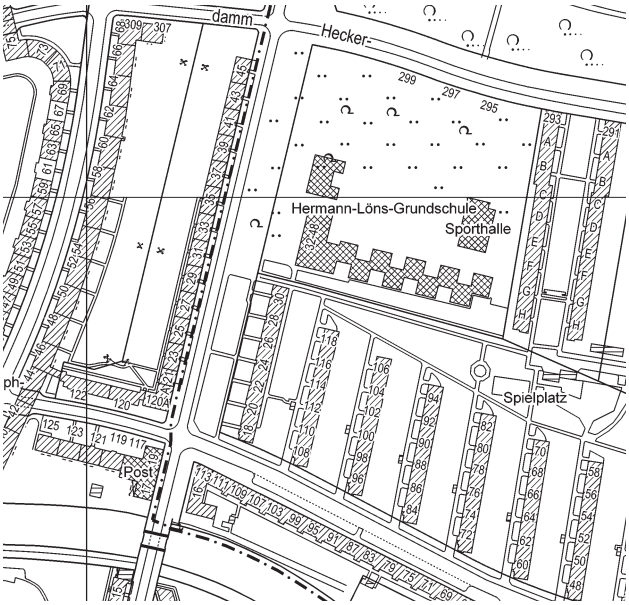


Abb. 6.2.8 SST 2 - Zeilenbebauung der 1920er bis 50er Jahre, Maßstab 1 : 5.000

Kenndaten Gebäudetyp

1	Baualtersklasse	1919 - 1948	
2	Bauweise	Mauerwerk	
3	Anzahl der Vollgeschosse	4	
4	Anzahl der Wohneinheiten	96	
5	Anzahl der Bewohner	218	
6	Nutzung	wohnen	
7	Bruttovolumen Ve	29.295	m^3
8	Nettovolumen V	23.436	m^2
9	Nutzfläche AN	8.278	m^3
10	A / Ve - Verhältnis	0,35	
11	Bruttogrundrissfläche	2.362	m^2
12	Bruttogeschossfläche	9.448	m^2
13	Grundstücksfläche	9.828	m^2
14	GRZ	0,24	
15	GFZ	0,96	
16	Wohnfläche / Bewohner	38	m^2

Kenndaten Stadtstrukturtyp

17	Gesamtfläche SST	11.950	m^2
18	Bruttowohnbaufläche	9.828	m^2
19	Straßenfläche	2.122	m^2
20	Bruttogrundrissfläche SST	2.362	m^2
21	Bruttogeschossfläche SST	9.448	m^2
22	Nettogeschossfläche SST	8.278	m^2
23	Anzahl der Bewohner SST	218	
24	mittlere GRZ SST	0,24	
25	mittlere GFZ SST	0,96	
26	Bruttowohnbaufäche / Gesamtfläche	0,82	
27	Straßenfläche/ Gesamtfläche	0,18	
28	Gesamtfläche SST / Bewohner	54,86	m^2
29	BWBF / Bewohner	45,12	m^2

Tab. 6.2.2 Kenndatenblatt Stadtstrukturtyp 2

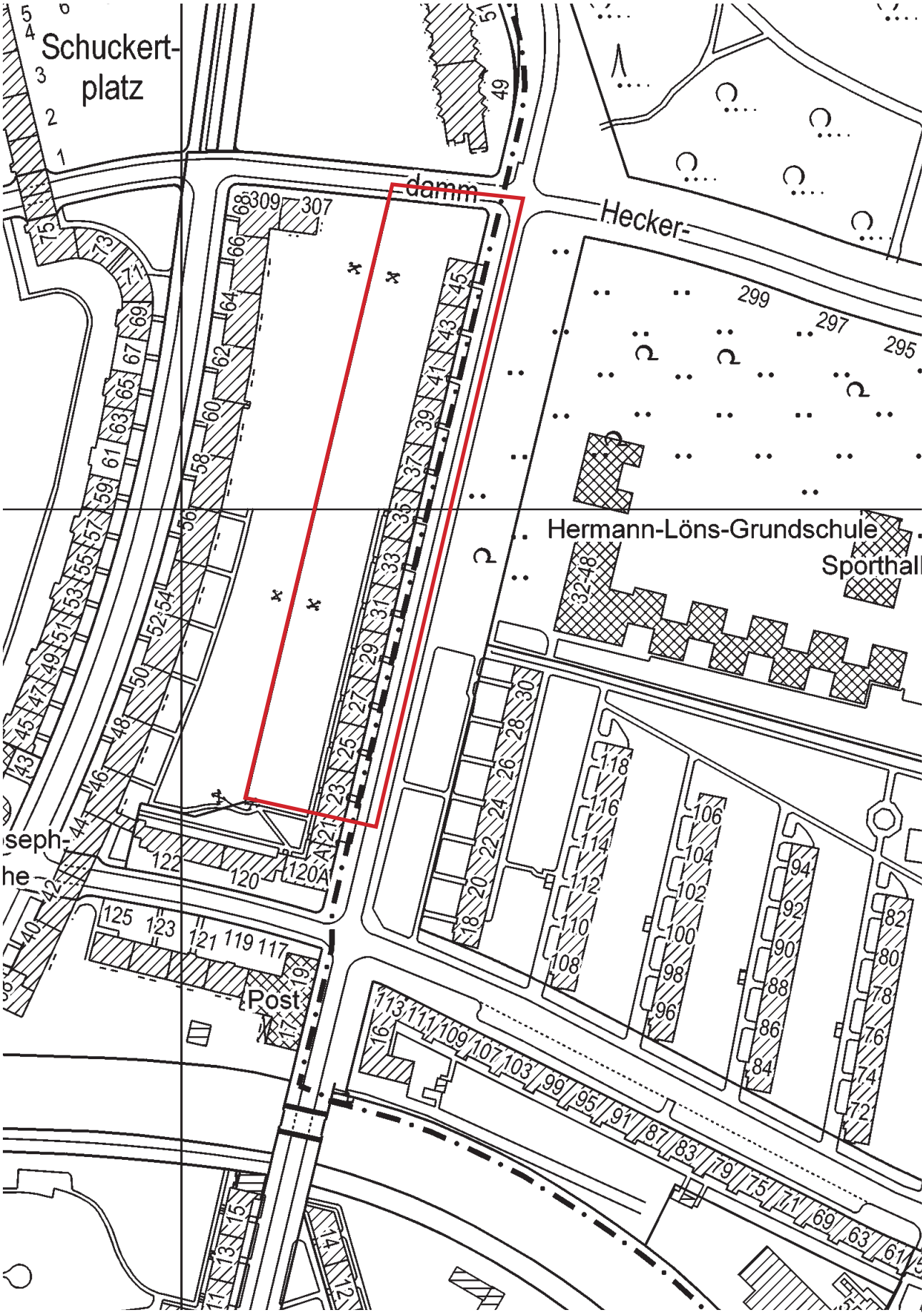
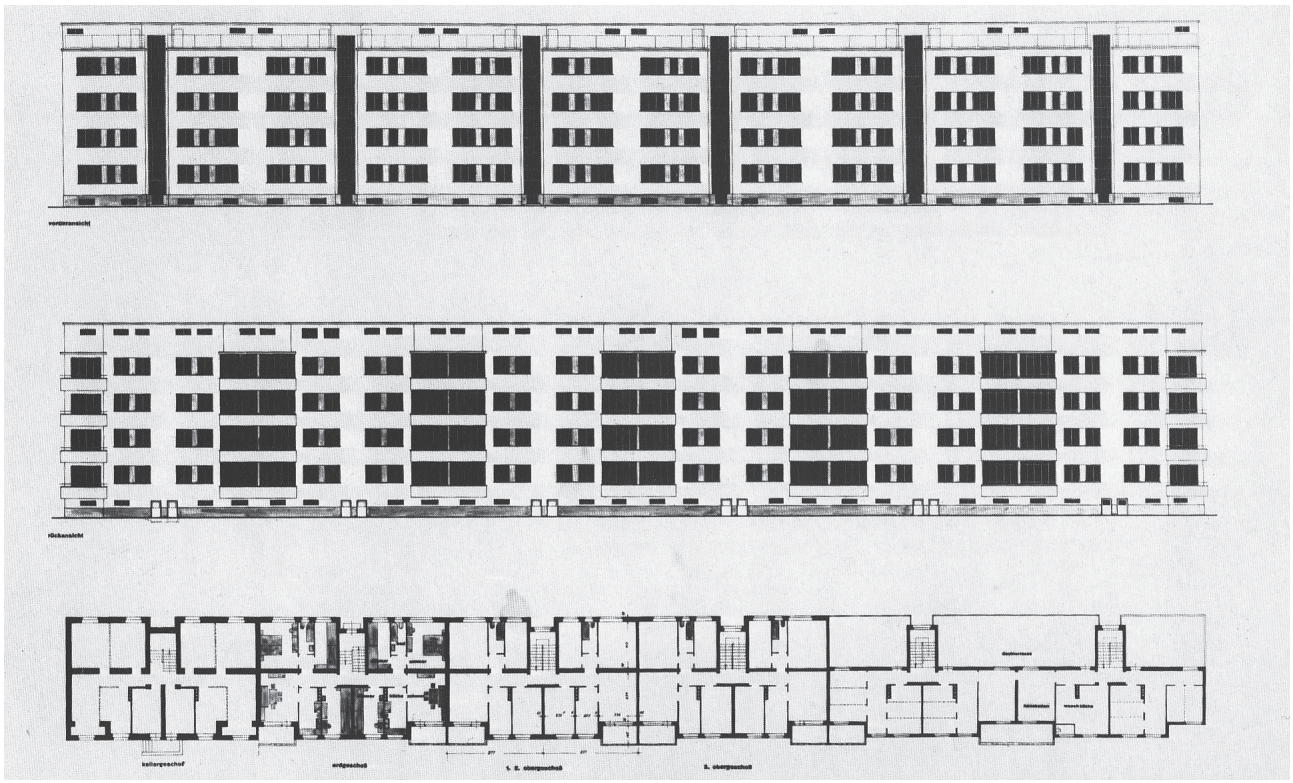


Abb. 6.2.9 SST 2 - Zeilenbebauung der 1920er, 30er und 50er Jahre Maßstab 1 : 2.000



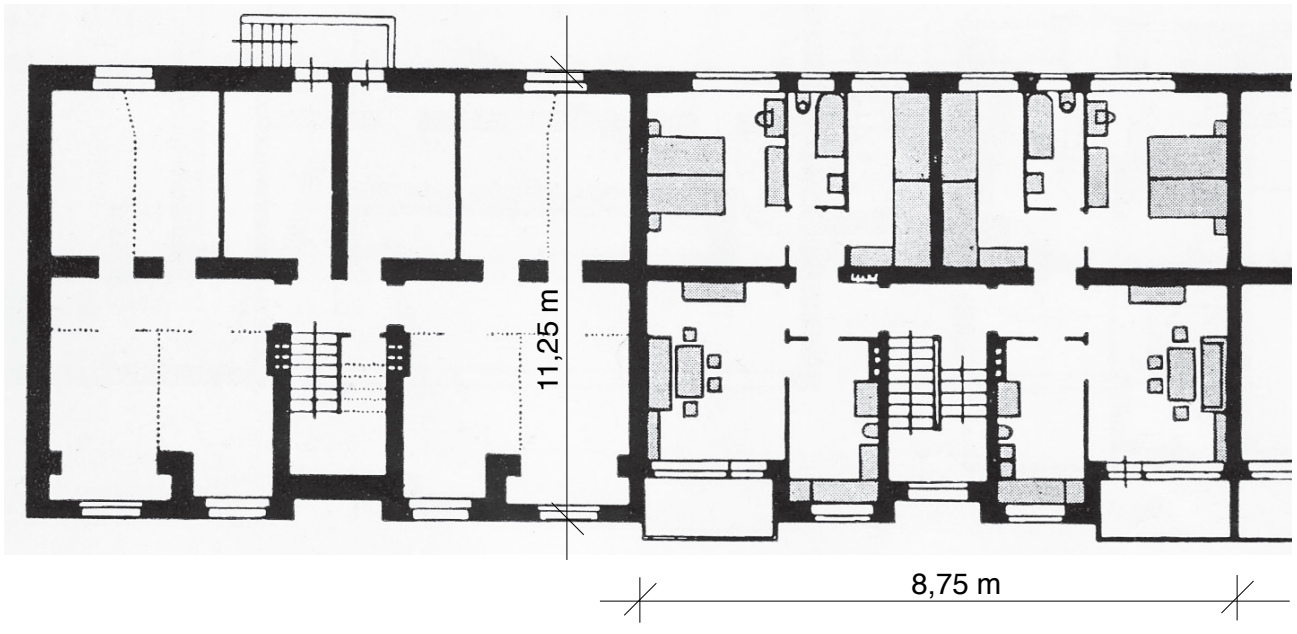


Abb. 6.2.10 Ansichten und Grundriss [HUSE 1987:165]

6.2.3 Stadtstrukturtyp 3 - Gründerzeitliche Blockrandbebauung

Beispiel: Blockrandbebauung um 1900 am Boxhagener Platz, Berlin - Friedrichshain

Kurzbeschreibung

Die zumeist fünfgeschossige Blockrandbebauung ist die vorherrschende Bebauungsstruktur innerhalb des Berliner Stadtbahnrings. Der 1862 verabschiedete Bebauungsplan für die Umgebungen von Berlin von James Hobrecht (1825 -1902) bildete die Grundlage für die große Stadterweiterung Berlins. Das rasante Bevölkerungswachstum und die Industrialisierung im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts erforderten einen großmaßstäblichen Entwicklungsplan, der die Verkehrs- und Versorgungsstrukturen (Wasserversorgung, Abwasserentsorgung, Gaswerke usw.) mit berücksichtigte. In Verbindung mit der Berliner Bauordnung von 1853, die im Wesentlichen nur elementare Anforderungen an die Standsicherheit und den baulichen Brandschutz stellte, entstand eine sehr dichte Bebauung mit einer hohen Belegungsdichte der Wohnungen. Die Gebäude der sogenannten *Mietskasernenstadt* entstanden als private Unternehmungen, wo der Eigentümer häufig selbst mit seiner Familie wohnte und die übrigen Wohnungen im Haus zur Einkommens- und Altersversicherung vermietete. Aufgrund der unterschiedlichen räumlichen Qualitäten und Ausstattungsstandards der Wohnungen entstand eine sehr differenzierte soziale Mischung auf kleinstem Raum. Als Antwort auf die soziale Frage, welche die Missstände an Überbelegung, schlechte Belüftung und Belichtung der Wohnungen anprangerte, entstand Anfang des 20. Jahrhunderts eine Reformbewegung, die zu einer Auflockerung der als menschenunwürdig empfundenen Bebauung führte [HEGEMANN 1930/1988]. In Berlin entstanden unter der Leitung des Stadtbaurats Martin Wagner in den 1920er Jahren Reformblöcke und Großsiedlungen in aufgelockerter Zeilenbebauung (SST 2).
Beim Wiederaufbau nach den Zerstörungen des 2. Weltkrieges kam es aufgrund veränderter städtebaulicher Leitbilder zu vielfachen Modifikationen des Grundtypus der Blockrandbebauung. Ende der 1970er Jahre trat eine Rückbesinnung auf die vor allem für den öffentlichen Straßenraum wichtige Blockrandbebauung ein. Unter der Leitung von Josef Paul Kleihues (1933 - 2004) fand 1984-87 die *Internationale Bauausstellung* (IBA) mit dem Thema *Kritische Rekonstruktion* (IBA neu) statt. Parallel dazu entwickelte Hardt-Waltherr Hämer (geb. 1922) unter dem Titel *Behutsame Stadterneuerung* (IBA alt) benutzerorientierte Strategien des Umbaus und der Erweiterung in den Kreuzberger Altbauquartieren. Durch die Neubewertung des Altbaubestandes fand ein Umdenken in der Sanierungspraxis statt, das europaweite Nachahmung fand.
Die typische Struktur innerhalb des S-Bahnrings sieht eine fünfgeschossige Randbebauung mit Dachgeschoss bei einer Traufkante von ca. 20 m vor. Das Erdgeschoss ist zumeist gewerblich oder als Ladenwohnung genutzt. Im Hinterhof befindet sich ebenfalls häufig eine gewerbliche Nutzung (*Kreuzberger Mischung*). Seit den 1980er Jahren wurden vielfach die Dachgeschosse zu Wohnzwecken ausgebaut, was die bauliche Dichte um 15-20% erhöht.

Technische Details:
- Monolithische Wandkonstruktionen aus zumeist verputzem Ziegelmauerwerk
- Holzbalkendecken mit Dielung und Schlackeschüttung, Spannweiten bis ca. 6 m
- Gebäudebreite abhängig von der Parzellenbreite, zumeist zwischen 16-20 m,
- Gebäudetiefe Vorderhaus ca. 13 m, Seitenflügel ca. 6 m, Geschosshöhen variieren 2.80 m - 3,80 m



Abb. 6.2.11 Straßenansicht Wühlischstr.

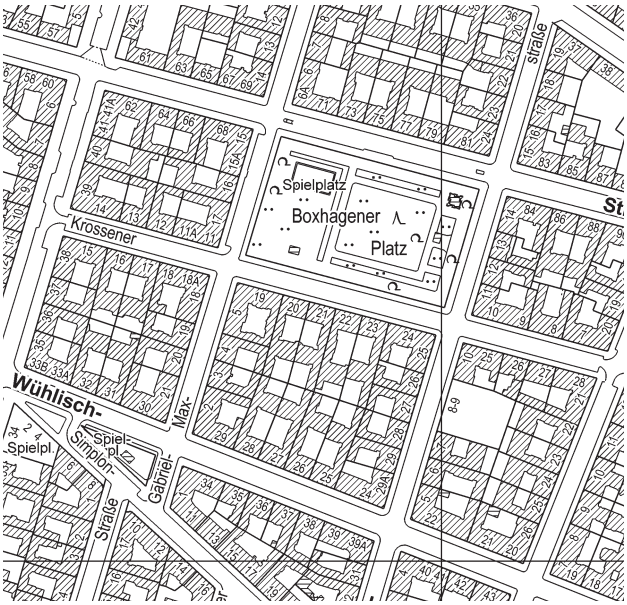


Abb. 6.2.12 SST 3 - Gründerzeitlicher Block
Maßstab 1 : 5.000

Kenndaten Gebäudetyp

1	Baualtersklasse	vor 1918	
2	Bauweise	Mauerwerk, massiv	
3	Anzahl der Vollgeschosse	5	
4	Anzahl der Wohneinheiten	ca. 30	
5	Anzahl der Bewohner	66	
6	Nutzung	wohnen	
7	Bruttovolumen Ve	11.235	m^3
8	Nettovolumen V	8.988	m^2
9	Nutzfläche AN	2.507	m^3
10	A / Ve - Verhältnis	0,25	
11	Bruttogrundrissfläche	630	m^2
12	Bruttogeschossfläche	3.150	m^2
13	Grundstücksfläche	972	m^2
14	GRZ	0,65	
15	GFZ	3,24	
16	Wohnfläche / Bewohner	38	m^2

Kenndaten Stadtstrukturtyp

17	Gesamtfläche SST	19.000	m^2
18	Bruttowohnbaufläche	14.444	m^2
19	Straßenfläche	4.556	m^2
20	Bruttogrundrissfläche SST	9.988	m^2
21	Bruttogeschossfläche SST	45.500	m^2
22	Nettogeschossfläche SST	39.952	m^2
23	Anzahl der Bewohner SST	1.051	
24	mittlere GRZ SST	0,69	
25	mittlere GFZ SST	3,15	
26	Bruttowohnbaufäche / Gesamtfläche	0,76	
27	Straßenfläche/ Gesamtfläche	0,24	
28	Gesamtfläche SST / Bewohner	18,07	m^2
29	BWBF / Bewohner	13,74	m^2

Tab. 6.2.3 Kenndatenblatt Stadtstrukturtyp 3

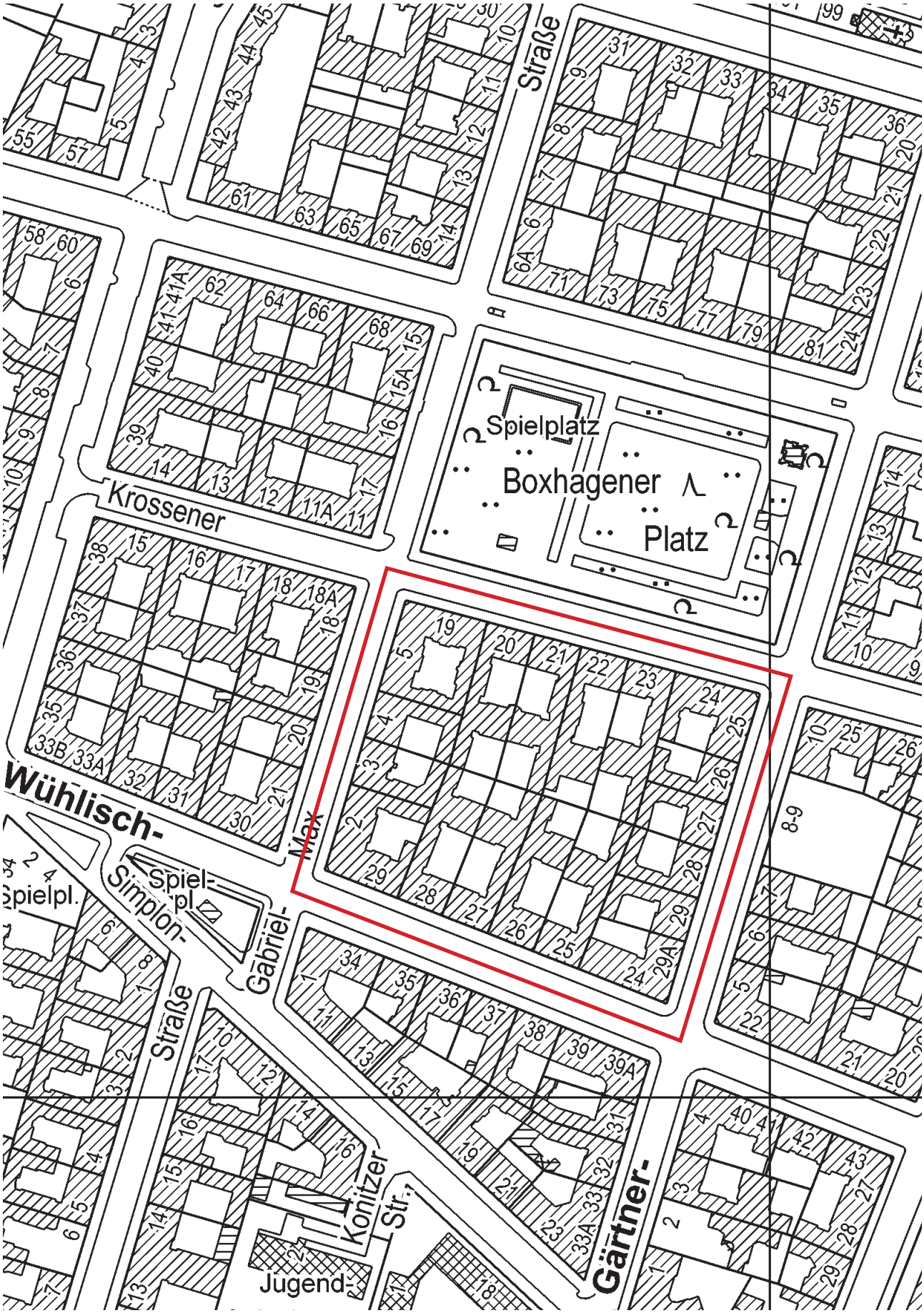


Abb. 6.2.13 SST 3 - Gründerzeitlicher Block Maßstab 1 : 2.000

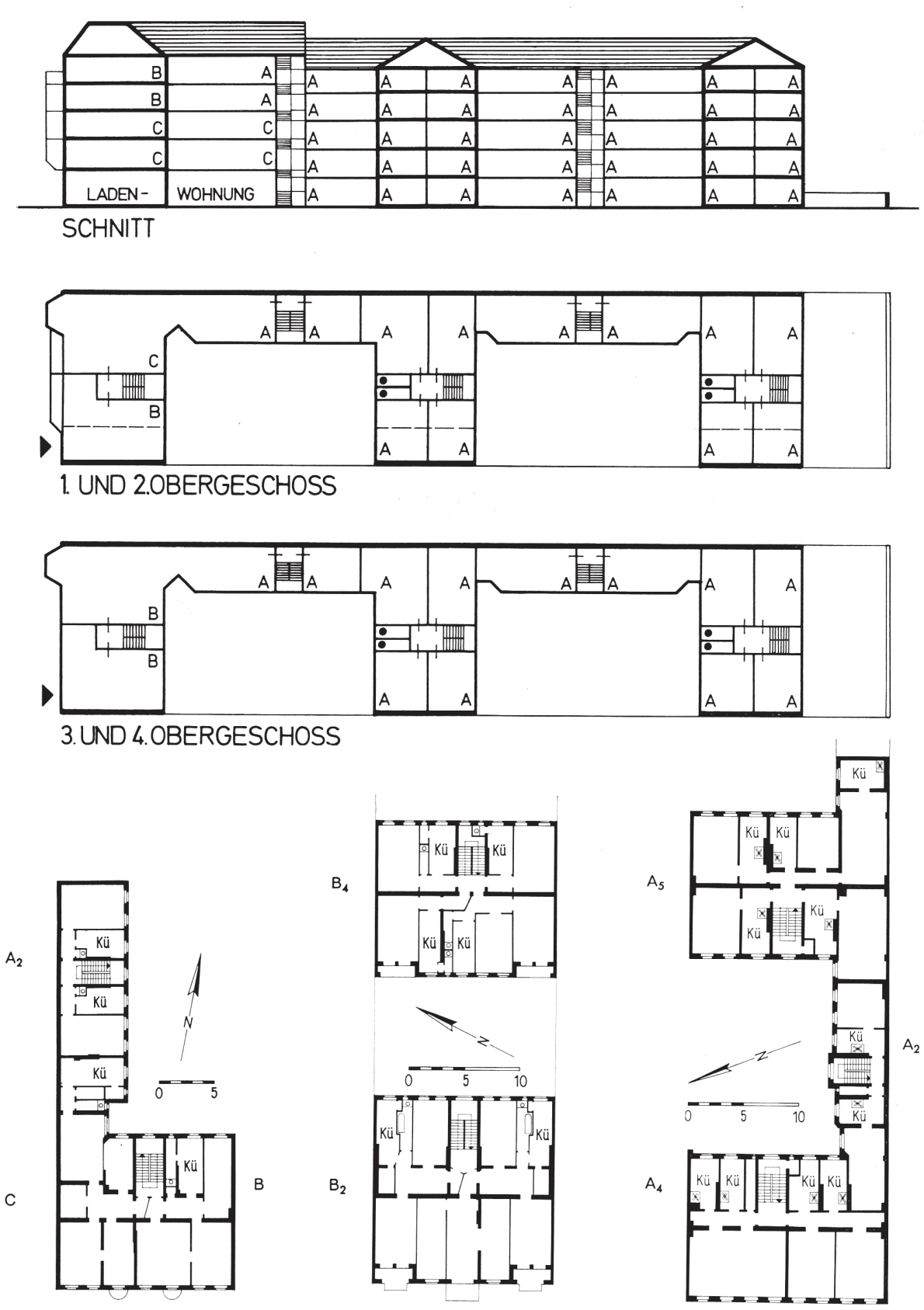


Abb. 6.2.14 Typologie der Berliner Blockrandbebauung um 1900. Längsschnitt und Grundrisse [ARCHITEKTEN- UND INGENIEURVEREIN ZU BERLIN 1974: IV B7]

6.2.4 Stadtstrukturtyp 4 - Hohe Bebauung der Nachkriegszeit

Beispiel: Typ QP 71 - Karl-Marx-Allee / Andreasstr. / Singerstr. / Koppenstr., Berlin - Friedrichshain

Kurzbeschreibung

Die Industrialisierung des Wohnungsbaus und neue städtebauliche Leitbilder führten seit Mitte der 1960er Jahren in West- und in Ostdeutschland gleichermaßen zu einer Fortsetzung der seit den 1920er Jahren praktizierten Rationalisierungstendenzen, um die rasant wachsende Nachfrage nach kostengünstigem Wohnraum zu befriedigen. Während in West-Deutschland vor allem Satellitenstädte in Stadtrandlagen entstanden, sind in der ehemaligen DDR auch in innerstädtischen Lagen zahlreiche Siedlungseinheiten errichtet worden.
Die Großsiedlungen in West-Deutschland wurden seit Anfang der 1970er Jahren von einem zunehmend plastischen Ausdruck mit starken Höhenvariationen und teilweise expressiven Bauformen geprägt. In den West-Berliner Großsiedlungen findet sich dieser Ansatz z.B. im Märkischen Viertel (1963 -1974) und in der Gropiusstadt (1962-1975). Die Wohnungswirtschaft der DDR hingegen setzte auch aufgrund ökonomischer Erwägungen auf eine strengere Rationalisierung und Standardisierung der Bausysteme. Diese führte auch zu einer größeren Standardisierung der Wohnungsgrundrisse. In Berlin sind vor allem die Großsiedlungen Marzahn (1977-1990), Hohenschönhausen (1982-1989) und Hellersdorf (seit 1986) zu nennen. Typisch für die Siedlungsstruktur ist eine Mischung von Wohnbautypologien mit Hochhauszeilen, Punkthochhäusern und Sonderbauformen mit Einrichtungen der sozialen Infrastruktur wie Schulen, Kindertagesstätten, Geschäfte und Dienstleistungseinrichtungen.

Der Höhepunkt der in der DDR systematisch betriebenen Rationalisierung in der Wohnungsproduktion war die Wohnungsbauserie 70 (WBS 70), ein Wohnhaustyp in Plattenbauweise, der Anfang der 1970er Jahre von der Deutschen Bauakademie und der Technischen Universität Dresden entwickelt wurde [HANNEMANN 1996: 86]. Das erste Gebäude wurde 1972 in Neubrandenburg errichtet. Bis 1990 wurden in der ehemaligen DDR rund 1,52 Mio. Wohnungen in Plattenbauweise errichtet, davon war der Typ WBS 70 mit einem Anteil von etwa 42 Prozent am weitesten verbreitet.
Für die Bilanzierung wurde ein innerstädtisches Quartier in Berlin-Friedrichshain mit dem Typ QP 71 gewählt. Die Wohnbauserie QP 71 ist der Nachfolgetyp von QP 64 und umfasst zwei Varianten, die zehngeschossig in Großplattenbauweise errichtet wurden [VE WOHNBAUKOMBINAT BERLIN 1973:2]. Bilanziert ist der Typ QP 64 A 104, der auf dem ausgewählten Stadtausschnitt ost-west- und nord-süd-orientiert realisiert wurde. Als Wärmeversorgung ist seit Fertigstellung ein Fernwärmeanschluss vorhanden. Die Gebäude sind bereits energetisch saniert worden.

Technische Details:

- Zehngeschossiger Vierspänner mit 156 Wohnungen und 7.560 m^2 Wohnfläche
- Gebäudelänge: 84,44 m / Gebäudebreite: 11,51 m / Gebäudehöhe: 31,00 m
- Stahlbeton-Großtafelbauweise
- Geschosshöhe: 2,80 m, Decken aus 14 cm Spannbeton
- Außenwand: dreischichtig mit 5 cm Kerndämmung



Abb. 6.2.15 Nord-Ost-Ansicht von der Karl-Marx-Allee, Februar 2011

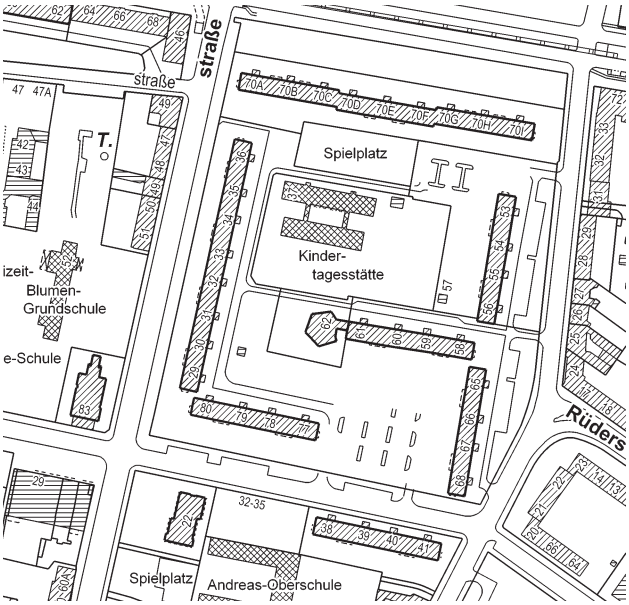


Abb. 6.2.16 SST 4 - Hohe Bebauung der Nachkriegszeit, Maßstab 1 : 5.000

Kenndaten Gebäudetyp

1	Baualtersklasse	1949 - 1978	
2	Bauweise	Großtafelbauweise	
3	Anzahl der Vollgeschosse	10	
4	Anzahl der Wohneinheiten	156	
5	Anzahl der Bewohner	210	
6	Nutzung	wohnen	
7	Bruttovolumen Ve	29.157	m^3
8	Nettovolumen V	23.325	m^2
9	Nutzfläche AN	7.560	m^3
10	A / Ve - Verhältnis	0,26	
11	Bruttogrundrissfläche	972	m^2
12	Bruttogeschossfläche	9.720	m^2
13	Grundstücksfläche	o.A.	m^2
14	GRZ	o.A.	
15	GFZ	o.A.	
16	Wohnfläche / Bewohner	36	m^2

Kenndaten Stadtstrukturtyp

17	Gesamtfläche SST	74.660	m^2
18	Bruttowohnbaufläche	61.240	m^2
19	Straßenfläche	13.420	m^2
20	Bruttogrundrissfläche SST	8.493	m^2
21	Bruttogeschossfläche SST	87.174	m^2
22	Nettogeschossfläche SST	66.688	m^2
23	Anzahl der Bewohner SST	1.852	
24	mittlere GRZ SST	0,14	
25	mittlere GFZ SST	1,42	
26	Bruttowohnbaufäche / Gesamtfläche	0,82	
27	Straßenfläche/ Gesamtfläche	0,18	
28	Gesamtfläche SST / Bewohner	40,30	m^2
29	BWBF / Bewohner	33,06	m^2

Tab. 6.2.4 Kenndatenblatt Stadtstrukturtyp 4

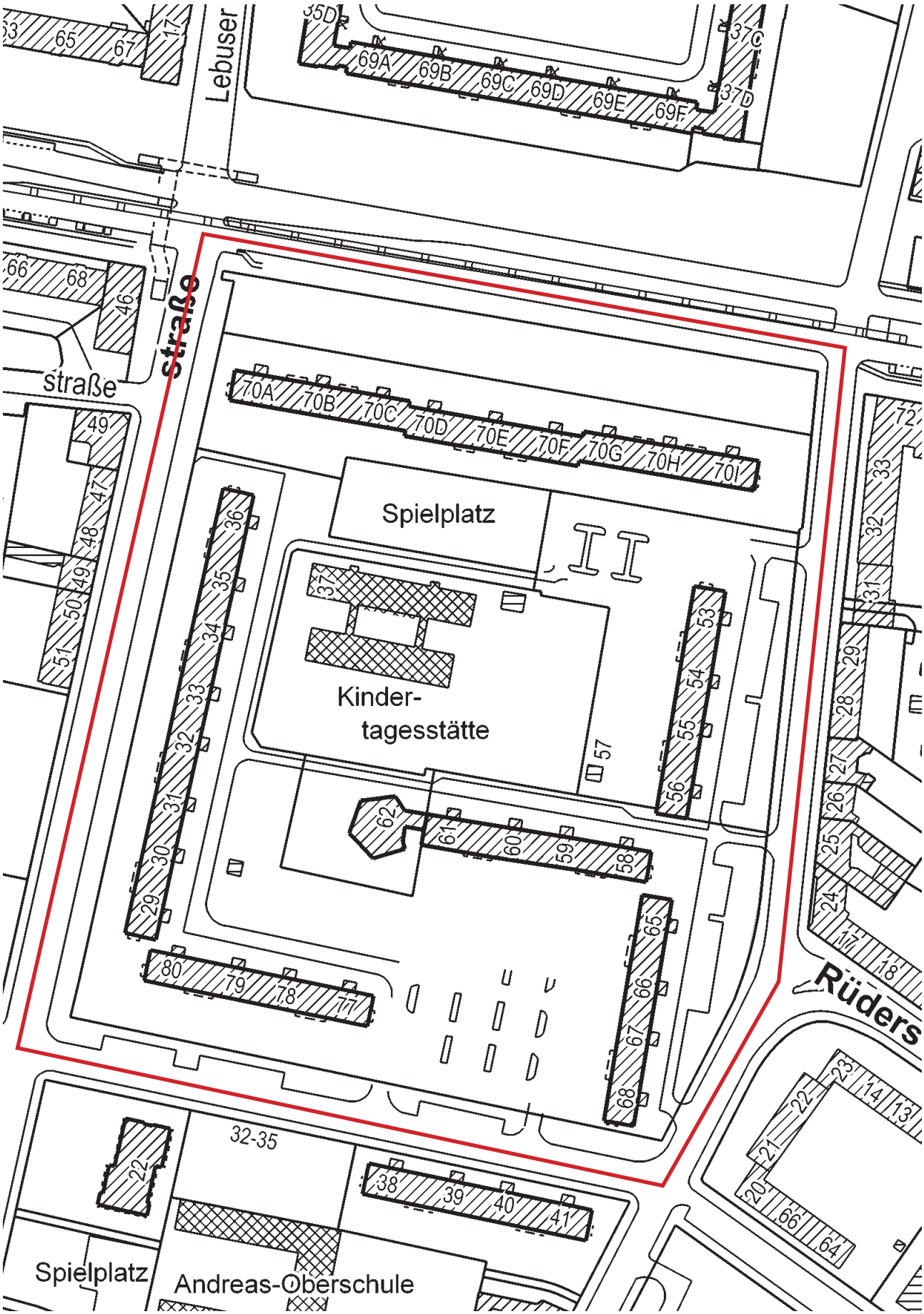


Abb. 6.2.17 SST 4 - Hohe Bebauung der Nachkriegszeit Maßstab 1 : 2.000

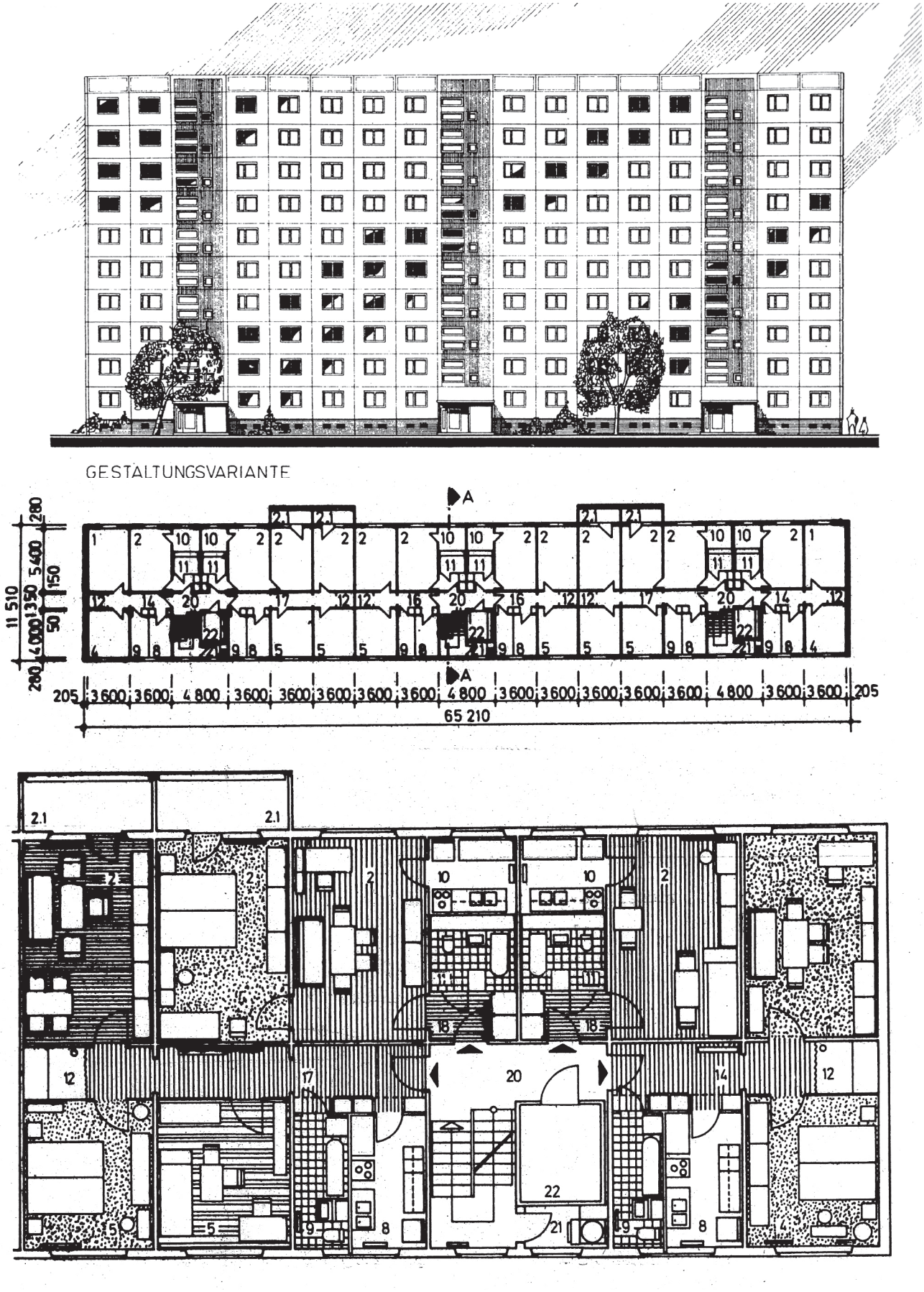


Abb. 6.2.18 Ansicht und Grundrisse der Wohnbauserien QP 71 Typ A103, Zehn Geschosse in Großtafelbauweise [VE WOHNBAUKOMBINAT BERLIN 1973]

6.3 Energetische Bilanzierung der Stadtstrukturtypen

6.3.1 Methodik zur Ermittlung des Wärmebedarfs für den Berliner Wohnungsbestand

Für eine genaue Ermittlung des Energiebedarfs zur Wärmeversorgung des Berliner Wohnungsbestands wünscht man sich idealerweise ein parzellenscharfes Gebäudekataster mit Energiekennzahlen und konkreten Angaben zu den Wärmeversorgungssystemen. In diesem Kataster sollten die Energiebedarfswerte mit dem tatsächlichen Energieverbrauch über ein Monitoring abgeglichen sein, da die Praxis zeigt, dass der reale Energieverbrauch aufgrund des Nutzerverhaltens erheblich über dem berechneten Energiebedarf liegen kann. Ein Grund für die Abweichung liegt in den nach EnEV-Berechnungen zugrundeliegenden Normwerten für Wetterdaten und Raumtemperaturen sowie im individuellen Lüftungsverhalten. Eine Erhöhung der Raumtemperatur von 1°K führt z.B. zu einem Mehrverbrauch von 5-7% Heizwärme. Ein eigenes, bislang unveröffentlichtes Monitoring hierzu kommt bei einem 2008 fertiggestellten Wohngebäude mit einem Primärbedarf von 40 kWh/(m² a) auf Abweichungen von bis zu 20%.

Ein solches Kataster liegt jedoch noch nicht vor, auch wenn von verschiedenen Seiten an einem Berliner Energie- oder Wärmeatlas gearbeitet wird. Aktuelle Forschungen zu einem Berliner CO_2-Atlas werden an der TU Berlin am Fachgebiet Bauphysik und Baukonstruktionen, Prof. Vogdt, in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Methodik der Geoinformationstechnik, Prof. Kolbe, und dem Fachgebiet Energieverfahrenstechnik und Umwandlungstechniken regenerativer Energien, Prof. Behrendt durchgeführt. Das Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Aktualisierung und Fortschreibung der Bilanzierung von CO_2-Emissionen und entsprechender Emissionskarten für den Berliner Umweltatlas.

Der hier gewählte Ansatz beruht auf der in Kapitel 6.1.3 dargestellten Kartierung der Berliner Stadtstrukturtypen [SENSTADT BERLIN 2008a]. Für die vier ausgewählten Stadtstrukturtypen existiert ein statistisches Mengengerüst. Hier stellt sich die Aufgabe, die vorhandenen Angaben über die Stadtstrukturtypen mit Statistiken zu den Berliner Gesamtwohnflächen zu korrelieren.
Die Gesamtwohnfläche in Berlin betrug im Jahr 2009 gemäß der Fortschreibung des Wohngebäude- und Wohnungsbestandes 133 Mio. m² und ist differenziert nach den Bezirken erfasst (Tab. 6.3.1).
Die Gesamtfläche der Stadtstrukturtypen umfasst knapp 250 Mio. m² (Tab. 6.3.2).
Wie viele Wohnflächen entfallen auf die jeweiligen Stadtstrukturtypen (SST)?
In welcher stadtstruktur-räumlichen Verteilung liegen diese vor? Wenn eine hinreichend genaue Zuordnung der Wohnflächen auf die SST ermittelt werden kann, lässt sich durch deren Verknüpfung mit den Ergebnissen aus der energetischen Bilanzierung (Kap. 6.3.2) der Endenergiebedarf eines jeden SST für alle dargestellten Versorgungsvarianten ableiten.

Die Zuordnung der Wohnflächen erfolgt durch eine relationale Verteilung auf Grundlage der baulichen Dichte. Aus dem Datenblatt eines jeden SST lassen sich hierfür zwei wichtige Werte entnehmen: Für die Zuordnung der Wohnflächen auf die jeweiligen SST wird die mittlere Geschossflächenzahl (GFZ) eines jeden SST herangezogen (Kenndatenblatt SST, Zeile 25), für die Zuordnung des Einwohneranteils wird die Bruttowohnflächenzahl je Einwohner verwendet (Kenndatenblatt SST, Zeile 18) (Abb.6.3.1 - 6.3.6).

Bezirk	Einwohner Stand 31.10.2010	Wohnungen 1)		Wohnfläche		
		insgesamt	je 1 000 Einwohner	insgesamt	je Wohnung	je Einwohner
	Anzahl	Anzahl	Anzahl	m^2	m^2	m^2
Mitte	333.011	191.032	573	12.528.800	65,6	37,6
Friedrichshain-Kreuzberg	269.576	146.001	543	9.686.200	66,3	35,9
Pankow	369.775	204.768	560	14.032.400	68,5	37,9
Charlottenburg-Wilmersdorf	320.291	190.976	597	14.385.100	75,3	44,9
Spandau	225.665	118.252	529	8.438.500	71,4	37,4
Steglitz-Zehlendorf	295.550	157.639	537	12.781.000	81,1	43,2
Tempelhof-Schöneberg	336.030	185.576	554	13.461.200	72,5	40,1
Neukölln	311.468	165.147	529	11.297.700	68,4	36,3
Treptow-Köpenick	242.423	128.645	534	8.869.800	68,9	36,6
Marzahn-Hellersdorf	249.729	130.798	527	9.098.200	69,6	36,4
Lichtenberg	261.340	142.922	550	9.093.000	63,6	34,8
Reinickendorf	241.406	132.808	551	9.834.400	74,0	40,7
Berlin	3.456.264	1.894.564	550	133.506.300	70,5	38,6

Tab. 6.3.1 Einwohner in Berlin nach Bezirken, Stand 31.10.2010 [STATISTISCHES LANDESAMT BERLIN 2010] sowie Wohnungs- und Wohnflächenbestand in Berlin nach Bezirken, Stand 31.12.2009 [AMT FÜR STATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2010b:8]

Diese Kennwerte gehen in die Berechnungen für die Zuordnung der Wohnflächen als Konstanten ein (Tab. 6.3.5, Spalte 1 und 2).

Zur Ermittlung der Wohnflächenanteile eines jeden SST werden zunächst die statistisch erfassten Flächen eines jeden SST pro Bezirk (Tab. 6.3.5, Spalte 3) mit der mittleren GFZ (Tab. 6.3.5, Spalte1) multipliziert. Als Produkt ergibt sich der relationale Anteil an Wohnfläche je SST im Bezirk. Die tatsächliche, statistisch ermittelte Wohnfläche im Bezirk wird durch die Summe dieser relationalen Wohnfläche dividiert und ergibt einen Korrelationsfaktor, mit dem die tatsächlichen, statistisch ermittelten Wohnflächen auf die SST verteilt werden (Tab. 6.3.5, Spalte 4).

Zur Ermittlung der Einwohneranteile (Tab. 6.3.5, Spalte 7) werden zunächst die statistisch erfassten Flächen eines jeden SST pro Bezirk (Tab. 6.3.5, Spalte 3) durch die Bruttowohnflächenzahl (Tab. 6.3.5, Spalte 2) dividiert und ergeben eine fiktive, aber relational zugeordnete Einwohneranzahl je Stadtstrukturfläche (Tab. 6.3.5, Spalte 6).
Die tatsächliche Einwohnerzahl wird durch die Summe dieser relational zugeordneten Einwohneranzahl je SST dividiert und ergibt einen weiteren Korrelationsfaktor, der als Multiplikator mit den relationalen Einwohnerzahlen eine hinreichend genaue Verteilung der tatsächlichen Einwohnerzahl auf die SST ermöglicht (Tab. 6.3.5, Spalte 7). Die Ergebnisse sind in tabellarischer und graphischer Form in Tab. 6.3.2 - 6.3.5 und Abb. 6.3.4 - 6.3.8 dargestellt.

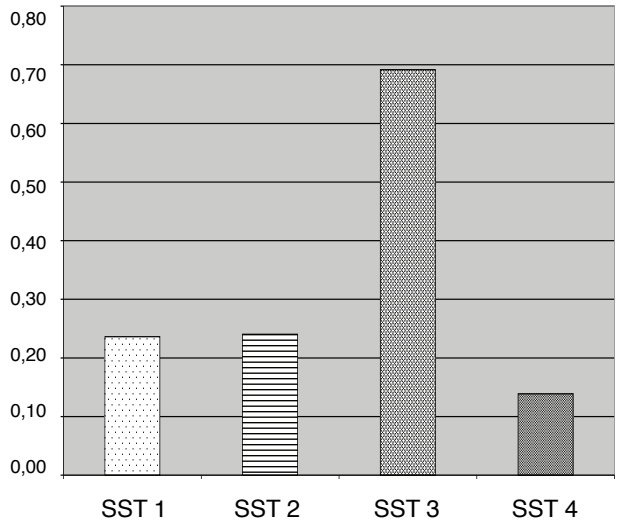


Abb. 6.3.1 Vergleich der Stadtstrukturtypen: Mittlere Grundflächenzahl (GRZ)

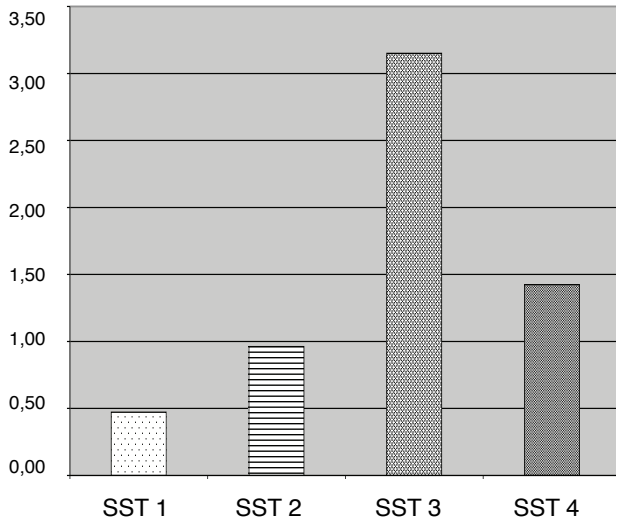


Abb. 6.3.2 Vergleich der Stadtstrukturtypen: Mittlere Geschossflächenzahl (GFZ)

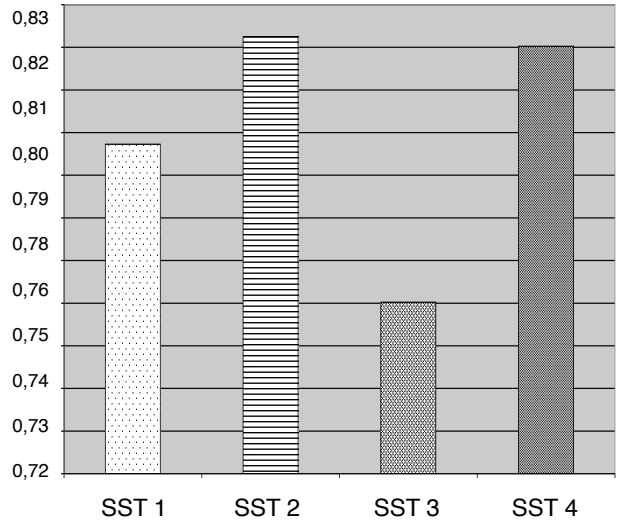


Abb. 6.3.3 Verhältnis Bruttowohnbaufäche zu Gesamtfläche

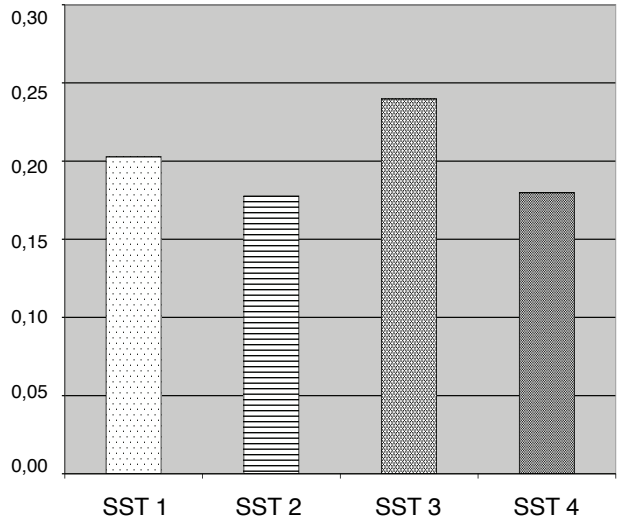


Abb. 6.3.4 Verhältnis Straßenfläche zu Gesamtfläche

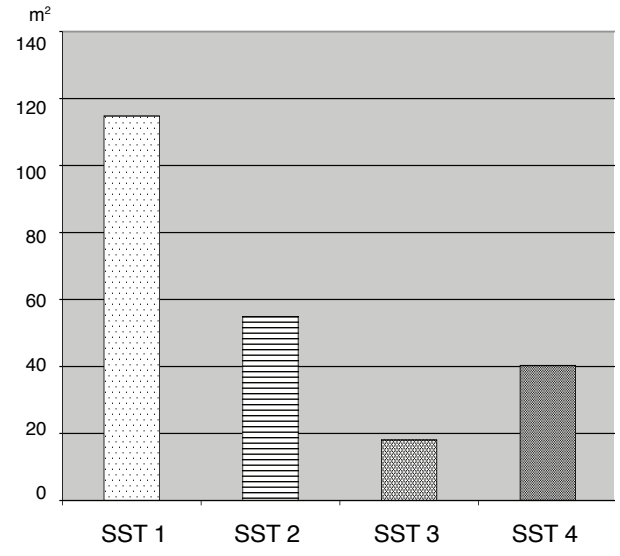


Abb. 6.3.5 Stadtstrukturtyp-Gesamtfläche je Bewohner in [m² / Bewohner]

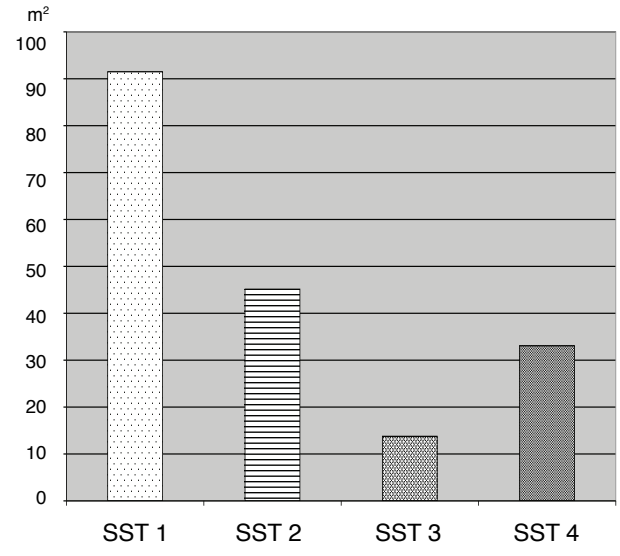


Abb. 6.3.6 Stadtstrukturtyp-Bruttowohnbaufläche je Bewohner in [m² / Bewohner]

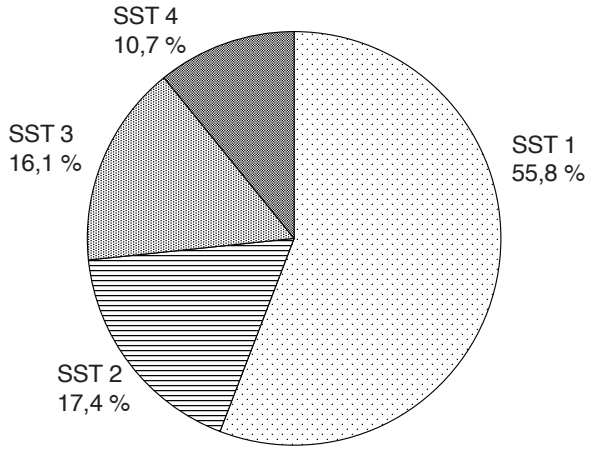


Abb. 6.3.7 Anteile der Stadtstrukturtypen an Stadtfläche

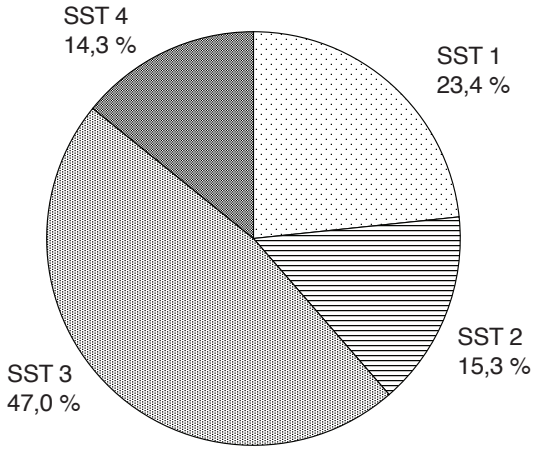


Abb. 6.3.8 Anteile der Stadtstrukturtypen an Wohnfläche

	Stadtstrukturfläche		Wohnfläche		Einwohner	
	gesamt	Anteil	gesamt	Anteil		
	m^2	%	m^2	%	Anzahl	%
SST 1	139.308.682	55,79	31.298.642	23,44	817.685	23,66
SST 2	43.459.819	17,41	20.366.265	15,25	526.484	15,23
SST 3	40.133.055	16,07	62.781.387	47,03	1.627.574	47,09
SST 4	26.781.765	10,73	19.060.006	14,28	484.521	14,02
Summe	249.683.322	100,00	133.506.300	100,00	3.456.264	100,00

Tab. 6.3.2 Anteile der Stadtstrukturtypen an Stadtfläche, Wohnfläche und Einwohnern in %

Als Indikator zur Kontrolle, ob die vorgenommen Korrelation stimmig ist, kann die Wohnfläche pro Einwohner (Tab. 6.3.5, Spalte 8) herangezogen werden. Die Werte dieser Spalte ergeben sich als Quotient aus den errechneten Wohnflächen- und Einwohnerverteilungen je SST und stimmen relativ gut mit den statistisch ermittelten Wohnflächengrößen je Einwohner überein.

Die Bilanzierung bewegt sich auf einer relativ hohen Aggregationsstufe. Eine differenziertere Betrachtung ist aber prinzipiell möglich, da entsprechende Daten bei der Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung vorliegen. Eine kleinteilige Abbildung wäre über die automatisierte Liegenschaftskarte (ALK) möglich, die Angaben zur Grundfläche und Geschossanzahl beinhaltet. Es gibt jedoch auch hier keine direkten Angaben zur Größe der Wohnfläche pro Gebäude. Teilräumlich exakte Daten sind bei den Bezirksämtern digital nicht vorhanden, und eine Ermittlung über die Bauakten wäre extrem aufwendig und datenschutzrechtlich bedenklich. Für die weitere Berechnung des Flächenbedarfs zur Energiebereitstellung ist die vorgenommene Berechnung hinreichend genau und plausibel.

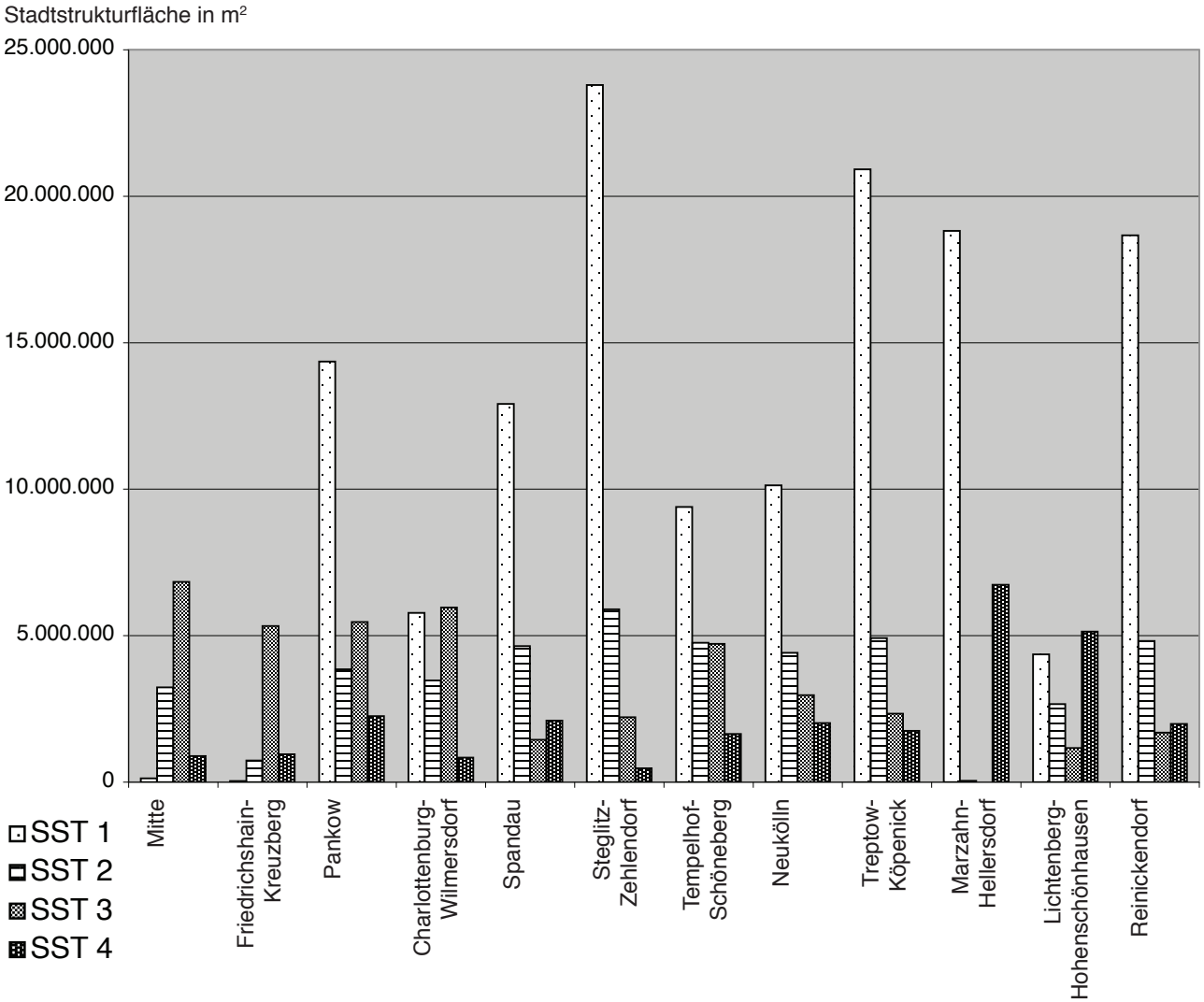


Abb. 6.3.9 Gesamtfläche der Strukturtypen mit überwiegender Wohnnutzung in den Berliner Stadtteilen Datenquelle: [SENSTADT BERLIN 2008a]

Bezirk	SST1 niedrige Bebauung mit Gartenstruktur		SST2 Zeilenbebauung der 20er, 30er, 50er J.		SST3 Blockbebauung der Gründerzeit		SST4 Hohe Bebauung der Nachkriegszeit		Summe der Strukturtypen	
	m2	%	m2	%	m2	%	m2	%	m2	%
Mitte	126.778	1,1	3.238.015	29,2	6.838.054	61,6	889.034	8,0	11.091.882	100
Friedrichshain-Kreuzberg	41.075	0,6	741.040	10,5	5.331.778	75,4	952.850	13,5	7.066.744	100
Pankow	14.357.732	55,4	3.849.774	14,8	5.469.615	21,1	2.251.448	8,7	25.928.570	100
Charlottenburg-Wilmersdorf	5.780.039	36,0	3.468.233	21,6	5.963.652	37,2	836.727	5,2	16.048.651	100
Spandau	12.908.718	61,2	4.645.648	22,0	1.444.343	6,8	2.103.933	10,0	21.102.643	100
Steglitz-Zehlendorf	23.799.580	73,5	5.899.387	18,2	2.211.539	6,8	470.268	1,5	32.380.774	100
Tempelhof-Schöneberg	9.391.618	45,8	4.761.150	23,2	4.719.679	23,0	1.642.378	8,0	20.514.826	100
Neukölln	10.129.709	51,9	4.414.848	22,6	2.966.506	15,2	2.014.679	10,3	19.525.743	100
Treptow-Köpenick	20.922.702	69,9	4.917.215	16,4	2.333.334	7,8	1.750.801	5,9	29.924.053	100
Marzahn-Hellersdorf	18.818.799	73,5	44.936	0,2	0	0,0	6.739.812	26,3	25.603.547	100
Lichtenberg-Hohenschönhausen	4.364.736	32,7	2.661.949	20,0	1.162.269	8,7	5.139.838	38,6	13.328.792	100
Reinickendorf	18.667.193	68,7	4.817.623	17,7	1.692.285	6,2	1.989.997	7,3	27.167.098	100
Berlin	139.308.682	55,8	43.459.819	17,4	40.133.055	16,1	26.781.765	10,7	249.683.322	100

Tab. 6.3.3 Gesamtfläche und Anteile der Strukturtypen mit überwiegender Wohnnutzung in den Berliner Stadtteilen. Datenquelle: [SENSTADT BERLIN 2008a]

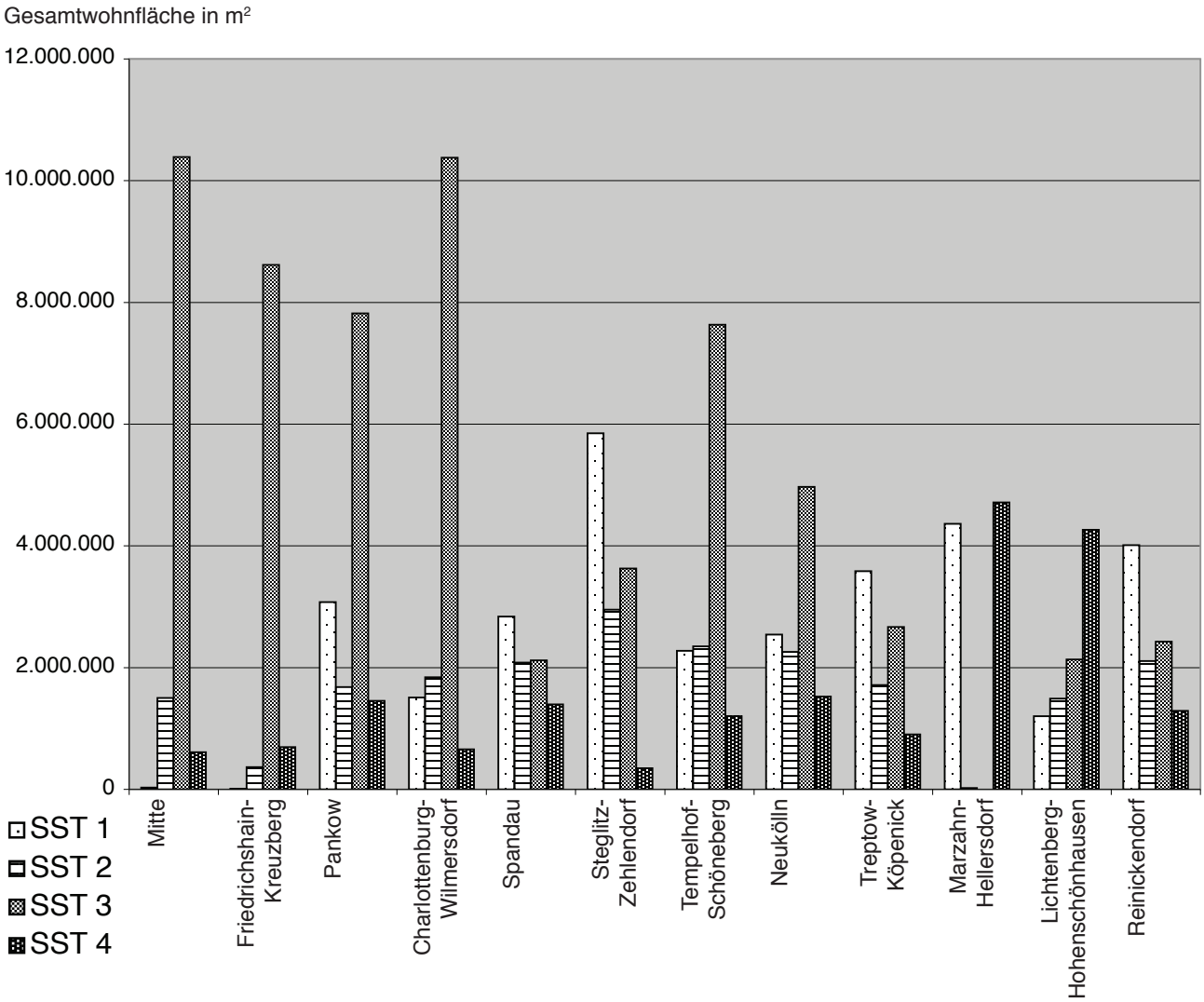


Abb. 6.3.10 Gesamtwohnflächen bezogen auf die Stadtstrukturtypen in den Berliner Stadtteilen

Bezirk	SST1 niedrige Bebauung mit Gartenstruktur		SST2 Zeilenbebauung der 20er, 30er, 50er J.		SST3 Blockbebauung der Gründerzeit		SST4 Hohe Bebauung der Nachkriegszeit		Summe Wohnflächen der Strukturtypen	
	m2	%	m2	%	m2	%	m2	%	m2	%
Mitte	28.870	0,2	1.501.222	12,0	10.388.382	82,9	610.326	4,9	12.528.800	100
Friedrichshain-Kreuzberg	9.948	0,1	365.411	3,8	8.615.110	88,9	695.731	7,2	9.686.200	100
Pankow	3.077.186	21,9	1.679.856	12,0	7.820.649	55,7	1.454.708	10,4	14.032.400	100
Charlottenburg-Wilmersdorf	1.507.649	10,5	1.841.818	12,8	10.377.673	72,1	657.959	4,6	14.385.100	100
Spandau	2.840.746	33,7	2.081.443	24,7	2.120.498	25,1	1.395.813	16,5	8.438.500	100
Steglitz-Zehlendorf	5.851.653	45,8	2.953.147	23,1	3.627.622	28,4	348.578	2,7	12.781.000	100
Tempelhof-Schöneberg	2.276.923	16,9	2.350.113	17,5	7.633.760	56,7	1.200.403	8,9	13.461.200	100
Neukölln	2.544.146	22,5	2.257.511	20,0	4.970.596	44,0	1.525.447	13,5	11.297.700	100
Treptow-Köpenick	3.584.099	40,4	1.714.946	19,3	2.666.597	30,1	904.159	10,2	8.869.800	100
Marzahn-Hellersdorf	4.364.569	48,0	21.218	0,2	0	0,0	4.712.412	51,8	9.098.200	100
Lichtenberg-Hohenschönhausen	1.201.465	13,2	1.491.838	16,4	2.134.409	23,5	4.265.288	46,9	9.093.000	100
Reinickendorf	4.011.387	40,8	2.107.741	21,4	2.426.091	24,7	1.289.181	13,1	9.834.400	100
Berlin	31.298.642	23,4	20.366.265	15,3	62.781.387	47,0	19.060.006	14,3	133.506.300	100

Tab. 6.3.4 Gesamtwohnflächen und Anteile bezogen auf die Stadtstrukturtypen in den Berliner Stadtteilen

	1	2	3	4	5	6	7	8
	mittlere GFZ SST	BWBF/ Bewohner	SST Fläche	Wohnfläche SST	Wohnfläche IST	Einwohner SST	Einwohner IST	Wohnfläche/ Einwohner
		m^2	m^2	m^2	m^2	EW	EW	m^2
Mitte								
SST 1	0,47	91,49	126.778	59.862	28.870	1.386	772	37,4
SST 2	0,96	45,12	3.238.015	3.112.817	1.501.222	71.772	39.982	37,5
SST 3	3,15	13,74	6.838.054	21.540.534	10.388.382	497.737	277.276	37,5
SST 4	1,42	33,06	889.034	1.265.524	610.326	26.892	14.981	40,7
Summe			11.091.882	25.978.736	**12.528.800**	597.787	**333.011**	37,6
Korrelationsfaktor				0,48		0,56		
Friedrichshain-Kreuzberg								
SST 1	0,47	91,49	41.075	19.395	9.948	449	279	35,7
SST 2	0,96	45,12	741.040	712.388	365.411	16.425	10.207	35,8
SST 3	3,15	13,74	5.331.778	16.795.618	8.615.110	388.096	241.178	35,7
SST 4	1,42	33,06	952.850	1.356.365	695.731	28.823	17.912	38,8
Summe			7.066.744	18.883.766	**9.686.200**	433.794	**269.576**	35,9
Korrelationsfaktor				0,51		0,62		
Pankow								
SST 1	0,47	91,49	14.357.732	6.779.406	3.077.186	156.931	81.905	37,6
SST 2	0,96	45,12	3.849.774	3.700.922	1.679.856	85.332	44.536	37,7
SST 3	3,15	13,74	5.469.615	17.229.818	7.820.649	398.129	207.790	37,6
SST 4	1,42	33,06	2.251.448	3.204.895	1.454.708	68.104	35.545	40,9
Summe			25.928.570	30.915.041	**14.032.400**	708.496	**369.775**	37,9
Korrelationsfaktor				0,45		0,52		
Charlottenburg-Wilmersdorf								
SST 1	0,47	91,49	5.780.039	2.729.208	1.507.649	63.176	33.755	44,7
SST 2	0,96	45,12	3.468.233	3.334.134	1.841.818	76.875	41.075	44,8
SST 3	3,15	13,74	5.963.652	18.786.081	10.377.673	434.090	231.937	44,7
SST 4	1,42	33,06	836.727	1.191.065	657.959	25.310	13.523	48,7
Summe			16.048.651	26.040.488	**14.385.100**	599.451	**320.291**	44,9
Korrelationsfaktor				0,55		0,53		
Spandau								
SST 1	0,47	91,49	12.908.718	6.095.214	2.840.746	141.093	77.124	36,8
SST 2	0,96	45,12	4.645.648	4.466.024	2.081.443	102.973	56.287	37,0
SST 3	3,15	13,74	1.444.343	4.549.822	2.120.498	105.133	57.467	36,9
SST 4	1,42	33,06	2.103.933	2.994.910	1.395.813	63.642	34.788	40,1
Summe			21.102.643	18.105.969	**8.438.500**	412.840	**225.665**	37,4
Korrelationsfaktor				0,47		0,55		
Steglitz-Zehlendorf								
SST 1	0,47	91,49	23.799.580	11.237.640	5.851.653	260.131	135.810	43,1
SST 2	0,96	45,12	5.899.387	5.671.287	2.953.147	130.763	68.269	43,3
SST 3	3,15	13,74	2.211.539	6.966.563	3.627.622	160.976	84.043	43,2
SST 4	1,42	33,06	470.268	669.417	348.578	14.225	7.427	46,9
Summe			32.380.774	24.544.907	**12.781.000**	566.095	**295.550**	43,2
Korrelationsfaktor				0,52		0,52		

	1	2	3	4	5	6	7	8
	mittlere	BWBF /	SST Fläche	Wohnfläche		Einwohner		Wohnfläche /
	GFZ SST	Bewohner		SST	IST	SST	IST	Einwohner
		m2	m2	m2	m2	EW	EW	m2
Tempelhof-Schöneberg								
SST 1	0,47	91,49	9.391.618	4.434.516	2.276.923	102.651	57.355	39,7
SST 2	0,96	45,12	4.761.150	4.577.060	2.350.113	105.533	58.966	39,9
SST 3	3,15	13,74	4.719.679	14.867.446	7.633.760	343.542	191.951	39,8
SST 4	1,42	33,06	1.642.378	2.337.895	1.200.403	49.680	27.758	43,2
Summe			20.514.826	26.216.917	**13.461.200**	601.406	**336.030**	40,1
Korrelationsfaktor				0,51		0,56		
Neukölln								
SST 1	0,47	91,49	10.129.709	4.783.026	2.544.146	110.718	71038	35,8
SST 2	0,96	45,12	4.414.848	4.244.148	2.257.511	97.857	62786	36,0
SST 3	3,15	13,74	2.966.506	9.344.782	4.970.596	215.930	138543	35,9
SST 4	1,42	33,06	2.014.679	2.867.858	1.525.447	60.942	39101	39,0
Summe			19.525.743	21.239.814	**11.297.700**	485.447	**311.468**	36,3
Korrelationsfaktor				0,53		0,64		
Treptow-Köpenick								
SST 1	0,47	91,49	20.922.702	9.879.241	3.584.099	228.686	98.913	36,2
SST 2	0,96	45,12	4.917.215	4.727.091	1.714.946	108.992	47.142	36,4
SST 3	3,15	13,74	2.333.334	7.350.230	2.666.597	169.842	73.461	36,3
SST 4	1,42	33,06	1.750.801	2.492.232	904.159	52.960	22.907	39,5
Summe			29.924.053	24.448.794	**8.869.800**	560.480	**242.423**	36,6
Korrelationsfaktor					0,36		0,43	
Marzahn-Hellersdorf								
SST 1	0,47	91,49	18.818.799	8.885.824	4.364.569	205.690	125.114	34,9
SST 2	0,96	45,12	44.936	43.198	21.218	996	606	35,0
SST 3	3,15	13,74	0	0	0	0	0	0,0
SST 4	1,42	33,06	6.739.812	9.593.997	4.712.412	203.872	124.009	38,0
Summe			25.603.547	18.523.019	**9.098.200**	410.559	**249.729**	36,4
Korrelationsfaktor				0,49		0,61		
Lichtenberg-Hohenschönhausen								
SST 1	0,47	91,49	4.364.736	2.060.933	1.201.465	47.707	35.952	33,4
SST 2	0,96	45,12	2.661.949	2.559.025	1.491.838	59.003	44.465	33,6
SST 3	3,15	13,74	1.162.269	3.661.259	2.134.409	84.601	63.756	33,5
SST 4	1,42	33,06	5.139.838	7.316.463	4.265.288	155.475	117.167	36,4
Summe			13.328.792	15.597.680	**9.093.000**	346.786	**261.340**	34,8
Korrelationsfaktor				0,58		0,75		
Reinickendorf								
SST 1	0,47	91,49	18.667.193	8.814.239	4.011.387	204.033	99.667	40,2
SST 2	0,96	45,12	4.817.623	4.631.349	2.107.741	106.785	52.163	40,4
SST 3	3,15	13,74	1.692.285	5.330.862	2.426.091	123.180	60.172	40,3
SST 4	1,42	33,06	1.989.997	2.832.724	1.289.181	60.195	29.405	43,8
Summe			27.167.098	21.609.175	**9.834.400**	494.194	**241.406**	40,7
Korrelationsfaktor				0,46		0,49		

Tab. 6.3.5 Übersicht zur Berechnung der Wohnflächenverteilung auf die Stadtstrukturtypen

6.3.2 Parametervariation zur energetischen Bilanzierung

Für jeden der vier gewählten Stadtstrukturtypen wurden drei verschiedene Energiestandards mit jeweils verschiedenen Anlagenkonfigurationen (V) für die Wärmeversorgung untersucht. Für die Berechnung der Parametervariationen werden jeweils drei Energiestandards (E) mit bau- und gebäudetechnischen Annahmen zugrunde gelegt.

Der **erste Energiestandard** - E1 - bezeichnet den Ausgangsfall im energetisch nicht optimierten Zustand mit folgenden spezifischen Energiekennwerten:

Heizwärmebedarf von ca.	180 -	200	kWh/(m²*a)
Endenergiebedarf von ca.	200 -	280	kWh/(m²*a)
Primärenergiebedarf von ca.	50 -	270	kWh/(m²*a)

Der **zweite Energiestandard** - E2 - bezeichnet eine energetische Optimierung mit folgenden spezifischen Energiekennwerten:

Heizwärmebedarf von ca.	180 -	200	kWh/(m²*a)
Endenergiebedarf von ca.	100 -	160	kWh/(m²*a)
Primärenergiebedarf von ca.	20 -	180	kWh/(m²*a)

Der **dritte Energiestandard** - E3 - bezeichnet eine weitergehende energetische Optimierung im Bereich des Niedrig- bzw. Niedrigstenergiestandards mit folgenden spezifischen Energiekennwerten:

Heizwärmebedarf von ca.	40 -	60	kWh/(m²*a)
Endenergiebedarf von ca.	20 -	80	kWh/(m²*a)
Primärenergiebedarf von ca.	20 -	80	kWh/(m²*a)

Die für die energetische Bilanzierung ausgewählten **Varianten zur Wärmeversorgung** sind in Tab. 6.3.6 dargestellt. Tatsächlich sind viel mehr Anlagenkonfigurationen denkbar, und es gibt weitergehende Untersuchungen dazu, z.B. zur Optimierung von Wandkonstruktionen und gebäudetechnischen Anlagen im energieeffizienten Wohnungsbau [PFEIFFER 2007]. Grundsätzlich lässt sich das Modell durch weitere Anlagenkonfigurationen erweitern. Für die überschlägige Abschätzung des Flächenbedarfs reichen aber zunächst die gewählten Versorgungsvarianten.

Die **Eingabeparameter für die energetische Bilanzierung** sind in den Tabellen 6.3.7 und 6.3.8 dargestellt. Tab. 6.3.7 zeigt die Annahmen zu den Randbedingungen wie Dichtigkeit, Wärmebrückenkorrektur und Luftwechselrate sowie die konstruktiven Annahmen (U-Werte).
Tab. 6.3.8 zeigt die Annahmen zur Wärmeerzeugung für Heizung und Warmwasser, zur Lüftung, zum spezifischen Transmissionswärmeverlust sowie die Rechenergebnisse zur Anlagenaufwandszahl und die spezifischen Energiekennwerte. Die Maßnahmen zur Erzielung der energetischen Optimierung sind jeweils in den einzelnen graphischen Variantenvergleichen der Stadtstrukturtypen vermerkt.

		V1 Ölbrenn.	V2 Gasbrenn.	V3 Gas+Solar	V4 KWK	V5 Holzpellets	V6 Holz+Solar	V7 Wärmepu.	V8 Nachtstrom
SST 1	E1	x	x	x	x	x	x		x
	E2	x	x	x	x	x	x		
	E3			x	x	x	x	x	
SST 2	E1	x	x	x	x	x	x		
	E2	x	x	x	x	x	x		
	E3			x	x	x	x	x	
SST 3	E1	x	x	x	x	x	x		x
	E2	x	x	x	x	x	x		
	E3			x	x	x	x	x	
SST 4	E1		x	x	x	x	x		
	E2		x	x	x	x	x		
	E3			x	x	x	x	x	

Tab. 6.3.6 Übersicht zu den bilanzierten Varianten für die Wärmeversorgung

Versorgungsvarianten:	**Energieträger Heizung:**	**Energieträger Warmwasser:**
V1 – Ölbrennwertkessel	Heizöl	Heizöl
V2 – Gasbrennwertkessel	Erdgas	Erdgas
V3 – Gasbrennwertkessel mit solarthermischen Kollektoren	Erdgas	Solarthermie 60%, Gas 40%
V4 – Nah- oder Fernwärme Kraftwärmekopplung	KWK fossil	KWK fossil
V5 – Biomassewärmeerzeuger	Holzpellets	Holzpellets
V6 – Biomassewärmeerzeuger mit solarthermischen Kollektoren	Holzpellets	Solarthermie 60% Holzpellets 40%
V7 – Erdreich/Wasser-Wärmepumpe mit Lüftungsanlage und Wärmerückgewinnung Bereitstellungsgrad > 80%	Strom und Umgebungswärme	Strom und Umgebungswärme
V8 – Gasbrennwertkessel mit elektr. Trinkwassererwärmung	Erdgas	Strom

			1	2	3	4	5	6
			Gebäudeart	Dachraum beheizt	Keller beheizt	Bauweise	Dichtheitsprüfung	Luftwechselrate
SST 1	E1	V1	freistehend	ja	ja	schwer	offens. Undichtheiten	1,00 h-1
		V2						
		V3						
		V4						
		V5						
		V6						
		V8						
	E2	V1	freistehend	ja	ja	schwer	ohne Dichtheitsprüfung	0,70 h-1
		V2						
		V3						
		V4						
		V5						
		V6						
	E3	V3	freistehend	ja	ja	schwer	mit Dichtheitsprüfung	0,60 h-1
		V4						
		V5						
		V6						
		V7						
SST 2	E1	V1	freistehend	nein	nein	schwer	offens. Undichtheiten	1,00 h-1
		V2						
		V3						
		V4						
		V5						
		V6						
	E2	V1	freistehend	nein	nein	schwer	ohne Dichtheitsprüfung	0,70 h-1
		V2						
		V3						
		V4						
		V5						
		V6						
	E3	V3	freistehend	nein	nein	schwer	mit Dichtheitsprüfung	0,60 h-1
		V4						
		V5						
		V6						
		V7						
SST 3	E1	V1	Eckhaus	nein	nein	schwer	offens. Undichtheiten	1,00 h-1
		V2						
		V3						
		V4						
		V5						
		V6						
		V8						
	E2	V1	Eckhaus	nein	nein	schwer	ohne Dichtheitsprüfung	0,70 h-1
		V2						
		V3						
		V4						
		V5						
		V6						
	E3	V3	Eckhaus	nein	nein	schwer	mit Dichtheitsprüfung	0,60 h-1
		V4						
		V5						
		V6						
		V7						
SST 4	E1	V2	freistehend	nein	nein	schwer	offens. Undichtheiten	1,00 h-1
		V3						
		V4						
		V5						
		V6						
	E2	V2	freistehend	nein	nein	schwer	ohne Dichtheitsprüfung	0,70 h-1
		V3						
		V4						
		V5						
		V6						
	E3	V3	freistehend	nein	nein	schwer	mit Dichtheitsprüfung	0,60 h-1
		V4						
		V5						
		V6						
		V7						

7 Wärmebrückenkorrektur in W/(m2K)	8 Außenwände U-Wert W/(m2K)	9 Fenster U-Wert W/(m2K)	10 Dach U-Wert W/(m2K)	11 oberste Geschossdeck eU-W. W/(m2K)	12 Kellerdecke U-Wert W/(m2K)	13 Kellerboden U-Wert W/(m2K)	14 Kellerwand U-Wert W/(m2K)
pauschal 0,1	1,87	3,8	1,4	-	-	1,22	1,87
optimiert 0,05	1,87	1,4	0,28	-	-	0,34	0,39
optimiert 0,05	0,39	1,4	0,28	-	-	0,34	0,39
pauschal 0,1	1,8	2,7	-	2,1	1,2	-	-
optimiert 0,05	1,8	1,4	-	0,3	0,4	-	-
optimiert 0,05	0,29	1,4	-	0,3	0,4	-	-
pauschal 0,1	1,7	2,7	-	1,0	1,2	-	-
optimiert 0,05	1,7	1,4	-	0,2	0,4	-	-
optimiert 0,05	straßenseitig 0,8 / hofseitig 0,3	0,8	-	0,2	0,4	-	-
pauschal 0,1	1,75	3,0	1,13	-	0,91	-	-
optimiert 0,05	1,75	1,4	0,35	-	0,35	-	-
optimiert 0,05	0,32	1,4	0,28	-	0,35	-	-

Tab. 6.3.7 Variantenvergleich - Übersicht zu den Eingabeparametern (1) Randbedingungen und Konstruktion

			15	16	17	18
			Wärmeerzeuger Heizung	Wärmeerzeuger Warmwasser	Energieträger	Speicher vorhanden
SST 1	E1	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	Heizöl	nein
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	Erdgas	nein
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	Erdgas	ja
		V4	KWK	KWK	fossil	nein
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	Holzpellets	nein
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	Holzpellets	ja
		V8	Standard-Heizkessel	Nachtstrom	Erdgas, Strom	nein
	E2	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	Heizöl	nein
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	Erdgas	nein
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	Erdgas	ja
		V4	KWK	KWK	fossil	nein
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	Holzpellets	nein
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	Holzpellets	ja
	E3	V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	Erdgas	ja
		V4	KWK	KWK	fossil	nein
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	Holzpellets	nein
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	Holzpellets	ja
		V7	Erdreich/Wasser-WP	Erdreich/Wasser-WP	Strom	nein
SST 2	E1	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	Heizöl	nein
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	Erdgas	nein
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	Erdgas	ja
		V4	KWK	KWK	fossil	nein
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	Holzpellets	nein
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	Holzpellets	ja
	E2	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	Heizöl	nein
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	Erdgas	nein
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	Erdgas	ja
		V4	KWK	KWK	fossil	nein
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	Holzpellets	nein
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	Holzpellets	ja
	E3	V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	Erdgas	ja
		V4	KWK	KWK	fossil	nein
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	Holzpellets	nein
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	Holzpellets	ja
		V7	Erdreich/Wasser-WP	Erdreich/Wasser-WP	Strom	nein
SST 3	E1	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	Heizöl	nein
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	Erdgas	nein
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	Erdgas	ja
		V4	KWK	KWK	fossil	nein
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	Holzpellets	nein
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	Holzpellets	ja
		V8	Standard-Heizkessel	Nachtstrom	Erdgas, Strom	nein
	E2	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	Heizöl	nein
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	Erdgas	nein
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	Erdgas	ja
		V4	KWK	KWK	fossil	nein
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	Holzpellets	nein
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	Holzpellets	ja
	E3	V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	Erdgas	ja
		V4	KWK	KWK	fossil	nein
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	Holzpellets	nein
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	Holzpellets	ja
		V7	Erdreich/Wasser-WP	Erdreich/Wasser-WP	Strom	nein
SST 4	E1	V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	Erdgas	nein
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	Erdgas	ja
		V4	KWK	KWK	fossil	nein
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	Holzpellets	nein
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	Holzpellets	ja
	E2	V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	Erdgas	nein
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	Erdgas	ja
		V4	KWK	KWK	fossil	nein
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	Holzpellets	nein
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	Holzpellets	ja
	E3	V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	Erdgas	ja
		V4	KWK	KWK	fossil	nein
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	Holzpellets	nein
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	Holzpellets	ja
		V7	Erdreich/Wasser-WP	Erdreich/Wasser-WP	Strom	nein

19	20	21	22	23	24
Art der Lüftungsanlage	Anlagen-aufwandszahl	spez. Transmissions-wärmeverlust W/(m² K)	spez. Heizwärmebedarf kWh/ (m² a)	spez. Endenergiebedarf kWh/ (m² a)	spez. Primärenergiebedarf kWh/ (m² a)
ohne	1,34	1,482	189,5	243,2	270,7
	1,34			243,2	270,7
	1,27			230,0	256,3
	0,75			215,9	152,2
	0,27			266,9	55,0
	0,26			253,9	52,9
	1,39			234,6	280,2
ohne	1,43	0,889	105,5	151,3	168,7
	1,43			151,3	168,7
	1,30			137,2	153,4
	0,79			131,1	92,8
	0,32			177,5	37,3
	0,30			164,1	35,1
Abluft/Zuluft mit WRG	1,15	0,394	49,0	56,3	67,5
	0,76			55,7	45,0
	0,38			73,1	22,9
	0,35			60,8	20,9
	0,80			18,1	47,2
ohne	1,28	1,709	179,0	221,6	245,1
	1,28			221,6	245,1
	1,24			213,7	236,6
	0,74			202,9	142,6
	0,26			250,1	50,7
	0,26			242,0	49,5
ohne	1,32	1,118	106,8	142,4	157,6
	1,32			142,4	157,6
	1,25			134,5	149,1
	0,77			129,9	91,5
	0,27			159,7	32,7
	0,26			151,7	31,4
Abluft/Zuluft mit WRG	1,06	0,499	48,2	54,0	64,2
	0,74			56,0	44,7
	0,35			70,5	21,1
	0,32			62,2	19,8
	0,76			17,7	46,1
ohne	1,29	1,567	188,5	234,6	259,9
	1,29			234,6	259,9
	1,24			225,1	249,5
	0,74			212,7	149,5
	0,27			262,6	53,4
	0,26			253,2	51,8
	1,36			229,5	273,3
ohne	1,33	1,107	120,0	159,4	176,7
	1,33			159,4	176,7
	1,26			149,9	166,4
	0,76			143,6	101,1
	0,27			177,0	36,2
	0,26			167,6	34,7
Abluft/Zuluft mit WRG	1,09	0,497	58,0	65,5	77,0
	0,74			66,1	51,9
	0,35			87,2	24,6
	0,33			77,6	23,0
	0,76			20,6	53,5
ohne	1,30	1,814	129,3	184,5	184,5
	1,24			159,1	176,2
	0,76			152,7	107,4
	0,27			187,8	38,3
	0,26			179,9	37,0
ohne	1,34	1,417	87,6	121,2	134,2
	1,26			113,4	125,8
	0,78			110,6	77,9
	0,28			135,7	27,8
	0,27			127,8	26,6
Abluft/Zuluft mit WRG	1,02	0,609	36,1	40,7	49,4
	0,74			43,7	36,1
	0,38			56,2	18,2
	0,35			48,1	16,9
	0,77			14,4	37,4

Tab. 6.3.8 Variantenvergleich - Übersicht zu den Eingabeparametern (2) Gebäudetechnik mit Wärmeerzeuger für Heizung und Warmwasser und spezifische Energiekennwerte

6.3.3 Ergebnisse der energetischen Bilanzierung

SST 1 - Zweifamilienhaus

Optimierungsmaßnahmen für E2:
Fenster neu: Isolierverglasung, U-Wert = 1,4 W/(m²K)
Dach gedämmt: 16 cm Zwischensparren-Dämmrolle, WLG 035
Kellerboden gedämmt: 8cm Mineralwolle, WLG 040

Optimierungsmaßnahmen für E3:
AW gedämmt: 8 cm Mineralwolle, WLG 040
Fenster neu: Isolierverglasung, U-Wert = 0,8 W/(m²K)
Dach gedämmt: 16 cm Zwischensparren-Dämmrolle, WLG 035
Kellerboden gedämmt: 8 cm Mineralwolle, WLG 040

Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E1/V1 Ölkessel	E1/V3 Gas+Solar	E1/V4 KWK	E1/V5 Holz
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	189,5	189,5	189,5	189,5	189,5
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	243,2	243,2	230,0	215,9	266,9
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	270,7	270,7	256,3	152,2	55,0

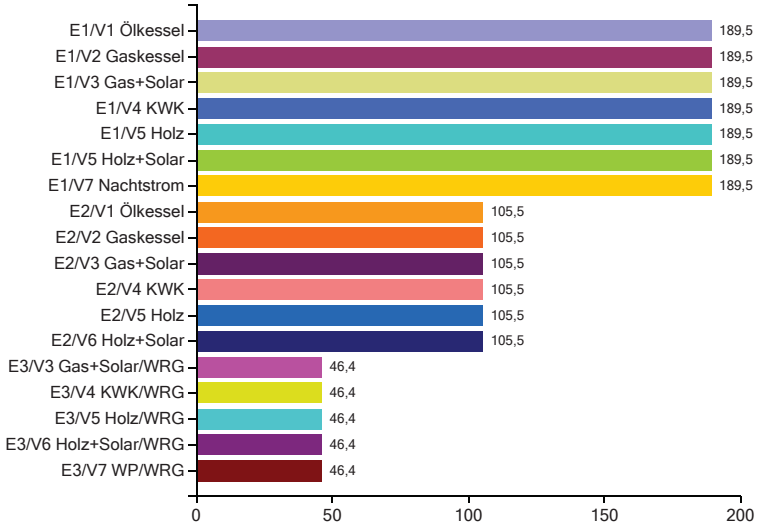
Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E1/V5 Holz+Solar	E1/V7 Nachtstrom	E2/V1 Ölkessel	E2/V2 Gaskessel
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	189,5	189,5	189,5	105,5	105,5
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	243,2	253,9	234,6	151,3	151,3
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	270,7	52,9	280,2	168,7	168,7

Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E2/V3 Gas+Solar	E2/V4 KWK	E2/V5 Holz	E2/V6 Holz+Solar
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	189,5	105,5	105,5	105,5	105,5
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	243,2	137,2	131,1	177,5	164,1
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	270,7	153,4	92,8	37,3	35,1

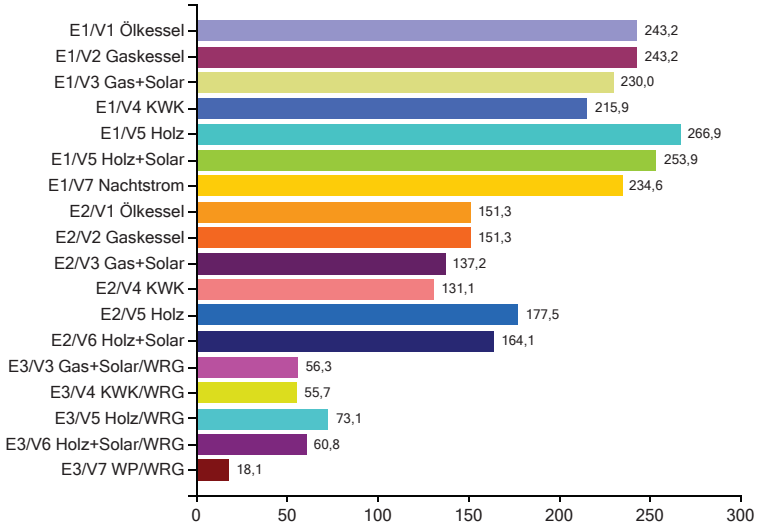
Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E3/V3 Gas+Solar /WRG	E3/V4 KWK/WRG	E3/V5 Holz/WRG	E3/V6 Holz+Solar/WRG
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	189,5	46,4	46,4	46,4	46,4
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	243,2	56,3	55,7	73,1	60,8
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	270,7	67,5	45,0	22,9	20,9

Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E3/V7 WP/WRG
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	189,5	46,4
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	243,2	18,1
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	270,7	47,2

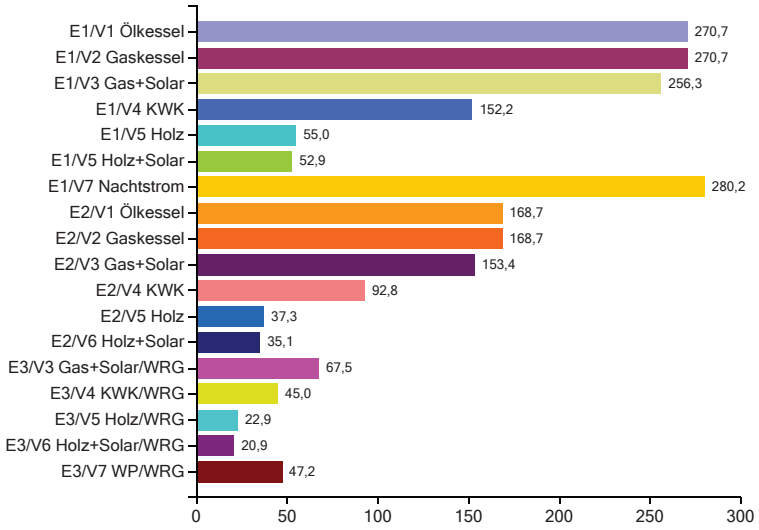
Tab. 6.3.9 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 1
Variantenvergleich verschiedener Energiestandards und Wärmeversorgungssysteme



spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]



spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]



spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]

Abb. 6.3.11 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 1
Graphischer Variantenvergleich, alle Angaben in [kWh/(m²a)]

SST 2 - Zeilenbebauung

Optimierungsmaßnahmen für E2:
Fenster neu: Isolierverglasung, U-Wert = 1,4 W/(m²K)
Oberste Geschossdecke gedämmt: 12 cm Bodendämmplatte, WLG 035
Kellerdecke gedämmt: 8 cm Mineralwolle, WLG 040

Optimierungsmaßnahmen für E3:
Außenwand gedämmt: 10 cm Fassadendämmplatte, WLG 035
Fenster neu: Isolierverglasung, U-Wert = 1,4 W/(m²K)
Oberste Geschossdecke gedämmt: 12 cm Bodendämmplatte, WLG 035
Kellerdecke gedämmt: 8 cm Mineralwolle, WLG 040

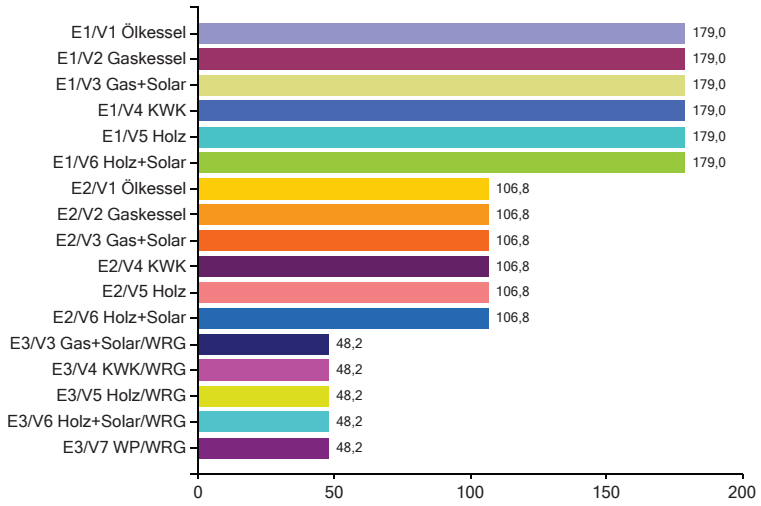
Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E1/V1 Ölkessel	E1/V3 Gas+Solar	E1/V4 KWK	E1/V5 Holz
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	179,0	179,0	179,0	179,0	179,0
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	221,6	221,6	213,7	202,9	250,1
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	245,1	245,1	236,6	142,6	50,7

Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E1/V6 Holz+Solar	E2/V1 Ölkessel	E2/V2 Gaskessel	E2/V3 Gas+Solar
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	179,0	179,0	106,8	106,8	106,8
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	221,6	242,0	142,4	142,4	134,5
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	245,1	49,5	157,6	157,6	149,1

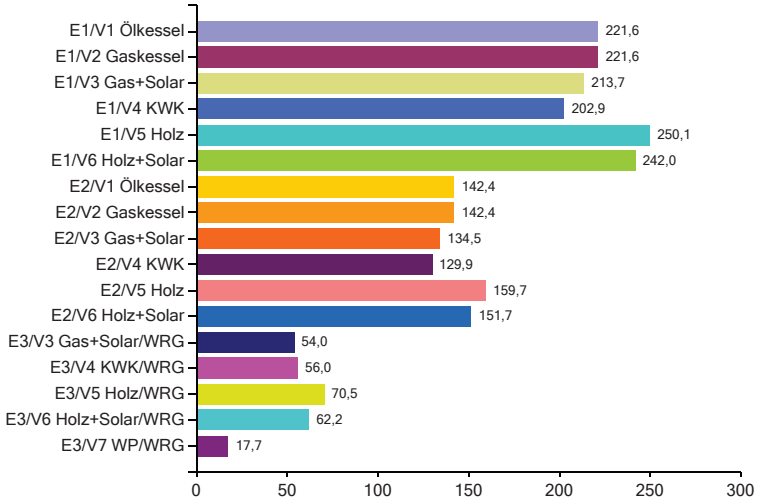
Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E2/V4 KWK	E2/V5 Holz	E2/V6 Holz+Solar	E3/V3 Gas+Solar /WRG
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	179,0	106,8	106,8	106,8	48,2
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	221,6	129,9	159,7	151,7	54,0
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	245,1	91,5	32,7	31,4	64,2

Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E3/V4 KWK/WRG	E3/V5 Holz/WRG	E3/V6 Holz+Solar/WRG	E3/V7 WP/WRG
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	179,0	48,2	48,2	48,2	48,2
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	221,6	56,0	70,5	62,2	17,7
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	245,1	44,7	21,1	19,8	46,1

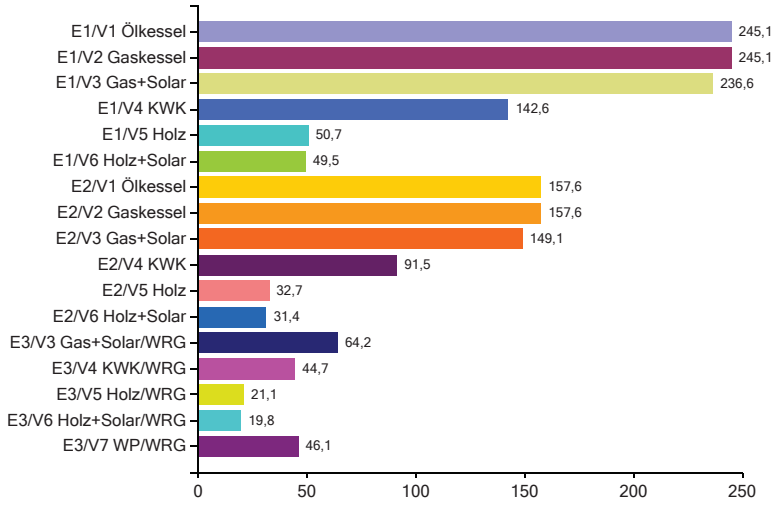
Tab. 6.3.10 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 2
Variantenvergleich verschiedener Energiestandards und Wärmeversorgungssysteme



spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]



spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]



spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]

Abb. 6.3.12 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 2
Graphischer Variantenvergleich, alle Angaben in [kWh/(m²a)]

SST 3 - Gründerzeitlicher Blockrand (Mitteltyp)

Optimierungsmaßnahmen für E2:
Fenster neu: Isolierverglasung, U-Wert = 1,4 W/(m²K)
Oberste Geschossdecke gedämmt: 14 cm Bodendämmplatte, WLG 035
Kellerdecke gedämmt: 8 cm Mineralwolle, WLG 040

Optimierungsmaßnahmen für E3:
Außenwand hofseitig gedämmt: 8 cm Fassadendämmplatte, WLG 035
Außenwand straßenseitig: 3 cm Wärmedämmputz
Fenster neu: Isolierverglasung, U-Wert = 0,8 W/(m²K)
Oberste Geschossdecke gedämmt: 14 cm Bodendämmplatte, WLG 035
Kellerdecke gedämmt: 8 cm Mineralwolle, WLG 040

Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E1/V1 Ölkessel	E1/V3 Gas+Solar	E1/V4 KWK	E1/V5 Holz
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	194,8	194,8	194,8	194,8	194,8
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	242,2	242,2	232,2	219,1	270,6
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	268,4	268,4	257,5	154,0	55,1

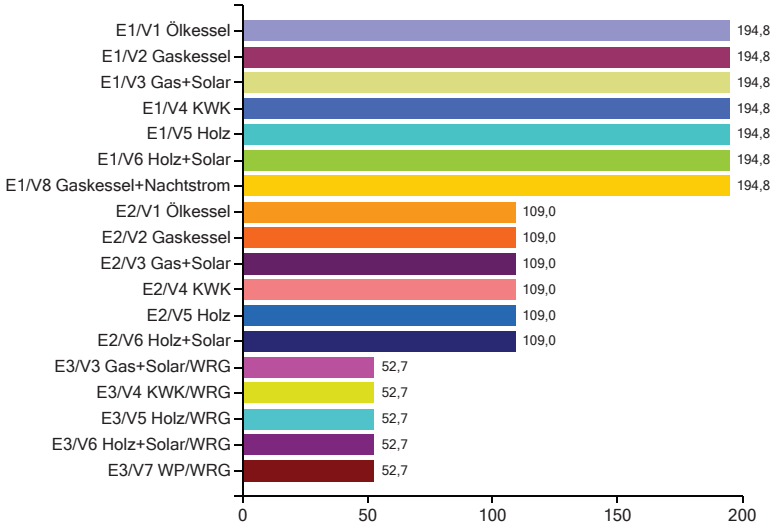
Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E1/V6 Holz+Solar	E1/V8 Gaskessel +Nachtstrom	E2/V1 Ölkessel	E2/V2 Gaskessel
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	194,8	194,8	194,8	109,0	109,0
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	242,2	260,8	236,8	148,0	148,0
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	268,4	53,4	281,5	164,2	164,2

Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E2/V3 Gas+Solar	E2/V4 KWK	E2/V5 Holz	E2/V6 Holz+Solar
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	194,8	109,0	109,0	109,0	109,0
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	242,2	138,0	132,5	163,3	153,5
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	268,4	153,3	93,4	33,5	31,9

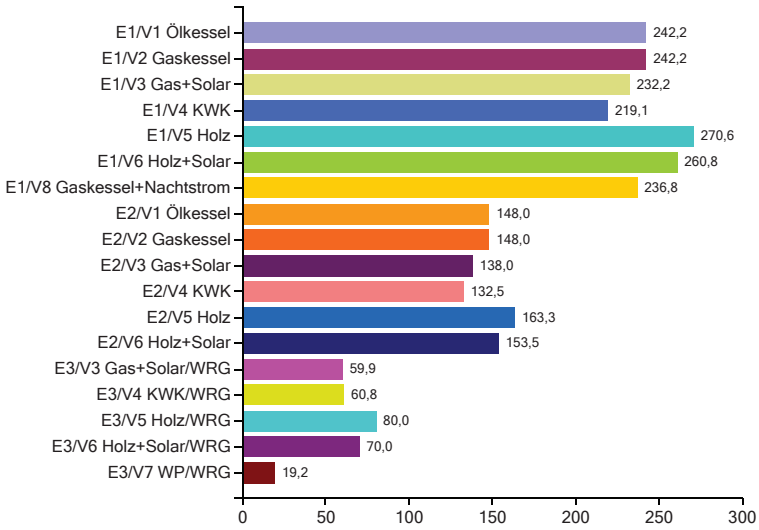
Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E3/V3 Gas+Solar /WRG	E3/V4 KWK/WRG	E3/V5 Holz/WRG	E3/V6 Holz+Solar/WRG
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	194,8	52,7	52,7	52,7	52,7
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	242,2	59,9	60,8	80,0	70,0
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	268,4	70,9	48,2	23,2	21,5

Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E3/V7 WP/WRG
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	194,8	52,7
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	242,2	19,2
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	268,4	49,9

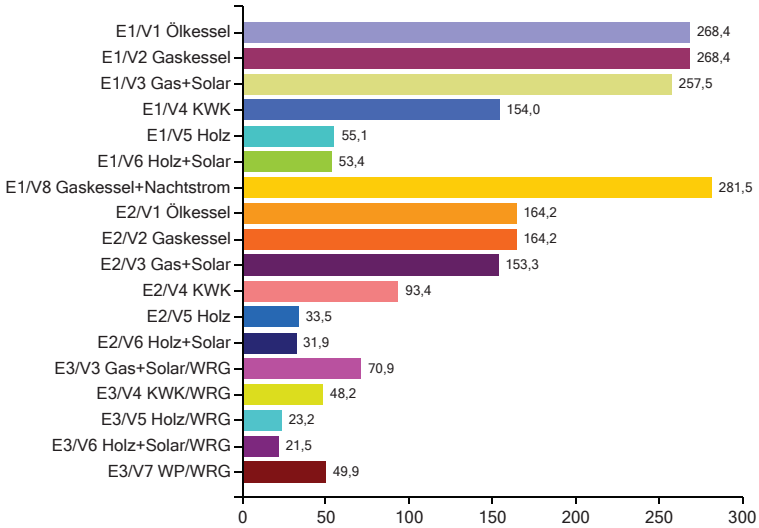
Tab. 6.3.11 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 3 / Mitteltyp
Variantenvergleich verschiedener Energiestandards und Wärmeversorgungssysteme



spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]



spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]



spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]

Abb. 6.3.13 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 3 / Mitteltyp
Graphischer Variantenvergleich, alle Angaben in [kWh/(m²a)]

SST 3 - Gründerzeitlicher Blockrand (Ecktyp)

Optimierungsmaßnahmen für E2:
Fenster neu: Isolierverglasung, U-Wert = 1,4 W/(m²K)
Oberste Geschossdecke gedämmt: 14 cm Bodendämmplatte, WLG 035
Kellerdecke gedämmt: 8 cm Mineralwolle, WLG 040

Optimierungsmaßnahmen für E3:
Außenwand hofseitig gedämmt: 8 cm Fassadendämmplatte, WLG 035
Außenwand straßenseitig: 3 cm Wärmedämmputz
Fenster neu: Isolierverglasung, U-Wert = 0,8 W/(m²K)
Oberste Geschossdecke gedämmt: 14 cm Bodendämmplatte, WLG 035
Kellerdecke gedämmt: 8 cm Mineralwolle, WLG 040

Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E1/V1 Ölkessel	E1/V3 Gas+Solar	E1/V4 KWK	E1/V5 Holz
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	188,5	188,5	188,5	188,5	188,5
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	234,6	234,6	225,1	212,7	262,6
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	259,9	259,9	249,5	149,5	53,4

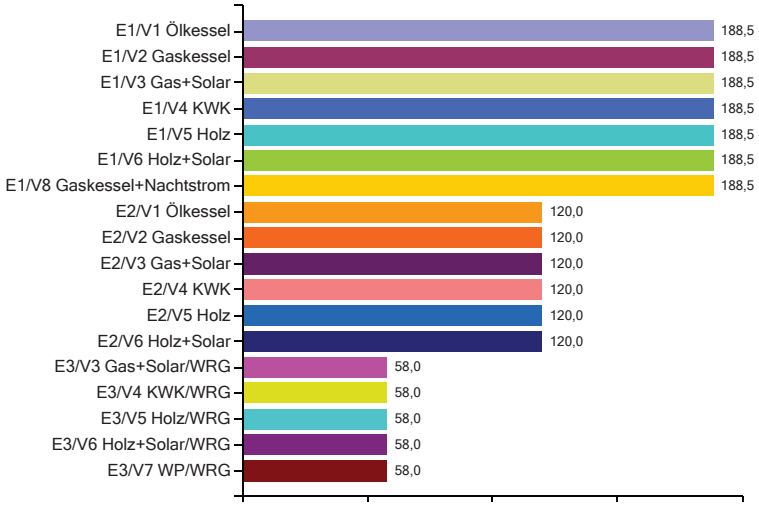
Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E1/V6 Holz+Solar	E1/V8 Gaskessel +Nachtstrom	E2/V1 Ölkessel	E2/V2 Gaskessel
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	188,5	188,5	188,5	120,0	120,0
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	234,6	253,2	229,5	159,4	159,4
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	259,9	51,8	273,3	176,7	176,7

Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E2/V3 Gas+Solar	E2/V4 KWK	E2/V5 Holz	E2/V6 Holz+Solar
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	188,5	120,0	120,0	120,0	120,0
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	234,6	149,9	143,6	177,0	167,6
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	259,9	166,4	101,1	36,2	34,7

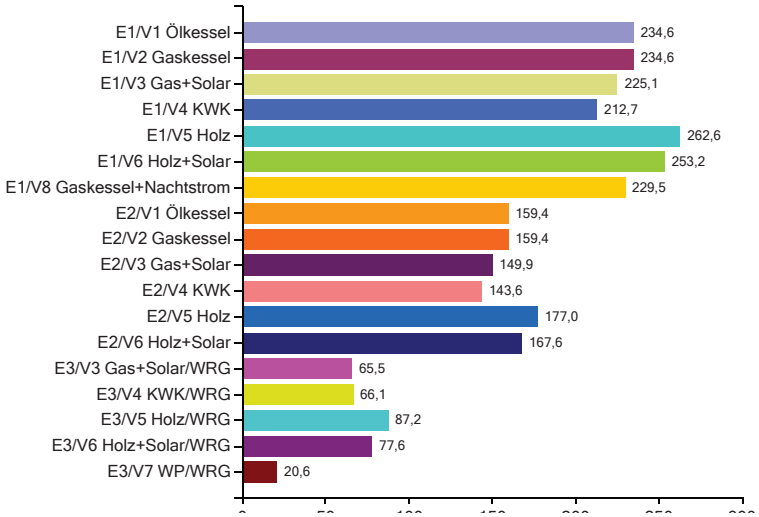
Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E3/V3 Gas+Solar /WRG	E3/V4 KWK/WRG	E3/V5 Holz/WRG	E3/V6 Holz+Solar/WRG
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	188,5	58,0	58,0	58,0	58,0
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	234,6	65,5	66,1	87,2	77,6
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	259,9	77,0	51,9	24,6	23,0

Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E3/V7 WP/WRG
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	188,5	58,0
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	234,6	20,6
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	259,9	53,5

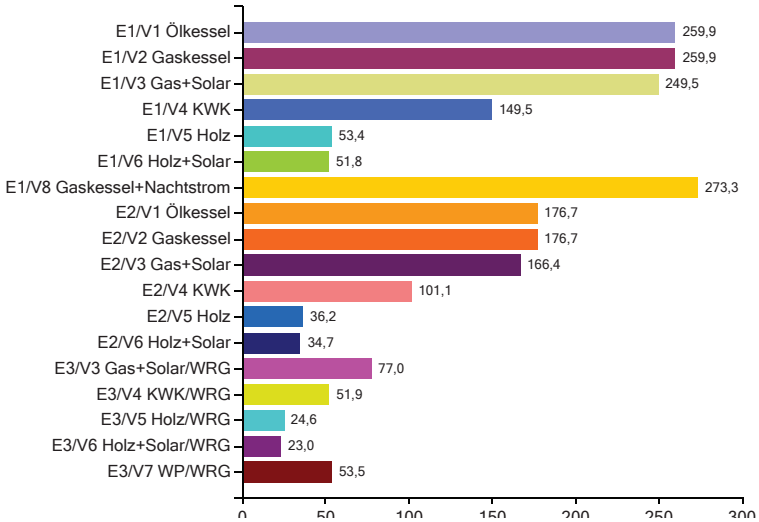
Tab. 6.3.12 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 3 / Ecktyp
Variantenvergleich verschiedener Energiestandards und Wärmeversorgungssysteme



spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]



spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]



spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]

Abb. 6.3.14 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 3 / Ecktyp
Graphischer Variantenvergleich, alle Angaben in [kWh/(m²a)]

SST 4 - Hohe Bebauung der Nachkriegszeit (Nord-Süd-orient.)

Optimierungsmaßnahmen für E2:
Fenster neu: Isolierverglasung, U-Wert = 1,4 W/(m²K)
Dach gedämmt: 7,5 cm Flachdach-Dämmplatte, WLG 035
Kellerdecke gedämmt: 8 cm Mineralwolle, WLG 040

Optimierungsmaßnahmen für E3:
Außenwand gedämmt: 8 cm Fassadendämmplatte WDV 040
Fenster neu: Isolierverglasung, U-Wert = 1,4 W/(m²K)
Dach gedämmt: 10 cm Flachdach-Dämmplatte, WLG 035
Kellerdecke gedämmt: 8 cm Mineralwolle, WLG 040

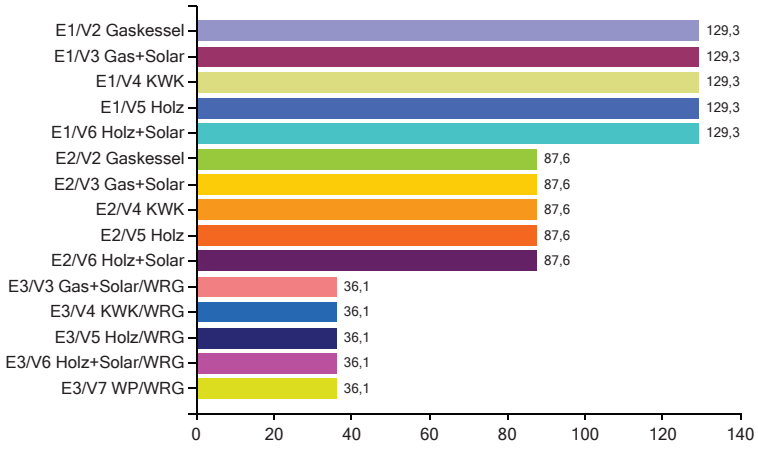
Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E1/V3 Gas+Solar	E1/V4 KWK	E1/V5 Holz	E1/V6 Holz+Solar
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	129,3	129,3	129,3	129,3	129,3
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	166,8	159,1	152,7	187,8	179,9
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	184,5	176,2	107,4	38,3	37,0

Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E2/V2 Gaskessel	E2/V3 Gas+Solar	E2/V4 KWK	E2/V5 Holz
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	129,3	87,6	87,6	87,6	87,6
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	166,8	121,2	113,4	110,6	135,7
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	184,5	134,2	125,8	77,9	27,8

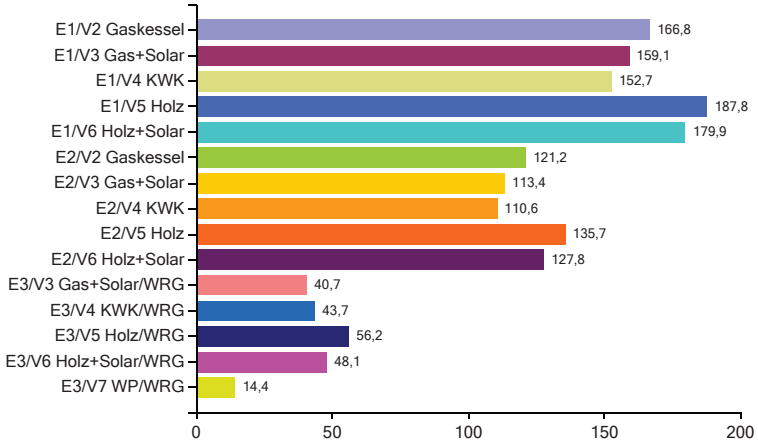
Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E2/V6 Holz+Solar	E3/V3 Gas+Solar /WRG	E3/V4 KWK/WRG	E3/V5 Holz/WRG
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	129,3	87,6	36,1	36,1	36,1
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	166,8	127,8	40,7	43,7	56,2
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	184,5	26,6	49,4	36,1	18,2

Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E3/V6 Holz+Solar/WRG	E3/V7 WP/WRG
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	129,3	36,1	36,1
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	166,8	48,1	14,4
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	184,5	16,9	37,4

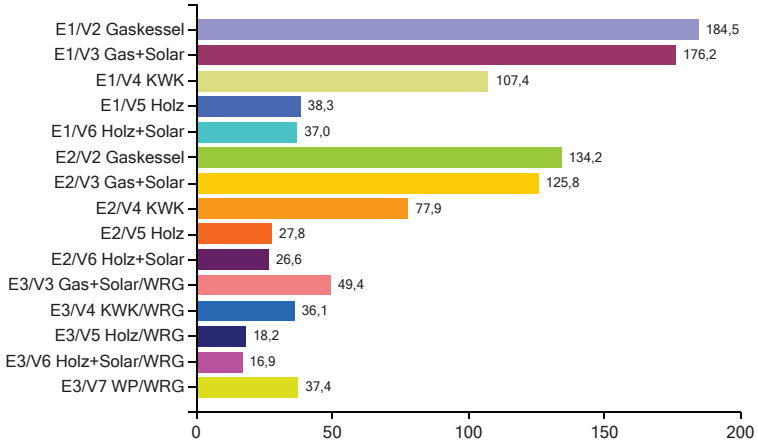
Tab. 6.3.13 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 4 / Nord-Süd-orientiert
Variantenvergleich verschiedener Energiestandards und Wärmeversorgungssysteme



spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]



spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]



spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]

Abb. 6.3.15 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 4 / Nord-Süd-orientiert
Graphischer Variantenvergleich, alle Angaben in [kWh/(m²a)]

SST 4 - Hohe Bebauung der Nachkriegszeit (Ost-West-orient.)

Optimierungsmaßnahmen für E2:
Fenster neu: Isolierverglasung, U-Wert = 1,4 W/(m²K)
Dach gedämmt: 7,5 cm Flachdach-Dämmplatte, WLG 035
Kellerdecke gedämmt: 8 cm Mineralwolle, WLG 040

Optimierungsmaßnahmen für E3:
Außenwand gedämmt: 8 cm Fassadendämmplatte WDV 040
Fenster neu: Isolierverglasung, U-Wert = 1,4 W/(m²K)
Dach gedämmt: 10 cm Flachdach-Dämmplatte, WLG 035
Kellerdecke gedämmt: 8 cm Mineralwolle, WLG 040

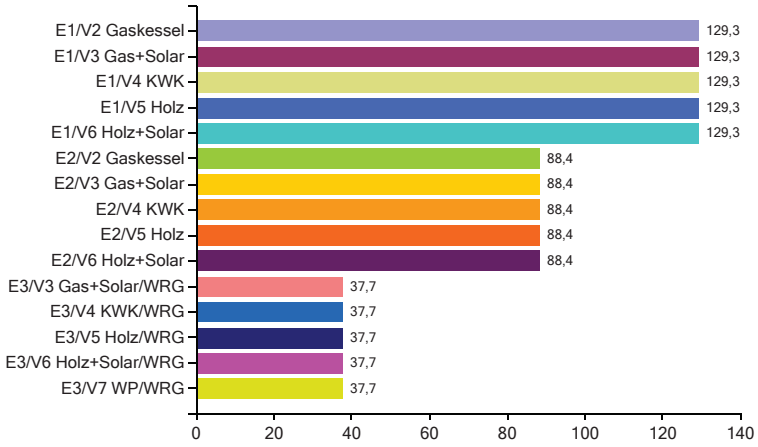
Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E1/V3 Gas+Solar	E1/V4 KWK	E1/V5 Holz	E1/V6 Holz+Solar
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	129,3	129,3	129,3	129,3	129,3
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	166,8	159,1	152,7	187,8	179,9
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	184,6	176,3	107,4	38,3	37,0

Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E2/V2 Gaskessel	E2/V3 Gas+Solar	E2/V4 KWK	E2/V5 Holz
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	129,3	88,4	88,4	88,4	88,4
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	166,8	122,1	114,3	111,4	136,7
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	184,6	135,1	126,8	78,5	28,0

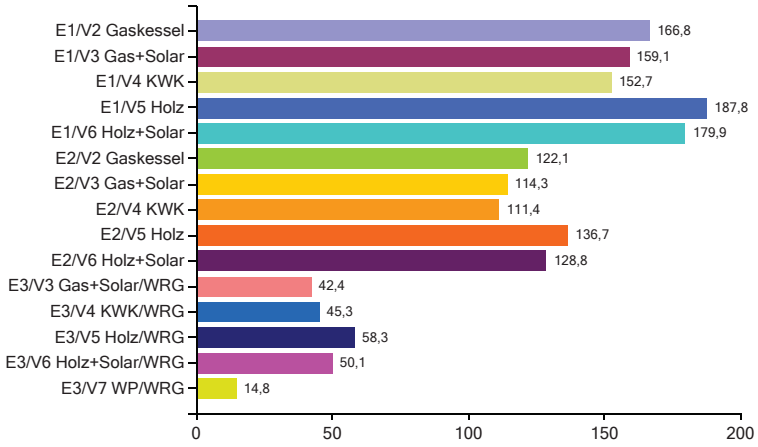
Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E2/V6 Holz+Solar	E3/V3 Gas+Solar /WRG	E3/V4 KWK/WRG	E3/V5 Holz/WRG
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	129,3	88,4	37,7	37,7	37,7
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	166,8	128,8	42,4	45,3	58,3
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	184,6	26,8	51,4	37,3	18,6

Bezeichnung	E1/V2 Gaskessel	E3/V6 Holz+Solar/WRG	E3/V7 WP/WRG
spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]	129,3	37,7	37,7
spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]	166,8	50,1	14,8
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	184,6	17,3	38,5

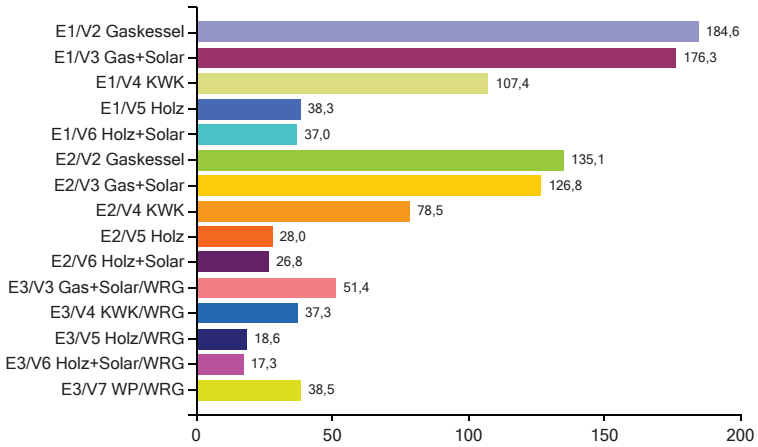
Tab. 6.3.14 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 4 / Ost-West-orientiert
Variantenvergleich verschiedener Energiestandards und Wärmeversorgungssysteme



spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m²a)]



spez. Endenergiebedarf [kWh/(m²a)]



spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]

Abb. 6.3.16 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 4 / Ost-West-orientiert
Graphischer Variantenvergleich, alle Angaben in [kWh/(m²a)]

6.4 Der Flächenbedarf verschiedener Versorgungsszenarien

6.4.1 Beschreibung des Rechenmodells und ausgewählter Versorgungsszenarien

Das in Kapitel 5.2 beschriebene Modell und die in Kapitel 6.1 bis 6.3 beschriebenen empirischen Kenngrößen des untersuchten urbanen Systems wurden in EXCEL, einem Programm für Tabellenkalkulation, zusammengeführt und operational abgebildet. In dem Rechenmodell können mehrere systembestimmende Parameter variiert werden, um die Flächeninanspruchnahme der untersuchten Versorgungsbereiche durch verschiedene technologische Varianten abzubilden. Es handelt sich dabei um folgende sieben Parameter:

1. Anzahl der Einwohner
2. Größe der beheizten Wohnflächen
3. Spezifischer Endenergiebedarf für verschiedene Energiestandards und Versorgungsvarianten
4. Flächenkennwert für Ernährung
5. Flächenkennwert Energie für Wärmeversorgung
6. Flächenkennwert Energie für Haushaltsstrom
7. Flächenkennwert Energie für Verkehr

Abbildung 6.4.1 zeigt die Modellstruktur des Rechenmodells für die Bilanzierung der Versorgungsszenarien als Systemdiagramm. Die Eingabeparameter sind hervorgehoben.
Jedes beschriebene Subsystem – Bevölkerungs- und Wohnflächenentwicklung, Flächenbedarf für Nahrungsmittelproduktion, Bedarf an Haushaltstrom oder für Verkehr – weist eine eigene Dynamik auf, die in der Modellstruktur prinzipiell erfasst werden kann. Aus der Kombination aller möglichen Parametervariationen ergibt sich eine sehr große Anzahl an möglichen Szenarien.
Gemäß der in Kapitel 6.3.1 dargestellten Methodik werden den vier Stadtstrukturtypen räumlich-strukturell hinreichend genau Wohnflächen und Bewohnerzahlen zugeordnet. Damit ist das Modell kalibriert. Durch die Kombination der in Kapitel 6.3.2 ermittelten Energiekennwerte mit Flächenkennwerten zur Bereitstellung von Energieträgern aus erneuerbaren Energien kann für alle dargestellten Wärmeversorgungsvarianten der jeweilige Flächenbedarf bilanziert werden.

Mit dem kalibrierten Modell werden hier exemplarisch vier Szenarien untersucht, die sich fast ausschließlich hinsichtlich der gewählten Varianten zur Wärmeversorgung unterscheiden (Tab. 6.4.1):

Szenario 1 – Darstellung des Status Quo
Szenario 2 – Ausbau Holzheizungen
Szenario 3 – Moderater energetischer Sanierungszustand der Siedlungsstrukturen
Szenario 4 – Maximierung der energetischen Optimierung der Siedlungsstrukturen

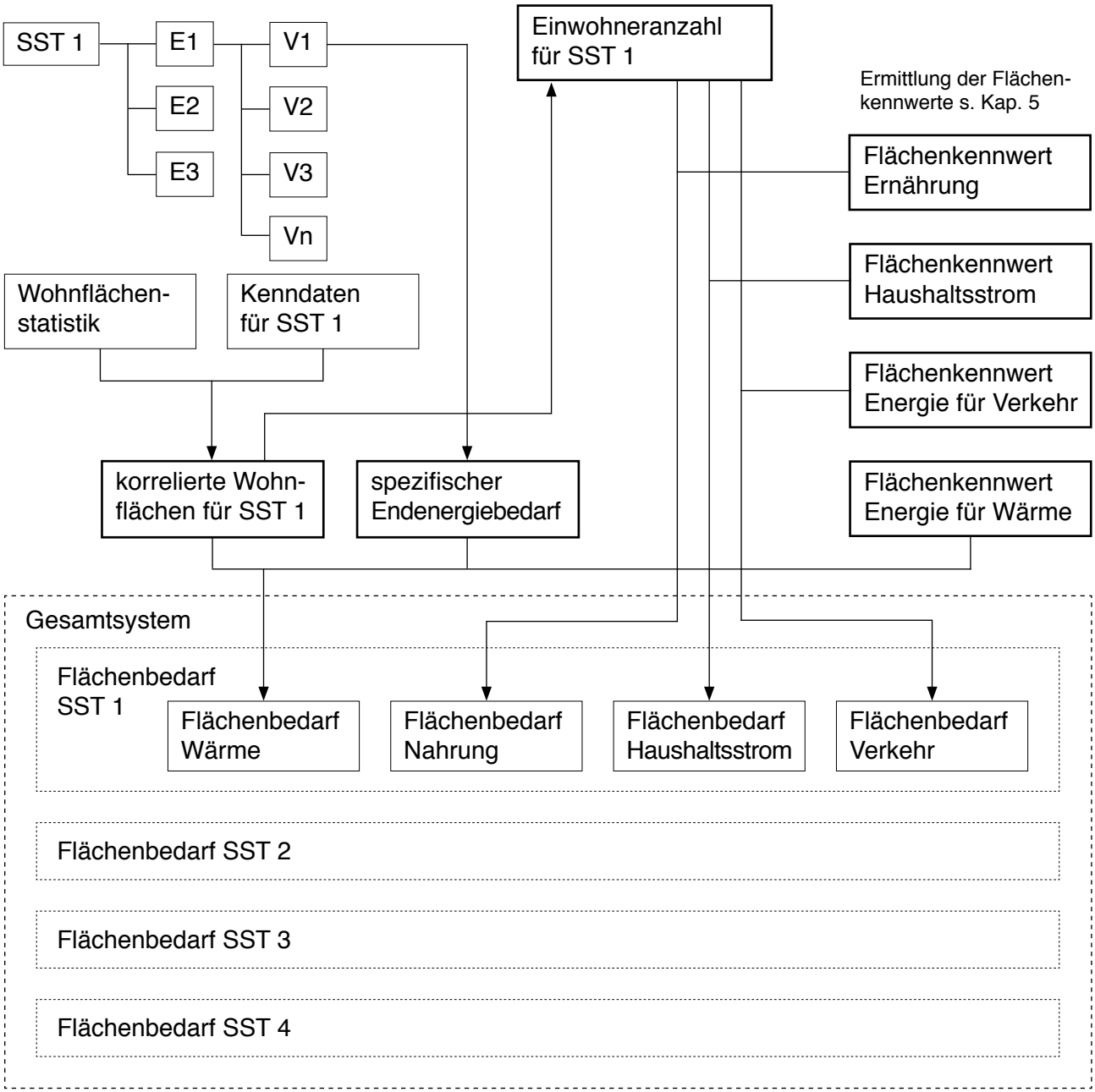


Abb. 6.4.1 Systemdiagramm der Modellstruktur des Rechenmodells in EXCEL zur Bilanzierung der Versorgungsszenarien

SST = Stadtstrukturtyp
E = Energiestandard
V1 - Vn = Varianten zur Wärmeversorgung

Szenario 1 – Darstellung des Status Quo

In Szenario 1 wird der hypothetische Flächenbedarf berechnet, der für die Bereitstellung von Biogas zur Wärmeversorgung benötigt würde unter der Annahme eines derzeit durchschnittlich hohen Endenergiebedarfs (E1). Bei diesem Szenario werden alle Systeme zur Wärmeversorgung vollständig durch (Bio-)Gas betrieben (V2). Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Wärmeerzeugung durch Heizölkessel oder aus Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung einen vergleichbar hohen Endenergiebedarf hat, bildet diese Annahme die derzeitige Versorgungsstruktur zumindest hinsichtlich der Flächeninanspruchnahme hinreichend genau ab und erlaubt eine plausible Vereinfachung bei der Modellierung.

Szenario 2 – Ausbau Holzheizungen

In Szenario 2 wird der Flächenbedarf für eine hypothetisch vollständige Wärmeversorgung mit Holzheizungen (V5) bei gleich bleibend hohem Endenergiebedarf (E1) untersucht. Aufgrund des im Vergleich zu fossilen Energieträgern oder Biogas geringeren Energiegehalts bestehen für eine effiziente Nutzung von Holz als Brennstoff in Form von Holzhackschnitzeln oder Pellets praktische Transportrestriktionen, die in diesen Modellrechnungen nicht berücksichtigt werden.

Szenario 3 – Moderater energetischer Sanierungszustand der Siedlungsstrukturen

In Szenario 3 wird eine energetische Sanierung des Gebäudebestands mit einem spezifischen Heizwärmebedarf von durchschnittlich 120 kWh/m² Wohnfläche und Jahr vorausgesetzt (E2). Die Wärmeversorgung (V3) erfolgt durch Erd- bzw. Biogas mit einem Nutzungsanteil von 50% Biogas und 50% Erdgas.

Szenario 4 – Maximierung der energetischen Optimierung der Siedlungsstrukturen

In Szenario 4 wird eine optimierte energetische Sanierung des gesamten Gebäudebestands mit einem spezifischen Heizwärmebedarf von durchschnittlich 60 kWh/m² Wohnfläche und Jahr vorausgesetzt (E3). Hierbei werden alle technologischen, ökonomisch und sozial vertretbaren Potenziale zur energetischen Optimierung von Gebäuden ausgeschöpft und u.a. eine kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung eingesetzt. Die Wärmeversorgung erfolgt über den Energieträger Biogas mit einem Nutzungsanteil von 100%.

Prinzipiell können mit diesem kalibrierten Rechenmodell eine sehr viel größere Anzahl und differenziertere Wärmeversorgungsvarianten untersucht werden, z.B. Szenarien energetischer Optimierung mit einem Anteil von 30% Bestand (E1), 50% Optimierungsstand 1 (E2) und 20% Optimierungsstand 2 (E3) sowie Mischvarianten zur Wärmeversorgung wie z.B. 40% Gas, 30% KWK, 20% Holz und 10% Wärmepumpen. In Abhängigkeit der statistischen Erhebungen lassen sich auch Versorgungsszenarien mit hoher räumlicher Auflösung untersuchen. Die Parameter Ernährung, Haushaltsstrom und Verkehr werden im Rahmen der gewählten Szenarien in nur geringem Maße untersucht:

Für die Ermittlung der Flächeninanspruchnahme zur **Ernährung** wird bei allen Szenarien ein Flächenbedarf von 2.400 m² / Einwohner und Jahr zugrunde gelegt. Bei einer hypothetischen Selbstversorgung würde damit heute die gesamte landwirtschaftliche Anbaufläche Brandenburgs – im größeren Maßstab trifft das auch auf Deutschland zu – zur Erzeugung von Nahrungs- und Futtermitteln benötigt (s. Kap. 6.5) [KOERBER ET AL. 2008]. Aufgrund eines erheblichen Anteils an Nahrungs- und Futtermittelimporten können derzeit aber Flächen zum Energiepflanzenanbau genutzt werden. Eine Reduktion des Fleisch- und Milchkonsums würde weitere Flächenpotenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse freisetzen. Eine Flächenreduktion für das Bedarfsfeld Ernährung wurde bei den untersuchten Szenarien aber nicht vorgenommen.

Die Wärmeversorgung durch elektrisch betriebene **Wärmepumpen** schneidet aufgrund der geringen Flächeninanspruchnahme der Windenergie sehr günstig ab. Abgesehen von Ländern mit einem

	Parameter Ernährung	Parameter Wärmebereitstellung	Parameter Haushaltsstrom	Parameter Verkehr
Szenario 1	2.400 m^2/P*a	E1 / V2 Gasbrennwert 100% Biogas	1.700 kWh / P*a Windenergie	5.400 kWh / P*a Biodiesel
Szenario 2	2.400 m^2/P*a	E1 / V5 Holzpellets + Solarthermie	1.700 kWh / P*a Windenergie	5.400 kWh / P*a BtL
Szenario 3	2.400 m^2/P*a	E2 / V3 Gasbrennwert + Solarthermie, 50% Biogas	1.700 kWh / P*a Windenergie	5.400 kWh / P*a BtL
Szenario 4	2.400 m^2/P*a	E2 / V3 Gasbrennwert + Solarthermie, Kontr. Lüftung 100% Biogas	1.700 kWh / P*a Windenergie	5.400 kWh / P*a BtL

Tab. 6.4.1 Übersicht der untersuchten Szenarien mit Definition der Eingabeparameter

hohen Anteil an Strom aus erneuerbaren Energien wie z.B. Norwegen setzt eine effektive Nutzung von Wärmepumpen allerdings eine geringe Heizlast und damit einen guten Wärmedämmstandard voraus. Gerade im Altbaubereich bestehen hierbei derzeit noch starke Einschränkungen. Bei einer verstärkten energetischen Sanierung und einer signifikanten Erhöhung des Stromanteils aus erneuerbaren Energien stellt der Einsatz von Wärmepumpen auch aus infrastruktureller Sicht ein großes, bislang wenig genutztes Potenzial zur Wärmeversorgung dar. Durch eine Verlagerung von Einspeiseüberschüssen im Stromnetz aus stochastischer Stromproduktion durch Wind- und Solarenergie in die thermische Nutzung durch dezentrale Wärmespeicher können Spitzen- und Überlasten im Stromnetz abgefedert werden.

Ein **Versorgungsszenario Öl** wurde nicht weiterverfolgt, da die Bereitstellung von Biodiesel o.ä. für Heizzwecke aufgrund der unrentablen Flächenbilanz im Vergleich zu anderen Nutzungspfaden und der Nutzungskonkurrenz im Verkehrssektor nicht sinnvoll ist und praktisch kaum erfolgt. Modelltheoretisch liegt der Endenergiebedarf von Ölheizungen in der gleichen Größenordnung wie (Erd-) Gas, insofern ist eine Betrachtung der Wärmeversorgung durch Ölheizungen zumindest im Rahmen dieses Modells nicht notwendig.

6.4.2 Darstellung der **Ergebnisse der gewählten Versorgungsszenarien**

Im Folgenden sind die Ergebnisse der gewählten Versorgungsszenarien tabellarisch und graphisch dargestellt. Die Graphiken zeigen den akkumulierten Flächenbedarf für alle vier Versorgungsbereiche – Ernährung, Wärmeversorgung, Haushaltsstrom und Verkehr – bezogen auf jeden Stadtstrukturtyp in Hektar pro Jahr. Während in Abb. 6.4.4 / 8 / 12 / 16 nur jeweils die im Szenario bezeichnete Wärmeversorgungsvariante dargestellt ist, sind in Abb. 6.4.5 / 9 / 13 / 17 sämtliche Energiestandards und Wärmeversorgungsvarianten wiedergegeben. Die nicht variierten Parameter Ernährung, Haushaltsstrom und Energie für Verkehr erscheinen in diesen Graphiken als ein *Plateau*.

Szenario 1 - Wärmebedarf STATUS QUO, Gasbrennwert

Parameter Ernährung: 2.400 m² / EW a
Wärme: E1 – V2: Gasbrennwertkessel
Strom: Windkraft
Verkehr: Kraftstoffbereitstellung aus Biodiesel

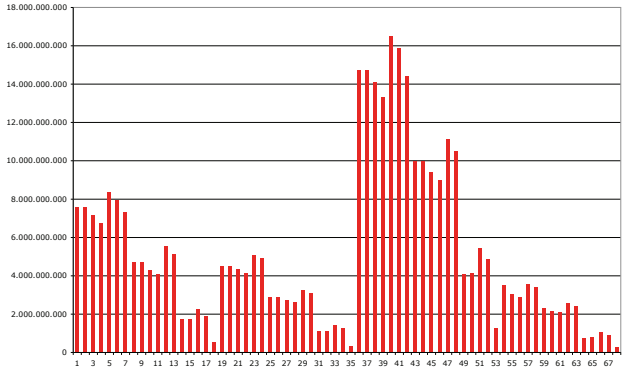


Abb. 6.4.2 Szenario 1 - Endenergiebedarf für Wärme in kWh / a

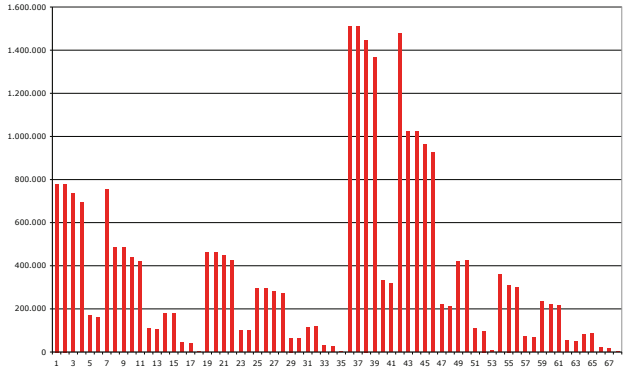


Abb. 6.4.3 Szenario 1 - Flächenbedarf für Wärme in ha / a

Flächenbedarf in ha/a

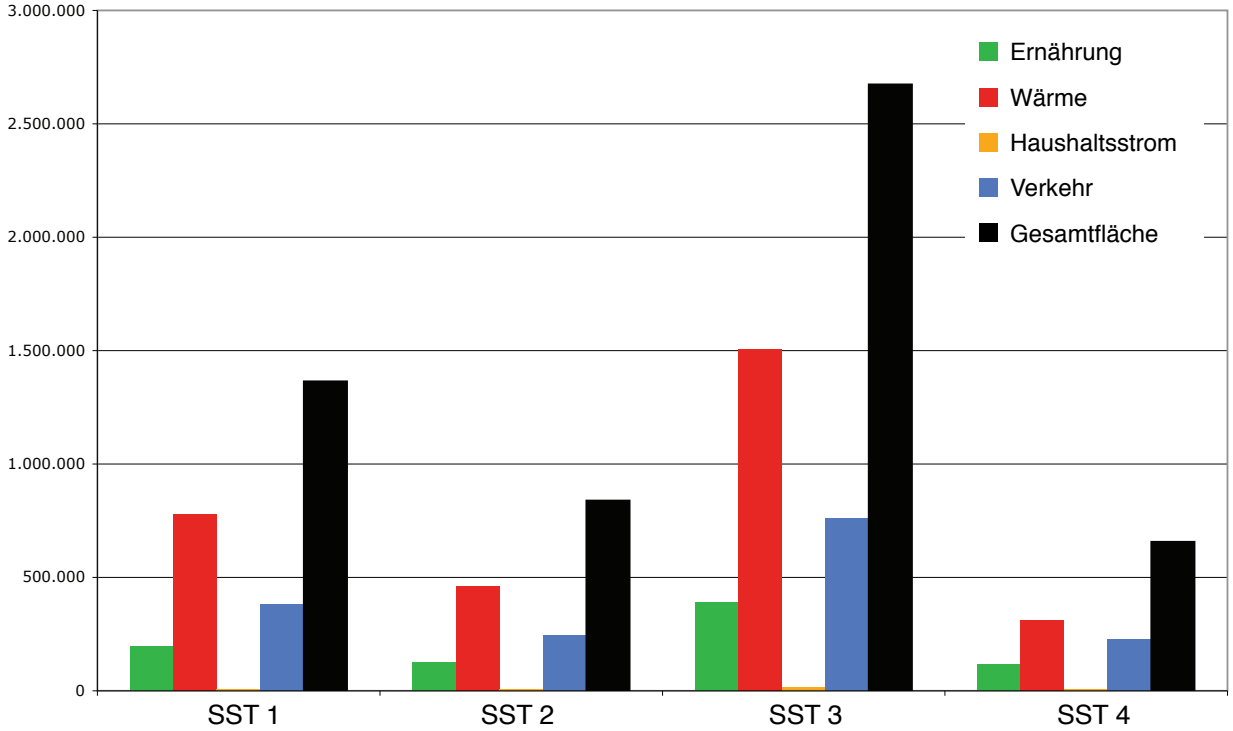


Abb. 6.4.4 Szenario 1 - Flächenbedarf zur Versorgung Berlins für alle Versorgungsbereiche in ha / a

	Ernährung	Wärme	Strom	Verkehr	Summe
Variante	2.400 m²	E1-V2 Gasbrenn.	Wind	Biodiesel	
	ha/a	ha/a	ha/a	ha/a	ha/a
SST 1	196.244	779.451	7.923	381.499	1.365.118
SST 2	126.356	462.148	5.102	245.637	839.242
SST 3	390.618	1.508.200	15.771	759.361	2.673.950
SST 4	116.285	310.523	4.695	226.058	657.561
Summe	829.503	3.060.322	33.491	1.612.555	5.535.871
%	15,0	55,3	0,6	29,1	100,0

Tab. 6.4.2 Szenario 1 - Flächenbedarf zur Versorgung Berlins für alle Versorgungsbereiche

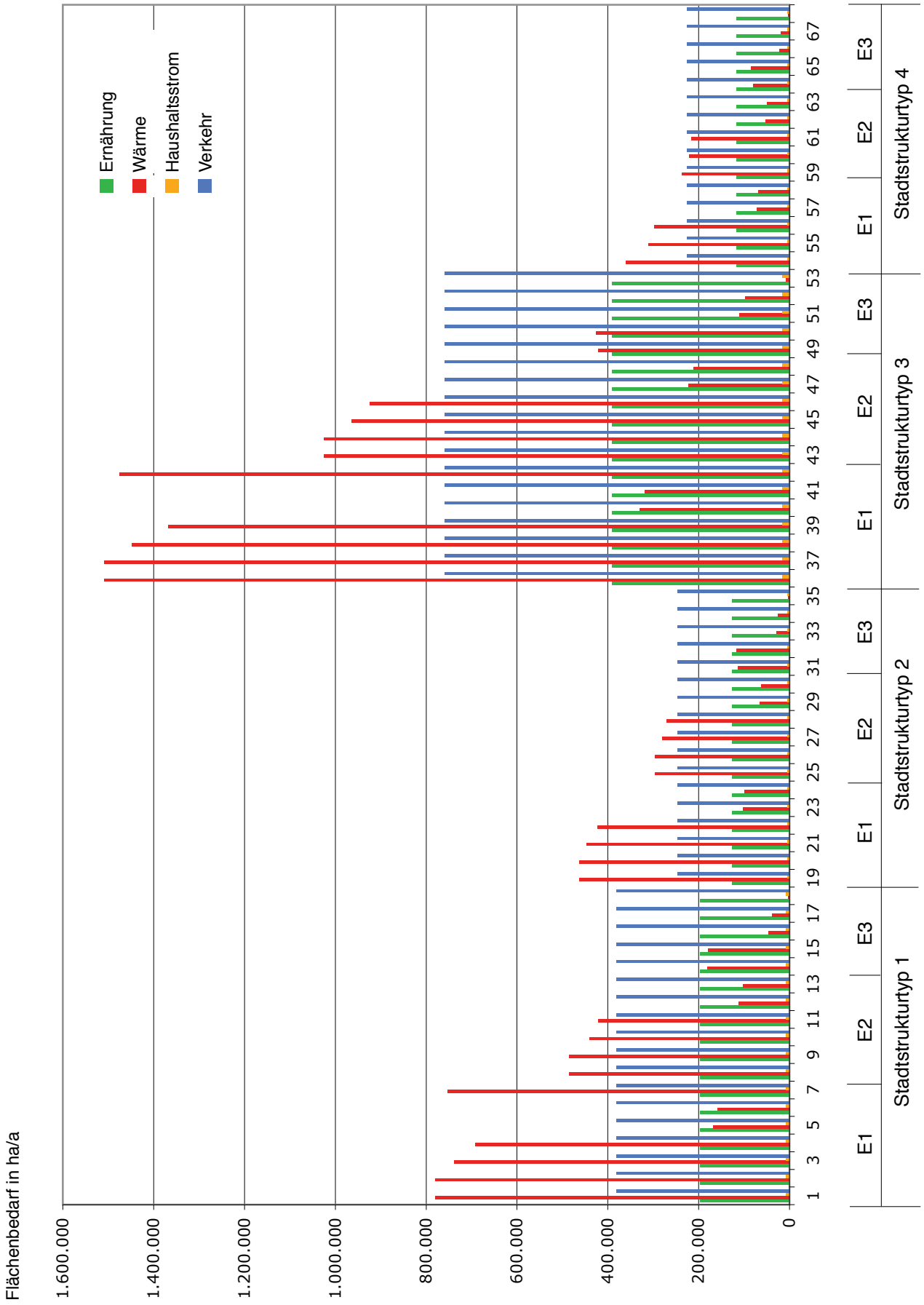


Abb. 6.4.5 Szenario 1 - Gesamtflächenbedarf der Varianten zur Wärmeversorgung im Vergleich

			Technologie zur Wärmeversorgung			Gesamtendenergiebedarf	
			Wärmeerzeuger Heizung	Wärmeerzeuger Warmwasser	spez.End-energiebedarf	Wärmebedarf je SST Wohnfläche * spez. Endenerg.	
					kWh/ (m2 a)	kWh/a	Terajoule/a
SST 1	E1	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	243,2	7.611.829.655	27.403
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	243,2	7.611.829.655	27.403
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	230,0	7.198.687.585	25.915
		V4	KWK	KWK	215,9	6.757.376.738	24.327
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	266,9	8.353.607.463	30.073
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	253,9	7.946.725.121	28.608
		V8	Standard-Heizkessel	Nachtstrom	234,6	7.342.661.337	26.434
	E2	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	151,3	4.735.484.485	17.048
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	151,3	4.735.484.485	17.048
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	137,2	4.294.173.638	15.459
		V4	KWK	KWK	131,1	4.103.251.924	14.772
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	177,5	5.555.508.897	20.000
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	164,1	5.136.107.099	18.490
	E3	V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	56,3	1.762.113.526	6.344
		V4	KWK	KWK	55,7	1.743.334.341	6.276
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	73,1	2.287.930.706	8.237
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	60,8	1.902.957.414	6.851
		V7	Erdreich/Wasser-WP	Erdreich/Wasser-WP	18,1	566.505.414	2.039
SST 2	E1	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	221,6	4.513.164.282	16.247
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	221,6	4.513.164.282	16.247
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	213,7	4.352.270.790	15.668
		V4	KWK	KWK	202,9	4.132.315.130	14.876
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	250,1	5.093.602.829	18.337
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	242,0	4.928.636.084	17.743
	E2	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	142,4	2.900.156.109	10.441
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	142,4	2.900.156.109	10.441
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	134,5	2.739.262.617	9.861
		V4	KWK	KWK	129,9	2.645.577.799	9.524
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	159,7	3.252.492.490	11.709
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	151,7	3.089.562.372	11.122
	E3	V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	54,0	1.099.778.300	3.959
		V4	KWK	KWK	56,0	1.140.510.829	4.106
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	70,5	1.435.821.669	5.169
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	62,2	1.266.781.671	4.560
		V7	Erdreich/Wasser-WP	Erdreich/Wasser-WP	17,7	360.482.887	1.298
SST 3	E1	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	234,6	14.728.513.493	53.023
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	234,6	14.728.513.493	53.023
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	225,1	14.132.090.313	50.876
		V4	KWK	KWK	212,7	13.353.601.108	48.073
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	262,6	16.486.392.342	59.351
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	253,2	15.896.247.300	57.226
		V8	Standard-Heizkessel	Nachtstrom	229,5	14.408.328.417	51.870
	E2	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	159,4	10.007.353.158	36.026
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	159,4	10.007.353.158	36.026
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	149,9	9.410.929.977	33.879
		V4	KWK	KWK	143,6	9.015.407.236	32.455
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	177,0	11.112.305.577	40.004
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	167,6	10.522.160.535	37.880
	E3	V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	65,5	4.112.180.877	14.804
		V4	KWK	KWK	66,1	4.149.849.710	14.939
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	87,2	5.474.536.985	19.708
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	77,6	4.871.835.665	17.539
		V7	Erdreich/Wasser-WP	Erdreich/Wasser-WP	20,6	1.293.296.581	4.656
SST 4	E1	V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	184,5	3.516.571.121	12.660
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	159,1	3.032.446.967	10.917
		V4	KWK	KWK	152,7	2.910.462.928	10.478
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	187,8	3.579.469.141	12.886
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	179,9	3.428.895.093	12.344
	E2	V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	121,2	2.310.072.736	8.316
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	113,4	2.161.404.689	7.781
		V4	KWK	KWK	110,6	2.108.036.672	7.589
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	135,7	2.586.442.824	9.311
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	127,8	2.435.868.776	8.769
	E3	V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	40,7	775.742.247	2.793
		V4	KWK	KWK	43,7	832.922.265	2.999
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	56,2	1.071.172.341	3.856
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	48,1	916.786.292	3.300
		V7	Erdreich/Wasser-WP	Erdreich/Wasser-WP	14,4	274.464.087	988

Endenergiebedarf je Einwohner			Flächenbedarf je Einwohner				Summe Flächenbedarf			
Wärme	Strom	Verkehr	Ernährung	Wärme	Strom	Verkehr	Ernährung	Wärme	Strom	Verkehr
kWh/EW a	kWh/EW a	kWh/EWa	m2/Einwohner Jahr				ha /Jahr			
9309	1.700	5.400	2.400	9532	97	4666	196.244	779.451	7.923	381.499
9309	1.700	5.400	2.400	9532	97	4666	196.244	779.451	7.923	381.499
8804	1.700	5.400	2.400	9015	97	4666	196.244	737.146	7.923	381.499
8264	1.700	5.400	2.400	8462	97	4666	196.244	691.955	7.923	381.499
10.216	1.700	5.400	2.400	2043	97	4666	196.244	167.072	7.923	381.499
9719	1.700	5.400	2.400	1944	97	4666	196.244	158.935	7.923	381.499
8980	1.700	5.400	2.400	9195	97	4666	196.244	751.889	7.923	381.499
5791	1.700	5.400	2.400	5930	97	4666	196.244	484.914	7.923	381.499
5791	1.700	5.400	2.400	5930	97	4666	196.244	484.914	7.923	381.499
5252	1.700	5.400	2.400	5378	97	4666	196.244	439.723	7.923	381.499
5018	1.700	5.400	2.400	5139	97	4666	196.244	420.173	7.923	381.499
6794	1.700	5.400	2.400	1359	97	4666	196.244	111.110	7.923	381.499
6281	1.700	5.400	2.400	1256	97	4666	196.244	102.722	7.923	381.499
2155	1.700	5.400	2.400	2207	97	4666	196.244	180.440	7.923	381.499
2132	1.700	5.400	2.400	2183	97	4666	196.244	178.517	7.923	381.499
2798	1.700	5.400	2.400	560	97	4666	196.244	45.759	7.923	381.499
2327	1.700	5.400	2.400	465	97	4666	196.244	38.059	7.923	381.499
693	1.700	5.400	2.400	39	97	4666	196.244	3.229	7.923	381.499
8572	1.700	5.400	2.400	8778	97	4666	126.356	462.148	5.102	245.637
8572	1.700	5.400	2.400	8778	97	4666	126.356	462.148	5.102	245.637
8267	1.700	5.400	2.400	8465	97	4666	126.356	445.673	5.102	245.637
7849	1.700	5.400	2.400	8037	97	4666	126.356	423.149	5.102	245.637
9675	1.700	5.400	2.400	1935	97	4666	126.356	101.872	5.102	245.637
9361	1.700	5.400	2.400	1872	97	4666	126.356	98.573	5.102	245.637
5509	1.700	5.400	2.400	5641	97	4666	126.356	296.976	5.102	245.637
5509	1.700	5.400	2.400	5641	97	4666	126.356	296.976	5.102	245.637
5203	1.700	5.400	2.400	5328	97	4666	126.356	280.500	5.102	245.637
5025	1.700	5.400	2.400	5146	97	4666	126.356	270.907	5.102	245.637
6178	1.700	5.400	2.400	1236	97	4666	126.356	65.050	5.102	245.637
5868	1.700	5.400	2.400	1174	97	4666	126.356	61.791	5.102	245.637
2089	1.700	5.400	2.400	2139	97	4666	126.356	112.617	5.102	245.637
2166	1.700	5.400	2.400	2218	97	4666	126.356	116.788	5.102	245.637
2727	1.700	5.400	2.400	545	97	4666	126.356	28.716	5.102	245.637
2406	1.700	5.400	2.400	481	97	4666	126.356	25.336	5.102	245.637
685	1.700	5.400	2.400	39	97	4666	126.356	2.055	5.102	245.637
9049	1.700	5.400	2.400	9267	97	4666	390.618	1.508.200	15.771	759.361
9049	1.700	5.400	2.400	9267	97	4666	390.618	1.508.200	15.771	759.361
8683	1.700	5.400	2.400	8891	97	4666	390.618	1.447.126	15.771	759.361
8205	1.700	5.400	2.400	8402	97	4666	390.618	1.367.409	15.771	759.361
10129	1.700	5.400	2.400	2026	97	4666	390.618	329.728	15.771	759.361
9767	1.700	5.400	2.400	1953	97	4666	390.618	317.925	15.771	759.361
8853	1.700	5.400	2.400	9065	97	4666	390.618	1.475.413	15.771	759.361
6149	1.700	5.400	2.400	6296	97	4666	390.618	1.024.753	15.771	759.361
6149	1.700	5.400	2.400	6296	97	4666	390.618	1.024.753	15.771	759.361
5782	1.700	5.400	2.400	5921	97	4666	390.618	963.679	15.771	759.361
5539	1.700	5.400	2.400	5672	97	4666	390.618	923.178	15.771	759.361
6828	1.700	5.400	2.400	1366	97	4666	390.618	222.246	15.771	759.361
6465	1.700	5.400	2.400	1293	97	4666	390.618	210.443	15.771	759.361
2527	1.700	5.400	2.400	2587	97	4666	390.618	421.087	15.771	759.361
2550	1.700	5.400	2.400	2611	97	4666	390.618	424.945	15.771	759.361
3364	1.700	5.400	2.400	673	97	4666	390.618	109.491	15.771	759.361
2993	1.700	5.400	2.400	599	97	4666	390.618	97.437	15.771	759.361
795	1.700	5.400	2.400	45	97	4666	390.618	7.372	15.771	759.361
7258	1.700	5.400	2.400	7432	97	4666	116.285	360.097	4.695	226.058
6259	1.700	5.400	2.400	6409	97	4666	116.285	310.523	4.695	226.058
6007	1.700	5.400	2.400	6151	97	4666	116.285	298.031	4.695	226.058
7388	1.700	5.400	2.400	1478	97	4666	116.285	71.589	4.695	226.058
7077	1.700	5.400	2.400	1415	97	4666	116.285	68.578	4.695	226.058
4768	1.700	5.400	2.400	4882	97	4666	116.285	236.551	4.695	226.058
4461	1.700	5.400	2.400	4568	97	4666	116.285	221.328	4.695	226.058
4351	1.700	5.400	2.400	4455	97	4666	116.285	215.863	4.695	226.058
5338	1.700	5.400	2.400	1068	97	4666	116.285	51.729	4.695	226.058
5027	1.700	5.400	2.400	1005	97	4666	116.285	48.717	4.695	226.058
1601	1.700	5.400	2.400	1639	97	4666	116.285	79.436	4.695	226.058
1719	1.700	5.400	2.400	1760	97	4666	116.285	85.291	4.695	226.058
2211	1.700	5.400	2.400	442	97	4666	116.285	21.423	4.695	226.058
1892	1.700	5.400	2.400	378	97	4666	116.285	18.336	4.695	226.058
566	1.700	5.400	2.400	39	97	4666	116.285	1.913	4.695	226.058

Tab. 6.4.3 Szenario 1 - Übersicht der Ergebnisse mit allen Varianten zur Wärmeversorgung

Szenario 2 - Wärmebedarf STATUS QUO, Holzpellets /Solarthermie, Kraftstoffe optimiert

Parameter: Ernährung: 2.400 m² / EW a
Wärme E1 – V5: Holzpellets mit solarer WW-Erwärmung
Strom: Windkraft
Verkehr: Kraftstoffbereitstellung aus BtL

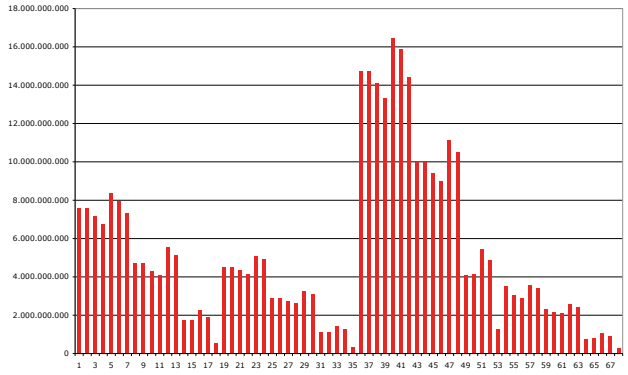


Abb. 6.4.6 Szenario 2 - Endenergiebedarf für Flächenbedarf in ha/a Wärme in kWh / a

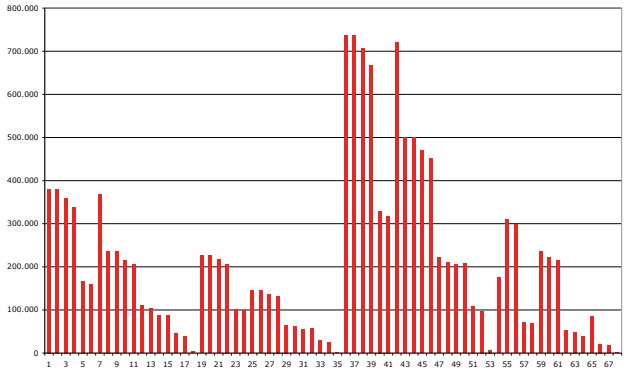


Abb. 6.4.7 Szenario 2 - Flächenbedarf für Wärme in ha / a

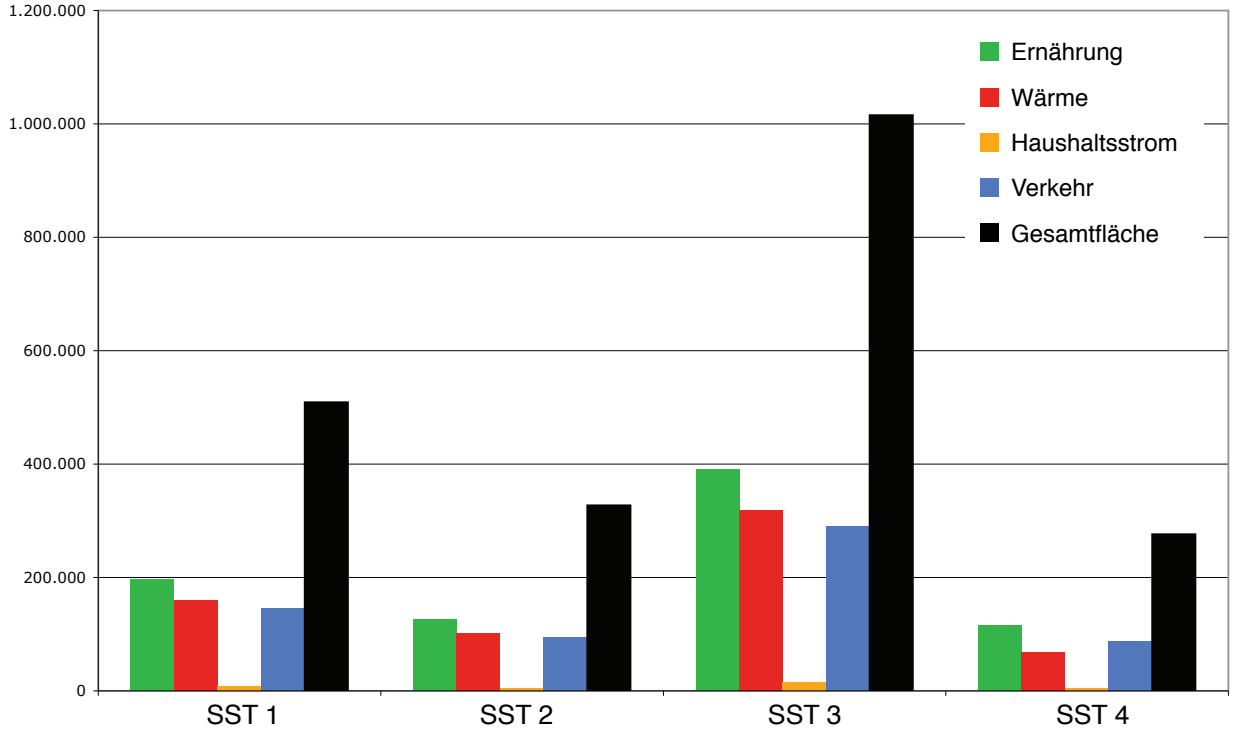


Abb. 6.4.8 Szenario 2 - Flächenbedarf zur Versorgung Berlins für alle Versorgungsbereiche in ha / a

	Ernährung	Wärme	Strom	Verkehr	Summe
Variante	2.400 m²	E3-V5 Pellet-Sol.	Wind	BtL	
	ha/a	ha/a	ha/a	ha/a	ha/a
SST 1	196.244	158.935	7.923	146.153	509.255
SST 2	126.356	101.872	5.102	94.104	327.434
SST 3	390.618	317.925	15.771	290.913	1.015.226
SST 4	116.285	68.578	4.695	86.603	276.161
Summe	829.503	647.309	33.491	617.773	2.128.077
%	39,0	30,4	1,6	29,0	100,0

Tab. 6.4.4 Szenario 2 - Flächenbedarf zur Versorgung Berlins für alle Versorgungsbereiche

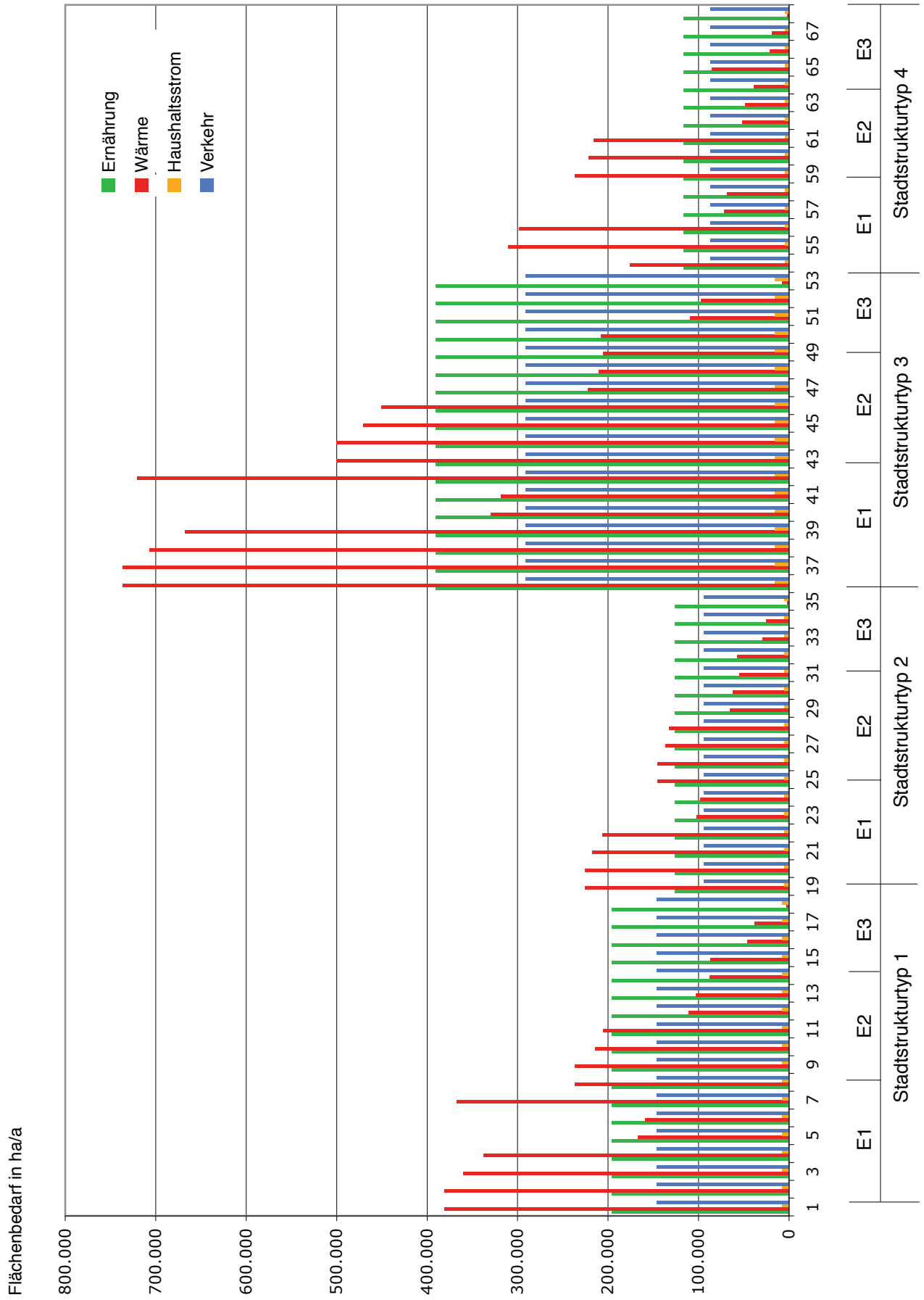


Abb. 6.4.9 Szenario 2 - Gesamtflächenbedarf der Varianten zur Wärmeversorgung im Vergleich

			Technologie zur Wärmeversorgung			Gesamtendenergiebedarf	
			Wärmeerzeuger Heizung	Wärmeerzeuger Warmwasser	spez.End-energiebedarf	Wärmebedarf je SST Wohnfläche * spez. Endenerg.	
					kWh/ (m2 a)	kWh/a	Terajoule/a
SST 1	E1	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	243,2	7.611.829.655	27.403
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	243,2	7.611.829.655	27.403
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	230,0	7.198.687.585	25.915
		V4	KWK	KWK	215,9	6.757.376.738	24.327
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	266,9	8.353.607.463	30.073
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	253,9	7.946.725.121	28.608
		V8	Standard-Heizkessel	Nachtstrom	234,6	7.342.661.337	26.434
	E2	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	151,3	4.735.484.485	17.048
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	151,3	4.735.484.485	17.048
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	137,2	4.294.173.638	15.459
		V4	KWK	KWK	131,1	4.103.251.924	14.772
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	177,5	5.555.508.897	20.000
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	164,1	5.136.107.099	18.490
	E3	V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	56,3	1.762.113.526	6.344
		V4	KWK	KWK	55,7	1.743.334.341	6.276
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	73,1	2.287.930.706	8.237
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	60,8	1.902.957.414	6.851
		V7	Erdreich/Wasser-WP	Erdreich/Wasser-WP	18,1	566.505.414	2.039
SST 2	E1	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	221,6	4.513.164.282	16.247
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	221,6	4.513.164.282	16.247
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	213,7	4.352.270.790	15.668
		V4	KWK	KWK	202,9	4.132.315.130	14.876
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	250,1	5.093.602.829	18.337
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	242,0	4.928.636.084	17.743
	E2	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	142,4	2.900.156.109	10.441
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	142,4	2.900.156.109	10.441
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	134,5	2.739.262.617	9.861
		V4	KWK	KWK	129,9	2.645.577.799	9.524
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	159,7	3.252.492.490	11.709
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	151,7	3.089.562.372	11.122
	E3	V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	54,0	1.099.778.300	3.959
		V4	KWK	KWK	56,0	1.140.510.829	4.106
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	70,5	1.435.821.669	5.169
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	62,2	1.266.781.671	4.560
		V7	Erdreich/Wasser-WP	Erdreich/Wasser-WP	17,7	360.482.887	1.298
SST 3	E1	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	234,6	14.728.513.493	53.023
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	234,6	14.728.513.493	53.023
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	225,1	14.132.090.313	50.876
		V4	KWK	KWK	212,7	13.353.601.108	48.073
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	262,6	16.486.392.342	59.351
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	253,2	15.896.247.300	57.226
		V8	Standard-Heizkessel	Nachtstrom	229,5	14.408.328.417	51.870
	E2	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	159,4	10.007.353.158	36.026
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	159,4	10.007.353.158	36.026
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	149,9	9.410.929.977	33.879
		V4	KWK	KWK	143,6	9.015.407.236	32.455
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	177,0	11.112.305.577	40.004
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	167,6	10.522.160.535	37.880
	E3	V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	65,5	4.112.180.877	14.804
		V4	KWK	KWK	66,1	4.149.849.710	14.939
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	87,2	5.474.536.985	19.708
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	77,6	4.871.835.665	17.539
		V7	Erdreich/Wasser-WP	Erdreich/Wasser-WP	20,6	1.293.296.581	4.656
SST 4	E1	V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	184,5	3.516.571.121	12.660
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	159,1	3.032.446.967	10.917
		V4	KWK	KWK	152,7	2.910.462.928	10.478
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	187,8	3.579.469.141	12.886
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	179,9	3.428.895.093	12.344
	E2	V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	121,2	2.310.072.736	8.316
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	113,4	2.161.404.689	7.781
		V4	KWK	KWK	110,6	2.108.036.672	7.589
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	135,7	2.586.442.824	9.311
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	127,8	2.435.868.776	8.769
	E3	V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	40,7	775.742.247	2.793
		V4	KWK	KWK	43,7	832.922.265	2.999
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	56,2	1.071.172.341	3.856
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	48,1	916.786.292	3.300
		V7	Erdreich/Wasser-WP	Erdreich/Wasser-WP	14,4	274.464.087	988

Endenergiebedarf je Einwohner			Flächenbedarf je Einwohner				Summe Flächenbedarf			
Wärme	Strom	Verkehr	Ernährung	Wärme	Strom	Verkehr	Ernährung	Wärme	Strom	Verkehr
kWh/EW a	kWh/EW a	kWh/EWa	m2/Einwohner Jahr				ha /Jahr			
9309	1.700	5.400	2.400	4655	97	1787	196.244	380.591	7.923	146.153
9309	1.700	5.400	2.400	4655	97	1787	196.244	380.591	7.923	146.153
8804	1.700	5.400	2.400	4402	97	1787	196.244	359.934	7.923	146.153
8264	1.700	5.400	2.400	4132	97	1787	196.244	337.869	7.923	146.153
10.216	1.700	5.400	2.400	2043	97	1787	196.244	167.072	7.923	146.153
9719	1.700	5.400	2.400	1944	97	1787	196.244	158.935	7.923	146.153
8980	1.700	5.400	2.400	4490	97	1787	196.244	367.133	7.923	146.153
5791	1.700	5.400	2.400	2896	97	1787	196.244	236.774	7.923	146.153
5791	1.700	5.400	2.400	2896	97	1787	196.244	236.774	7.923	146.153
5252	1.700	5.400	2.400	2626	97	1787	196.244	214.709	7.923	146.153
5018	1.700	5.400	2.400	2509	97	1787	196.244	205.163	7.923	146.153
6794	1.700	5.400	2.400	1359	97	1787	196.244	111.110	7.923	146.153
6281	1.700	5.400	2.400	1256	97	1787	196.244	102.722	7.923	146.153
2155	1.700	5.400	2.400	1078	97	1787	196.244	88.106	7.923	146.153
2132	1.700	5.400	2.400	1066	97	1787	196.244	87.167	7.923	146.153
2798	1.700	5.400	2.400	560	97	1787	196.244	45.759	7.923	146.153
2327	1.700	5.400	2.400	465	97	1787	196.244	38.059	7.923	146.153
693	1.700	5.400	2.400	39	97	1787	196.244	3.229	7.923	146.153
8572	1.700	5.400	2.400	4286	97	1787	126.356	225.658	5.102	94.104
8572	1.700	5.400	2.400	4286	97	1787	126.356	225.658	5.102	94.104
8267	1.700	5.400	2.400	4133	97	1787	126.356	217.614	5.102	94.104
7849	1.700	5.400	2.400	3924	97	1787	126.356	206.616	5.102	94.104
9675	1.700	5.400	2.400	1935	97	1787	126.356	101.872	5.102	94.104
9361	1.700	5.400	2.400	1872	97	1787	126.356	98.573	5.102	94.104
5509	1.700	5.400	2.400	2754	97	1787	126.356	145.008	5.102	94.104
5509	1.700	5.400	2.400	2754	97	1787	126.356	145.008	5.102	94.104
5203	1.700	5.400	2.400	2601	97	1787	126.356	136.963	5.102	94.104
5025	1.700	5.400	2.400	2512	97	1787	126.356	132.279	5.102	94.104
6178	1.700	5.400	2.400	1236	97	1787	126.356	65.050	5.102	94.104
5868	1.700	5.400	2.400	1174	97	1787	126.356	61.791	5.102	94.104
2089	1.700	5.400	2.400	1044	97	1787	126.356	54.989	5.102	94.104
2166	1.700	5.400	2.400	1083	97	1787	126.356	57.026	5.102	94.104
2727	1.700	5.400	2.400	545	97	1787	126.356	28.716	5.102	94.104
2406	1.700	5.400	2.400	481	97	1787	126.356	25.336	5.102	94.104
685	1.700	5.400	2.400	39	97	1787	126.356	2.055	5.102	94.104
9049	1.700	5.400	2.400	4525	97	1787	390.618	736.426	15.771	290.913
9049	1.700	5.400	2.400	4525	97	1787	390.618	736.426	15.771	290.913
8683	1.700	5.400	2.400	4341	97	1787	390.618	706.605	15.771	290.913
8205	1.700	5.400	2.400	4102	97	1787	390.618	667.680	15.771	290.913
10129	1.700	5.400	2.400	2026	97	1787	390.618	329.728	15.771	290.913
9767	1.700	5.400	2.400	1953	97	1787	390.618	317.925	15.771	290.913
8853	1.700	5.400	2.400	4426	97	1787	390.618	720.416	15.771	290.913
6149	1.700	5.400	2.400	3074	97	1787	390.618	500.368	15.771	290.913
6149	1.700	5.400	2.400	3074	97	1787	390.618	500.368	15.771	290.913
5782	1.700	5.400	2.400	2891	97	1787	390.618	470.546	15.771	290.913
5539	1.700	5.400	2.400	2770	97	1787	390.618	450.770	15.771	290.913
6828	1.700	5.400	2.400	1366	97	1787	390.618	222.246	15.771	290.913
6465	1.700	5.400	2.400	1293	97	1787	390.618	210.443	15.771	290.913
2527	1.700	5.400	2.400	1263	97	1787	390.618	205.609	15.771	290.913
2550	1.700	5.400	2.400	1275	97	1787	390.618	207.492	15.771	290.913
3364	1.700	5.400	2.400	673	97	1787	390.618	109.491	15.771	290.913
2993	1.700	5.400	2.400	599	97	1787	390.618	97.437	15.771	290.913
795	1.700	5.400	2.400	45	97	1787	390.618	7.372	15.771	290.913
7258	1.700	5.400	2.400	3629	97	1787	116.285	175.829	4.695	86.603
6259	1.700	5.400	2.400	6409	97	1787	116.285	310.523	4.695	86.603
6007	1.700	5.400	2.400	6151	97	1787	116.285	298.031	4.695	86.603
7388	1.700	5.400	2.400	1478	97	1787	116.285	71.589	4.695	86.603
7077	1.700	5.400	2.400	1415	97	1787	116.285	68.578	4.695	86.603
4768	1.700	5.400	2.400	4882	97	1787	116.285	236.551	4.695	86.603
4461	1.700	5.400	2.400	4568	97	1787	116.285	221.328	4.695	86.603
4351	1.700	5.400	2.400	4455	97	1787	116.285	215.863	4.695	86.603
5338	1.700	5.400	2.400	1068	97	1787	116.285	51.729	4.695	86.603
5027	1.700	5.400	2.400	1005	97	1787	116.285	48.717	4.695	86.603
1601	1.700	5.400	2.400	801	97	1787	116.285	38.787	4.695	86.603
1719	1.700	5.400	2.400	1760	97	1787	116.285	85.291	4.695	86.603
2211	1.700	5.400	2.400	442	97	1787	116.285	21.423	4.695	86.603
1892	1.700	5.400	2.400	378	97	1787	116.285	18.336	4.695	86.603
566	1.700	5.400	2.400	39	97	1787	116.285	1.913	4.695	86.603

Tab. 6.4.5 Szenario 2 - Übersicht der Ergebnisse mit allen Varianten zur Wärmeversorgung

Szenario 3 - Versorgungsgrad Biogas 50%

Parameter: Ernährung: 2.400 m² / EW a
Wärme E2 – V3: Gasbrennwertkessel mit solarer WW-Erwärmung
Strom: Windkraft
Verkehr: Kraftstoffbereitstellung aus BtL

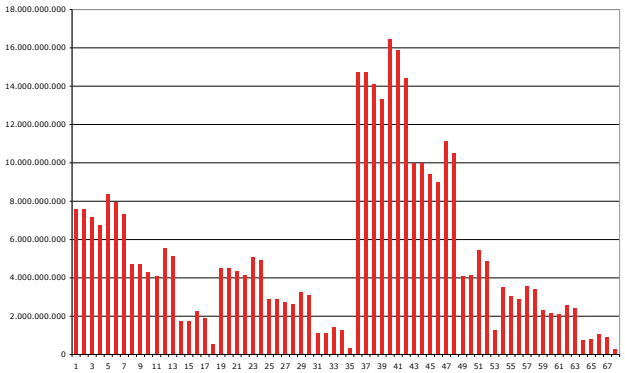


Abb. 6.4.10 Szenario 3 - Endenergiebedarf für Wärme in kWh / a

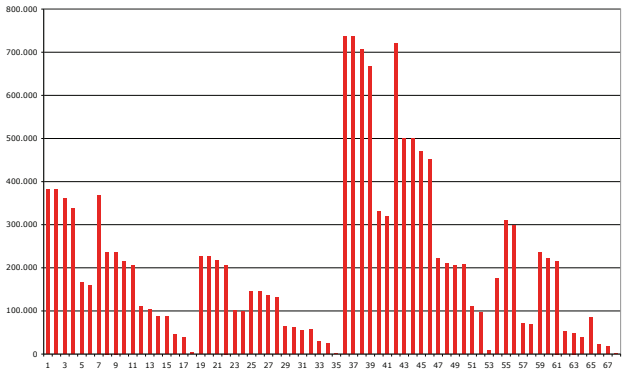


Abb. 6.4.11 Szenario 3 - Flächenbedarf für Wärme in ha / a

Flächenbedarf in ha/a

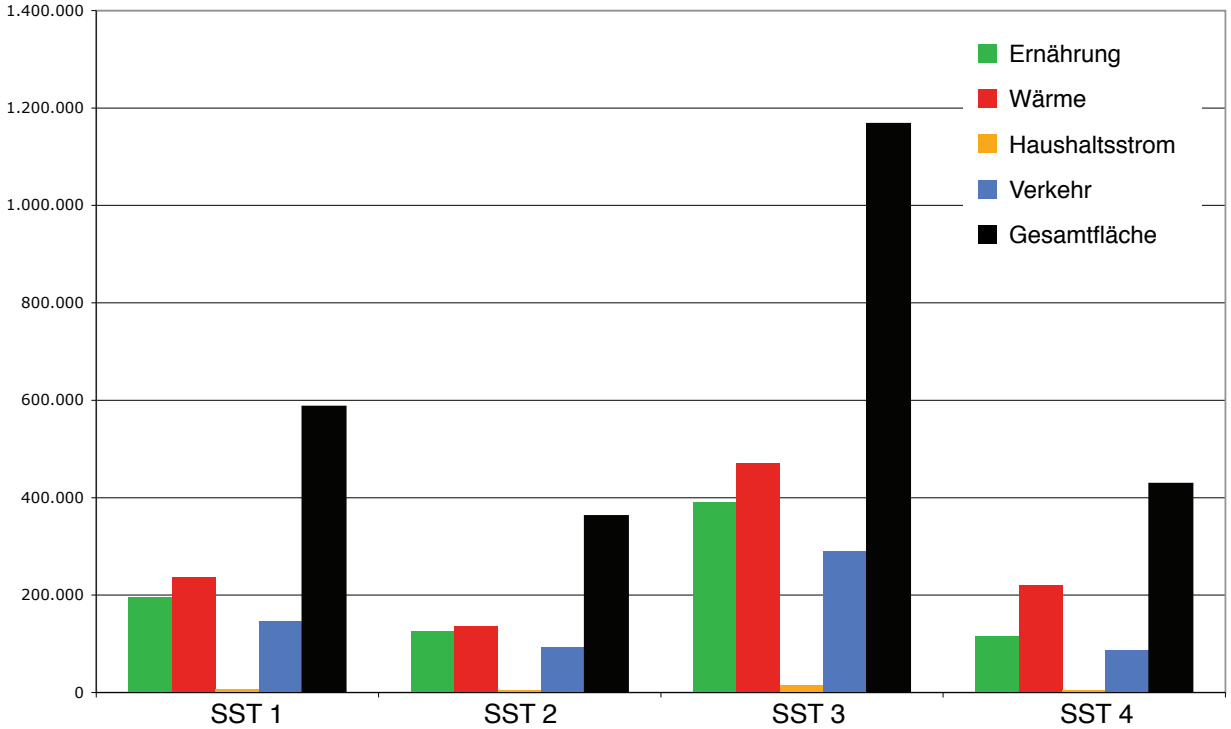


Abb. 6.4.12 Szenario 3 - Flächenbedarf zur Versorgung Berlins für alle Versorgungsbereiche in ha / a

	Ernährung	Wärme	Strom	Verkehr	Summe
Variante	2.400 m²	E2-V3 Gas + Sol.	Wind	BtL	
	ha/a	ha/a	ha/a	ha/a	ha/a
SST 1	196.244	236.774	7.923	146.153	587.095
SST 2	126.356	136.963	5.102	94.104	362.525
SST 3	390.618	470.546	15.771	290.913	1.167.848
SST 4	116.285	221.328	4.695	86.603	428.911
Summe	829.503	1.065.612	33.491	617.773	2.546.379
%	32,6	41,8	1,3	24,3	100,0

Tab. 6.4.6 Szenario 3 - Flächenbedarf zur Versorgung Berlins für alle Versorgungsbereiche

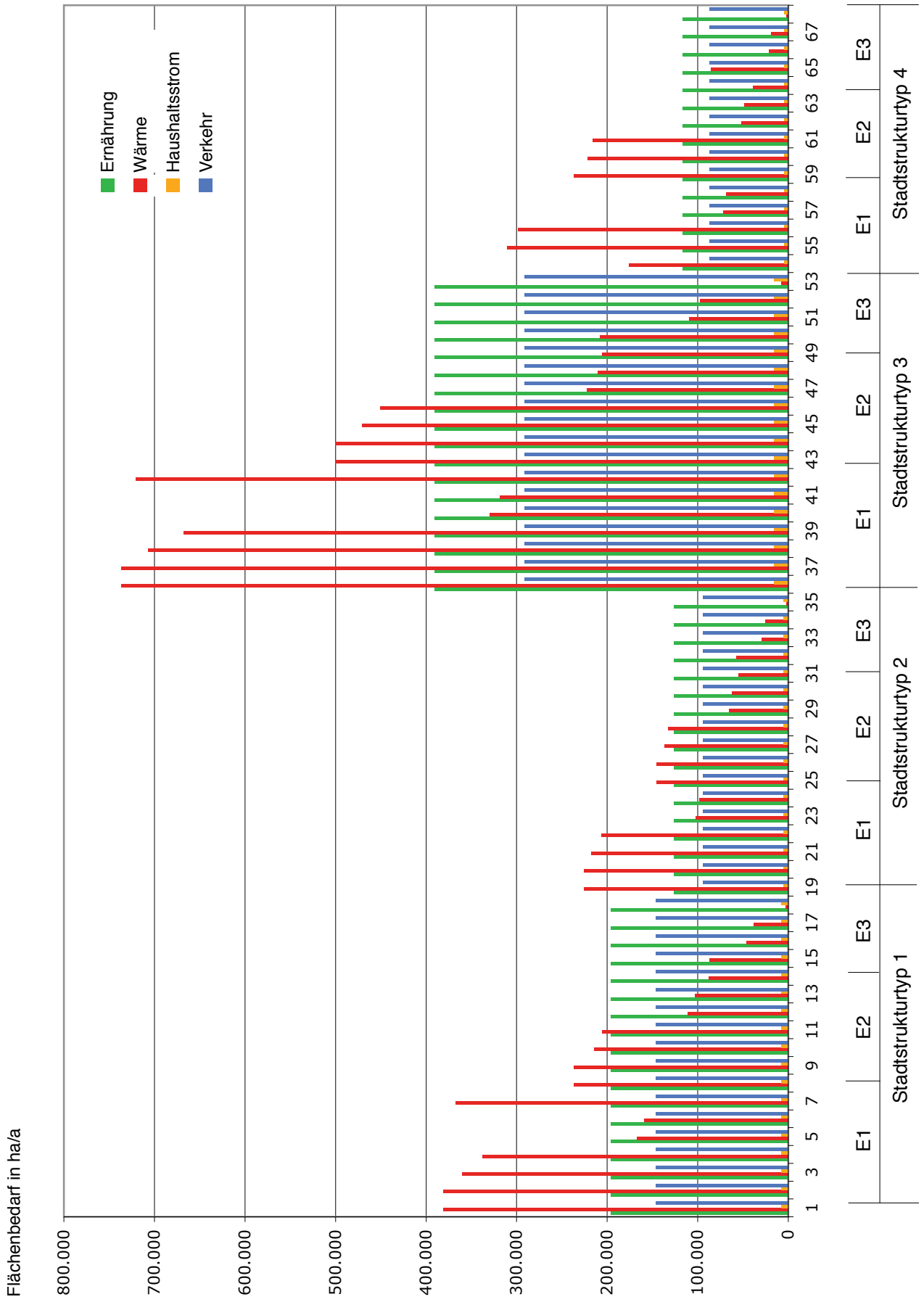


Abb. 6.4.13 Szenario 3 - Gesamtflächenbedarf der Varianten zur Wärmeversorgung im Vergleich

			Technologie zur Wärmeversorgung			Gesamtendenergiebedarf	
			Wärmeerzeuger Heizung	Wärmeerzeuger Warmwasser	spez.End-energiebedarf	Wärmebedarf je SST Wohnfläche * spez. Endenerg.	
					kWh/ (m2 a)	kWh/a	Terajoule/a
SST 1	E1	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	243,2	7.611.829.655	27.403
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	243,2	7.611.829.655	27.403
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	230,0	7.198.687.585	25.915
		V4	KWK	KWK	215,9	6.757.376.738	24.327
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	266,9	8.353.607.463	30.073
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	253,9	7.946.725.121	28.608
		V8	Standard-Heizkessel	Nachtstrom	234,6	7.342.661.337	26.434
	E2	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	151,3	4.735.484.485	17.048
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	151,3	4.735.484.485	17.048
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	137,2	4.294.173.638	15.459
		V4	KWK	KWK	131,1	4.103.251.924	14.772
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	177,5	5.555.508.897	20.000
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	164,1	5.136.107.099	18.490
	E3	V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	56,3	1.762.113.526	6.344
		V4	KWK	KWK	55,7	1.743.334.341	6.276
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	73,1	2.287.930.706	8.237
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	60,8	1.902.957.414	6.851
		V7	Erdreich/Wasser-WP	Erdreich/Wasser-WP	18,1	566.505.414	2.039
SST 2	E1	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	221,6	4.513.164.282	16.247
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	221,6	4.513.164.282	16.247
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	213,7	4.352.270.790	15.668
		V4	KWK	KWK	202,9	4.132.315.130	14.876
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	250,1	5.093.602.829	18.337
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	242,0	4.928.636.084	17.743
	E2	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	142,4	2.900.156.109	10.441
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	142,4	2.900.156.109	10.441
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	134,5	2.739.262.617	9.861
		V4	KWK	KWK	129,9	2.645.577.799	9.524
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	159,7	3.252.492.490	11.709
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	151,7	3.089.562.372	11.122
	E3	V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	54,0	1.099.778.300	3.959
		V4	KWK	KWK	56,0	1.140.510.829	4.106
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	70,5	1.435.821.669	5.169
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	62,2	1.266.781.671	4.560
		V7	Erdreich/Wasser-WP	Erdreich/Wasser-WP	17,7	360.482.887	1.298
SST 3	E1	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	234,6	14.728.513.493	53.023
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	234,6	14.728.513.493	53.023
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	225,1	14.132.090.313	50.876
		V4	KWK	KWK	212,7	13.353.601.108	48.073
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	262,6	16.486.392.342	59.351
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	253,2	15.896.247.300	57.226
		V8	Standard-Heizkessel	Nachtstrom	229,5	14.408.328.417	51.870
	E2	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	159,4	10.007.353.158	36.026
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	159,4	10.007.353.158	36.026
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	149,9	9.410.929.977	33.879
		V4	KWK	KWK	143,6	9.015.407.236	32.455
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	177,0	11.112.305.577	40.004
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	167,6	10.522.160.535	37.880
	E3	V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	65,5	4.112.180.877	14.804
		V4	KWK	KWK	66,1	4.149.849.710	14.939
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	87,2	5.474.536.985	19.708
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	77,6	4.871.835.665	17.539
		V7	Erdreich/Wasser-WP	Erdreich/Wasser-WP	20,6	1.293.296.581	4.656
SST 4	E1	V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	184,5	3.516.571.121	12.660
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	159,1	3.032.446.967	10.917
		V4	KWK	KWK	152,7	2.910.462.928	10.478
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	187,8	3.579.469.141	12.886
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	179,9	3.428.895.093	12.344
	E2	V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	121,2	2.310.072.736	8.316
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	113,4	2.161.404.689	7.781
		V4	KWK	KWK	110,6	2.108.036.672	7.589
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	135,7	2.586.442.824	9.311
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	127,8	2.435.868.776	8.769
	E3	V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	40,7	775.742.247	2.793
		V4	KWK	KWK	43,7	832.922.265	2.999
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	56,2	1.071.172.341	3.856
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	48,1	916.786.292	3.300
		V7	Erdreich/Wasser-WP	Erdreich/Wasser-WP	14,4	274.464.087	988

Endenergiebedarf je Einwohner			Flächenbedarf je Einwohner				Summe Flächenbedarf			
Wärme	Strom	Verkehr	Ernährung	Wärme	Strom	Verkehr	Ernährung	Wärme	Strom	Verkehr
kWh/EW a	kWh/EW a	kWh/EWa	m2/Einwohner Jahr				ha /Jahr			
9309	1.700	5.400	2.400	4655	97	1787	196.244	380.591	7.923	146.153
9309	1.700	5.400	2.400	4655	97	1787	196.244	380.591	7.923	146.153
8804	1.700	5.400	2.400	4402	97	1787	196.244	359.934	7.923	146.153
8264	1.700	5.400	2.400	4132	97	1787	196.244	337.869	7.923	146.153
10.216	1.700	5.400	2.400	2043	97	1787	196.244	167.072	7.923	146.153
9719	1.700	5.400	2.400	1944	97	1787	196.244	158.935	7.923	146.153
8980	1.700	5.400	2.400	4490	97	1787	196.244	367.133	7.923	146.153
5791	1.700	5.400	2.400	2896	97	1787	196.244	236.774	7.923	146.153
5791	1.700	5.400	2.400	2896	97	1787	196.244	236.774	7.923	146.153
5252	1.700	5.400	2.400	2626	97	1787	196.244	214.709	7.923	146.153
5018	1.700	5.400	2.400	2509	97	1787	196.244	205.163	7.923	146.153
6794	1.700	5.400	2.400	1359	97	1787	196.244	111.110	7.923	146.153
6281	1.700	5.400	2.400	1256	97	1787	196.244	102.722	7.923	146.153
2155	1.700	5.400	2.400	1078	97	1787	196.244	88.106	7.923	146.153
2132	1.700	5.400	2.400	1066	97	1787	196.244	87.167	7.923	146.153
2798	1.700	5.400	2.400	560	97	1787	196.244	45.759	7.923	146.153
2327	1.700	5.400	2.400	465	97	1787	196.244	38.059	7.923	146.153
693	1.700	5.400	2.400	39	97	1787	196.244	3.229	7.923	146.153
8572	1.700	5.400	2.400	4286	97	1787	126.356	225.658	5.102	94.104
8572	1.700	5.400	2.400	4286	97	1787	126.356	225.658	5.102	94.104
8267	1.700	5.400	2.400	4133	97	1787	126.356	217.614	5.102	94.104
7849	1.700	5.400	2.400	3924	97	1787	126.356	206.616	5.102	94.104
9675	1.700	5.400	2.400	1935	97	1787	126.356	101.872	5.102	94.104
9361	1.700	5.400	2.400	1872	97	1787	126.356	98.573	5.102	94.104
5509	1.700	5.400	2.400	2754	97	1787	126.356	145.008	5.102	94.104
5509	1.700	5.400	2.400	2754	97	1787	126.356	145.008	5.102	94.104
5203	1.700	5.400	2.400	2601	97	1787	126.356	136.963	5.102	94.104
5025	1.700	5.400	2.400	2512	97	1787	126.356	132.279	5.102	94.104
6178	1.700	5.400	2.400	1236	97	1787	126.356	65.050	5.102	94.104
5868	1.700	5.400	2.400	1174	97	1787	126.356	61.791	5.102	94.104
2089	1.700	5.400	2.400	1044	97	1787	126.356	54.989	5.102	94.104
2166	1.700	5.400	2.400	1083	97	1787	126.356	57.026	5.102	94.104
2727	1.700	5.400	2.400	545	97	1787	126.356	28.716	5.102	94.104
2406	1.700	5.400	2.400	481	97	1787	126.356	25.336	5.102	94.104
685	1.700	5.400	2.400	39	97	1787	126.356	2.055	5.102	94.104
9049	1.700	5.400	2.400	4525	97	1787	390.618	736.426	15.771	290.913
9049	1.700	5.400	2.400	4525	97	1787	390.618	736.426	15.771	290.913
8683	1.700	5.400	2.400	4341	97	1787	390.618	706.605	15.771	290.913
8205	1.700	5.400	2.400	4102	97	1787	390.618	667.680	15.771	290.913
10129	1.700	5.400	2.400	2026	97	1787	390.618	329.728	15.771	290.913
9767	1.700	5.400	2.400	1953	97	1787	390.618	317.925	15.771	290.913
8853	1.700	5.400	2.400	4426	97	1787	390.618	720.416	15.771	290.913
6149	1.700	5.400	2.400	3074	97	1787	390.618	500.368	15.771	290.913
6149	1.700	5.400	2.400	3074	97	1787	390.618	500.368	15.771	290.913
5782	1.700	5.400	2.400	2891	97	1787	390.618	470.546	15.771	290.913
5539	1.700	5.400	2.400	2770	97	1787	390.618	450.770	15.771	290.913
6828	1.700	5.400	2.400	1366	97	1787	390.618	222.246	15.771	290.913
6465	1.700	5.400	2.400	1293	97	1787	390.618	210.443	15.771	290.913
2527	1.700	5.400	2.400	1263	97	1787	390.618	205.609	15.771	290.913
2550	1.700	5.400	2.400	1275	97	1787	390.618	207.492	15.771	290.913
3364	1.700	5.400	2.400	673	97	1787	390.618	109.491	15.771	290.913
2993	1.700	5.400	2.400	599	97	1787	390.618	97.437	15.771	290.913
795	1.700	5.400	2.400	45	97	1787	390.618	7.372	15.771	290.913
7258	1.700	5.400	2.400	3629	97	1787	116.285	175.829	4.695	86.603
6259	1.700	5.400	2.400	6409	97	1787	116.285	310.523	4.695	86.603
6007	1.700	5.400	2.400	6151	97	1787	116.285	298.031	4.695	86.603
7388	1.700	5.400	2.400	1478	97	1787	116.285	71.589	4.695	86.603
7077	1.700	5.400	2.400	1415	97	1787	116.285	68.578	4.695	86.603
4768	1.700	5.400	2.400	4882	97	1787	116.285	236.551	4.695	86.603
4461	1.700	5.400	2.400	4568	97	1787	116.285	221.328	4.695	86.603
4351	1.700	5.400	2.400	4455	97	1787	116.285	215.863	4.695	86.603
5338	1.700	5.400	2.400	1068	97	1787	116.285	51.729	4.695	86.603
5027	1.700	5.400	2.400	1005	97	1787	116.285	48.717	4.695	86.603
1601	1.700	5.400	2.400	801	97	1787	116.285	38.787	4.695	86.603
1719	1.700	5.400	2.400	1760	97	1787	116.285	85.291	4.695	86.603
2211	1.700	5.400	2.400	442	97	1787	116.285	21.423	4.695	86.603
1892	1.700	5.400	2.400	378	97	1787	116.285	18.336	4.695	86.603
566	1.700	5.400	2.400	39	97	1787	116.285	1.913	4.695	86.603

Tab. 6.4.7 Szenario 3 - Übersicht der Ergebnisse mit allen Varianten zur Wärmeversorgung

Szenario 4 **Versorgungsgrad Biogas 100% , Kontrol. Wohnraumlüftung**

Parameter: Ernährung: 2.400 m² / EW a
Wärme E3 – V1: Gasbrennwertkessel mit solarer WW-Erwärmung
Strom: Windkraft
Verkehr: Kraftstoffbereitstellung aus BtL

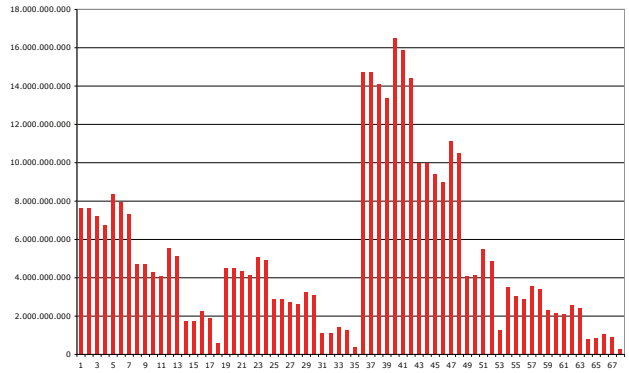


Abb. 6.4.14 Szenario 4 - Endenergiebedarf für Wärme in kWh / a

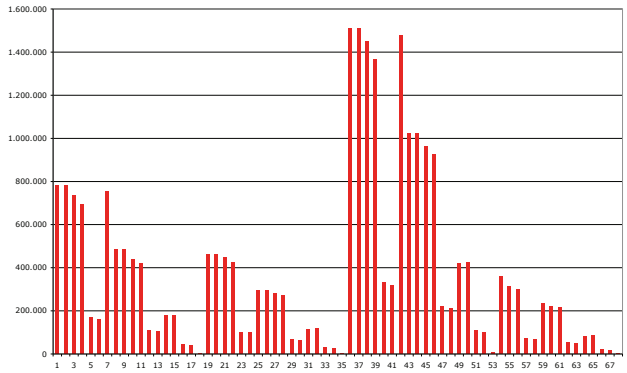


Abb. 6.4.15 Szenario 4 - Flächenbedarf für Wärme in ha / a

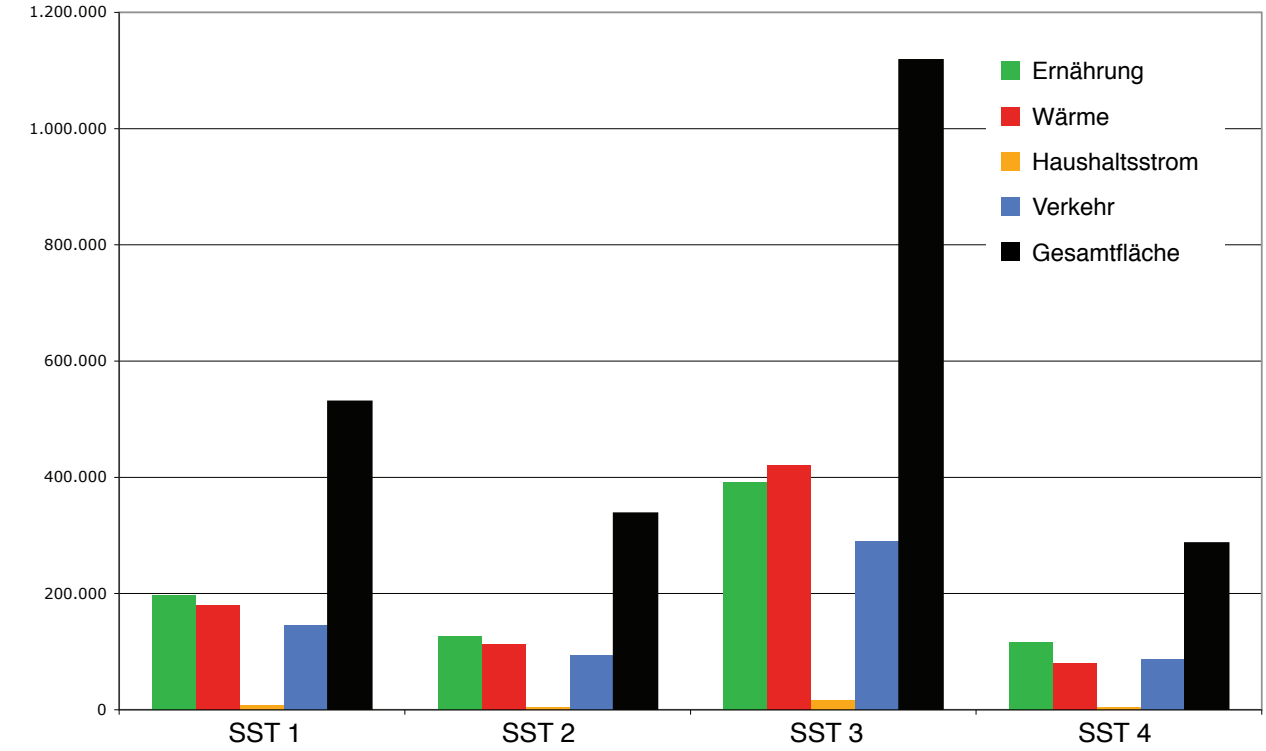


Abb. 6.4.16 Szenario 4 - Flächenbedarf zur Versorgung Berlins für alle Versorgungsbereiche in ha / a

	Ernährung	Wärme	Strom	Verkehr	Summe
Variante	2.400 m²	E3-V1Gas + Sol.	Wind	BtL	
	ha/a	ha/a	ha/a	ha/a	ha/a
SST 1	196.244	180.440	7.923	146.153	530.761
SST 2	126.356	112.617	5.102	94.104	338.179
SST 3	390.618	421.087	15.771	290.913	1.118.389
SST 4	116.285	79.436	4.695	86.603	287.019
Summe	829.503	793.581	33.491	617.773	2.274.348
%	36,5	34,9	1,5	27,2	100,0

Tab. 6.4.8 Szenario 4 - Flächenbedarf zur Versorgung Berlins für alle Versorgungsbereiche

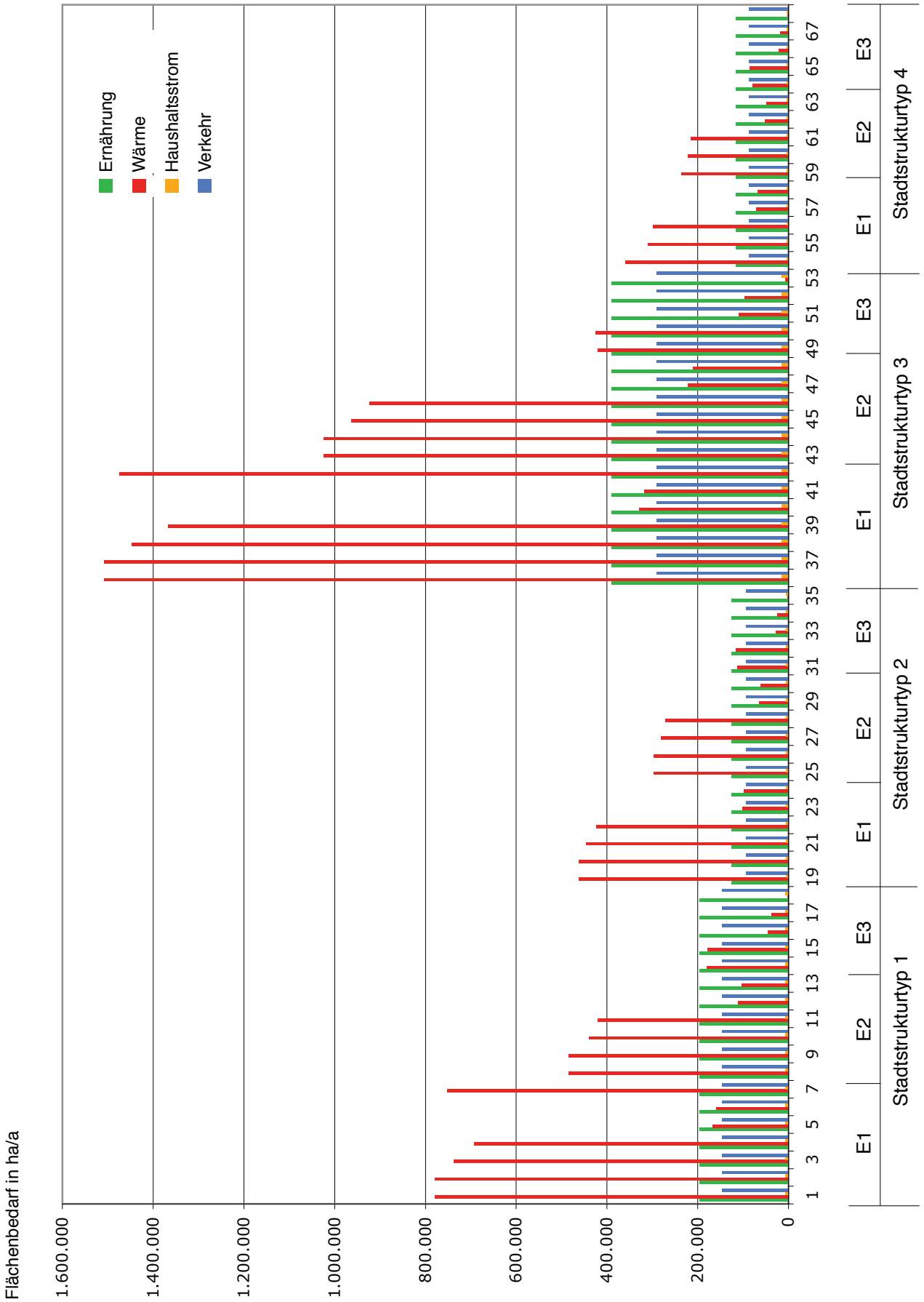


Abb. 6.4.17 Szenario 4 - Gesamtflächenbedarf der Varianten zur Wärmeversorgung im Vergleich

			Technologie zur Wärmeversorgung			Gesamtendenergiebedarf	
			Wärmeerzeuger Heizung	Wärmeerzeuger Warmwasser	spez.End-energiebedarf	Wärmebedarf je SST Wohnfläche * spez. Endenerg.	
					kWh/ (m2 a)	kWh/a	Terajoule/a
SST 1	E1	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	243,2	7.611.829.655	27.403
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	243,2	7.611.829.655	27.403
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	230,0	7.198.687.585	25.915
		V4	KWK	KWK	215,9	6.757.376.738	24.327
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	266,9	8.353.607.463	30.073
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	253,9	7.946.725.121	28.608
		V8	Standard-Heizkessel	Nachtstrom	234,6	7.342.661.337	26.434
	E2	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	151,3	4.735.484.485	17.048
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	151,3	4.735.484.485	17.048
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	137,2	4.294.173.638	15.459
		V4	KWK	KWK	131,1	4.103.251.924	14.772
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	177,5	5.555.508.897	20.000
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	164,1	5.136.107.099	18.490
	E3	V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	56,3	1.762.113.526	6.344
		V4	KWK	KWK	55,7	1.743.334.341	6.276
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	73,1	2.287.930.706	8.237
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	60,8	1.902.957.414	6.851
		V7	Erdreich/Wasser-WP	Erdreich/Wasser-WP	18,1	566.505.414	2.039
SST 2	E1	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	221,6	4.513.164.282	16.247
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	221,6	4.513.164.282	16.247
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	213,7	4.352.270.790	15.668
		V4	KWK	KWK	202,9	4.132.315.130	14.876
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	250,1	5.093.602.829	18.337
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	242,0	4.928.636.084	17.743
	E2	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	142,4	2.900.156.109	10.441
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	142,4	2.900.156.109	10.441
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	134,5	2.739.262.617	9.861
		V4	KWK	KWK	129,9	2.645.577.799	9.524
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	159,7	3.252.492.490	11.709
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	151,7	3.089.562.372	11.122
	E3	V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	54,0	1.099.778.300	3.959
		V4	KWK	KWK	56,0	1.140.510.829	4.106
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	70,5	1.435.821.669	5.169
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	62,2	1.266.781.671	4.560
		V7	Erdreich/Wasser-WP	Erdreich/Wasser-WP	17,7	360.482.887	1.298
SST 3	E1	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	234,6	14.728.513.493	53.023
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	234,6	14.728.513.493	53.023
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	225,1	14.132.090.313	50.876
		V4	KWK	KWK	212,7	13.353.601.108	48.073
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	262,6	16.486.392.342	59.351
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	253,2	15.896.247.300	57.226
		V8	Standard-Heizkessel	Nachtstrom	229,5	14.408.328.417	51.870
	E2	V1	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	159,4	10.007.353.158	36.026
		V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	159,4	10.007.353.158	36.026
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	149,9	9.410.929.977	33.879
		V4	KWK	KWK	143,6	9.015.407.236	32.455
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	177,0	11.112.305.577	40.004
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	167,6	10.522.160.535	37.880
	E3	V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	65,5	4.112.180.877	14.804
		V4	KWK	KWK	66,1	4.149.849.710	14.939
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	87,2	5.474.536.985	19.708
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	77,6	4.871.835.665	17.539
		V7	Erdreich/Wasser-WP	Erdreich/Wasser-WP	20,6	1.293.296.581	4.656
SST 4	E1	V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	184,5	3.516.571.121	12.660
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	159,1	3.032.446.967	10.917
		V4	KWK	KWK	152,7	2.910.462.928	10.478
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	187,8	3.579.469.141	12.886
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	179,9	3.428.895.093	12.344
	E2	V2	Standard-Heizkessel	Standard-Heizkessel	121,2	2.310.072.736	8.316
		V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	113,4	2.161.404.689	7.781
		V4	KWK	KWK	110,6	2.108.036.672	7.589
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	135,7	2.586.442.824	9.311
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	127,8	2.435.868.776	8.769
	E3	V3	Standard-Heizkessel	Solare TW-Erwärmung	40,7	775.742.247	2.793
		V4	KWK	KWK	43,7	832.922.265	2.999
		V5	Pelletheizung	Pelletheizung	56,2	1.071.172.341	3.856
		V6	Pelletheizung	Solare TW-Erwärmung	48,1	916.786.292	3.300
		V7	Erdreich/Wasser-WP	Erdreich/Wasser-WP	14,4	274.464.087	988

Endenergiebedarf je Einwohner			Flächenbedarf je Einwohner				Summe Flächenbedarf			
Wärme	Strom	Verkehr	Ernährung	Wärme	Strom	Verkehr	Ernährung	Wärme	Strom	Verkehr
kWh/EW a	kWh/EW a	kWh/EWa	m2/Einwohner Jahr				ha /Jahr			
9309	1.700	5.400	2.400	9532	97	1787	196.244	779.451	7.923	146.153
9309	1.700	5.400	2.400	9532	97	1787	196.244	779.451	7.923	146.153
8804	1.700	5.400	2.400	9015	97	1787	196.244	737.146	7.923	146.153
8264	1.700	5.400	2.400	8462	97	1787	196.244	691.955	7.923	146.153
10.216	1.700	5.400	2.400	2043	97	1787	196.244	167.072	7.923	146.153
9719	1.700	5.400	2.400	1944	97	1787	196.244	158.935	7.923	146.153
8980	1.700	5.400	2.400	9195	97	1787	196.244	751.889	7.923	146.153
5791	1.700	5.400	2.400	5930	97	1787	196.244	484.914	7.923	146.153
5791	1.700	5.400	2.400	5930	97	1787	196.244	484.914	7.923	146.153
5252	1.700	5.400	2.400	5378	97	1787	196.244	439.723	7.923	146.153
5018	1.700	5.400	2.400	5139	97	1787	196.244	420.173	7.923	146.153
6794	1.700	5.400	2.400	1359	97	1787	196.244	111.110	7.923	146.153
6281	1.700	5.400	2.400	1256	97	1787	196.244	102.722	7.923	146.153
2155	1.700	5.400	2.400	2207	97	1787	196.244	180.440	7.923	146.153
2132	1.700	5.400	2.400	2183	97	1787	196.244	178.517	7.923	146.153
2798	1.700	5.400	2.400	560	97	1787	196.244	45.759	7.923	146.153
2327	1.700	5.400	2.400	465	97	1787	196.244	38.059	7.923	146.153
693	1.700	5.400	2.400	39	97	1787	196.244	3.229	7.923	146.153
8572	1.700	5.400	2.400	8778	97	1787	126.356	462.148	5.102	94.104
8572	1.700	5.400	2.400	8778	97	1787	126.356	462.148	5.102	94.104
8267	1.700	5.400	2.400	8465	97	1787	126.356	445.673	5.102	94.104
7849	1.700	5.400	2.400	8037	97	1787	126.356	423.149	5.102	94.104
9675	1.700	5.400	2.400	1935	97	1787	126.356	101.872	5.102	94.104
9361	1.700	5.400	2.400	1872	97	1787	126.356	98.573	5.102	94.104
5509	1.700	5.400	2.400	5641	97	1787	126.356	296.976	5.102	94.104
5509	1.700	5.400	2.400	5641	97	1787	126.356	296.976	5.102	94.104
5203	1.700	5.400	2.400	5328	97	1787	126.356	280.500	5.102	94.104
5025	1.700	5.400	2.400	5146	97	1787	126.356	270.907	5.102	94.104
6178	1.700	5.400	2.400	1236	97	1787	126.356	65.050	5.102	94.104
5868	1.700	5.400	2.400	1174	97	1787	126.356	61.791	5.102	94.104
2089	1.700	5.400	2.400	2139	97	1787	126.356	112.617	5.102	94.104
2166	1.700	5.400	2.400	2218	97	1787	126.356	116.788	5.102	94.104
2727	1.700	5.400	2.400	545	97	1787	126.356	28.716	5.102	94.104
2406	1.700	5.400	2.400	481	97	1787	126.356	25.336	5.102	94.104
685	1.700	5.400	2.400	39	97	1787	126.356	2.055	5.102	94.104
9049	1.700	5.400	2.400	9267	97	1787	390.618	1.508.200	15.771	290.913
9049	1.700	5.400	2.400	9267	97	1787	390.618	1.508.200	15.771	290.913
8683	1.700	5.400	2.400	8891	97	1787	390.618	1.447.126	15.771	290.913
8205	1.700	5.400	2.400	8402	97	1787	390.618	1.367.409	15.771	290.913
10129	1.700	5.400	2.400	2026	97	1787	390.618	329.728	15.771	290.913
9767	1.700	5.400	2.400	1953	97	1787	390.618	317.925	15.771	290.913
8853	1.700	5.400	2.400	9065	97	1787	390.618	1.475.413	15.771	290.913
6149	1.700	5.400	2.400	6296	97	1787	390.618	1.024.753	15.771	290.913
6149	1.700	5.400	2.400	6296	97	1787	390.618	1.024.753	15.771	290.913
5782	1.700	5.400	2.400	5921	97	1787	390.618	963.679	15.771	290.913
5539	1.700	5.400	2.400	5672	97	1787	390.618	923.178	15.771	290.913
6828	1.700	5.400	2.400	1366	97	1787	390.618	222.246	15.771	290.913
6465	1.700	5.400	2.400	1293	97	1787	390.618	210.443	15.771	290.913
2527	1.700	5.400	2.400	2587	97	1787	390.618	421.087	15.771	290.913
2550	1.700	5.400	2.400	2611	97	1787	390.618	424.945	15.771	290.913
3364	1.700	5.400	2.400	673	97	1787	390.618	109.491	15.771	290.913
2993	1.700	5.400	2.400	599	97	1787	390.618	97.437	15.771	290.913
795	1.700	5.400	2.400	45	97	1787	390.618	7.372	15.771	290.913
7258	1.700	5.400	2.400	7432	97	1787	116.285	360.097	4.695	86.603
6259	1.700	5.400	2.400	6409	97	1787	116.285	310.523	4.695	86.603
6007	1.700	5.400	2.400	6151	97	1787	116.285	298.031	4.695	86.603
7388	1.700	5.400	2.400	1478	97	1787	116.285	71.589	4.695	86.603
7077	1.700	5.400	2.400	1415	97	1787	116.285	68.578	4.695	86.603
4768	1.700	5.400	2.400	4882	97	1787	116.285	236.551	4.695	86.603
4461	1.700	5.400	2.400	4568	97	1787	116.285	221.328	4.695	86.603
4351	1.700	5.400	2.400	4455	97	1787	116.285	215.863	4.695	86.603
5338	1.700	5.400	2.400	1068	97	1787	116.285	51.729	4.695	86.603
5027	1.700	5.400	2.400	1005	97	1787	116.285	48.717	4.695	86.603
1601	1.700	5.400	2.400	1639	97	1787	116.285	79.436	4.695	86.603
1719	1.700	5.400	2.400	1760	97	1787	116.285	85.291	4.695	86.603
2211	1.700	5.400	2.400	442	97	1787	116.285	21.423	4.695	86.603
1892	1.700	5.400	2.400	378	97	1787	116.285	18.336	4.695	86.603
566	1.700	5.400	2.400	39	97	1787	116.285	1.913	4.695	86.603

Tab. 6.4.9 Szenario 4 - Übersicht der Ergebnisse mit allen Varianten zur Wärmeversorgung

6.4.3 Diskussion der Ergebnisse der gewählten Versorgungsszenarien

Die Ergebnisse der Berechnung zur Flächeninanspruchnahme der vier untersuchten Szenarien sind in Tab. 6.4.10 und Abb. 6.4.18 dargestellt und im Folgenden kurz zusammengefasst:

Szenario 1 - Status Quo
Unter Zugrundelegung eines hohen Heiz- und Endenergiebedarfs und der Wärmeversorgung durch Gasbrennwerttechnik (Variante E1-V2) beträgt der Flächenbedarf allein zur Wärmeversorgung der Berliner Haushalte aus Biogas ca. 3 Mio. ha – das sind 55% des Gesamtflächenbedarfs und das Doppelte der landwirtschaftlichen Nutzfläche Brandenburgs. Allein die Bereitstellung von Biodiesel als Kraftstoff für den Verkehrsektor Berlins würde mit 1,6 Mio. ha mehr landwirtschaftliche Nutzfläche beanspruchen, als in Brandenburg bewirtschaftet werden. Insgesamt würde Berlin allein etwa die vierfache Fläche zur Versorgung benötigen – eine Fläche von 1,6 ha je Einwohner. Hierin sind die Versorgung von Nichtwohngebäuden und die Industrieproduktion nicht einmal eingeschlossen.

Szenario 2 - Ausbau Holzheizungen
Eine hypothetische Versorgung mit Energieholz aus Schnellumtriebsplantagen unterstützt von solarer Brauchwassererwärmung würde den Flächenbedarf theoretisch erheblich senken. Besonders die Bereitstellung von Holz aus Kurzumtriebsplantagen hat verglichen zum Biogas eine relativ hohe Flächenproduktivität. Das Szenario berücksichtigt allerdings nicht die Transportrestriktionen, die bei der energetischen Holznutzung bestehen. Praktisch ist die energetische Nutzung von Waldholz, Restholz und Holz aus Kurzumtriebsplantagen (Pellets, Holzhackschnitzel etc.) damit für die Wärmeversorgung der Berliner Haushalte nur sehr eingeschränkt erschließbar. Insofern ist dieses Szenario nur bedingt aussagekräftig. Hinzu kommen Fragen der Feinstaubemissionen aus einer flächendeckenden Verbrennung sowie die Aufwendungen in der Transport- und Lagerlogistik. Im Verkehrssektor erhöht die Nutzung von BtL-Kraftstoffen (Biomass-to-Liquid) die Flächenproduktivität gegenüber Biodiesel um das Doppelte und senkt damit den Flächenbedarf erheblich. Durch die Optimierung in diesen beiden Subsystemen kann der Flächenbedarf um mehr als die Hälfte reduziert werden.

Szenario 3 - Moderate energetische Optimierung
Mit Variante E2-V3 wird ein durchschnittlicher Endenergiebedarf von 100 - 120 kWh/m^2 a zugrunde gelegt. Trotz des geringeren Endenergiebedarfs als in Szenario 2 fällt die Flächeninanspruchnahme aufgrund der Biogasproduktion höher aus. Unter Berücksichtigung eines Versorgungsanteils von 50% durch Erdgas kann der Gesamtflächenbedarf fast auf die Größe der vorhandenen landwirtschaftlichen Nutzfläche Brandenburgs reduziert werden.

Szenario 4 - Maximierung der energetischen Optimierung des Gebäudebestandes
Szenario 4 zeigt den Flächenbedarf für Biogas bei einem baulich energetisch optimierten Ausbauzustand des Gebäudebestands. Das Erreichen dieses geringen Heiz- und Endenergiebedarfs setzt neben den baulichen Maßnahmen zur energetischen Ertüchtigung der Gebäudehülle zumindest modelltechnisch einen flächendeckenden Ausbau von Lüftungsanlagen auch im Gebäudebestand voraus. Idealerweise sollten diese mit Wärmerückgewinnung ausgestattet sein. Abgesehen von der energetischen Seite hat diese Maßnahme positive Auswirkungen auf die Luftqualität in Gebäuden

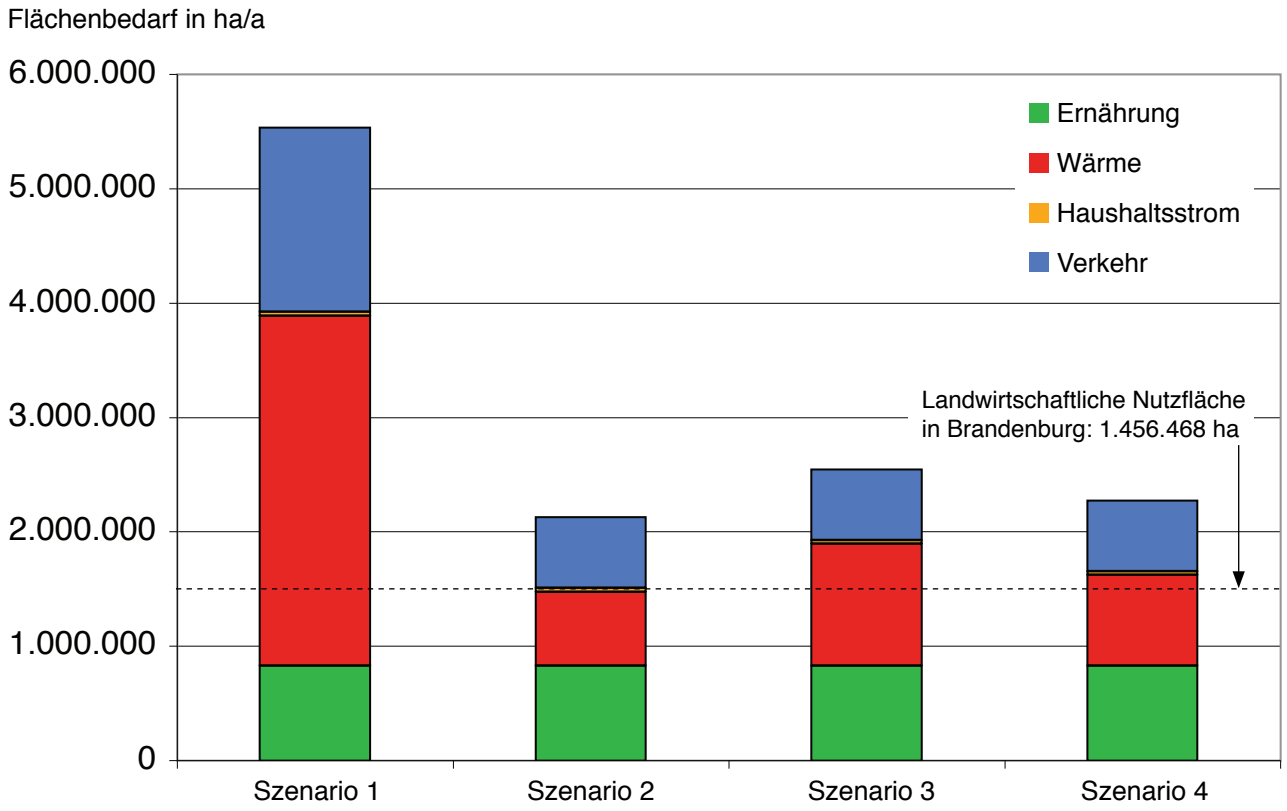


Abb. 6.4.18 Übersicht zum Gesamtflächenbedarf aller Szenarien zur Versorgung von Berlin

	Ernährung	Wärme	Strom	Verkehr	Gesamt-flächenbedarf	Flächen-bedarf Anteil	Flächenbedarf /je Einwohner
	ha/a	ha/a	ha/a	ha/a	ha/a	%	ha / EW
Szenario 1	829.503	3.060.322	33.491	1.612.555	5.535.871	380	1,6017
Szenario 2	829.503	647.309	33.491	617.773	2.128.076	146	0,6157
Szenario 3	829.503	1.065.612	33.491	617.773	2.546.379	175	0,7367
Szenario 4	829.503	793.581	33.491	617.773	2.274.348	156	0,6580

Tab. 6.4.10 Übersicht Gesamtflächenbedarf aller Szenarien und spezifischer Flächenbedarf je Einwohner
Bevölkerung Berlin: 3.456.264 Einwohner – Landwirtschaftliche Nutzfläche: 1.456.468 ha

und auf die Bauschadensfreiheit durch Vermeidung von Schimmelpilzen. Aber selbst bei diesem Szenario kann eine vollständige Selbstversorgung nicht erzielt werden. Mit 2,2 Mio. ha Gesamtflächenbedarf bzw. 0,65 ha/(EW*a) liegt der Flächenbedarf immer noch ca. 50% über dem vorhandenen Flächenbestand.

Der Anteil des Verkehrsbereichs liegt bei allen angenommenen Szenarien zwischen 25 und 30%. Mit zunehmender Effizienz im Bereich der Bereitstellung extra-somatischer Energie (Szenarien 2-4) steigt bei einem gleichbleibenden Flächenbedarf für Ernährung dieser Bereich anteilig von heute etwa 15% auf 30-40%. Mit einem Bedarf von ca. 0,8 Mio. ha für Berlin und weiteren ca. 0,3 Mio. ha für das Land Brandenburg ist die verfügbare landwirtschaftliche Nutzfläche theoretisch bereits vollständig für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion beansprucht. Eine Selbstversorgung mit Energieträgern und anderen Gütern ist ausgeschlossen.

6.5 Versorgungspotenziale erneuerbarer Energien im Land Brandenburg

6.5.1 Landschafts- und Kulturentwicklung Brandenburgs

Das Land Brandenburg liegt im norddeutschen Tiefland und erhielt seine geographischen Ausprägungen während der letzten Eiszeit, die vor ca. 10-15.000 Jahren endete. Die Bodenoberfläche wird fast ausschließlich durch eiszeitliche und nacheiszeitliche Ablagerungen wie Geschiebemergel und Schmelzwassersande gebildet. Aufgrund der Vielgestaltigkeit der eiszeitlichen Ablagerungen sind die Bodengesellschaften sehr heterogen, flächenmäßig überwiegen aber vor allem im mittleren und südlichen Brandenburg nährstoffarme Sandböden.

Als ältester Beleg ist seit ca. 8.000 v. Chr. eine späteiszeitliche Besiedlung durch Jäger und Sammlerkulturen nachgewiesen [WOITHE 2003:29]. Die natürlich vorherrschenden Eichenmischwälder wurden bereits durch die frühneolithischen bandkeramischen Siedler zu parkähnlichen Landschaften aufgelockert, um die fruchtbaren Lösgebiete für Ackerbau und Viehzucht zu nutzen [WOITHE 2003:33]. Archäologische Grab- und Siedlungsfunde belegen eine kontinuierliche Besiedelung Brandenburgs seit der Bronzezeit um ca. 1.500 v. Chr. Aufgrund der nährstoffarmen Böden waren die frühen Siedlungstätigkeiten zunächst durch ein Muster unsteter Landbewirtschaftung gekennzeichnet, deren Wirkungszusammenhang anhand archäologischer Grabungen für den Oderbruch rekonstruiert wurde [BORK ET AL. 1998:50]. Zunächst erfolgten Rodungen mit intensiver Siedlungstätigkeit, die von ausgedehnter Landnutzung begleitet wurden. Winderosion führte in der Folgezeit zu starken Anwehungen von Sanden aus vegetationsarmen, ausgeräumten Landschaftsausschnitten. Die Anlagerung nährstoffarmer, leicht austrocknender Sande bewirkte eine drastische Abnahme der Bodenfruchtbarkeit, verbunden mit der Nutzungs- und Siedlungsaufgabe und anschließender Wiederbewaldung mit schwacher Bodenbildung. Der Prozess von Rodung, Siedlungstätigkeit, Erosion und Wiederbewaldung wiederholte sich mehrmals, wobei die bronze- und früheisenzeitlichen Siedlungen jeweils nur etwa ein Jahrhundert bestanden [BORK ET AL. 1998:53].

Nach slawischen Einwanderungen im 7. Jahrhundert begann durch die *deutsche Ostkolonisation* Ende des 10. Jahrhunderts die systematische Christianisierung und Landschaftskultivierung. Mit der Gründung der Bistümer Havelberg (946) und Brandenburg (948) entstand im Rahmen des hochmittelalterlichen Landesausbaus die *Mark Brandenburg*. Noch bis ins späte Mittelalter war Brandenburg weitgehend bewaldet. Die stärkste anthropogene Überformung erfuhr die Landschaft durch die Einwirkungen spätmittelalterlicher Wüstungen und durch Trockenlegung, sogenannte Bodenmeliorationen, um das fruchtbare Auenland zu erschließen. Vor dem Hintergrund des seit dem 18. Jahrhundert einsetzenden starken Bevölkerungswachstums und den machtpolitischen Bestrebungen Preußens wurden die Intensivierung der Landwirtschaft und die Kultivierung von Ackerland vorangetrieben. Infolge von Ernteausfällen und damit verbundene Lebensmittelteuerungen kam es in den Jahren 1771/72 und 1803/4 zu Hungersnöten. In vielen zeitgenössischen Berichten des 18. Jahrhunderts wurde die schlechte Bodenbeschaffenheit beklagt, galt Brandenburg doch bereits seit Jahrhunderten schon als die Streusandbüchse der deutschen Territorien [SPRENGER 2011:29]. Eine Erweiterung des Ackerlandes auf Kosten von Waldfläche war in Brandenburg wie in vielen anderen Gegenden Deutschlands seit dem 18. Jahrhundert keine Option mehr, da die Forstordnungen des 17. und 18. Jahrhunderts aufgrund der Angst vor Holzmangel bereits eine nachhaltige Bewirtschaftung



Kreisfreie Städte:
1 - Brandenburg a.d. Havel
2 - Cottbus
3 - Frankfurt (Oder)
4 - Potsdam

Abb. 6.5.1 Karte des Landes Brandenburg mit Verwaltungsbezirken

Nr.	Landkreis	Einwohner	Fläche in km2	Fläche in ha	Gebäude- und Freifläche	Betriebs-fläche	Erholungs-fläche	Verkehrs-fläche	Landwirtschafts-fläche	Wald-fläche	Wasser-fläche	Flächen anderer Nutzung
1.	Barnim (BAR)	177.644	1.494,33	149.441	8.483	604	532	5.803	53.636	69.191	7.679	3.513
2.	Dahme-Spreewald (LDS)	161.482	2.261,09	226.115	9.552	2.139	742	8.143	89.798	102.066	9.092	4.582
3.	Elbe-Elster (EE)	115.560	1.889,34	188.939	6.635	4.587	865	6.479	97.079	67.104	3.088	3.102
4.	Havelland (HVL)	155.141	1.717,15	171.736	8.965	559	820	6.685	101.788	43.645	5.443	3.831
5.	Märkisch-Oderland (MOL)	191.241	2.127,99	212.818	12.018	1.116	1.426	7.794	133.181	48.393	5.686	3.205
6.	Oberhavel (OHV)	202.231	1.795,77	179.594	10.440	815	755	6.747	76.918	71.555	7.016	5.349
7.	Oberspreewald-Lausitz (OSL)	125.216	1.216,65	121.670	6.476	11.547	996	5.368	42.440	44.369	3.681	6.793
8.	Oder-Spree (LOS)	186.542	2.242,71	224.285	11.098	653	389	7.663	85.579	106.400	8.572	3.932
9.	Ostprignitz-Ruppin (OPR)	104.786	2.509,22	250.940	6.987	557	645	8.022	139.027	85.086	8.492	2.123
10.	Potsdam-Mittelmark (PM)	204.277	2.575,05	257.512	10.397	706	838	10.061	120.212	103.662	6.862	4.775
11.	Prignitz (PR)	84.284	2.123,31	212.331	6.257	505	448	6.870	144.292	48.541	3.994	1.425
12.	Spree-Neiße (SPN)	130.626	1.647,89	164.794	7.437	11.279	622	6.367	58.404	73.776	4.592	2.317
13.	Teltow-Fläming (TF)	162.073	2.092,08	209.226	9.928	885	799	7.190	96.679	86.516	3.728	3.502
14.	Uckermark (UM)	132.837	3.058,08	305.821	9.286	752	1.448	7.820	193.281	72.336	15.537	5.362
	Kreisfreie Städte											
1.	Brandenburg (BRB)	72.516	228,80	22.880	2.997	245	432	1.370	6.846	6.424	4.105	461
2.	Cottbus	99.823	164,28	16.428	2.705	1.797	787	1.258	4.967	3.390	264	1.260
3.	Frankfurt (Oder) (FF)	61.286	147,61	14.769	1.641	171	625	1.069	6.501	3.935	599	228
4.	Potsdam (P)	154.966	187,27	18.729	3.343	116	782	1.351	5.840	4.608	2.076	613
	Land Brandenburg	2.522.531	29.479	2.948.028	134.645	39.033	13.951	106.060	1.456.468	1.040.997	100.506	56.373
	Flächenanteile in %			100	4,6	1,3	0,5	3,6	49,4	35,3	3,4	1,9

Tab. 6.5.1 Land Brandenburg: Katasterfläche nach Verwaltungsbezirken und Nutzungsart 2007 [AMT FÜR SATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2008, BOSCH & PARTNER 2009:55]

der Wälder auferlegte [SPRENGER 2011:37]. Erst die umfangreichen Agrar- und Bildungsreformen des frühen 19. Jahrhunderts, Veränderungen der rechtlichen Bodenverhältnisse und der landwirtschaftlichen Anbaumethoden, aber besonders die mit der Gewerbefreiheit einsetzende Industrialisierung ermöglichten eine intensivere Bodennutzung und Ausweitung der landwirtschaftlichen Erträge.

Das heutige *Bundesland Brandenburg* hat eine maximale Nord-Süd-Ausdehnung von 291 km und eine Ost-West-Ausdehnung von 244 km. Es umfasst damit eine Gesamtfläche von 29.479 km^2 (Abb. 6.5.1 und Tab 6.5.1). Zusammen mit Berlin bildet es die *europäische Metropolregion Berlin - Brandenburg*. Die landwirtschaftlichen Nutzflächen machen mit 1,45 Mio. ha (50%) den größten Flächenanteil aus. Die Waldfläche umfasst mit 1,04 Mio. ha (35%) den zweitgrößten Flächenanteil, wobei anthropogen bedingt die Waldkiefer mit 70 % der Forstfläche aktuell die dominierende Baumart ist [WOITHE 2003:30]. Der Naturschutz hat eine hohe Priorität. Im Jahr 2002 waren insgesamt rund ein Drittel der Landesfläche als Großschutzgebiete (ein Nationalpark, drei Biosphärenreservate der UNESCO und elf Naturparks) ausgewiesen.

6.5.2 Aktuelle Studien und Stand des Ausbaus Erneuerbarer Energien in Brandenburg

Das Land Brandenburg verursacht auf Grund seiner historisch gewachsenen Energiestruktur mit Kohlekraftwerken zur Verstromung von Braunkohle einen hohen primärenergetischen Verbrauch mit hohen Kohlendioxidemissionen. Aufgrund seiner geringen Bevölkerungsdichte und einem großen Anteil an Windenergie ist Brandenburg gleichzeitig zu einem Vorreiter erneuerbarer Energien in Deutschland geworden.

Die Brandenburgische Landesregierung verabschiedete im Mai 2008 die *Energiestrategie 2020* [LANDESREGIERUNG BRANDENBURG 2008]. Darin werden die energie- und klimapolitischen Ziele definiert. Für die energetische Biomassenutzung wurde einen Anteil von 49 PJ am Primärenergieverbrauch bis 2020 als Ziel festgelegt. Die Sicherung der Wertschöpfung aus der landwirtschaftlichen Nahrungsgüterproduktion hat dabei Vorrang gegenüber der Biomasseerzeugung zur energetischen Nutzung [BMUV 2010:6]. Die folgende Ermittlung der Potenziale erneuerbarer Energien fasst mehrere aktuelle Studien zusammen, die u.a. Eingang in die *Energiestrategie 2020 des Landes Brandenburg* gefunden haben [LANDESREGIERUNG BRANDENBURG 2008].

In den Studien *Flächenbedarfe und kulturlandschaftliche Auswirkungen regenerativer Energien am Beispiel der Region Uckermark-Barnim* [BOSCH & PARTNER ET AL. 2006], *Erarbeitung von Grundlagen zur regionalplanerischen Steuerung von Photovoltaik-Freiflächenanlagen am Beispiel der Region Lausitz-Spreewald* [BOSCH & PARTNER ET AL. 2009], *Netzintegration Erneuerbarer Energien in Brandenburg* [CEBRA ET AL. 2010] und der *Biomassestrategie des Landes Brandenburg* [BMUV 2010] finden sich bereits Abschätzungen über die regionalen Energiepotenziale. Weitere Erhebungen finden sich in der *Biomasse-Strategie des Landes Brandenburg bis 2020* [BMUV 2010].

Der Ausbauzustand erneuerbarer Energien ist u.a. bei ENERGYMAP dokumentiert, eine Internetseite der *Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.*, welche bundesweit alle Initiativen zum Ausbau erneuerbarer Energien sammelt [http://www.energymap.info/] (Tab. 6.5.2).

	Bundesland	Anteil
1.	Brandenburg	47%
2.	Mecklenburg-Vorpommern	36%
3.	Schleswig-Holstein	31%
4.	Niedersachsen	30%
5.	Sachsen-Anhalt	28%
6.	Thüringen	16%
7.	Bayern	16%
8.	Rheinland-Pfalz	12%
9.	Saarland	10%
10.	Baden-Württemberg	10%
	Deutschland	16%

Verwaltungsbezirk	Anteil
Barnim	41%
Brandenburg an der Havel	8%
Cottbus	17%
Dahme-Spreewald	36%
Elbe-Elster	28%
Frankfurt (Oder)	10%
Havelland	59%
Märkisch-Oderland	58%
Oberhavel	21%
Oberspreewald-Lausitz	29%
Oder-Spree	50%
Ostprignitz-Ruppin	98%
Potsdam	0%
Potsdam-Mittelmark	39%
Prignitz	172%
Spree-Neiße	9%
Teltow-Fläming	67%
Uckermark	158%
Summe Brandenburg	47%

Tab. 6.5.2 Top Ten der Bundesländer hinsichtlich ihres Anteils an erneuerbaren Energien am Stromverbrauch und Anteile der Verwaltungsbezirke Brandenburgs Stand 22.02.2011 [http://www.energymap.info/].

Differenziert nach Bundesländern und Landkreisen wird dort die Zahl der in Deutschland installierten Anlagen zur Erzeugung elektrischer Energie aus erneuerbaren Energien detailliert dokumentiert und die TOP 10 der Regionen bestimmt. Nach aktuellen Angaben (Stand 22.02.2011) ist das Land Brandenburg bei einer installierten Leistung von 4.263 MW (peak) und einem Jahresertrag von 8.929.372 MWh mit einem Selbstversorgungsgrad von 47% derzeit Spitzenreiter im Bereich der erneuerbaren Stromversorgung. Betrachtet man allerdings die Region mit Berlin ergibt sich ein anderes Bild (Abb. 6.5.2). Da Berlin eine hohe Energiedichte aufweist und Strom nur in geringem Umfang aus erneuerbaren Energien erzeugt, liegt der Anteil im Durchschnitt der Region Berlin-Brandenburg nur bei etwa 20% (Tab. 6.5.3).

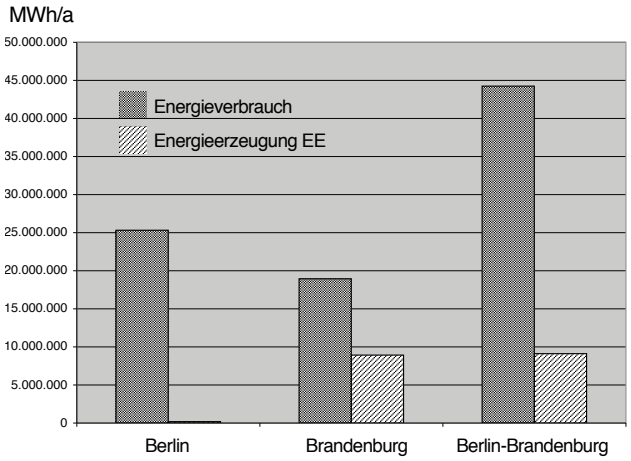


Abb. 6.5.2 Energieverbrauch und -erzeugung aus erneuerbaren Energien in Berlin und im Land Brandenburg (in MWh/a) Stand 22.02.2011. Datenquelle: [http://www.energymap.info/]

Weitere Informationen zum Ausbaustand erneuerbarer Energien in Brandenburg finden sich im *Energieatlas Brandenburg* auf der Homepage der Brandenburgischen *Energie Technologie Initiative* (ETI) der Industrie- und Handelskammer Potsdam [http://www.eti-brandenburg.de/].

Für die Ermittlung der energetischen Potentiale wird zunächst eine Unterteilung nach den bereitgestellten Energieformen Strom, Wärme und Kraftstoffe vorgenommen. Die Technologien und Nutzungspfade lassen sich nach flächenwirksamen und nicht-flächenwirksamen Formen der Nutzung erneuerbarer Energien unterscheiden Bosch & Partner [BOSCH & PARTNER ET AL. 2006]:

Flächenwirksam sind
- Windenergie
- Biomasse
- PV in Freiflächenanlagen

Nicht-flächenwirksam sind:
- Geothermie
- Gebäudeintegrierte Solarthermie
- Gebäudeintegrierte PV

Für diese Forschungsarbeit ist insbesondere die flächenwirksame Nutzung erneuerbarer Energien von Interesse. Daher werden die Potenziale der nicht-flächenwirksamen Nutzung ebenso wie Energieimporte nicht ausführlicher behandelt, gleichwohl z.B. von der geothermischen Wärme- und Stromerzeugung erhebliche Potenziale erwartet werden.

6.5.3 Potenzialabschätzung zur Nutzung erneuerbarer Energien in Brandenburg

Windenergie

Derzeit beträgt die installierte elektrische Leistung von Windenergiekonvertern in Brandenburg ca. 4.300 Megawatt (Stand November 2010) mit einem jährlichen Ertrag von 7.213.500 MWh [MUGV 2011a]. Nach dem Ausbauziel der Energiestrategie 2020 des Landes Brandenburg soll die installierte Gesamtleistung auf 7500 Megawatt mit einem jährlichen Ertrag von ca. 55 Petajoule gesteigert werden [MUGV 2011b]. Dieses Ziel soll durch die Erneuerung bestehender Anlagen – das sogenannte *Repowering* – als auch durch eine Ausweisung neuer Eignungsgebiete erreicht werden, unter Berücksichtigung der Restriktion, dass Windkraftanlagen nur mit einem Mindestabstand von 1000 m zu Wohnbebauungen errichtet werden [MIL 2009]. Insgesamt werden dann 55.500 ha Fläche beansprucht, was rund 1,9% der Landesfläche entspricht. Windenergiekonverter sind somit flächenwirksam, wobei die beanspruchte Fläche nahezu vollständig und ohne weitere Restriktionen zur Biomassenutzung für die Nahrungs- oder Energieproduktion genutzt werden kann.
Das Repowering sieht Anlagen mit einer Nabenhöhe von 100 m vor, womit die Anlagen weitgehend unabhängig von der Topographie und Störeinflüssen sind [BOSCH & PARTNER ET. AL. 2006:22]. Der Berechnung des Energiepotenzials wird die Leistung nach dem Repowering zugrundegelegt.

Photovoltaik (PV)

Dachintegrierte Photovoltaikanlagen erbringen in Deutschland je nach lokalem Strahlungspotenzial, Sonnenorientierung, Neigungswinkel und Verschattung einen durchschnittlichen Stromertrag von ca. 100 kWh/m²*a. Durch die Dachintegration werden diese Anlagen als nicht-flächenwirksam im Sinne der landschaftlichen Flächenbeanspruchung betrachtet.
Freiflächenanlagen hingegen beanspruchen Aufstellflächen, die keine weitere landwirtschaftliche Nutzung ermöglichen. Eine vergleichende Studie des Wuppertal-Instituts zur Elektrizitätsgewinnung aus PV-Freiflächenanlagen und Biogas aus Maisanbau zeigte hinsichtlich der Ökobilanzen und Flächenerträge in verschiedenen Szenarien einen deutlichen Vorteil durch die Energienutzung aus Photovoltaik. Auch bei effizienter, gekoppelter Nutzung für Elektrizität und Wärme durch Biogas aus Maisanbau und unter Berücksichtigung von Unterbrechungen bei der photovoltaischen Stromerzeugung erwies sich die PV dem Biogas überlegen. In der Studie wird der Energieertrag für Biogas mit 1.62 kWh_{el} /(m²*a) und für PV mit 22.9 kWh_{el} /(m²*a) angegeben, ein Verhältnis von 1:14 [GRAEBIG ET AL. 2010]. Die Autoren weisen darauf hin, dass die dachintegrierte PV gegenüber den

		Deutschland	Berlin	Brandenburg	Berlin-Brandenb.
Einwohner	Anzahl	82.169.000	3.420.786	2.559.000	5.979.786
Fläche	km^2	35.710.400	89.200	2.947.900	3.037.100
Stromverbrauch	MWh/a	608.050.600	25.313.816	18.936.600	44.250.416
Stromerzeugung	MWh/a	96.368.343	181.722	8.929.372	9.111.094

	Anlagen	Installierte Leistung	Jahresertrag	Anteil EE an Produktion	Anteil EE Einwohner	Anteil EE Fläche	Anteil EE am Verbrauch
	Stck.	MW(peak)	MWh/a	%	MWh/ EW a	MWh/ m2 a	%
Deutschland							
Solarstrom	837.995	15.965	15.279.023	15,85			
Windkraft	20.490	26.564	46.399.988	48,15			
Wasserkraft	7.119	1.522	6.041.959	6,27			
Biomasse	10.071	4.548	26.081.155	27,06			
Klärgas, etc	862	695	2.526.283	2,62			
Geothermie	5	8	39.935	0,04			
Summe		49.302	96.368.343	100,00	1,17	2,70	15,85
Berlin							
Solarstrom	3.108	31	27.867	15,33			
Windkraft	8	14	20.201	11,12			
Wasserkraft	0	0	0	0,00			
Biomasse	14	23	133.654	73,55			
Klärgas, etc	0	0	0	0,00			
Geothermie	0	0	0	0,00			
Summe		68	181.722	100,00	0,05	2,04	0,72
Brandenburg							
Solarstrom	12.368	458	434.493	4,87			
Windkraft	2.378	3.482	6.541.628	73,26			
Wasserkraft	34	4	17.101	0,19			
Biomasse	262	286	1.768.004	19,80			
Klärgas, etc	29	33	168.146	1,88			
Geothermie	0	0	0	0,00			
Summe		4.263	8.929.372	100,00	3,49	3,03	47,15
Berlin-Brandeburg							
Solarstrom	15.476	489	462.360	5,07			
Windkraft	2.386	3.496	6.561.829	72,02			
Wasserkraft	34	4	17.101	0,19			
Biomasse	276	309	1.901.658	20,87			
Klärgas, etc	29	33	168.146	1,85			
Geothermie	0	0	0	0,00			
Summe		4.331	9.111.094	100,00	1,52	3,00	20,59

Tab. 6.5.3 Ausbaustand erneuerbarer Energien für die Stromversorgung in Deutschland, Berlin und Brandenburg, ENERGYMAP, Stand 22.02.2011. Datenquelle: [http://www.energymap.info/]

Freiflächenanlagen als noch günstiger zu beurteilen sind. Allerdings sind die ökonomischen Aspekte und der Einfluss auf das Landschaftsbild hierbei nicht berücksichtigt. Einem großmaßstäblichen Ausbau von Freiflächen-PV wird möglicherweise ein ähnlicher Widerstand entgegengebracht werden wie der „Verstängelung“ der Landschaft durch Windenergiekonverter.

Die Energiestrategie 2020 beschreibt für den Ausbau von Solarfreiflächenanlagen in Brandenburg ein energetisches Potential von 9,8 Petajoule bei einer Flächeninanspruchnahme von 11.000 ha. Das

entspricht einer installierten PV-Leistung von einem Megawatt peak. Bei ausschließlicher Nutzung kristalliner Zellen ist eine Reduktion um 2.500 ha möglich [BOSCH&PARTNER ET AL. 2009:6].

Flächenintensive Nutzung von Biomasse

Für den Anbau von Biomasse zur energetischen Nutzung können bei Nutzung der Stilllegungsflächen bis auf 3% und unter Berücksichtigung der notwendigen Flächen zur Nahrungsmittelerzeugung ca. 300.000 ha zur Verfügung gestellt werden [BUGV 2010:11]. Nach eigenen Abschätzungen für den Flächenbedarf für Nahrungs- und Futtermittel in Höhe von ca. 2.400 m²/EW scheinen diese Zahlen recht optimistisch, da unter Zugrundelegung dieses Flächenbedarfs bereits die gesamte Anbaufläche Brandenburgs für eine ausschließlich regionale Versorgung der Berliner und Brandenburger Bevölkerung benötigt würde.
Eine Bewirtschaftung von 300.000 ha stellt ein Potenzial von ca. 40 Petajoule bzw. 11 Mio. MWh dar, was bezogen auf die Gesamtbevölkerung Berlin-Brandenburgs knapp 1.900 kWh/EW*a bedeutet. Die energetisch verfügbare Fläche Brandenburgs reicht nicht einmal zur Deckung des Kraftstoffverbrauchs der Berliner Bevölkerung. Allenfalls in effizienter Nutzung in Kraftwärmekopplung könnten nachwachsende Rohstoffe zur Stromerzeugung eingesetzt werden.

Flächenneutrale Nutzung von Biomasse

Aus Rindergülle kann pro Tonne Frischmasse 26 m³ Biogas gewonnen werden, die eine elektrische Leistung von 47 kWh ermöglichen. Bei der derzeit in Brandenburg anfallende Gülle von 8.211.548 t pro Jahr ergibt sich eine Biogasmenge von 213.500.248 m³ mit einem energetischen Potenzial von 385,9 GWh_{el}. Schweinegülle hat mit 22 m³ Biogas bzw. 39 kWh_{el} pro Tonne Frischmasse eine etwas geringere Energieausbeute. Bei einer jährlich anfallenden Menge von 1.781.058 t Gülle ergibt sich eine Biogasmenge von 39.183.276 m³ mit einem energetischen Potential von 69,5 GWh_{el}.
In der Summe ergibt sich ein Potenzial von 455,4 GWh_{el} bzw. 1,64 Petajoule [HÖHNE 2006:10]. Bei der **Biogaserzeugung** durch die Nutzung von **Gülle** ist zu beachten, das bei Rindergülle eine Trockenmassebeimischung von ca. 8% und bei Schweinegülle von ca. 6% erforderlich ist. Diese kann aus Grünflächenresten oder aus dem Anbau nachwachsender Rohstoffe erfolgen. Dadurch ist aber eine geringes Maß an Flächenwirksamkeit zu berücksichtigen [HÖHNE 2006:10]. Als energetisches Potenzial aus **Grünlandabfällen** ergeben sich im Mittel 200.000 t Trockenmasse pro Jahr [BUGV 2010:11]. Die Biomasse aus intensiver Nutzung kann vergoren und zu Gas umgewandelt werden und hat ein Energiepotenzial von 1,44 Petajoule bzw. 400.000 MWh. Biomase aus extensiver Nutzung wird in der Regel thermisch verwertet und und ergibt ein Energiepotenzial von einem Petajoule bzw. 278.000 MWh.
Ein weiteres Potential stellt die Nutzung von **Waldholz** dar. Brandenburg verfügt über 1,05 Mio. ha Wald. Das ist ein Flächenanteil von 35,5% an der Landesfläche. In den Jahren 2000 bis 2007 wurden jährlich ca. 3,7 Mio. m³ Waldholz geerntet. Der Großteil davon ging in die stoffliche Verwertung. Das Energiepotenzial aus Jungbeständen und Waldrestholz lag im Jahr 2006 bei 8,69 Petajoule, ist aber aufgrund zunehmender stofflicher Nutzung rückläufig und wird bei nachhaltiger Bewirtschaftung bis 2016 auf ca. 4 Petajoule geschätzt. Zusammen mit der Rest- und Altholzverwertung (4,4 PJ + 1,5 PJ) sowie Erträgen aus Kurzumtriebsplantagen (1,5 PJ) ergibt sich ein energetisches Potenzial von ca. 11,4 Petajoule bzw. 3,1 Mio. MWh/a [BUGV 2010:11].

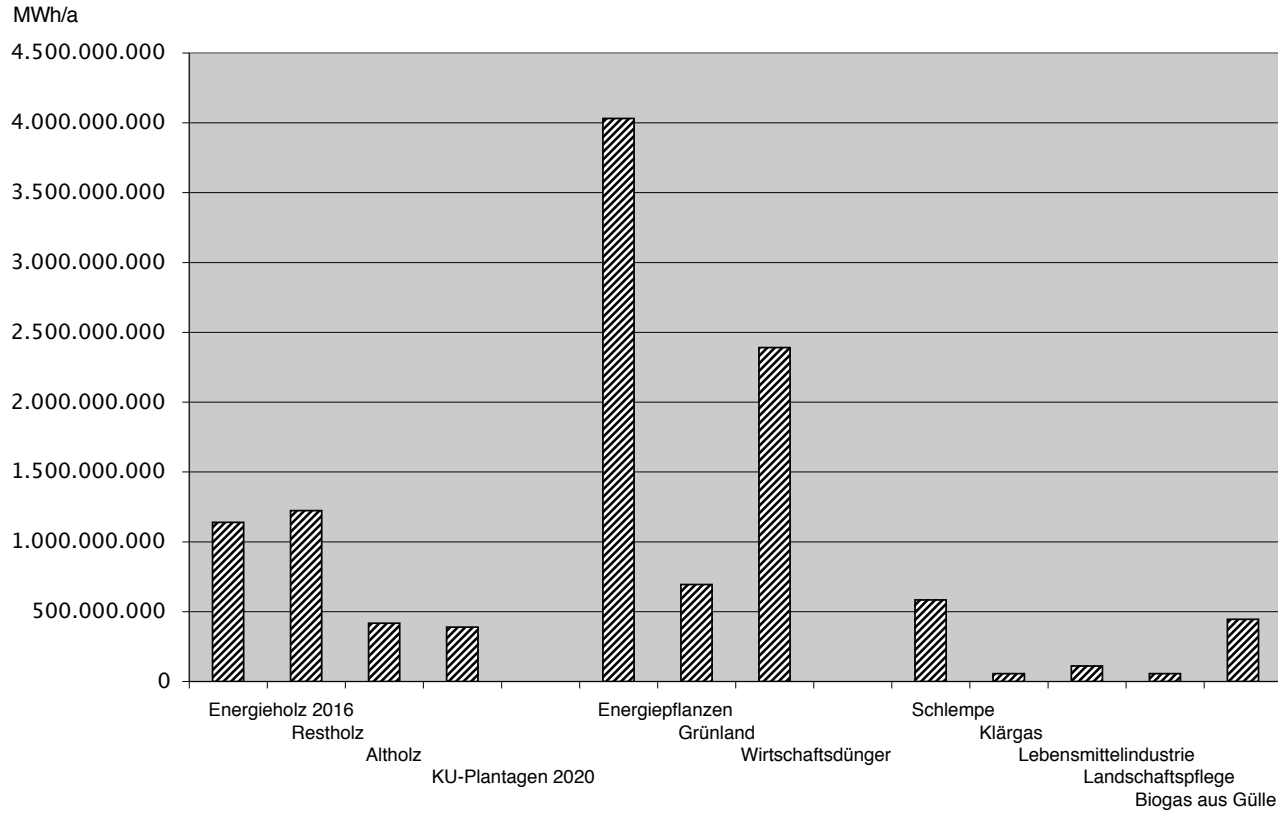


Abb. 6.5.3 Bioenergiepotenziale im Land Brandenburg. Datenquelle: [MUGV BRANDENBURG 2010]

Art der Bereitstellung	Energieertrag / Jahr Ausbauziel 2020			Energieertrag / Einwohner	Energieertrag / Fläche
	PJ	kWh	kWh	kWh / EW	kWh / ha
Holzartige Biomasse:					
Energieholz 2006	8,6				
Energieholz 2016	4,1	1.139.800.000			
Restholz	4,4	1.223.200.000			
Altholz	1,5	417.000.000			
KU-Plantagen 2020	1,4	389.200.000	3.169.200.000	531	1044
Landwirtschaftliche Biomasse:					
Energiepflanzen	14,5	4.031.000.000			
Grünland	2,5	695.000.000			
Wirtschaftsdünger	8,6	2.390.800.000	7.116.800.000	1.193	2343
Organische Reststoffe:					
Schlempe	2,1	583.800.000			
Klärgas	0,2	55.600.000			
Lebensmittelindustrie	0,4	111.200.000			
Landschaftspflege	0,2	55.600.000			
Biogas Rinder- u. Schweinegülle	1,6	444.800.000	1.251.000.000	210	412
Summe	**41,5**	**11.537.000.000**		**1.933**	**3799**
Technische Energiekonverter:					
Windenergie	55,0	15.290.000.000			5035
PV - Freianlagen	9,8	2.724.400.000			897
Summe	**64,8**	**18.014.400.000**		**3.019**	**5932**
Summe aller Potenziale	**106,3**	**29.551.400.000**		**4.952**	**9.731**

Tab. 6.5.4 Potenziale erneuerbarer Energien in Brandenburg und ihre Flächenbeanspruchung für Biomasse [BUGV 2010:16] sowie Windenergie und PV [MIL 2009] gem. Ausbaustrategie 2020

6.6 Zusammenfassung

Das in Kapitel 5 beschriebene Modell zur Ermittlung der Versorgungsflächen der Teilsysteme Ernährung, Wärmeversorgung, Haushaltsstrom und Energieträger für Verkehr wurde in Kapitel 6 empirisch am Beispiel des urbanen Systems Berlin angewendet.
Zunächst wurden die wichtigsten räumlichen, bevölkerungsstatistischen und energieinfrastrukturellen Parameter der Region Berlin-Brandenburg beschrieben (Kapitel 6.1). Anschließend wurden vier Stadtstrukturtypen beschrieben, die annäherungsweise alle Berliner Wohngebäudetypologien repräsentieren und durch Typenvertreter hinsichtlich ihrer architektonischen und städtebaulichen Kenndaten wie Konstruktion, bauliche Dichte, Wohnfläche, Bewohneranzahl u.a. analysiert wurden (Kapitel 6.2). Die stadträumlichen Flächen der gewählten Stadtstrukturtypen sind statistisch erfasst und über den Berliner Umweltatlas zugänglich [SENSTADT BERLIN 2008a]. Mit Hilfe der ermittelten städtebaulichen Kenndaten wurde das Mengengerüst der Berliner Wohnflächenstatistik mit den vier Berliner Stadtstrukturtypen korreliert (Kapitel 6.3.1).
Mit der Bilanzierungssoftware EPASS Helena wurde für jeden Stadtstrukturtyp am Beispiel der vier Typenvertreter energetische Kennwerte ermittelt. Hierbei wurden drei verschiedene Standards zum Energiebedarf mit bis zu acht verschiedenen Wärmeversorgungsvarianten untersucht (Kapitel 6.3.2 und 6.3.3). Über den Endenergiebedarf lässt sich der Bedarf an Energieträger berechnen, und in Verbindung mit den in Kapitel 5 ermittelten Flächenkennwerten zur Bereitstellung von Energieträgern ergibt sich der spezifische Flächenbedarf für jede Versorgungsvariante. Die Beziehungen der verschiedenen Parameter sind in einer EXCEL-Tabelle mathematisch verknüpft. Es wurden für vier unterschiedliche Versorgungsvarianten die jeweilige Flächeninanspruchnahme berechnet und graphisch dargestellt (Kapitel 6.4).
Dem Versorgungsbedarf für Nahrungs- und Futtermittel sowie Energie für die Berliner Siedlungsstrukturen stehen im Land Brandenburg ca. 1,45 Mio. ha landwirtschaftlich genutzter Fläche zur hypothetischen Bedarfsdeckung zur Verfügung. Unter Berücksichtigung der benötigten Flächen für Nahrungs- und Futtermittelanbau und einer Stilllegungsfläche von 3% (= 30.000 ha.) stehen etwa 300.000 ha für den Biomasseanbau zur energetischen Nutzung zur Verfügung. Das energetische Gesamtpotenzial aus der Biomassenutzung in Brandenburg wird auf insgesamt 41,5 Petajoule bzw. 11,5 MWh/a geschätzt [BUGV 2010:16]. Bezogen auf die Gesamtbevölkerung bzw. Landesfläche Brandenburgs ist das ein spezifisches Energiepotenzial von ca. 1.900 kWh/EW bzw. 3.800 kWh/ha. Durch den geplanten Ausbau erneuerbarer Energien aus Wind- und PV-Freianlagen werden diese Werte auf knapp 5.000 kWh/EW bzw. knapp 10.000 kWh/ha gesteigert [BUGV 2010].

Den Ergebnissen der Modellrechnungen zufolge ist das Flächenpotenzial Brandenburgs zur Versorgung der untersuchten Teilsysteme selbst unter der Annahme einer hochwertig energetischen Sanierung der Siedlungsstruktur – *Faktor Vier* – und optimierten Treibstoffproduktion aus BtL nicht ausreichend.

7. ZUSAMMENFASSUNG, MODELLBEWERTUNG UND AUSBLICK

7.1 Zusammenfassung und Modellbewertung

Ausgehend vom Brundlandbericht [HAUFF 1987] Ende der 1980er Jahre hat sich das Konzept einer nachhaltigen Entwicklung zu einem zentralen normativen Leitbild entwickelt. In dieser Arbeit wird die Position einer starken Nachhaltigkeit eingenommen, wonach der natürliche Kapitalstock nicht beliebig durch künstlich geschaffenes Kapital substituiert werden kann. Der Schutz und der sorgsame Umgang mit den natürlichen Ressourcen sind eine wichtige Voraussetzung für die langfristige Funktionalität und den Wohlstand menschlicher Gesellschaften. Der Großteil anthropogener Ressourcenströme wird durch die Menschen in urbanen Systemen verursacht. Um Aussagen über die Nachhaltigkeit der Entwicklung urbaner Systeme treffen zu können, ist es notwendig, die Interaktionen der physiologischen und sozioökonomischen Teilsysteme und insbesondere deren infrastrukturelle Versorgungssysteme zu analysieren. Diese Analyse wird hier mit dem Begriff *urbaner Metabolismus* bezeichnet. Ausgangspunkt ist die Grundannahme, dass urbane Systeme als anthropogene Ökosysteme zu betrachten sind, die hinsichtlich ihrer nachhaltigen Entwicklung mit Methoden der Untersuchung von Energie- und Stoffströmen bewertet werden können.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich dabei auf die Analyse des urbanen Energiehaushalts mit dem Schwerpunkt auf die Wärmeversorgung von Siedlungsstrukturen. Für die Bewertung der Versorgungsprozesse hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit habe ich ein Modell zur integralen Analyse von Energie- und Stoffströmen entwickelt. Das Modell bildet die Systembeziehungen für die Flächeninanspruchnahme zur Versorgung mit Nahrungsmitteln sowie Energieträgern für die Wärmebereitstellung von Siedlungsstrukturen, für Elektrizität in Haushalten und für den Verkehrssektor durch einen Flächenindikator ab. Dabei wird nach somatischer und extra-somatischer Energie unterschieden, da diese durch ihre Bereitstellung unmittelbar um die Ressource Fläche konkurrieren. Der Indikator ist nicht an vermeintlichen Schadstoffen wie CO_2, sondern an der Bewertung von Ressourcennutzungen orientiert. In einem postfossilen Energiesystem wird die Flächeninanspruchnahme wieder zu einem limitierenden Faktor für die Versorgung mit Subsistenzgütern.

Als städtebauliche Bezugsgröße wird die Maßstabsebene der Stadtstrukturtypen verwendet. Sie erlaubt eine Zusammenführung von gebäudetypologischen und regionalplanerischen Fragestellungen und ist daher der ideale Betrachtungsmaßstab. Die Betrachtung von Gebäudetypen erlaubt eine Analyse verschiedener Konfigurationen der Gebäudetechnik und des damit verbundenen Ressourcenbedarfs. Entscheidend für die empirische Anwendung des Modells war die Korrelation der Wohnflächenstatistik mit der Flächenstatistik der Stadtstrukturtypen. Beiden Statistiken erfassen die jeweiligen Flächen bezirks- bzw. blockscharf, die Flächen sind aber nicht unmittelbar miteinander korrelierbar. Die kritische Frage an diesem Punkt war, wie viel Wohnfläche den jeweiligen Stadtstrukturtypen zuzuordnen ist. Durch die Ermittlung städtebaulicher Kenndaten wie die Flächen- und Bewohnerdichte wurde eine sinnvolle Korrelation beider statistischer Datensätze möglich.
Die Systembeziehungen sind in Abb. 7.1.1 nochmals dargestellt.

Der wichtigste Beitrag der vorliegenden Arbeit ist das Gesamtmodell zur Bewertung einer nachhaltigen Entwicklung urbaner Systeme. Daher ist abschließend das Modell selbst einer kritischen

Prüfung zu unterziehen. Das Modell zeichnet sich besonders durch seine Erweiterungsfähigkeit und Übertragbarkeit auf andere urbane Systeme aus. Die Anwendung am Beispiel der Region Berlin-Brandenburg zeigt aber auch Optimierungsmöglichkeiten auf.

Erweiterungsfähigkeit: In der vorliegenden Arbeit wird nur die Wärmeversorgung für den Wohnungsbestand betrachtet. Bei Verfügbarkeit geeigneter statistischer Daten kann das Modell problemlos um andere energetische Subsysteme wie Energiebedarf für Nichtwohngebäude oder im Produktionssektor erweitert werden. Das Modell kann auch durch eine Bilanzierung der Ressourceninanspruchnahme – Stoffströme und graue Energie – für die vorgelagerten Prozessketten bei der Herstellung von Energiesystemen wie PV-Anlagen, Windenergiekonverter u.a. erweitert werden. Für diese Energiesysteme liegen bereits detaillierte Studien vor.
Um den Umfang der vorliegenden Arbeit zu begrenzen, wurden im Detail nur das Bedarfsfeld Ernährung und die Infrastruktursysteme zur Wärmeversorgung differenziert untersucht, während die Subsysteme Haushaltsstrom, Verkehr und Landnutzungssysteme nur am Rande betrachtet wurden. Für den Verkehr liegt das u.a. daran, dass sich der Energiebedarf nicht eindeutig den einzelnen Stadtstrukturtypen zuzuordnen lässt (s.u.). Eine Erweiterungsmöglichkeit für eine ganzheitliche Analyse bietet auch die Einbeziehung anderer ökologischer Handlungsfelder wie z.B. der Wasserhaushalt. Die Stadtstrukturtypen bieten auch hierfür die geeignete Maßstabsebene.

Übertragbarkeit: Das Modell ist grundsätzlich auf andere urbane Systeme übertragbar, wobei es entsprechend der unterschiedlichen klimatischen, kulturellen und technologischen Bedingungen angepasst werden muss. Die in der Modellstruktur behandelten Parameter wie Ernährungsgewohnheiten, Energiebedarf für die thermische Gebäudekonditionierung und Verkehr sind auch in anderen klimatischen und kulturellen Umgebungen relevante Systemgrößen.

Optimierungsmöglichkeiten: Durch die Reduktion der unterschiedlichen Bauformen und Nutzungen auf vier exemplarische Stadtstrukturtypen kann die Komplexität urbaner Systeme nur begrenzt abgebildet werden. Die Ergebnisse aus der Analyse sind daher als eine überschlägige Bilanz zu bewerten. Eine größere Differenzierung der Stadtstrukturtypen würde eine genauere Analyse erlauben, die Untersuchung würde aber bei der Größe des untersuchten Systems zu einem sehr großen Erhebungsaufwand führen. Denkbar wäre hier eine methodische Erweiterung durch die Verwendung von Geoinformationssystemen.
Die Beschränkung auf vier Typen und Siedlungsstrukturen in der vorliegenden Arbeit ergab sich insbesondere aus der statistischen Datenlage. Ein Schritt zur Weiterentwicklung des gewählten Ansatzes liegt daher in der Anwendung und Überprüfung des Modells auf ein kleinteiligeres Untersuchungsgebiet, z.B. ein Stadtquartier oder eine Kommune. Um die Validität des Modells zu erhöhen, sollte dann auch eine detaillierte Erfassung der Verbrauchsdaten der betrachteten Subsysteme erfolgen, da aufgrund des Benutzerverhaltens erfahrungsgemäß erhebliche Unterschiede zwischen Verbrauchs- und Bedarfsdaten auftreten können.
Eine Ausweitung des Modells auf eine energetische Betrachtung von Nichtwohngebäuden und den Produktionssektor ist – wie oben beschrieben – für eine vollständige Bilanzierung urbaner Systeme ebenfalls anzustreben.

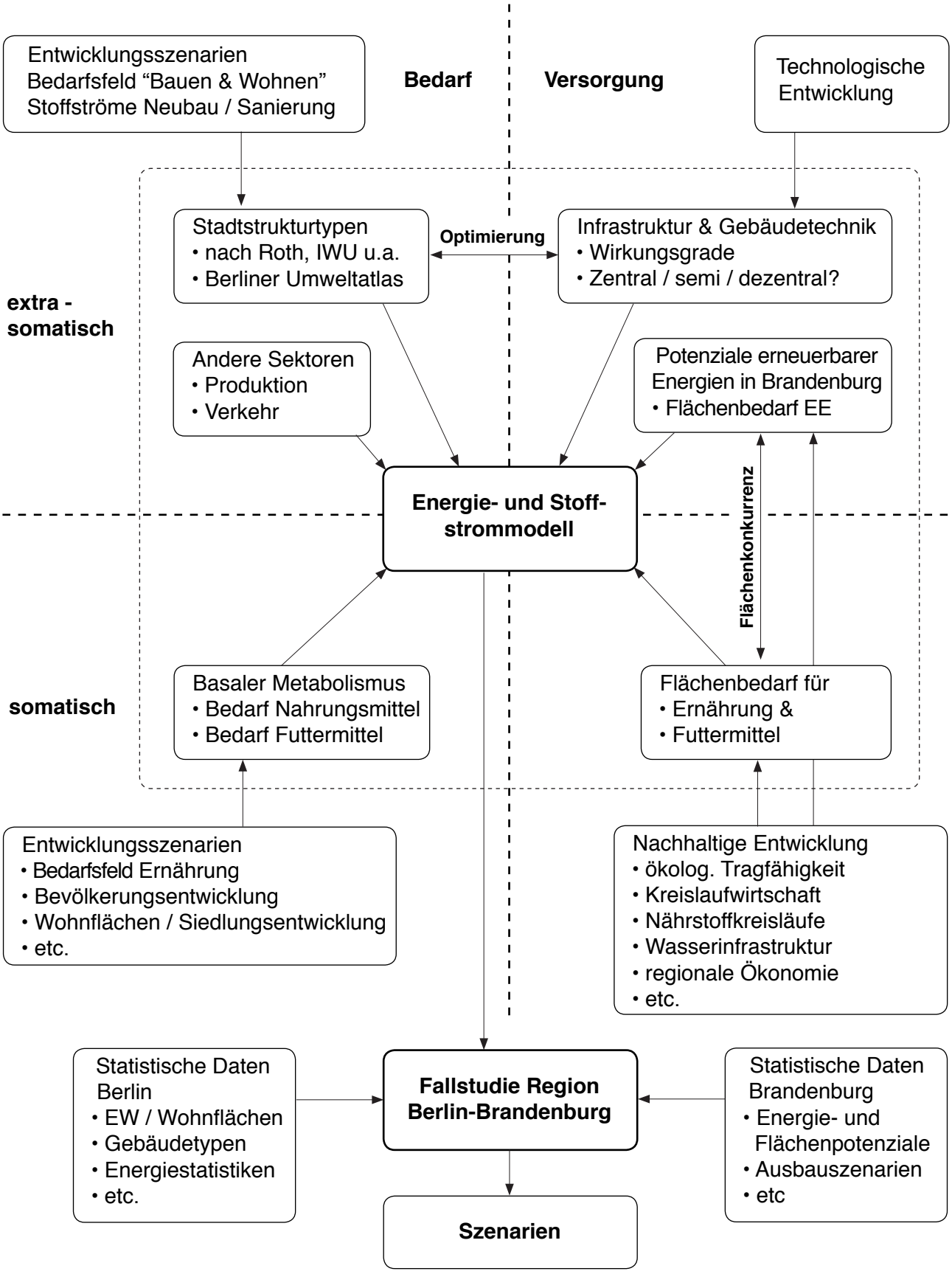


Abb. 7.1.1 Graphische Übersicht zur Arbeit mit den Beziehungen der Modellparameter

7.2 Konsequenzen aus den Modellergebnissen

Die Bilanzierung der Szenarien mit dem kalibrierten Modell ermöglicht verschiedene qualitative und quantitative Schlussfolgerungen zu den vier untersuchten Teilsystemen.

Die **Ernährung** der Bevölkerung der Region Berlin-Brandenburgs beansprucht aus modelltheoretischer Sicht nahezu vollständig die vorhandene landwirtschaftliche Nutzfläche. In Szenario 4 mit einer energetisch optimierten Siedlungsstruktur und effizienten Treibstofferzeugung aus BtL wird das Bedarfsfeld Ernährung bei gleichbleibender Flächenintensität mehr als ein Drittel des Gesamtflächenbedarfs benötigen. Etwa 60% der Flächen entfallen auf die Produktion tierischer Nahrungsmittel, die bei einer Veränderung der Ernährungsgewohnheiten mit vermindertem Konsum tierischer Nahrungsmittel theoretisch ein Flächenpotenzial zur energetischen Nutzung freisetzen würde.

Für das Teilsystem **Wärmeversorgung** ermöglicht das Modell durch die Korrelation der Bevölkerungs- und Wohnungsdichte mit den Stadtstrukturtypen sowie die Verknüpfung mit den energetischen und versorgungstechnischen Varianten eine hinreichend genaue Abbildung des Systems. Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der ausgewählten Versorgungsszenarien, dass sich der Energiebedarf für die Wärmeversorgung durch geeignete Maßnahmen zur energetischen Stadterneuerung in der Summe um etwa Faktor Vier reduzieren lässt. Forschungsinitiativen zur Erhöhung der Energieeffizienz in urbanen Systemen wie *EnEff:Stadt* und *EnEff:Wärme* [http://www.eneff-stadt.info/] sowie der kürzlich erschienene *Handlungsleitfaden zur Energetischen Stadterneuerung* [BMVBS 2011b] zeigen anhand von Pilotprojekten und Handlungsempfehlungen, dass diese Effizienzsteigerung auch ökonomisch umsetzbar ist.
Das Modell zeigt aber auch, dass die regionalen Flächenpotenziale der Land- und Forstwirtschaft in Brandenburg zur Bereitstellung von Biomasse für eine vollständige Versorgung Berlins nicht ausreichen. Dieses Ergebnis lässt sich vermutlich auf vergleichbare urbane Systeme mit einer hohen Bevölkerungsdichte in Mitteleuropa übertragen. Hier besteht weiterhin ein großer Forschungsbedarf, um den Ausbau und die Integration erneuerbarer Energien in die Energiesysteme voranzubringen. Ein Wesensmerkmal der Transformation des Energiesystems ist die Diversifizierung und Zunahme dezentraler Energieerzeugungsanlagen (DEA) im Verteilnetz. Eine Dezentralisierung ist verbunden mit einer zunehmenden Integration von stadtinfrastrukturellen Versorgungsaufgaben in Form von DEA, aber auch von (thermischen) Speichersystemen auf der Ebene der Gebäudetechnik (Abb.7.2.1, 7.2.2 und 7.3.1).
Anlagen zur **Kraft-Wärme-Kopplung** haben hinsichtlich des Endenergiebedarfs und der Flächeninanspruchnahme für die Wärmeversorgung nur einen geringen Vorteil gegenüber konventionellen Gasheizungen. Aufgrund der gekoppelten Stromerzeugung entsteht aber ein höherer Gesamtnutzungsgrad der eingesetzten Energieträger, daher sind KWK-Anlagen einer reinen Wärmeerzeugung grundsätzlich vorzuziehen. Die Aggregation vieler dezentraler KWK-Anlagen zu virtuellen Kraftwerken schafft in Verbindung mit Smart Grids zudem neue Möglichkeiten zur Regelung der Stromnetze.
Der Bedarf an **Haushaltsstrom** spielt in der Flächeninanspruchnahme eine untergeordnete Rolle. Die Zugrundelegung des Durchschnittsverbrauchs ist für die Modellrechnung vollkommen ausreichend. Die Stromerzeugung durch Windenergie führt in der Modellbetrachtung zu einer sehr geringen Flächeninanspruchnahme, besonders im Vergleich zu allen Energiebereitstellungen, die

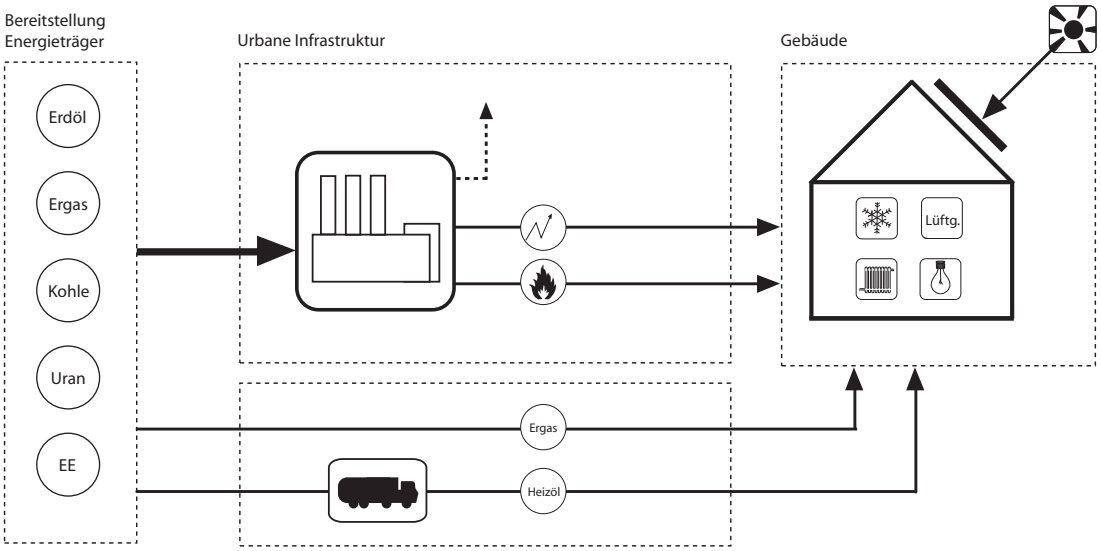


Abb. 7.2.1 Struktur der heutigen Energieversorgung auf der Basis fossiler Energieträger und Großkraftwerke

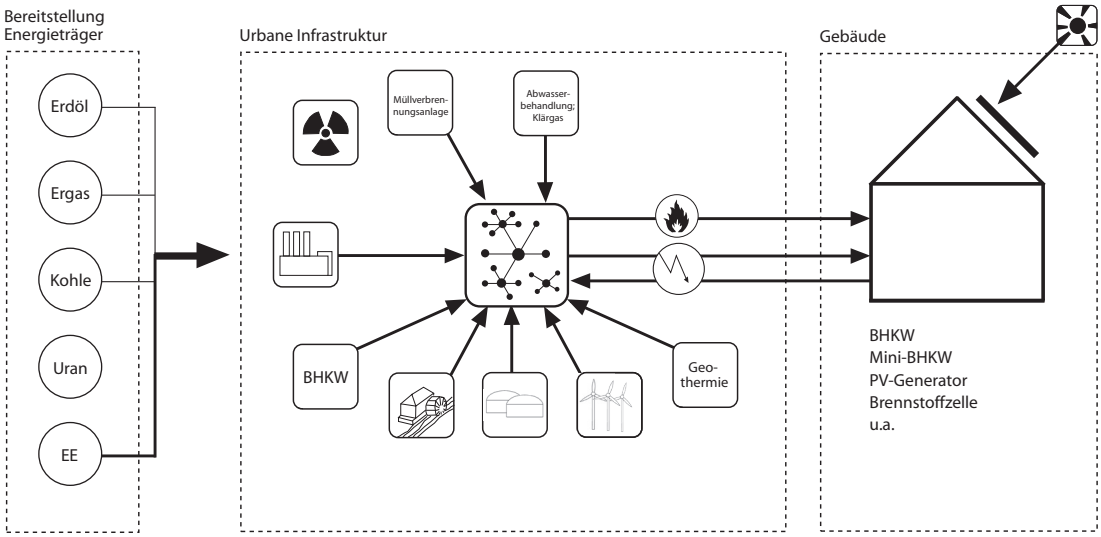


Abb. 7.2.2 Struktur einer zukünftigen Energieversorgung mit erneuerbaren Energien und dezentralen Energieerzeugungsanlagen (DEA) [PRYTULA 2010:125]

auf der flächenwirksamen Biomassenutzung beruhen. Der Flächenbedarf für Speichersysteme wie z.B. Talsperren, die für die Systemfunktion der Stromnetze besonders bei einer starken Zunahme der Windenergienutzung notwendig werden, wird an dieser Stelle nicht in die Bewertung einbezogen. Hier ist eine Erweiterung des Modells durch eine Abbildung aller externen Effekte des Gesamtsystems der Energieinfrastruktur im Modul Strombereitstellung denkbar.

Die **Flächenlimitierung** stellt eine kritische Restriktion zur Bereitstellung erneuerbarer Energien dar. Insbesondere bei der **Biomassenutzung** ist das Potenzial unter Berücksichtigung der Flächenkonkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion modelltheoretisch ausgeschöpft. Daher ist es notwendig, alle Schritte zu unternehmen, die technischen Potenziale zur Energieerzeugung in den urbanen Systemen selbst optimal zu erschließen. Die Nutzung von Geothermie weist große, bislang unerschlossene Potenziale auf, und die Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien im

Wärmesektor durch den Einsatz von Wärmepumpen, Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung oder LowEx-Systemen wird an Bedeutung zunehmen. Trotz eines höheren Flächenertrags der PV gegenüber der Biogasgewinnung aus Energiepflanzenanbau ist eine Integration von PV- und Solarthermieanlagen in Siedlungs- und Gewerbestrukturen den Freianlagen vorzuziehen.

Auf die **Methoden einer nachhaltigen Bodenbewirtschaftung und Ertragssteigerung des Biomasseertrags** kann im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht näher eingegangen werden. Neben dem bereits erwähnten Optimierungsvorschlag von Konrad Scheffer zur Biomasseverwertung in Bioenergiedörfern (Kap. 4.4.2) sei hier nur auf weitergehende Forschungen zur *Permakultur*, *Agroforstwirtschaft*, zum Einsatz von *Terra Preta* oder zum Prozess der *hydrothermalen Karbonisierung* [ANTONIETTI 2006] für die Bodenverbesserung nährstoffarmer oder erodierter Böden verwiesen. Ein Beispiel für die gelungene Rekultivierung einer erodierten Landschaft ist die Stadt-Region Auroville in Südindien. Auch die Anwendungsmöglichkeiten neuer Gewächshaussysteme wie das von Martin Buchholz entwickelte System *Watergy* [http://www.watergy.de/] können hier nicht näher vertieft werden. Hinsichtlich der Potenziale einer umfassenden Kreislaufwirtschaft sei hier auf Gunter Pauli's Ansatz der *Blue Economy* und der *Zero Emissions Research & Initiatives* (ZERI) verwiesen [http://www.zeri.org/ZERI/Home.html].

Auf die Verwendung von Geoinformationssystemen zur Ermittlung der **solaren Potenziale** in urbanen Systemen wurde bereits in Kapitel 4.1.6 kurz eingegangen. Der Berliner Solaratlas zeigt, wie groß das energetische nutzbare Potenzial der Berliner Dächer ist, ohne weitere Landnutzungssysteme zu beanspruchen. Der Solaratlas stellt das Solarpotenzial jeder Dachfläche dar, das aus Dachneigung, Himmelsrichtung und Verschattung sowie aus weiteren Daten wie durchschnittliche Sonneneinstrahlung, Wirkungsgrad der Module etc. berechnet wurde [http://www.businesslocation center.de/solaratlas]. Auch Einschränkungen durch den Denkmalschutz werden vom Solaratlas berücksichtigt. Für die Potenzialanalyse wurden insgesamt 560.000 Berliner Dächer ausgewertet.
Theoretisch sind mit knapp 222.000 Gebäuden mehr als ein Drittel aller Dächer für eine Installation von Photovoltaikanlagen geeignet. Bei einer Modulfläche von ca. 23 km^2 mit einer installierten Leistung von knapp 3.300 MW_{Peak} ließe sich ein jährlicher Stromertrag von ca. 3.000 GWh/a erwirtschaften. Bei einem durchschnittlichen Jahresbedarf von 1.700 kWh/ Person könnte dadurch etwa die Hälfte des jährlichen Haushaltsstrombedarfs aller Berliner Haushalte abgedeckt werden. Alternativ wären 352.850 Gebäude für die Nutzung von Solarthermie geeignet. Die installierbare Fläche beträgt 30 km^2 mit einem möglichen Wärmeertrag von ca. 11.400 GWh/a [SIMUPLAN 2011:5].
Demgegenüber gibt das Berliner Solaranlagenkataster der Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz einen Überblick zur tatsächlichen Solarenergienutzung: 2010 waren in Berlin insgesamt 9.535 Solaranlagen installiert, davon 7.140 solarthermische Anlagen mit einer Fläche von 74.000 m^2 und 2.395 Photovoltaikanlagen mit einer installierten Gesamtleistung von ca. 22 MW_{Peak} und einem geschätzten Stromertrag von 20 GWh/a [Solaranlagenkataster Berlin, Datenstand 31.12.2010, http://www.solarkataster.de/index.php?page=ergebnisse&mode=stat_gesamt_gesamt]. Damit sind derzeit weniger als ein Prozent des Berliner Dachflächenpotenzials durch Solar- oder Photovoltaikanlagen genutzt.

Der Energiebedarf und die Flächeninanspruchnahme für das Teilsystem **Verkehr** umfasst heute und auch zukünftig unter Berücksichtigung einer erhöhten Ressourceneffizienz etwa ein Drittel des

Gesamtbedarfs. Eine Differenzierung des Bedarfs hinsichtlich der Charakteristiken der Stadtstrukturtypen ist im Rahmen dieses Modells nicht möglich. Aufgrund der höheren baulichen Dichte und innerstädtischen Lage mit gutem öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) ist für den Stadtstrukturtypen 3 – Gründerzeitliche Blockrandbebauung – ein geringerer Anteil an Individualverkehr und damit eine geringere energetische und stoffliche Aufwendungen zu erwarten als für den Stadtstrukturtypen 1 – Niedrige Bebauung mit Gartenstruktur –, dessen Anteil am Individualverkehr aufgrund der typischen Flächenausdehnung vermutlich höher ausfällt. Diese Annahme ist allerdings nicht ohne weiteres empirisch zu quantifizieren. Dass es dort einer größeren Binnendifferenzierung bedarf, lässt sich am großen Unterschied des spezifischen Endenergieverbrauchs je Einwohner für Berlin und Brandenburg ablesen. Berlin hat als Stadtstaat mit 5.389 kWh/(EW*a) einen verhältnismäßig geringen Endenergiebedarf im Vergleich zu dem Flächenland Brandenburg mit 8.696 kWh/(EW*a) (Bezugsjahr 2007). Die Differenz liegt mit 3.307 kWh/(EW*a) bei mehr als 60% des Energieverbrauchs für den Individualverkehr eines Einwohners Berlins. Eine solche Binnendifferenzierung setzt allerdings auch eine entsprechende statistische Datenlage der sozialräumlichen Situation voraus. Gerade im Verkehrsbereich ist eine genaue Allokation der Verkehrsbewegungen nur schwer möglich. Eventuell lassen sich über Lebensstilanalysen hier genauere Annahmen treffen. Modelle hierzu gibt es u.a. vom Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu) in Heidelberg, die mit dem Programm TREMOD untersucht werden. Ein Ausbau von Elektromobilität wird wegen der Speicherthematik und Regelungsfunktion des Stromnetzes aktuell stark diskutiert und forciert. Bei einem flächendeckenden Ausbau sind allerdings Fragen der stofflichen Limitierung, z.B. zur Batterieherstellung zu beachten. Weiterhin bestehen durch die beschränkten Reichweiten bei der Fahrleistung Einschränkungen im Nutzerkomfort. Eine ausführliche Diskussion der Vor- und Nachteile von Elektromobilität kann im Rahmen der vorliegenden Arbeit aber nicht erfolgen.

7.3 Ausblick auf eine nachhaltige urbane Energieversorgung

Abschließend wird hier ein mögliches Szenario einer zukunftsfähigen urbanen Energieversorgung skizziert. Ausgehend von den Forschungsergebnissen, von den Szenarien zu einer vollständigen Versorgung mit erneuerbaren Energien und den zahlreichen best practice-Beispielen lassen sich eindeutige Anforderungen an eine zukunftsfähige Versorgungs- und Infrastruktur benennen.

Eine zukunftsfähige Energieversorgung benötigt

- eine optimale Erzeugung, Transport, Speicherung und Wandlung von Energieträgern aus erneuerbaren Energiequellen zur Bereitstellung von Niedertemperatur- und Prozesswärme, Strom und Treibstoffen,
- eine optimale Integration fluktuierender Stromerzeugung aus Wind- und Solaranlagen ins Versorgungsnetz verbunden mit einer Transformation der vorhandenen Netzinfrastruktur, u.a. durch ein intelligentes Stromnetz / Smart Grid,
- den Ausbau von Systemen zur Kraftwärmekopplung in allen Maßstabsebenen (GuD-Kraftwerke, BHKW, Mikro-BHKW) und eine effiziente Verteilung der Wärme durch Fern- oder Nahwärmenetze,
- eine Optimierung von Systemen dezentraler Wärmeerzeugung durch BHKW, Mikro-BHKW, Kleinfeuerungsanlagen auf der Basis von biogenen Brennstoffen oder Wärmepumpen in Verbindung mit Low-Ex-Konzepten,

- eine energetische Sanierung des Gebäudebestands und Erstellung energieeffizienter Gebäude und Siedlungsstrukturen mit einer optimalen Nutzung der passiven und aktiven Solarenergiepotenziale,
- ein effektives Akteursmanagement, um die vielfältigen lokal und regional vorhandenen energetischen Potenziale zu erschließen und die unterschiedlichsten Akteure im Transformationsprozess „mitzunehmen".

Ausgehend von diesen Anforderungen zeigt Abb. 7.3.1 eine mögliche Systemkonstellation, wie sich die Beziehungen von Energie- und Stoffströmen im Energiesystem zukünftig darstellen werden. Eine wichtige Rolle in dieser Struktur spielen die system- und medienübergreifenden Energie- und Stoffflüsse durch verschiedene Energienetze. Ein effektives Zusammenwirken der Strom-, Gas- und Wärmenetze ist eine wesentliche Voraussetzung für die Integration erneuerbarer Energien.
Das Gasnetz versorgt z.B. KWK-Anlagen in unterschiedlichen Skalierungsgrößen. Die Wärme wird entweder in lokale Wärmenetze (Fern- oder Nahwärme) eingespeist oder durch Mikro-BHKW direkt dezentral erzeugt. Denkbar sind auch konventionelle Gasbrennwertgeräte, ergänzt mit solar-thermischer Wärmeerzeugung. Abgesehen vom überregionalen Stromnetz stellt in weniger dicht besiedelten Räumen der Ausbau von Mikrogas- und lokalen Nahwärmenetzen eine sinnvolle energetische Insellösungen dar.
Hybrid- oder Kombikraftwerke können einen erheblichen Beitrag leisten, den Stromüberschuss aus fluktuierender Stromerzeugung in chemische Energieträger zu transformieren und zur Energiespeicherung, zur thermischen Nutzung oder für den Verkehr bereitzustellen. Der regenerativ erzeugte Wasserstoff kann entweder in reiner Form genutzt oder zu Methan reformiert werden. In dieser Form kann es genau wie aufbereitetes Biogas in das bestehende Erdgasnetz eingespeist werden und das Erdgas künftig ersetzen.
Durch die energetische Sanierung des Gebäudebestands kann und muss der Energiebedarf urbaner Systeme erheblich herabgesenkt werden. Für die Wärmeversorgung von Gebäuden und andere Energiedienstleistungen wird aber auch zukünftig ein Import von Energieträgern aus Bioenergiedörfern, aus 100% EE- Regionen oder aus dem Ausland erforderlich sein.
Die Forschungsergebnisse zum *energieautarken Solarhaus* [VOSS 1997] und zu einer vollständigen Stromversorgung aus erneuerbaren Energien [SRU 2010] zeigen, dass eine autarke Energieversorgung im mitteleuropäischen Klima technologisch zwar möglich, aber aufgrund der hohen Aufwendungen für saisonale Speichersysteme ökonomisch nur unter besonderen Bedingungen tragfähig ist. Die zukünftige Energieversorgung wird aus einer stark diversifizierten Infrastruktur mit vielfältigen und komplexen Systemverbundlösungen bestehen.

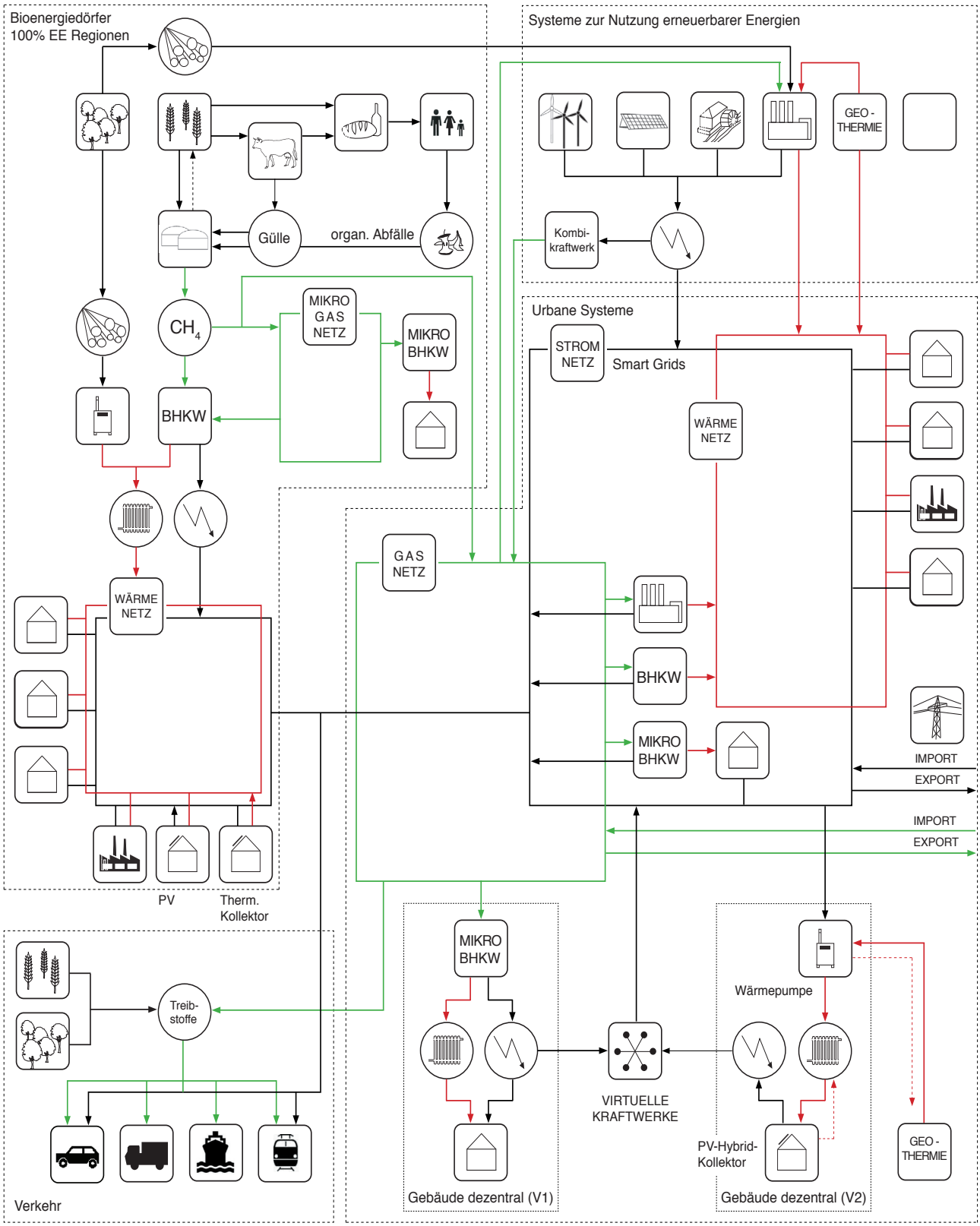


Abb. 7.3.1 Struktur einer zukünftigen Energieversorgung: Beziehungen von Energie- und Stoffströmen, Infrastruktursystemen und Leitungsnetzen in urbanen Systemen und 100% EE-Regionen

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

a	Jahr
Agenda 21	Entwicklungs- und umweltpolitisches Aktionsprogramm für das 21.Jahrhundert, beschlossen von 172 Staaten auf der Konferenz für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen (UNCED) in Rio de Janeiro (1992)
AHV	Außerhausverzehr
ALK	Automatisierte Liegenschaftskarte
AVUS	Automobil-Verkehrs- und Übungs-Straße im Südwesten Berlins, wurde 1921 für den öffentlichen Verkehr freigegeben
BBR	Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BE-BB	Berlin/Brandenburgisches Metadatenprofil
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Bundesumweltministerium)
BMVBS	Bundesbehörde für Verkehr, Bauwesen, Städtebau und Raumordnung
BtL	Biomass-to-Liquid = Biomasseverflüssigung
cbm	Kubikmeter
CIAM	Congrès International d'Architecture Moderne = Internationaler Kongress moderner Architektur
CSD	Commission on Sustainable Development = Kommission der Vereinten Nationen für nachhaltige Entwicklung
DDR	Deutsche Demokratische Republik
DGE	Deutsche Gesellschaft für Ernährung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EAWAG	Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz
EE	Erneuerbare Energien
EnEV	Energieeinsparverordnung
ESM	Energiesystemmodelle
ETI	Energie Technologie Initiative
EU-15	Mitgliedstaaten der Europäischen Union vor der so genannten Ost-Erweiterung im Jahr 2004: Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Italien, Irland, Luxemburg, Niederlande, Österreich, Portugal, Schweden und Spanien
EVS	Einkommens- und Verbrauchsstichproben
EWSV	Ernährung - Wärme - Strom - Verkehr
EXCEL	Tabellenkalkulationsprogramm
GEMIS	Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme
GFZ	Geschossflächenzahl
GIS	Geoinformationssysteme
GMAS	Migros-Genossenschaft Aargau/Solothurn
GRZ	Grundflächenzahl
GuD	Gas-und-Dampf
GWP	Global Warming Potential = Treibhauspotential
h	Stunde
ha	Hektar
HEA	Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung
IBA	Internationale Bauausstellung
IfaS	Institut für angewandtes Stoffstrommanagement
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung
IHV	Inhausverzehr
IÖR	Institut für Ökologische Raumentwicklung

IPAT	Impact = Population * Affluence * Technology Umwelteinwirkungen = Bevölkerungsanzahl * Wohlstand * Technologie
ISU	Informationssystem Stadt und Umwelt
IWU	Institut für Wohnen und Umwelt
KEA	Kumulierter Energieaufwand
km	Kilometer
kWh	Kilowattstunden
KWK	Kraftwärmekopplung
LCA	Life Cycle Assessment = Lebenszyklusanalyse oder Ökobilanzierung
m	Meter
m^2	Quadratmeter
m^3	Kubikmeter
MaB	„Man and the Biosphere“ = „Der Mensch und die Biosphäre“
MIT	Massachusetts Institute of Technology = Institut für Technologie, Massachusetts
NVS	Nationale Verzehrsstudie
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development = Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
OES	Optimierten Energiesystemen
ÖI	Ökoinstitut Freiburg
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PEV	Primärenergieverbrauch
PV	Photovoltaik
RES	Referenzenergiesystem
SD	System Dynamics = Systemdynamik
SFA	Stoffflussanalyse
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
SSM	Stoffstrommanagement
SST	Stadtstrukturtyp
TU	Technische Universität
UGR	Umweltökonomische Gesamtrechnungen
UN / UNO	United Nations / United Nations Organization = Vereinte Nationen / Organisation der Vereinten Nationen
UNEP	UN-Umweltprogramm
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization = Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat für globale Umweltfragen
WBS	Wohnungsbauserie
WCED	World Commission on Environment and Development = Weltkommission für Umwelt und Entwicklung
WHO	World Health Organization = Weltgesundheitsorganisation
WLG	Wärmeleitfähigkeitsgruppe
WW	Warmwasser
ZUB	Zentrum für Umweltbewusstes Bauen

UMRECHNUNGSTABELLE ENERGIEEINHEITEN

Allgemeine Energieeinheiten: Joule (J) 1 Joule = 1 Wattsekunde (Ws)

Ein Gegenstand mit einer Masse von 1 kg kann auf der Erde unter dem Aufwand von 10 J um etwa 1 m angehoben werden. 1 l Wasser kann mit 400.000 J (= 111,11 kWh) von 10 auf etwa 100°C (zum Kochen) erwärmt werden.

1 Kilojoule	kJ	=	10^3 (J)			
1 Megajoule	MJ	=	10^6 (J)	=	0,278 kWh	
1 Gigajoule	GJ	=	10^9 (J)	=	278 kWh	
1 Terajoule	TJ	=	10^{12} (J)	=	278.000 kWh	= 278 MWh
1 Petajoule	PJ	=	10^{15} (J)	=	278.000.000 kWh	= 278 GWh
1 Exajoule	EJ	=	10^{18} (J)	=	278.000.000.000 kWh	= 278 TWh

1 kWh = 3.597.122 J = 3,6 MJ

Historische Energieeinheit : 1 Kalorie (cal) = 4,19 J
Eine Kalorie ist die Energiemenge, die man benötigt, um 1 g Wasser um 1°C zu erwärmen.

Elektrische Energieeinheiten:

1 Kilowattstunde (kWh)			= 3,6 MJ
1 Terawattstunde (TWh)	=	10^9 kWh	= 3,6 PJ
1 Petawattstunde (PWh)	=	10^{12} kWh	= 3,6 EJ

Fossile Energieeinheiten:

1 Mio. Tonnen Steinkohleeinheiten (SKE) = 1 Mio t SKE = 29,3 (PJ)

Die Verbrennung von 1 Mio. t typischer Steinkohle ergibt 29,3 PJ Wärmeenergie, die z.B. in einem herkömmlichen Kraftwerk mit einem Wirkungsgrad von 38 % in 11 PJ elektrische Energie umgewandelt werden kann. Dies entspricht mit ca. 3 Mrd. kWh einer Energiemenge, die ein kohlebefeuertes Wärmekraftwerk mit 1GW elektrischer Leistung innerhalb von 4 Monaten Dauerbetrieb an Strom abgibt.

1 Tonnen Öleinheiten = 1.000 kg ÖE = 1170 Liter ÖE = 7,3 Barrel ÖE (1 Barrel = 159 Liter)

1 L ÖL = 10 kWh Wärme

Leistungseinheiten: Watt (W) 1 Watt = 1 Joule pro Sekunde (J/s)

Wenn jemand eine Masse von 1 kg um einen Meter anhebt und dies jede Sekunde einmal macht, ist die mittlere erbrachte Dauerleistung 10 J/s, also 10 W.

Umrechnungstabelle zwischen Energieeinheiten

Einheiten	kJ	kWh	kg SKE	kg ÖE
1 kJ	1	0,000278	0,000034	0,000024
1 kWh	3.600	1	0,123	0,086
1 kg SKE	29.304	8,14	1	0,700
1 kg ÖE	41.686	11,63	1,429	1

Joule		Öleinheiten	Steinkohleeinheiten	Kilowattstunde
1.000 J	=	0,000024 ÖE	0,000034	0,000278
10.000 J	=	0,00024 ÖE	0,00034	0,00278
100.000 J	=	0,0024 ÖE	0,0034	0,0278
1.000.000 J	=	0,024 ÖE	0,034	0,278
10.000.000 J	=	0,24 ÖE	0,34	2,78
100.000.000 J	=	2,4 ÖE	3,4	27,8
1.000.000.000 J	=	24 ÖE	34 = 28 L Öl	278

Quelle: [HEINLOTH 2003:514f.]

GLOSSAR

Bioenergiedorf Das „Institut für Bioenergiedörfer Göttingen“ (ibeg) definiert Bioenergiedörfer nach folgenden Kriterien In einem Bioenergiedorf wird das Ziel verfolgt, möglichst die gesamte Wärme- und Stromversorgung eines Ortes auf die Basis des erneuerbaren Energieträgers „Biomasse“ zu stellen und die Bioenergieanlagen in Eigenregie zu betreiben.

- Es ist mindestens so viel Strom durch Biomasse zu erzeugen, wie in dem Ort verbraucht wird.
- Der Wärmebedarf des Ortes wird mindestens zur Hälfte auf Basis von Biomasse abgedeckt. Um eine hohe Energieeffizienz zu erreichen, sollte dies durch Kraft-Wärme-Kopplung erfolgen.
- Die Bioenergieanlagen befinden sich zu mehr als 50 % im Eigentum der Wärmekunden und der Biomasse liefernden Landwirte. Möglichst alle Beteiligten sollten Anteile an den Bioenergieanlagen besitzen.
- Die Biomasse stammt nicht aus Maismonokulturen oder von gentechnisch veränderten Pflanzen. Unter Maismonokultur verstehen wir, wenn die Fruchtfolge auf einem landwirtschaftlichen Schlag nur aus Mais besteht.

[http://www.bioenergiedorf.info/index.php?id=134]

Biomasse ist ein Sammelbegriff für die gesamte tierische und pflanzliche organische Substanz und ist somit chemisch gespeicherte Sonnenenergie. Sie kann in fester, flüssiger und gasförmiger Form vorliegen und in verschiedener Weise energetisch genutzt werden.

BtL / Biomass-to-Liquid (= engl. für Biomasseverflüssigung) Verfahren zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen aus Biomasse, die auch als Synfuel oder Sunfuel® bezeichnet werden. Die Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR) definiert Biomass-to-Liquid (BtL) als „eine Prozesskette, die Biomasse über die thermochemische Vergasung in Synthesegas (Gemisch aus CO und H2) und anschließende Synthese in flüssige Kohlenwasserstoffe umwandelt. Die so erzeugten biogenen Kohlenwasserstoffe können mit bekannten Prozessen der Erdölraffination zu marktfähigen Kraftstoffen wie Diesel nach EN 590 oder Benzin nach EN 228 aufgearbeitet werden“. Für die Herstellung von BtL-Kraftstoffen können verschiedene Biorohstoffe wie Stroh und Restholz oder eigens für die Kraftstofferzeugung angebaute Energiepflanzen aus nachwachsenden Rohstoffen (NaWARo) genutzt werden. Nach Schätzungen können auf einem Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche umgerechnet ca. 4.000 Liter BtL-Kraftstoffe erzeugt werden. [http://www.btl-plattform.de/]

Demographischer Übergang ist eine Theorie, die besagt, „dass bei niedrigem der Industrialisierung sowohl Fertilität als auch Mortalität hoch sind und die Bevölkerung langsam wachsen. Wenn sich dann die Ernährung und medizinische Versorgung verbessern, sinkt die Sterberate (Mortalität). Die Geburtsrate (Fertilität) hinkt jedoch eine bis zwei Generationen hinter dieser Entwicklung her und bleibt zunächst hoch. Dadurch entsteht eine große Differenz von Fertilität und Mortalität, die rasches Bevölkerungswachstum zur Folge hat.“ [MEADOWS ET AL. 1993:51]

Ecological Overshoot (= ökologische Überschreitung) bezeichnet das Überziehen der ökologischen Tragfähigkeit der natürlichen Ökosysteme. Der Begriff wird insbesondere im Zusammenhang mit der Methode des ökologischen Fußabdrucks verwendet, um die Überschreitung der globalen Tragfähigkeit zu bezeichnen.
[http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/glossary/]

EMAS ist die Abkürzung für Eco-Management and Audit Scheme, die Öko-Audit-Richtlinie der EU. Die Beteiligung ist freiwillig, zum Erwerb eines Zertifikats muss das Unternehmen jedoch ein im Vergleich zur ISO-Norm strenges, genau definiertes Verfahren durchlaufen.

End-of-Pipe-Technologien sind additive Umweltweltschutzmaßnahmen, die als nach geschaltete Maßnahmen wie Filtertechnologien Emissionen verringern, und durch gesetzliche Grenzwerte geregelt werden. Im Gegensatz hierzu werden mit der Strategie des Integrierten Umweltschutzes durch produktionsimmanenten Herstellungsverfahren von vornherein Umwelt gefährdende Emissionen vermieden.

Energieeinsparverordnung für Gebäude (EnEV) Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. Die letzte Novellierung zur Energieeinsparverordnung trat zum 1.10.2009 in Kraft

(EnEV 2009). Gesetzestext: http://www.bgblportal.de/BGBL/bgbl1f/bgbl107s1519.pdf.
[http://www.enev-online.de/index.htm]

Erneuerbare Energien werden auch als regenerative oder alternative Energien bezeichnte und sind Energieformen, die dem Menschen gleichsam unbegrenzt zur Verfügung stehen. Dazu zählen: Solarenergie, Biomasse, Wasser, Wind und Geothermie.

Ernährungsökologie ist ein interdisziplinäres Wissenschaftsgebiet, das die komplexen Beziehungen innerhalb des gesamten Ernährungssystems untersucht und bewertet. Dieses beinhaltet alle Teilbereiche von der landwirtschaftlichen Erzeugung der Lebensmittel über Verarbeitung, Verpackung, Transport und Handel bis zu Verzehr und Abfallentsorgung. Über die in der Ernährungswissenschaft übliche Dimension Individuum bzw. Gesundheit hinaus werden die Dimensionen Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft gleichwertig einbezogen. Ziel der Ernährungsökologie ist, wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse über die vernetzten gesundheitlichen, ökologischen, ökonomischen und sozialen Bedingungen und Auswirkungen des Umgangs mit Lebensmitteln zu gewinnen. Dieses ermöglicht die Entwicklung von realisierbaren, nachhaltigen bzw. zukunftsorientierten Ernährungskonzepten und bietet die Basis für ein bewusstes Essverhalten. (v. Koerber , Männle, Leitzmann 2004). [http://bfeoe.de/wzw/wasist/index.shtml#Grundsätze], Zugriff 10.09.2010

Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) Das Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien ist das effektivste Förderinstrument der Bundesregierung zur Erreichung der Ausbauziele für erneuerbare Energien im Strombereich. Es gewährt den Betreibern der zu fördernden Anlagen über einen bestimmten Zeitraum hinweg einen festen Vergütungssatz für den erzeugten Strom. Dieser orientiert sich an den Erzeugungskosten der jeweiligen Erzeugungsart und gewährleistet so einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlagen. Daher wirkt es als ein Marktanreizprogramm. Für neu installierte Anlagen sinkt der festgelegte Satz jährlich um einen bestimmten Prozentsatz (Degression), um einen Anreiz für Senkungen der Produktionskosten zu schaffen. Die Wirksamkeit des Gesetzes spiegelt sich in der internationalen Vorreiterrolle, die bis 2007 47 Staaten zur Nachahmung veranlasst hat (http://de.wikipedia.org/wiki/Erneuerbare-Energien-Gesetz). Die letzte umfassende Novellierung trat zum 01.01.2009 in Kraft (EEG 2009).
Gesetzestext: [http://www.bgblportal.de/BGBL/bgbl1f/bgbl108s2074.pdf]
[http://www.bmu.de/erneuerbare_energien/erneuerbare-energien-gesetz/doc/40508.php]

Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) Das Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich ist parallel zur Novellierung der EnEV 2009 zum 01.01.2009 in Kraft getreten. Mit dem EEWärmeG verfolgt die Bundesregierung die Absicht, den Anteil erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteversorgung in Deutschland bis zum Jahr 2020 auf bis zu 14 Prozent zu erhöhen. Für alle von dem Gesetz betroffenen Gebäude - insbesondere alle neu zu errichtenden Wohn- und Nichtwohngebäude mit einer Nutzfläche von mehr als 50 qm -, bedeutet das in Abhängigkeit der gewählten Versorgungstechnik einen Deckungsanteil von 15-50% an erneuerbaren Energien.
Gesetzestext: [http://www.bgblportal.de/BGBL/bgbl1f/bgbl108s1658.pdf]
[http://www.enev-online.de/index.htm]

Extra-somatische Energie ist die Energie, die für den Betrieb von Gebäuden, Maschinen, Fahrzeugen usw. benötigt wird. Der Begriff stammt aus der Humanökologie und ermöglicht eine differenzierte Betrachtung von Energieverwendungen in anthropogenen Ökosystemen nach basalen (organischen) und technischen Stoffwechselvorgängen. [Boyden 1979]

Fernwärme ist Wärme im Niedertemperaturbereich bis etwa 200°C, die von einem zentralen Wärmelieferanten über längere Strecken durch ein Leitungsnetz zum Verbraucher (Wohnung, Gewerbe, Industrie) transportiert wird. Als Wärmelieferant kann ein Heizwerk oder Heizkraftwerk mit KWK dienen. Bei der örtlichen Erschließung einzelner Gebäude oder kleiner Wohnsiedlungen mit eigener Wärmenutzung spricht man von Nahwärme.
[http://www.eneff-stadt.info/de/glossar/]

Geschossflächenzahl (GFZ) gibt das Verhältnis der gesamten Fläche aller Vollgeschosse der baulichen Anlagen auf einem Baugrundstück zu dessen Gesamtfläche an (vgl. Baunutzungsverordnung – BauNVO § 20).

Grundflächenzahl (GRZ) gibt den bebauten Anteil der Fläche eines Baugrundstückes wieder und wird als Dezimalzahl dargestellt (vgl. Baunutzungsverordnung - BauNVO §19).

Homöostasis (Homöostase) bezeichnet die Eigenschaft eines Systems, bestimmte physikalische und chemische Größen innerhalb enger Grenzen über längere Zeitperioden konstant zu halten [BACCINI / BADER 1995:19]

Integrale Planung (von lat. „integrare“ = „wiederherstellen, ergänzen“) zielt auf eine ganzheitliche und frühzeitige Betrachtung aller Planungsaspekte unter Einbeziehung aller erforderlichen Fachdisziplinen. Die wesentlichen Planungsentscheidungen mit den größten ökonomischen, ökologischen und soziokulturellen Auswirkungen werden in den frühen Planungsphasen getroffen. Eine umfassende Formulierung der Zielstellungen in den frühen Leistungsphasen der Grundlagenermittlung und des Vorentwurfs ermöglichen nachhaltigere Planungsentscheidungen und eine optimale Koordination des zeitlichen Planungsablaufs aller Beteiligten.

Intelligentes Stromnetz siehe Smart Grid

Intergenerationelle Gerechtigkeit ist die Gerechtigkeit zwischen verschiedenen Generationen, die in Durchschnitten zusammengefasst werden und zeitlich voneinander abgegrenzt sind. Wir tun heute etwas dafür, dass auch die nachrückende Generation in sozialer Gerechtigkeit leben kann.

Intragenerationelle Gerechtigkeit ist die Gerechtigkeit innerhalb einer Generation, besitzt eine zeitliche Komponente. Man will ein Ziel erreichen, z.B. eine Angleichung der Lebensverhältnisse zwischen Industrie- und Entwicklungsländern. Der Status Quo liegt in der Gegenwart, der erwünschte Zustand liegt damit notwendigerweise in der Zukunft. Die „Zukunft“ wird bei intragenerationellen Anliegen allerdings meist kürzer gefasst. Nicht erst die nachrückende Generation soll in größerer Gerechtigkeit leben, sondern möglichst die heutigen Generationen.
National: Gerechtigkeit innerhalb eines Landes zwischen Arm und Reich
International: Gerechtigkeit zwischen verschiedenen Ländern, unabhängig von der Einkommensverteilung innerhalb dieser Länder
Quelle: „Generationengerechtigkeit – eine Ethik der Zukunft“ von Jörg Tremmel in der OnlineAkademie
[http://www.fes-online-akademie.de/download.php?d=U_Inter_vs_Intragenerationelle_G.pdf]

IPAT-Formel beschreibt eine lineare Korrelation zwischen Umwelteinwirkungen (impact) in Abhängigkeit von Bevölkerungsanzahl (population), Wohlstand (affluence) und dem Stand der Technologie (technology) hinsichtlich Bevölkerungsentwicklung und Ressourcennutzung, die Anfang der 1970er Jahre von Paul Ehrlich und John Holdren entwickelt wurde. [Ehrlich, Paul R. / Holdren, John P. (1971): Impact of population growth]

Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung erzeugen in einem gekoppelten Prozess elektrischen Strom und Wärme. Der Ausnutzungsgrad der dabei eingesetzten Brennstoffe ist dabei um ein Vielfaches höher als bei der konventionellen Stromerzeugung.

Leapfrogging „Der Begriff „Leapfrogging“ beschreibt die sprunghafte Veränderung einer Gesellschaft oder eines Unternehmens hin zu einem höheren Entwicklungsstand, ohne dass die in anderen Fällen zu beobachtenden Zwischenstufen durchlaufen werden. Damit wird die Vorstellung verbunden, dass volkswirtschaftliche Ressourcen für nichtnachhaltige fossile Technologien gespart werden können und somit das Land diese Investitionen direkt in eine nachhaltige Zukunft investieren kann, anstatt sie in bald überholten Infrastrukturen zu binden. Ökologisches Leapfrogging ist somit als Gegenmodell zur Nachholenden Entwicklung im klassischen Sinne zu verstehen, nämlich als den Übergang eines Entwicklungslandes direkt in den Status der Nachhaltigkeit, ohne dass auf dem Weg zu mehr Wohlstand die ressourcenverschwendende Wirtschaftsweise der Industrieländer durchlaufen wird.“
[http://www.wupperinst.org/globalisierung/html/alt.html] und [DALKMANN ET AL. 2004]

Life Cycle Assessment (LCA) siehe Ökobilanz

Metabolismus ist der Terminus technicus für die Stoffwechselvorgänge (Energie- und Stofftransformationen) in Lebewesen. [BACCINI / BADER 1995:19]

Modell Ein Modell ist eine vereinfachende Abbildung der realen Welt, welches die wichtigen Schlüsselprozesse und deren Beziehungen zueinander enthält, um Voraussagen über das Verhalten eines betrachteten Systems treffen zu können. [ODUM 1991:45, ODUM 1999:5]

Nahwärme Als Nahwärme wird die Übertragung von Wärme zwischen Gebäuden zu Heizzwecken umschrieben, wenn die Wärmeübertragung über verhältnismäßig kurze Strecken erfolgt. Im Gegensatz zur Fernwärme wird die Nahwärme in kleinen, dezentralen Einheiten realisiert und bei relativ niedrigen Temperaturen transportiert. Sie eignet sich daher sehr gut in Kombination mit BHKW, Solarkollektoranlagen oder niedertemperaturigen Erdwärmeanlagen. [http://www.eneff-stadt.info/de/glossar/]

Netto-Wohnbauland (NWBL) umfasst die Summe aller Grundstücksflächen, die mit Wohngebäuden bebaut sind oder bebaut werden sollen. Sie setzt sich aus der überbauten Grundstücksfläche und allen grundstückszugehörigen Hof- und Freiflächen einschließlich Zuwegungen und KFZ-Einstellplätze zusammen. NWBL ist eine wichtige städtebauliche Kenngröße. [GRUHLER ET AL. 2002:244]

Ökobilanzen (Life Cycle Assessment, LCA) analysieren die Umweltwirkungen eines Produktes über seinen gesamten Lebensweg („Produktlinie“) hinweg: Von der Rohstoffentnahme und –aufbereitung über Herstellung, Distribution und Transport bis zu Gebrauch, Verbrauch und Entsorgung. Im Mittelpunkt steht die Bilanzierung von Input- und Outputflüssen – und daraus folgend die Beurteilung der Umweltfolgen in Relation zu den Erkenntniszielen der jeweiligen Studie. Anforderungen sind international als ISO 14040 festgelegt. Diese Norm ist in Deutschland als DIN-Norm übernommen worden [POLITISCHE ÖKOLOGIE 1999:30].

Ökosysteme sind offene, nicht im Gleichgewicht stehende, thermodynamische Systeme, die Energie und Stoff kontinuierlich mit der Umwelt austauschen, um ihre innere Entropie zu verringern und die äußere Entropie zu vergrößern. [ODUM 1999:42]

Smart Grid (englisch für intelligentes Stromnetz) bezeichnet die informationstechnische Vernetzung und Steuerung von Stromerzeugern, Speichern, elektrischer Verbraucher und Netzbetriebsmitteln in Energieübertragungs- und -verteilungsnetzen der Elektrizitätsversorgung [EPRI 2009:6].

Somatische Energie ist die Energie, die natürliche Lebewesen zur Aufrechterhaltung ihrer Lebensvorgänge aufnehmen und verstoffwechseln, s.a. extra-somatische Energie.

Solare Nahwärme Solar unterstützte Nahwärmesysteme versorgen mehrer Gebäude über ein Nahwärmenetz von einer Heizzentrale, wobei ein Großteil der Wärme über Solarkollektoren bereitgestellt wird.

Stadtstrukturtypen sind urbane Flächennutzungen, die durch eine einheitliche physiognomische Ausprägung in ihrer Bebauungsstruktur und der Freiflächen charakterisiert sind. [SCHILLER 2003]

Stofflager ist eine absolute Größe und spiegeln die Baustoffmenge in Kilogramm oder Tonnen wider, die in einem Bauteil, Gebäude, Siedlung oder urbanen System vergegenständlicht ist. [GRUHLER ET AL. 2002:8]

Stoffintensität ist eine spezifische Größe und beschreibt die in einem Bauteil vergegenständlichte Baustoffmenge bezogen auf den Quadratmeter einer gebäudetypischen Fläche oder den Kubikmeter eines gebäudetypischen Volumens. [GRUHLER ET AL. 2002:8]

Stoffstrom ist der Weg eines Stoffes von seiner Gewinnung als Rohstoff bis zur Entsorgung – über die Veredelung, das Endprodukt und seinen Gebrauch oder Verbrauch sowie eventuell seine Wiederverwendung / Verwertung. [POLITISCHE ÖKOLOGIE 1999:27]

Stoffstrommanagement ist das zielorientierte Beeinflussen der Materialströme, um die Menge der benutzten Stoffe zu reduzieren, ihre Nutzung zu intensivieren, Emissionen zu reduzieren und ihren Kreislauf so weit wie möglich zu gewährleisten. (Enquetekommission, 1994) „Das Stoffstrommanagement zielt auf die ökologisch und ökonomisch effiziente Beeinflussung von Stoffströmen unter Berücksichtigung sozialer Aspekte. Ausgangspunkt ist eine möglichst umfassende Stoffstromanalyse, die eine medienübergreifende Bewertung ermöglicht. Darauf aufbauend sind Strategien zu entwickeln, um die Ziele zu erreichen. Prinzipiell geht es dabei um die Senkung des Materialdurchsatzes durch die gesamte Wirtschaft und um die Verringerung und den Ersatz ökologisch bedenklicher Stoffe."
[http://www.umweltdatenbank.de/lexikon/stoffstrommanagement.htm]

Subsistenz (lat.) 1. der Bestand, das Bestehen durch sich selbst (philos.)
2. veralt. für Lebensunterhalt, Fremdwörterbuch Duden, 1966
Subsistenzwirtschaft bezeichnet die wirtschaftliche Leistung, die der Selbstversorgung dient und auf die Deckung des Eigenbedarfs ausgerichtet ist. Als Subsistenzgüter können alle lebensnotwendigen Güter wie Nahrungsmittel und Trinkwasser, Behausung, Güter für den alltäglichen Gebrauch sowie die infrastrukturelle Grundversorgung mit Energie, Verkehr und Mobilität, Wasserversorgung und Abwasserentsorgung gezählt werden.

System Ein System bezeichnet die Gesamtheit aller miteinander verknüpfter und sich gegenseitig beeinflussender Elemente, die entsprechend einem bestimmten Zweck organisiert ist. Ein System hat eine gänzlich andere Qualität als die Summe seiner Elemente. Systeme können bestimmte Verhaltensformen zeigen, so dynamisches, adaptives, zielsuchendes, sich selbst erhaltendes und evolutionäres Verhalten. Siehe auch Emergenz. [MAEDOWS ET AL. 1992:301]

Szenarien Im Gegensatz zu Prognosen besteht das Ziel von Szenarien nicht darin, die Zukunft vorherzusagen. Bei Szenarien geht es vielmehr darum, denkbare zukünftige Möglichkeiten zu identifizieren und auszuleuchten. Dahinter steht die Einsicht, dass das Aufzeigen von Entscheidungs- und Wahlmöglichkeiten bei zukünftigen Entwicklungspfaden von zentraler Bedeutung für Gesellschaft und Wirtschaft ist. Szenarien integrieren fachliches Expertenwissen aus den zahlreichen, für die zukünftige Entwicklung eines komplexen Systems maßgeblichen Einzeldisziplinen und machen somit auch die Wechselwirkungen zwischen den Entwicklungen in den unterschiedlichen Teilbereichen deutlich.

Urbane Systeme „Das urbane System ist ein aus geogenen (erdgeschichtlich entstandenen) und anthropogenen (kulturell gestalteten) Subsystemen zusammengesetztes Gross-System auf einer Fläche, die Hunderte bis Zehntausende von Quadratkilometern umfasst, und einer Dichte von Hunderten von Einwohnern pro Quadratkilometer. Es ist ein flächendeckendes dreidimensionales Netzwerk von vielfältigen sozialen und physiologischen Verknüpfungen. In den Knoten dieses Netzwerks bestehen relativ hohe Dichten von Menschen, Gütern und Informationen. Zwischen diesen Knoten unterschiedlicher Dichten finden hohe Flüsse von Personen, Gütern und Informationen statt. Die kolonialisierten Ökosysteme der Land- und Forstwirtschaft und die Gewässer sind integrierte Teile dieses Systems."
[OSWALT / BACCINI 2003:46]

ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis

1.1 Dynamik der Probleme urbaner Slums [UN-HABITAT 2005] 1
1.2 Die Entwicklung des ökologischen Fussabdrucks von 1961 - 2005 global (links) und nach Nationen (rechts) [GLOBAL FOOTPRINT NETWORK 2008:14] 3
1.3 Übergang zur 2. solaren Gesellschaft [BACCINI 1999] 3
1.4 Überblick und Gliederung der Arbeit 5
1.5 Der Ökologische Fußabdruck von Berlin [SCHNAUSS 2001] 8
1.6 Die vier im Modell betrachteten Handlungsfelder 9
2.1.1 Zauberscheiben der Nachhaltigkeit [DIEFENBACHER ET AL. 1997] 16
2.2.1 Graphische Darstellung des Systemverhaltens [MEADOWS ET AL. 1993:156] 21
2.2.2 Sozialökologischer Wirkungszusammenhang [SIEFERLE 1997:37] 23
2.4.1 Gütergruppen nach Ernst Schumacher [SCHUMACHER 1977:45] 28
2.5.1 Aggregationsstufen von Indikatoren zu Indikatorensystemen 34
2.5.2 Indikatorenkatalog des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR): Nachhaltigkeitsdefizite des Bundes [IRMEN / MILBERT 2002:127] 35
2.5.3 Indikatorenkatalog des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR): Indikator Energieverbrauch je Beschäftigten [IRMEN / MILBERT 2002:105] 36
3.1.1 Grundschema mit fünf Komponenten für die Erstellung von Ökosystemmodellen [ODUM 1991:48] 38
3.1.2 Funktionsdiagramm eines Ökosystems [ODUM 1991:52] 38
3.1.3 Modell eines vollständigen Ökosystems [ELLENBERG 1973:3] 39
3.1.4 Energie- und Stoffflussmodell der Stadt Brüssel von Duvigneaud und Denayer-De Smet (1977) in: [NEDDENS 1986: 142] 41
3.1.5 Einflüsse auf den bio-psychischen Zustand [BOYDEN 1979:22] 42
3.1.6 Extrasomatische und somatische Energienutzung im Vergleich zur Bevölkerungsanzahl in Hongkong 1900, 1950, 1971 und 1974 [BOYDEN 1979:45] 43
3.1.7 Wasserbilanz in Hongkong, 1971 [BOYDEN 1979:53] 43
3.1.8 Netzwerk Ballungsgebiet [VESTER 1976:8] 43
3.2.1 Landesplanung vom Lande her [MIGGE 1926: 100] 46
3.2.2 Leberecht Migge: Selbsthilfe und urbane Subsistenz (1920) [REUSS 1990:255] 47
3.2.3 Leberecht Migge: Ökologische Modelle der Haus- und Stadtwirtschaft (1923 und 1925) [REUSS 1990:253] 47
3.2.4 “Unmittelbare, pünktliche und rasche Verbindungen zwischen zwei unabhängigen Funktionen ...” [LE CORBUSIER 1979:260] 48
3.2.5 Kisho Kurokawa: Helix-City, 1961 [DAHINDEN 1971:74] 50
3.2.6 Interaktionen zwischen der Anthroposphäre und der Umwelt im regionalen Stoffhaushalt [BACCINI / BRUNNER 1991:11] 54
3.2.7 Diagramm zu den Wechselwirkungen zwischen Energie-, Material-, Wasser- und Flächenhaushalt in Bezug auf den Energiestoffwechsel für die Bereitstellung von Subsitenzgütern 59
3.3.1 Auswahl von Entscheidungsunterstützungsinstrumenten nach Hofstetter 1998 [FRISCHKNECHT 2004:17] 61
3.3.2 Der ökologische Fussabdruck und die Biokapazität verschiedener Nationen 2005 [GLOBAL FOOTPRINT NETWORK 2008:15] 65
4.1.1 Die weltweite Ölförderung von 1920 bis 2006 [http://www.energywatch-group.org/fileadmin/global/pdf/2008-05-21_EWG_Erdoel_Pressemeldung_D.pdfEnergyWatchGroup] 71
4.1.2 Die *Strategische Linse* [RWE 2004:37] 72
4.1.3 Herkunft erneuerbarer Energien [KLEEMANN / MELISS 1993:3] 75
4.1.4 Graphischer Überblick über die Methode URBS [RICHTER 2004:6] 77
4.1.5 Ermittlung von Biomasseerträgen, Ablaufdiagramm des *bym* [BRONZIO ET AL. 2006:46] 80
4.2.1 Entwicklung der Anforderungen an den Heizenergiebedarf und Pilotprojekte zum energieeffizienten Bauen

[Zero-Haus, URL: http://www.zero-haus.de/bilder/diagramm-qh.gif] 83
4.2.2 Solarhaus in Regensburg, Architekt: Thomas Herzog [Herzog 1992:18f. Foto: Richard Schenkirz]....84
4.2.3 Passivhaus Darmstadt-Kranichstein, Architekt: Bott, Ridder, Westermeyer [Foto: Prytula 2009] 85
4.2.4 Energieautarkes Solarhaus Freiburg, Architekt: Planerwerkstatt Hölken & Berghoff [Foto: Prytula 1993] 86
4.2.5 Kumulierter Primärenergieaufwand (KEA) verschiedener Bauweisen über eine Nutzungsdauer von 80 Jahren (nach Feist) [BINE 1999:2] 87
4.2.6 Plusenergiehäuser *Am Schlierberg,* Architekt: Rolf Disch [Foto: Prytula 2009] 89
4.2.7 Solarhaus TU Darmstadt, Architekt: TU Darmstadt [http://www.pressebox.de/pr-images/281399.jpg] 89
4.2.8 Patchwork-Haus in Müllheim, 2005, Architekt: Pfeiffer / Kuhn [http://www.pfeifer-kuhn.de/uploadspics/03_01.jpg] ...90
4.2.9 Plusenergiehaus mit Elektromobilität, Architekt: Werner Sobek [http://www.uni-stuttgart.de/ilek/joomla/images/aktuelles/ 101109_PEH_Visualisierung_WernerSobek.jpg] 91
4.2.10 Wohnhaus B35 (Bolleystrasse 35) Architekt: Johannes Leibundgut [LEIBUNDGUT 2010a:23]....91
4.2.11 Energiebilanz für Wärmeerzeugung 2007 und 2057 [LEIBUNDGUT 2008:16] 92
4.3.1 KWK-Kohlekraftwerk Reuter West, Berlin-Charlottenburg [Foto: Prytula 2005] 95
4.3.2 Mikro-BHKW WhisperGen [http:/www.gasag.de/DownloadPaper/ presse/technik_innovationen/whisper_gen1.jpg] 96
4.3.3 Konzept einer solar unterstützten Nahwärmeversorgung mit Langzeitwärmespeicher [BINE 2001:2] 99
4.4.1 Szenario einer zukünftigen Energieversorgung im Netzverbund mit Nordafrika durch ein Hochspannungs-Gleichstrom-Netz [GREENPEACE / EREC 2010b:42] 101
4.4.2 Biogasanlage - Fermenter [Foto: Prytula 2006] 103
4.4.3 Blockheizkraftwerk (BHKW) [Foto: Prytula 2006] 103
4.4.4 Stoff- und Energieflussdiagramm Bioenergiedorf Jühnde, Stand 2006, Eigene Darstellung, Datenquelle: [BIOENERGIEDORF JÜHNDE EG 2006] 105
4.4.5 Bioenergiedorf Effelter: Praxisorientiertes Projekt von Matthias Böhm [BÖHM 2006] Seminar *Energieautarke Regionen* , FG TGA, Universität Kassel, 2006 107
4.4.6 Mikrostruktur einer regionalen Energieversorgung mit virtuellen Kraftwerken, lokalen Wärmenetzen und einem überregionalen Strom- und Gasnetz [Prytula 2007] 108
4.4.7 Makrostruktur einer regionalen Energieversorgung [Prytula 2007] 109
4.4.8 Vernetzung verschiedener Energie- und Stoffströme für ein regionales Energiekonzept 109
4.4.9 Windenergiekonverter [Foto: Prytula 2006] 109
4.4.10 PV-Freiflächenanlage Solarpark Münchberg / Oberfranken, Nennleistung 6,84 MW_{peak} [Foto: Prytula 2010] ...109
4.5.1 Entwicklung des Beitrags erneuerbarer Energien und der verbleibenden fossilen Energien zur Primärenergie in den Ausbauszenarien 2000-2050 (Wirkungsgradmethode) [BMU 2004:191] mit eigenen Ergänzungen 111
4.5.2 Struktur des Primärenergiebeitrags erneuerbarer Energien (Wirkungsgradmethode) in den Ausbauszenarien am Beispiel des Szenarios NaturschutzPlus II [BMU 2004:192] 111
5.1.1 Prozentuale Verteilung von Gebäudearten, Wohnflächen und Wohnungen in Deutschland (2000) [BMVBS 2006] 117
5.1.2 Prozentuale Verteilung der Gebäudealtersklassen von Wohnunggebäuden in Deutschland [BMVBS 2006] 117
5.1.3 Deutsche Gebäudetypologie - Häufigkeit von Gebäudetypen unterschiedlichen Baualters [IWU 2007:17] 118
5.1.4 Energieträger-Struktur in Einfamilienhäusern [IWU 2007:18] 119
5.1.5 Energieträger-Struktur in Mehrfamilienhäusern [IWU 2007:18] 119
5.1.6 Typen der Beheizung in Deutschland [IWU 2007:18] 120
5.1.7 Der deutsche Baubestand im Referenzjahr 1991 [HASSLER / KOHLER / WANG 1999:29] 121
5.1.8 Umweltbelastungen, hervorgerufen durch Nutzung und Bautätigkeit Referenzjahr 1991 [HASSLER / KOHLER / WANG 1999:31] 121
5.1.9 Stofflich-energetische Gebäudesteckbriefe [GRUHLER ET AL. 2002:58/63] 122
5.1.10 Matrix der ARK-Haus-Methode [LICHTENSTEIGER 2006:15] 123
5.1.11 Systembeschreibung für den Energie-,Stoff- und Güterhaushalt eines regionalen Bauwerks nach [BACHINI / BADER 1996, LICHTENSTEIGER 2006:8] 124
5.1.12 Raumtypenmodell mit Zuordnung der vier Raumtypen [ROTH ET AL. 1980:25] 125

5.1.13 Die neun wärmeversorgungsrelevanten Siedlungstypen [ROTH ET AL. 1980:25] 126
5.1.14 Wirtschaftlichkeit der Wärmeversorgungssysteme [ROTH ET AL. 1980:233] 127
5.1.15 Bebauungsleittypen des Wohngebäudebestandes und ihre angenommenen Spannbreiten der Geschossflächendichte (Zuordnung nach IÖR) [BUCHERT ET AL. 2004:22] 129
5.2.1 Modellebene 1: Versorgung und Bedarf urbaner Subsistenz bezogen auf den Energiehaushalt, EWSV - Modell (Ernährung - Wärme - Strom - Verkehr) 132
5.2.2 Modellebene 2: Beziehungen zwischen den Subsystemen Energiehaushalt, Flächenhaushalt und Stadtstrukturtypen in Verbindung mit dem Flächenindikator 133
5.2.3 Modellebene 3: Betrachtung aller räumlichen Maßstabsebenen sowie Auswahl und die räumliche Verteilung der Stadtstrukturtypen 134/135
5.2.4 Modellebene 3: Darstellung der vier elementaren Stadtstrukturtypen 136
5.2.5 Modellebene 4: Einflüsse auf den Energiebedarf von Wohngebäuden und Abbildung dieser Parameter im Modell, Auswahl der baukonstruktiven und gebäudetechnischen Varianten 137
5.2.6 Übersicht zu den Parametervariationen für Ermittlung des Energiebedarfs der SST 138
5.2.7 Übersicht zur Gesamtmethodik für dir Ermittlung der Flächenkennwerte der Stadtstrukturtypen 139
5.3.1 Mangel- und Unterernährung, weltweit [FAO 2008] 140
5.3.2 Systemdarstellung Bedarfsfeld Ernährung 142
5.3.3 Flächenbedarf Niederlande, 1950 - Quelle: [GERBENS-LEENES / NONHEBEL 2002:189 / 192] 147
5.3.4 Flächenbedarf Niederlande, 1990 - Quelle: [GERBENS-LEENES / NONHEBEL 2002:189 / 192] 147
5.3.5 Anteile Flächenbedarf Thüringen (1) [THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT 2010] 148
5.3.6 Anteile Flächenbedarf Thüringen (2) [THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT 2010] 148
5.3.7 Anteile Flächenbedarf ÖF Berlin [SCHNAUSS 2001] 1
505.3.8 Anteile Flächenbedarf ÖF München [TREFFNY 2003] ....1505.
3.9 Anteile des Flächenbedarfs (Verzehr Männer), eigene Berechnung 151
5.3.10 Anteile des Flächenbedarfs (Verzehr Frauen), eigene Berechnung 152
5.3.11 Anteile des Flächenbedarfs (Verzehr Durchschnitt), eigene Berechnung 153
5.4.1 Überblick zu exergetischen und energetischen Wirkungsgraden bei verschiedenen Bioenergienutzungspfaden [WBGU 2008:172] 164
6.1.1 Primär- und Endenergieverbrauch pro Einwohner und Jahr in Deutschland, Berlin und Land Brandenburg für das Jahr 2007 174
6.1.2 Endenergieverbrauch in Berlin 2007 Anteiliger Verbrauch nach Sektoren 174
6.1.3 Endenergieverbrauch für den Sektor Verkehr in Berlin 2007, Anteiliger Verbrauch nach Verkehrsarten 174
6.2.1 Stadtstrukturtypen im Berliner Umweltatlas. Kartenausschnitt Maßstab 1 : 100.000 [SENATSVERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG 2007] 176/177
6.2.2 Straßenansicht Falterweg 17 [KÜHNHENRICH ET AL. 2004]] 179
6.2.3 SST 1 - Niedrige Bebauung mit Gartenstruktur, Maßstab 1 : 5.000 179
6.2.4 SST 1 - Niedrige Bebauung mit Gartenstruktur Maßstab 1 : 2.000 180
6.2.5 Grundrisse und Ansichten der Doppelwohnhaushälfte Falterweg 17, Berlin – Eichkamp [KÜHNHENRICH ET AL. 2004] 181
6.2.7 Straßenansicht Zeilenbebauung von Walter Gropius 183
6.2.8 SST 2 - Zeilenbebauung der 1920er bis 50er Jahre, Maßstab 1 : 5.000 183
6.2.9 SST 2 - Zeilenbebauung der 1920er, 30er und 50er Jahre, Maßstab 1 : 2.000 184
6.2.10 Ansichten und Grundriss [HUSE 1987:165] 185
6.2.11 Straßenansicht Wühlischstr. 187
6.2.12 SST 3 - Gründerzeitlicher Block, Maßstab 1 : 5.000 187
6.2.13 SST 3 - Gründerzeitlicher Block, Maßstab 1 : 2.000 188
6.2.14 Typologie der Berliner Blockrandbebauung um 1900. Längsschnitt und Grundrisse [ARCHITEKTEN- UND INGENIEURVEREIN ZU BERLIN 1974: IV B7] 189
6.2.15 Nord-Ost-Ansicht von der Karl-Marx-Allee, Februar 2011 191
6.2.16 SST 4 - Hohe Bebauung der Nachkriegszeit, Maßstab 1 : 5.000 191

6.2.17 SST 4 - Hohe Bebauung der Nachkriegszeit, Maßstab 1 : 2.000 192
6.2.18 Ansicht und Grundrisse der Wohnbauserien QP 71 Typ A103, 10 Geschosse in Großtafelbauweise [VE WOHNBAUKOMBINAT BERLIN 1973] 193
6.3.1 Vergleich der Stadtstrukturtypen: Mittlere Grundflächenzahl (GRZ) 196
6.3.2 Vergleich der Stadtstrukturtypen: Mittlere Geschoßflächenzahl (GFZ) 196
6.3.3 Verhältnis Bruttowohnbaufäche zu Gesamtfläche 196
6.3.4 Verhältnis Straßenfläche zu Gesamtfläche 196
6.3.5 Stadtstrukturtyp-Gesamtfläche je Bewohner in [m² / Bewohner] 196
6.3.6 Stadtstrukturtyp-Bruttowohnbaufläche je Bewohner in [m² / Bewohner] 196
6.3.7 Anteile der Stadtstrukturtypen an Stadtfläche 197
6.3.8 Anteile der Stadtstrukturtypen an Wohnfläche 197
6.3.9 Gesamtfläche der Strukturtypen mit überwiegender Wohnnutzung in den Berliner Stadtteilen. Datenquelle: [SENSTADT BERLIN 2008a] 198
6.3.10 Gesamtwohnflächen bezogen auf die Stadtstrukturtypen in den Berliner Stadtteilen 198
6.3.11 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 1 - alle Angaben in [kWh/(m² a)] 209
6.3.12 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 2 - alle Angaben in [kWh/(m² a)] 211
6.3.13 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 3 - Mitteltyp - alle Angaben in [kWh/(m² a)] 213
6.3.14 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 3 - Ecktyp - alle Angaben in [kWh/(m² a)] 215
6.3.15 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 4 - Nord-Süd-orientiert - alle Angaben in [kWh/(m² a)] 217
6.3.16 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 1 - Ost-West- orientiert - alle Angaben in [kWh/(m² a)] 219
6.4.1 Systemdiagramm der Modellstruktur des Rechenmodells in EXCEL zur Bilanzierung der Versorgungsszenarien 221
6.4.2 Szenario 1 - Endenergiebedarf für Wärme in kWh/a 224
6.4.3 Szenario 1 - Flächenbedarf für Wärme in ha / a 224
6.4.4 Szenario 1 - Flächenbedarf für Wärme in ha / a 224
6.4.5 Szenario 1 - Gesamtflächenbedarf der Varianten zur Wärmeversorgung im Vergleich 225
6.4.6 Szenario 2 - Endenergiebedarf für Wärme in kWh/a 228
6.4.7 Szenario 2 - Flächenbedarf für Wärme in ha / a 228
6.4.8 Szenario 2 - Flächenbedarf für Wärme in ha / a 228
6.4.9 Szenario 2 - Gesamtflächenbedarf der Varianten zur Wärmeversorgung im Vergleich 229
6.4.10 Szenario 3 - Endenergiebedarf für Wärme in kWh/a 232
6.4.11 Szenario 3 - Flächenbedarf für Wärme in ha / a 232
6.4.12 Szenario 3 - Flächenbedarf für Wärme in ha / a 232
6.4.13 Szenario 3 - Gesamtflächenbedarf der Varianten zur Wärmeversorgung im Vergleich 233
6.4.14 Szenario 4 - Endenergiebedarf für Wärme in kWh/a 236
6.4.15 Szenario 4 - Flächenbedarf für Wärme in ha / a 236
6.4.16 Szenario 4 - Flächenbedarf für Wärme in ha / a 236
6.4.17 Szenario 4 - Gesamtflächenbedarf der Varianten zur Wärmeversorgung im Vergleich 237
6.4.18 Übersicht zum Gesamtflächenbedarf aller Szenarien zur Versorgung von Berlin 241
6.5.1 Karte des Landes Brandenburg mit Verwaltungsbezirken 243
6.5.2 Energieverbrauch und -erzeugung aus erneuerbaren Energien in Berlin und im Land Brandenburg (in MWh/a) Stand 22.02.2011. Datenquelle: [http://www.energymap.info/] 245
6.5.3 Bioenergiepotenziale im Land Brandenburg. Datenquelle: [MUGV BRANDENBURG 2010] 249
7.1.1 Graphische Übersicht zur Arbeit mit den Beziehungen der Modellparameter 252
7.2.1 Struktur der heutigen Energieversorgung auf der Basis fossiler Energieträger und Großkraftwerkstechnolgien 255
7.2.2 Struktur einer zukünftigen Energieversorgung mit Erneuerbaren Energien und dezentralen Energieerzeugungsanlagen (DEA) [PRYTULA 2010:125] 255
7.3.1 Struktur einer zukünftigen Energieversorgung: Beziehungen von Energie- und Stoffströmen, Infrastruktursystemen und Leitungsnetzen in urbanen Systemen und 100% EE-Regionen 259

Tabellenverzeichnis

3.3.1 Übersicht des ökologischen Fußabdrucks zu ausgewählten Städten und Ländern mit spezifischem Kennwert in (ha / Einwohner) 65
4.1.1 Primärenergieverbrauch 2010, Global und in Deutschland in Mio. t Erdöläquivalenten [BP 2011] 70
5.3.1 Durchschnittlicher und empfohlener Gesamtenenergiebedarf für die Ernährung 143
5.3.2 Pro-Kopf-Verzehr von Nahrungsmitteln in Deutschland 2007, Nationale Verzehrstudie I Datenquelle: [MAX RUBNER-INSTITUT 2008a & b] I 145
5.3.3 Bedarf an Produktionsflächen von Nahrungsmitteln in den Niederlanden 1950 – 1990 Datenquelle: [GERBENS-LEENES / NONHEBEL 2002:189 / 192] 147
5.3.4 Bedarf an Produktionsflächen von Nahrungsmitteln in Thüringen [THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT 2010] 148
5.3.5 Vergleich des Flächenbedarfs für Ernährung nach Berechnungen des ökologischen Fußabdrucks für Berlin und München [SCHNAUSS 2001, TREFFNY 2003] 150
5.3.6 Flächenbedarf für Nahrungsmittelproduktion, Deutschland 2007, Verzehr Männer eigene Berechnung auf Datenbasis [GERBENS-LEENES / NONHEBEL 2002:189 / 192, MAX RUBNER-INSTITUT 2008b] 151
5.3.7 Flächenbedarf für Nahrungsmittelproduktion, Deutschland 2007, Verzehr Frauen eigene Berechnung auf Datenbasis [GERBENS-LEENES / NONHEBEL 2002:189 / 192, MAX RUBNER-INSTITUT 2008b] 152
5.3.8 Flächenbedarf für Nahrungsmittelproduktion, Deutschland 2007, Verzehr im Durchschnitt eigene Berechnung auf Datenbasis [GERBENS-LEENES / NONHEBEL 2002:189 / 192, MAX RUBNER-INSTITUT 2008b] 153
5.3.9 Primärenergieverbrauch im Bedarfsfeld Ernährung [FAIST 2000: B-31] 156
5.3.10 Anteile von Strom und fossilen Energieträgern am Primärenergieverbrauch [FAIST 2000: B-31] 156
5.3.11 Energiemengen zur Erzeugung pflanzlicher u. tierischer Lebensmittel [SCHLIEPER 1997:369, KOLLATH 2001:280] 157
5.3.12 Entwicklung des jährlichen Fleischverbrauchs in Deutschland von 1957 - 2006 [LLM 2007:145] 158
5.3.13 Pro-Kopf-Verzehr von Männern und Frauen in Deutschland [MAX RUBNER-INSTITUT 2008b:44] 158
5.4.1 Durchschnittsverbrauch von Strom in Haushalten und der Flächenbedarf bei der Erzeugung aus erneuerbaren Energien [BOSCH & PARTNER ET AL. 2006:19, BDEW 2010] 159
5.4.2 Kennwerte zu Biogas 160
5.4.3 Endenergieverbrauch für Verkehr in Deutschland, Berlin und Land Brandenburg (2007 / 2008) 161
5.4.4 Endenergieverbrauch für Verkehr in Deutschland (2008) 161
5.4.5 Endenergieverbrauch für Verkehr in Berlin (2007) 162
5.4.6. Endenergieverbrauch für Verkehr in Brandenburg (2007) 162
5.4.7 Zusammenstellung von Flächenkennwerten zur Erzeugung von Endenergie [BOSCH & PARTNER ET AL. 2006:19, GIENAPP 2006] 165
6.1.1 Bevölkerung und Fläche von Deutschland, Berlin und Brandenburg, Stand 31.12.2009 ....167 [AMT FÜR STATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2010a] (2) [STATISTISCHES LANDESAMT BERLIN 2010]
6.1.2 Flächennutzung in Deutschland und Berlin-Brandenburg, Stand 31.12.2009 [DESTATIS 2010b] 168
6.1.3 Anteile der Nutzungssektoren an den Gesamtflächen (Erstellung am 03.10.07) 168
6.1.4 Wohnungsbestand in Berlin nach Bezirken, Stand 31.12.2009 Einwohner in Berlin nach Bezirken, Stand 31. 10.2010....169
6.1.5 Energiebilanz Berlin 2007 in Terrajoule [AMT FÜR STATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2010b:8/9] ...170/171
6.1.6 Energiebilanz im Land Brandenburg 2007 in Terrajoule [AMT FÜR STATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2010c:8/9] 172/173
6.2.1 Kenndatenblatt Stadtstrukturtyp 1 179
6.2.2 Kenndatenblatt Stadtstrukturtyp 2 183
6.2.3 Kenndatenblatt Stadtstrukturtyp 3 187
6.2.4 Kenndatenblatt Stadtstrukturtyp 4 191

6.3.1 Einwohner in Berlin nach Bezirken, Stand 31.10.2010 [STATISTISCHES LANDESAMT BERLIN 2010] sowie Wohnungs- und Wohnflächenbestand in Berlin nach Bezirken, Stand 31.12.2009 [AMT FÜR STATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2010b:8] 195
6.3.2 Anteile der Stadtstrukturtypen an Stadtfläche, Wohnfläche und Einwohnern in % 197
6.3.3 Gesamtfläche und Anteile der Strukturtypen mit überwiegender Wohnnutzung in den Berliner Stadtteilen. Datenquelle: [SENSTADT BERLIN 2008a] 198
6.3.4 Gesamtwohnflächen und Anteile bezogen auf die Stadtstrukturtypen in den Berliner Stadtteilen 199
6.3.5 Übersicht zur Berechnung der Wohnflächenverteilung auf die Stadtstrukturtypen 200/201
6.3.6 Übersicht zu den bilanzierten Varianten für die Wärmeversorgung 203
6.3.7 Variantenvergleich - Übersicht zu den Eingabeparametern (1), Randbedingungen und Konstruktion 204/205
6.3.8 Variantenvergleich - Übersicht zu den Eingabeparametern (2) Gebäudetechnik mit Wärmeerzeuger für Heizung und Warmwasser und spezifische Energiekennwerte 206/207
6.3.9 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 1 - Variantenvergleich verschiedener Energiestandards und Wärmeversorgungssysteme 208
6.3.10 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 2 - Variantenvergleich verschiedener Energiestandards und Wärmeversorgungssysteme 210
6.3.11 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 3 / Mitteltyp - Variantenvergleich verschiedener Energiestandards und Wärmeversorgungssysteme 212
6.3.12 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 3 / Ecktyp - Variantenvergleich verschiedener Energiestandards und Wärmeversorgungssysteme 214
6.3.13 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 4 / Nord-Süd-orientiert - Variantenvergleich verschiedener Energiestandards und Wärmeversorgungssysteme 216
6.3.14 Energiekennwerte für Stadtstrukturtyp 4 / Ost-West-orientiert - Variantenvergleich verschiedener Energiestandards und Wärmeversorgungssysteme 218
6.4.1 Übersicht der untersuchten Szenarien mit Definition der Eingabeparameter 223
6.4.2 Szenario 1 - Flächenbedarf für Berlin für alle Versorgungsbereiche 224
6.4.3 Szenario 1 - Übersicht der Ergebnisse mit allen Varianten zur Wärmeversorgung 226/227
6.4.4 Szenario 2 - Flächenbedarf für Berlin für alle Versorgungsbereiche 228
6.4.5 Szenario 2 - Übersicht der Ergebnisse mit allen Varianten zur Wärmeversorgung 230/231
6.4.6 Szenario 3 - Flächenbedarf für Berlin für alle Versorgungsbereiche 232
6.4.7 Szenario 3 - Übersicht der Ergebnisse mit allen Varianten zur Wärmeversorgung 234/235
6.4.8 Szenario 4 - Flächenbedarf für Berlin für alle Versorgungsbereiche 236
6.4.9 Szenario 4 - Übersicht der Ergebnisse mit allen Varianten zur Wärmeversorgung 238/239
6.5.1 Land Brandenburg: Katasterfläche nach Verwaltungsbezirken und Nutzungsart 2007 [AMT FÜR SATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2008, BOSCH & PARTNER 2009:55] 243
6.5.2 Top Ten der Bundesländer hinsichtlich ihres Anteils an erneuerbaren Energien am Stromverbrauch und Anteile der Verwaltungsbezirke Brandenburgs Stand 22.02.2011 [http://www.energymap.info/] 245
6.5.3 Ausbaustand erneuerbarer Energien für die Stromversorgung in Deutschland, Berlin und Brandenburg, ENERGYMAP, Stand 22.02.2011. Datenquelle: [http://www.energymap.info/] 247
6.5.4 Potenziale erneuerbarer Energien in Brandenburg und ihre Flächenbeanspruchung für Biomasse [BUGV 2010:16] sowie Windenergie und PV [MIL 2009] gem. Ausbaustrategie 2020 249

LITERATURVERZEICHNIS

AGEB 2010: Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2009. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V., Berlin / Köln: März 2010, 38.S
URL: http://www.ag-energiebilanzen.de/componenten/download.php?filedata=1268131438.pdf&filename=AGEB_Jahresbericht2009_20100309.pdf&mimetype=application/pdf

AGFW (2004): Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und erneuerbarer Energien. Kurztitel: Pluralistische Wärmeversorgung. Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft (AGFW), Hauptstudie, Zweiter Bearbeitungsabschnitt. Gesamtprojektleitung: W. Lutsch, H. Neuffer, F.-G. Witterhold Bearbeitung: B. Eikmeier, W. Pfaffenberger, W. Schulz, W. bremer energie institut; R. Heckler, M. Kleemann, B. Krüger, B. Forschungszentrum Jülich, Programmgruppe STE H. Neidhart, M. Sester, Institut für Kartographie und Geoinformatik an der Universität Hannover - Frankfurt
Band 1: Wirtschaftliche Rahmendaten – Räumlich verteilter Energiebedarf – Digitale Wärmekarte, 304 S.
URL: http://www.isi.fraunhofer.de/e/publikation/waerme/PW-Band-1-311120.pdf
Band 2: Technikentwicklung und -bewertung, 322 S.
URL: http://www.isi.fraunhofer.de/e/publikation/waerme/PW-Band-2-311120.pdf
Band 3: Zukunft der KWK und der Fernwärme. Modellgestützte Hochrechnungen, vergleichende Betrachtungen, zukünftige Anforderungen, 234 S.
URL: http://www.isi.fraunhofer.de/e/publikation/waerme/PW-Band-3-311120.pdf

Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2010a): Bevölkerungsstand 2009. Basisdaten
URL: http://www.statistik-berlin-brandenburg.de/BasisZeitreiheGrafik/Bas- Bevoelkerungsstand.asp?Ptyp=300&Sageb=12004&creg=BBB&anzwer=3

Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2010b): Statistischer Bericht F I 1 - j/09. Fortschreibung des Wohngebäude und Wohnungsbestandes in Berlin am 31. Dezember 2009. – Potsdam, 16 S.
URL: http://www.statistik-berlin-brandenburg.de/Publikationen/Stat_Berichte/2010/SB_F1- 1_j01-09_BE.xls

Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2010c): Statistischer Bericht E IV 4 – j/07. Energie- und CO2-Bilanz in Berlin 2007. – Potsdam, 24 S.
URL: http://www.statistik-berlin-brandenburg.de/Publikationen/Stat_Berichte/2010/SB_E4-4_j01-07_BB.xls

Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2010d): Statistischer Bericht E IV 4 – j/07. Energie- und CO2-Bilanz im Land Brandenburg 2007– Potsdam, 32 S.
URL: http://www.statistik-berlin-brandenburg.de/publikationen/Stat_Berichte/2010/SB_E4-4_j01-07_BB.pdf

Antonietti, Markus (2006): Zauberkohle aus dem Dampfkochtopf. In: Max Planck Forschung 2/2006, S. 20-25
URL: http://www.mpg.de/969501/F001_Fokus_020_025.pdf

Arch Plus (2001): Sobeks Sensor oder Wittgensteins Griff? Das Wohnhaus Sobek. Sonderheft Ausgabe 157 9/2001

Architekten- und Ingenieurverein zu Berlin (1974): Berlin und seine Bauten. Teil IV Wohnungsbau, Band B Die Wohngebäude – Mehrfamilienhäuser. Schriftleitung: D. Rentschler und W. Schirmer – Berlin, München, Düsseldorf: Ernst & Sohn

Ayres, Robert U. (1994): Industrial Metabolism: Theory and policy. In: Ayres, R. U. / Simonis, U. E. (Hgs.): Industrial Metabolism: Restructuring for Sustainable Development. Tokyo, New York, Paris: United Nations University Press, S. 3-20.

Baccini, Peter / Brunner, Paul H. (1991): Metabolism of the Anthroposphere. – Berlin, Heidelberg: Springer, 157 S.

Baccini, Peter / Bader, Hans-Peter (1996): Regionaler Stoffhaushalt. Erfassung, Bewertung und Steuerung – Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akad. Verlag, 420 S.

Baccini, Peter (1999): «Schöne Neue Schweiz»: Wie soll sie in 50 Jahren aussehen? Forum für Wissen 1999, 1: 47–54
URL: http://www.wsl.ch/lm/publications/e-publ/forum/1999-1/fo99-1-baccini.pdf

Bader, Hans-Peter (2005): Gespräch am 01.03.2005 mit Hans-Peter Bader und Ruth Scheidegger an der EAWAG in Dübendorf, Abteilung Systemanalyse und Modellierung

Bader, Hans-Peter (2006): Stoffflüsse: Von der Analyse zum Management. In: Eawag News 62d/Dezember 2006, S. 4-8
URL: http://www.eawag.ch/services/publikationen/eanews/news_62/en62d_leitartikel.pdf

Banzhaf, Ellen / Martini, Mike (2006): Objektorientierte Klassifikation von Stadtstrukturtypen für die Stadt Leipzig mittels sehr hochauflösender Fernerkundungsdaten. UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle. In: Michel, Ulrich / Behncke, Kai (Hrsg.) (2006): gi-reports@igf Band 5. Veröffentlichungen des AK Fernerkundung 2006, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, S. 1-13
URL: http://www.fergi-online.de/pdfs/presse/gi-reports_igf5.pdf

BDEW (2010): Haushaltsgröße beeinflusst Strombedarf. Presseinformation vom 25. Februar 2010. Erhebung des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) und der HEA-Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung.
URL: http://www.bdew.de/bdew.nsf/id/DE_20100225_PM_Haushaltsgroesze_beeinflusst_Energiebedarf/$file/Stromverbrauch_nach_Haushaltsgrößen.pdf

Beckenbach, Frank / Diefenbacher, Hans (Hrsg.) (1994): Zwischen Entropie und Selbstorganisation. Perspektiven einer ökologischen Ökonomie. – Marburg: Metropolis, 395 S.

BEI / IWU (2010): Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Bremer Energie Institut und Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt. Autoren Dr. Nikolaus Diefenbach (IWU, Projektkoordinator), Dr. Holger Cischinsky (IWU), Markus Rodenfels (IWU), Dr. Klaus-Dieter Clausnitzer (BEI). 180 S.
URL: http://www.bremer-energie-institut.de/download/projects/0303_2010_endbericht.pdf

Berger, Hartwig (2003): Entgrenzte Städte. Zur politischen Ökologie des Urbanen. – Münster: Westfälisches Dampfboot, 181 S.

Behringer, Wolfgang (2007): Kulturgeschichte des Klimas. Von der Eiszeit bis zur globalen Erwärmung. – München: C.H. Beck, 352 S.

Bine (2000): Solar unterstützte Nahwärme. Projektinfo 8/2000
URL: http://www.solites.de/download/bi_0800%20SUN.pdf

Bine (2001): Langzeit-Wärmespeicher mit solarer Nahwärme. Projektinfo 1/2001
URL: http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Themen-Infos/I_2001/themen0101internetx.pdf

Bine (1999): Bewertung der Energie- und Stoffströme im Planungsprozess von Gebäuden. Herausgeber: Fachinformationszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information mbH, Redaktion Dr. Thomas Lützkendorf, Micaela Nolte. 4 S.
URL: http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/1999/Projekt-Info_10-1999/projekt_1099_internetx.pdf

Bioenergiedorf Jühnde eG (2006): Datenblatt Bioenergieanlage Jühnde. 1 S.
URL: http://www.bioenergiedorf.de/con/cms/upload/Wissenstransfer/Wissenswertes/2005-06-01Kenndaten.pdf

Blaser, Werner / Heinlein, Frank (2002): R 128 by Werner Sobek. Bauen im 21. Jahrhundert. – Basel: Birkhäuser, 96 S.

Blesl, Markus (2002): Räumlich hoch aufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme zur Deckung des Niedertemperaturwärmebedarfs. Dissertation am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Prof. Dr. - Ing. A. Voß. Universität Stuttgart. 280 S.
URL: http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2002/1193/pdf/FB92.pdf

BMBF (2003): Die Urbane Wende: Forschung für die nachhaltige Entwicklung der Megastädte von morgen. Bundesministerium für Bildung und Forschung Referat 622 „Globaler Wandel“, 23 S.
URL: http://www.future-megacities.org/download/Megacities_Langfassung.pdf

BMJ (2009a):Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (EnEV). Herausgegeben vom Bundesministerium der Justiz (BMJ). 42 S.
URL: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/enev_2007/gesamt.pdf

BMJ (2009b): Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energie (EEG). Herausgegeben vom Bundesministerium der Justiz (BMJ). 36 S.
URL: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eeg_2009/gesamt.pdf

BMJ (2011): Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz - EEWärmeG). Herausgegeben vom Bundesministerium der Justiz (BMJ). 18 S.
URL: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eew_rmeg/gesamt.pdf

BMU (Hrsg.) (2000): Erprobung der CSD-Nachhaltigkeitsindikatoren in Deutschland - Bericht der Bundesregierung
URL: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/csd_01.pdf

BMU (Hrsg.) (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, FKZ 901 41 803. – Stuttgart, Heidelberg, Wuppertal, 285 S.
URL: http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nutzung_ee_lang.pdf

BMU (Hrsg.) (2006): Erneuerbare Energien in Zahlen - nationale und internationale Entwicklung. Stand: Mai 2006. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).
URL: http://www.erneuerbare-energien.de/files/erneuerbare_energien/downloads/application/pdf/broschuere_ee_zahlen.pdf

BMU (Hrsg.) (2008): Weiterentwicklung der Ausbaustrategie Erneuerbare Energien, Leitstudie 2008. Herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) bearbeitet von Dr. Joachim Nitsch in Zusammenarbeit mit der Abteilung „Systemanalyse und Technikbewertung“ des DLR-Instituts für Technische Thermodynamik, Stuttgart. – Berlin: 128 S.
URL: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2008.pdf

BMU (Hrsg.) (2010): Leitstudie 2010 - Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global.
Arbeitsgemeinschaft Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart Institut für Technische Thermodynamik, Abt. Systemanalyse und Technikbewertung Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Kassel Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE), Teltow Bearbeiter: Dr. Joachim Nitsch, Dr. Thomas Pregger, Yvonne Scholz, Dr. Tobias Naegler (DLR) Dr. Michael Sterner, Norman Gerhardt, Amany von Oehsen, Dr. Carsten Pape, Yves-Marie Saint-Drenan (IWES) Dr. Bernd Wenzel (IFNE), 273 S.
URL: http://www.bundesumweltministerium.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010_bf.pdf

BMVBS (2006): Wohngebäudebestand und Nutzungsperspektiven. Info - Blatt Nr. 7.1. Kompetenzzentrum Bauen des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. 41 S.
URL: http://www.inqa-bauen.de/komko/pdf/7_1_0106.pdf

BMVBS (2010): Wohnen und Bauen in Zahlen 2009/2010. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. 162 S
URL: http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/54084/publicationFile/25487/wohnen-und-bauen-in-zahlen-2009-2010.pdf

BMVBS (Hrsg.) (2011a): Erneuerbare Energien: Zukunftsaufgabe der Regionalplanung. Bearbeitung: Urbanizers Büro für städtische Konzepte, Dr. Gregor Langenbrinck (Leitung), Arnt von Bodelschwingh, Olaf Kessler, Lutz Wüllner; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) Gina Siegel (Leitung); Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn, Lars Porsche
URL: http://www.bbsr.bund.de/cln_032/nn_21918/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Sonderveroeffentlichungen/2011/DL__ErneuerbareEnergien,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/DL_ErneuerbareEnergien.pdf

BMVBS (Hrsg.) (2011b): Handlungsleitfaden zur energetischen Stadterneuerung. Herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, bearbeitet von Prof. Dr.-Ing. Matthias Koziol, Lehrstuhl Stadttechnik, Brandenburgische Technische Universität Cottbus. – Berlin, 167 S.
URL: http://www.bbsr.bund.de/cln_032/nn_21272/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Sonderveroeffentlichungen/2011/DL__HandlungsleitfadenEE,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/DL_HandlungsleitfadenEE.pdf

BMWi (2006): Verfügbarkeit und Versorgung mit Energierohstoffen. Kurzbericht vom 29.März 2006 der Arbeitsgruppe Energierohstoffe, Abteilung III, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie,
URL: http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energierohstoffbericht,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf

BMWi (2007): Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 47 S.
URL: http://bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/eckpunkt-fuer-ein-integriertes-energie-und-klimaprogramm,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf

BMWi / IBP (Hrsg.) (2009): LowEx Symposium. Zum deutschen Projektverbund des BMWi. 28.10. – 29-10.2009 Fraunhofer Institut für Bauphysik, Kassel. Herausgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP). Redaktion: Dr. Dietrich Schmidt. – Kassel: 154 S.
URL: http://www.enob.info/fileadmin/media/Publikationen/LowEx/LowEx-Tagungsband_10-09.pdf
URL: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept_bundesregierung.pdf

Bollery, Franziska / Fehl, Gerhard / Hartmann, Kristina (Hg.) (1990): Im Grünen wohnen – im Blauen planen. Ein Lesebuch zur Gartenstadt mit Beiträgen und Zeitdokumenten. Ergebnisse des Forschungskolloquiums „Die Gartenstadt – Neubewertung ihrer historischen Entwicklung und Überprüfung ihrer aktuellen Bedeutung“, Stiftung Volkswagenwerk, TH Delft 6.-8.3.1986. – Hamburg: Hans Christians Verlag, 470 S.

Bork et al. (1998): Landschaftsentwicklung in Mitteleuropa. Wirkungen des Menschen auf Landschaften. Mit Beiträgen von: Hans-Rudolf Bork, Helga Bork, Claus Dalchow, Berno Faust, Hans-Peter Piorr, Thomas Schatz. – Gotha, Stuttgart: Klett-Pertes, 328 S.

Bosch & Partner et al. (2006): Flächenbedarfe und kulturlandschaftliche Auswirkungen regenerativer Energien am Beispiel der Region Uckermark-Barnim. Forschungsprogramm Aufbau Ost, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Autoren: Bosch & Partner; Prof. Peters; HNE Eberswalde (FH); Institut für Energetik & RA Bohl & Coll., 154 S.
URL: http://www.bbsr.bund.de/cln_016/nn_113334/BBSR/DE/FP/AO/RegionaleEntwicklung/FlaechenbedarfeRegenerativerEnergien/DL__Endbericht,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/DL_Endbericht.pdf

Bosch & Partner et al. (2009): Erarbeitung von Grundlagen zur regionalplanerischen Steuerung von Photovoltaik-Freiflächenanlagen am Beispiel der Region Lausitz-Spreewald. 195 S.
URL: http://gl.berlin-brandenburg.de/imperia/md/content/bb-gl/energie/gutachten_endbericht.pdf

Bossel, Hartmut (1989): Simulation dynamischer Systeme. Grundwissen, Methoden, Programme. – Braunschweig und Wiesbaden: Friedrich Vieweg & Sohn, 310 S.

Bossel, Hartmut (1990): Umweltwissen - Daten, Fakten und Zusammenhänge. – Berlin / Heidelberg / NewYork: Springer, 169 S.

Boyden, Stephen (1979): An Integrative Ecological Approach to the Study of Human Settlements. Technical Note Number 12. Prepared in co-operation with UNEP. UNESCO. – Paris: United Nations, 87 S.

Boyden, Stephen et al. (1981): The Ecology of a city and its people: the case of Hong Kong. S. Boyden, S. Millar, K. Newcombe, B. O‘Neill. – Canberra: Australian National Univ. Press, 437 S.

BP (2011): Statistical Review of World Energy June 2011
URL: http://www.bp.com/assets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2011/STAGING/local_assets/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_report_2011.pdf

Brand, Karl-Werner / Jochum, Georg (2000): Der deutsche Diskurs zu nachhaltiger Entwicklung. Abschlussbericht eines DFG-Projekts zum Thema „Sustainable Development / Nachhaltige Entwicklung – Zur sozialen Konstruktion globaler Handlungskonzepte im Umweltdiskurs“, Münchner Projektgruppe für Sozialforschung e.V., MPS-Texte 1/2000. – München, 200 S.
URL: http://www.sozialforschung.org/de/literatur/deutscher_nachh_diskurs.pdf

Braungart, Michael / McDonough, William (2005): Einfach intelligent produzieren. Cradle to Cradle: Die Natur zeigt wie wir Dinge besser machen können. – Berlin: Bt Bloomsbury, 236 S.

Braunschweig, Arthur (1988): Die ökologische Buchhaltung als Instrument der Städtischen Umweltpolitik. – Grüsch: Verlag Rüegger

Bringezu, Stefan (1999): Stoffflussanalysen für eine nachhaltige Raumentwicklung. Instrumente zur Erfassung und Bewertung der intra- und transregionalen Ressourcennutzung. Habilitationsschrift zur Erlangung der Lehrbefähigung für das Fach „Stoffhaushalt und nachhaltiges Ressourcenmanagement“, Fachbereich Umwelt und Gesellschaft der Technischen Universität Berlin, 211 S.

Bringezu, Stefan (2000): Ressourcennutzung in Wirtschaftsräumen: Stoffstromanalysen für eine nachhaltige Raumentwicklung. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 239 S.

Bringezu, Stefan (2004): Erdlandung. Navigation zu den Ressourcen der Zukunft. Unter Mitarbeit von Rainer Klüting. – Stuttgart: Hirzel, 176 S.

Brockmöller, Andreas (1992): Dezentraler Einsatz von Photovoltaikanlagen in Gebäuden. Auswirkungen auf Energieversorgung, Haustechnik und Architektur, Dissertation an der Hochschule der Künste Berlin 1990. – Frankfurt/ Main, Bern, New York, Paris: Peter Lang, 170 S.

Brozio, Sybille et al. (2006): Modellierung landwirtschaftlicher Bioenergie. Autoren: Sybille Brozio, Hans-Peter Piorr, Frank Torkler. Tagungsband, 26. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst und Ernährungswirtschaft e.V. 6.-8. März 2006, Potsdam; S. 45-48.
URL: http://www.gil.de/dokumente/berichte/DDD/R18_2006_008.pdf

Brozio, Sybille et al. (2008): Die Nutzung von Bodenschätzungsdaten zur Modellierung von landwirtschaftlicher Biomasse. Autoren: Sybille Brozio, Mirella Zeidler, Hans-Peter Piorr, Frank Torkler. Tagungsbeitrag zu: Vortrags- und Exkursionstagung zur Bodenschätzung, AG Bodenschätzung und Bodenbewertung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Thür. Landesfinanzdirektion, Thür. Landesanstalt für Umwelt und Geologie 11. - 12.09.2008 in Weimar, 4 S.
URL: http://eprints.dbges.de/50/1/DBG_2008_Beitrag_12.pdf

Brown, Lester R. (2001): Eco-Economy, Building an Economy for the Earth. – New York: W.W.Norton & Company, 334 S.

Bruyn, Gerd de (1996): Die Diktatur der Philanthropen. Entwicklung der Stadtplanung aus dem utopischen Denken. Gekürzte Fassung der an der TH Darmstadt vorgelegten Dissertation (D17),
Bauwelt Fundamente 110 – Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 315 S.

Buchert, Matthias et al. (1999): Stoffflussbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der Nachhaltigen Entwicklung. Hrsg. vom Umweltbundesamt, Forschungsbericht 295 92 148 – Berlin, 147 S.

Buchert, Matthias et al. (2004): Nachhaltiges Bauen und Wohnen in Deutschland. Stoffflussbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung – Verknüpfung des Bereiches Bauen und Wohnen mit dem komplementären Bereich „Öffentliche Infrastruktur“, Umweltplanung Nr. 01/2004 UBAFBNr 00054, Förderkennzeichen 298 92 303/02, Umweltbundesamt, Download-Langfassung [7,17MB]
URL: http://www.umweltbundesamt.org/fpdf-l/2600.pdf

BUGV (2010): Biomassestrategie des Landes Brandenburg. Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz. 42 S. URL: http://www.mugv.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.2328.de/bmstrategie.pdf

Bundesregierung (2002): Perspektiven für Deutschland. Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. 328 S
URL: http://www.bundesregierung.de/nn_658658/Content/DE/__Anlagen/2006-2007/perspektiven-fuer-deutschland-langfassung.html

BUND / Misereor (Hrsg.) (1997): Zukunftsfähiges Deutschland: Ein Beitrag zu einer global nachhaltigen Entwicklung. Studie des Wuppertal-Instituts für Klima, Umwelt, Energie GmbH / BUND / Misereor,
Autoren: Reinhard Loske u.a. unter Mitarb. von Thomas Böhmer u.a, 4.überarb. und erw. Aufl. – Basel, Bosten, Berlin: Birkhäuser, 466 S.

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW) (2008): Endenergieverbrauch in Deutschland 2007.
URL: http://www.ag- energiebilanzen.de/componenten/download.php?filedata=1228300892.pdf&filename=Energie%20Info%20EEV%20in%20Deutschland%202007.pdf&mimetype=application/pdf

Capra, Fritjof (1996): Lebensnetz. Ein neues Verständnis der lebendigen Welt. – Bern, München, Wien: Scherz 384 S.

Chapagain, A.K./ Hoekstra, A.Y. (2004): Water footprints of nations, Volume 1: Main Report.
Value of Water Research Series No. 16, UNESCO-IHE Institute for Water Education. 76 S.
URL: http://www.unesco-ihe.org/content/download/2608/26887/file/Report16_Volume1.pdf

Carlowitz, Hans Carl von (1713 / 1732): Sylvicultura oeconomica. Anweisung zur wilden Baum-Zucht. Reprint der Ausgabe von 1713, bearbeitet von Klaus Irmer und Angela Kießling. Freiberg 2000 - TU Bergakademie Freiberg und Akademische Buchhandlung. Reprint der 2. Auflage von 1732, Verlag Kessel
Zitiert nach: URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Hans_Carl_von_Carlowitz

CEBra et. al (2010): Netzintegration Erneuerbarer Energien in Brandenburg. Studie im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft des Landes Brandenburg in Kooperation mit Vattenfall Europe Transmission GmbH, envia Verteilnetz GmbH, E.ON edis Netz GmbH, ENERTRAG AG, NAWARO BioEnergie AG. CEBra – Centrum für Energietechnologie Brandenburg BTU Cottbus, Prof. Dr.-Ing. H. Schwarz, Prof. Dr.-Ing. R. Bitsch, Prof. Dr. rer. pol. W. Fichtner. 69 S.

Costanza/ Cumberland/ Daly/ Goodland/ Norgaard (2001): Einführung in die ökologische Ökonomik.
Originalausgabe von 1998 Boca Raton FL/USA. – Stuttgart: UTB, 354 S

Dahinden, Justus (1971): Stadtstrukturen für morgen. Analysen, Thesen, Modelle. – Stuttgart: Hatje 220 S.

Daimond, Jared (1999): Arm und Reich, Die Schicksale menschlicher Gesellschaften. Amerikanische Originalausgabe „Guns, Germs and Steel. The Fates of Human Societies“ erschienen bei N.N.Norton & Company, New York 1997. – Frankfurt a.M.: Fischer, 550 S.

Dalkmann, Holger et al. (2004): Wege von der nachholenden zur nachhaltigen Entwicklung. Infrastrukturen und deren Transfer im Zeitalter der Globalisierung. Holger Dalkmann, Dirk Aßmann, Kora Kristof, Rudolf Petersen, Cláudia do Valle Costa, Holger Wallbaum, Thorsten Reckerzügel, Maria J. Welfens, Dorjee Hegel, Wuppertal Paper, Februar 2004.
URL: http://www.wupperinst.org/globalisierung/pdf_global/infrastrukturen.pdf

Daly, Herman E. (2002): Ökologische Ökonomie: Konzepte. Analysen, Politik. Aus dem Amerikanischen übersetzt von Udo E. Simonis, Discussion Paper FS-II 02-410. – Berlin: Wissenschaftszentrum, 17 S.
URL: http://bibliothek.wz-berlin.de/pdf/2002/ii02-410.pdf

Darnhofer, Ika (2005): Resilienz und die Attraktivität des Biolandbaus für Landwirte. In: Bio-Landbau in Österreich im internationalen Kontext. Michael Groier, Markus Schermer (Hg.). Institut für Agrar- und Forstökonomie, Wien: 67-83
URL: http://www.wau.boku.ac.at/fileadmin/_/H73/H733/pub/Biolandbau/2005_FB55_Resilience.pdf

deENet (Hrsg.) (2009): Schriftliche Befragung von Erneuerbare-Energie-Regionen in Deutschland. Regionale Ziele, Aktivitäten und Einschätzungen in Bezug auf 100% Erneuerbare Energie in Regionen.Entwicklungsperspektiven für nachhaltige 100%-Erneuerbare-Energie-Regionen. Projekt 100%-Erneuerbare-Energie-Regionen, herausgegeben vom Kompetenznetzwerk Dezentrale Energietechnologien, deENet, 73 S.
URL: http://www.100-ee.de/index.php?id=schriftenreihe&no_cache=1&eID=dam_frontend_push&docID=176

Deilmann, Clemens (2004): Szenarien der Rohstoff- und Flächeninanspruchnahme für das Bauen und Wohnen 2025. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden 53 (2004) 1-2, S.77-81
URL: http://www2.ioer.de/recherche/pdf/2004_deilmann_szenarien2025.pdf

Deilmann, Clemens; Gruhler, Karin (2005): Stoff- und Energieflüsse von Gebäuden und Infrastrukturen als Grundlage für ein vorausschauendes szenariogeleitetes Stoffstrommanagement . In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 57 (2005) 7/8, S.103-109
URL: http://www2.ioer.de/recherche/pdf/2005_gruhler_stoff_u_energiefluesse.pdf

Der Regierende Bürgermeister von Berlin / Senatskanzlei (Hrsg.) (2000): Die BerlinStudie. Strategien für die Stadt. – Berlin: Regioverlag, 206 S.

Destatis (2008): Vom Erzeuger zum Verbraucher - Fleischversorgung in Deutschland
Statistische Ämter des Bundes und der Länder. 43 S.
URL: http://www.eds-destatis.de/de/press/download/2011/06/093-2011-06-22.pdf

Destatis (2009): Flächennutzung in Deutschland 2008. Statistische Ämter des Bundes und der Länder:
URL: http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/de_jb09_jahrtabf1.asp

Destatis (2010a): Bevölkerungsstand in Deutschland 2009
URL: http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Navigation/Statistiken/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/Bevoelkerungsstand.psml

Destatis (2010b): Flächennutzung in Deutschland nach Bundesländern
URL: http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/de_jb09_jahrtabf1.asp

Destatis (2010c): Fortschreibung Wohngebäude- und Wohnungsbestand (destatis-statistik-31231)
URL: https://www- genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=statistikInfo&selectionname=31231&sprache=de

Deutsches Institut für Normung (2004): DIN V 4701-10 - Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen. Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung. Vornorm. Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin: Beuth, 156 S.

Deutsche Stiftung Weltbevölkerung (Hrsg.) (2011): DSW-Datenreport. Soziale und demographische Daten zur Weltbevölkerung 2005. Herausgegeben von der Deutschen Stiftung Weltbevölkerung (DSW). 16 S.
URL: http://www.weltbevoelkerung.de/fileadmin/user_upload/PDF/Datenreport/Datenreport_11.pdf

Diamond, Jared (1999): Arm und Reich, Die Schicksale menschlicher Gesellschaften. Originalausgabe New York 1997. – Frankfurt / Main: Fischer, 550 S.

Diefenbach, Nikolaus et al. (2002): Null-Emissions-Stadt. Sondierungsstudie im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, vorgelegt vom, IWU – Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt, in Zusammenarbeit mit dem ZIV – Zentrum für integrierte Verkehrssysteme, Darmstadt, Bearbeiter IWU: Nikolaus Diefenbach, Andreas Enseling, Peter Werner, Bearbeiter ZIV: Peter Sturm, Wolfgang Kieslich, Darmstadt, 188 S. URL: www.iwu.de/datei/zec_endfassung.pdf

DLR (2005): Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region. Schlussbericht des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR). Projektverantwortlicher: Dr. Franz Trieb. – Stuttgart, 285 S. URL: http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/projects/MED-CSP_Full_report_final.pdf

Dötsch, Christian / Bargel, Stefan (2009): Theoretische Betrachtungen zur idealen Temperatur in Fernwärmenetzen auf Grundlage einer exergetischen Bewertung. Fraunhofer UMSICHT. In: Tagungsband zum LowEx-Symposium am 28.-29. Oktober 2009 – Fraunhofer IBP, 154 S., 134-141 URL: http://www.enob.info/fileadmin/media/Publikationen/LowEx/LowEx-Tagungsband_10-09.pdf

Dürr, Hans-Peter (1995): Die Zukunft ist ein unbetretener Pfad. Bedeutung und Gestaltung eines ökologischen Lebensstils. – Freiburg: Herder, 172 S.

DVL / NABU (Hrsg.) (2007): Biogas aus der Sicht des Umwelt- und Naturschutzes. Deutscher Verband für Landschaftspflege (DVL) und Naturschutzbund Deutschland (NABU). 8 S. URL: http://www.lpv.de/fileadmin/user_upload/data_files/Themen/Projekt_Erneuerbare_Energien/biogas_fact-sheet.pdf

Ebel, W.; Eicke, W.; Feist, W.; Gabler, W. (1991): Dokumentation der Referenzgebäude, Wärmetechnische Gebäudetypologie für die Bundesrepublik Deutschland (alte Bundesländer). BMFT-Projekt: Instrumente für die Entwicklung von Strategien zur Reduktion energiebedingter Klimagasemissionen in Deutschland, Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU). – Darmstadt

Eberle, Ulrike et al. (2005): Umweltauswirkungen von Ernährung – Stoffstromanalysen und Szenarien; Ernährungswende-Diskussionspapier Nr.7 des Öko-Instituts, Darmstadt / Hamburg. Autoren: Ulrike Eberle, Uwe R. Fritsche, Katja Hünecke, Kirsten Wiegmann. URL: www.ernaehrungswende.de/pdf/DP7_Szenarien_2005_final.pdf

Ebök (2005): Gebäudetypologie für die Stadt Düsseldorf. Endbericht. Herausgegeben von der Landeshauptstadt Düsseldorf, Umweltamt, Verantwortlich: Dr. Werner Görtz URL: http://www.duesseldorf.de/umweltamt/download/energie/gebaeudetypologie.pdf

Ellenberg, Heinz (Hrsg.) (1973): Ökosystemforschung. Ergebnisse von den Symposien der Deutschen Botanischen Gesellschaft und der Gesellschaft für Angewandte Botanik in Innsbruck, Juli 1971. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 280 S.

EnergieAgentur NRW (2008): Planungsleitfaden. 50 Solarsiedlungen in Nordrhein-Westfalen. Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. Bearbeitung Andreas Gries. 68 S. URL: http://www.ea-nrw.de/_database/_data/datainfopool/Planungsleitfaden2008_080211.pdf URL: http://www.energieagentur.nrw.de/solarsiedlungen/page.asp?RubrikID=5526

Engelhard, Karl (2007): Entwicklungspolitik auf dem Weg zu nachhaltigen Zielen. In: Engelhard, Karl (Hrsg.) (2007): Welt im Wandel. Ein Informations- und Arbeitsheft für die Sekundarstufe II. Autoren: Hans-Jürgen Albers, Dieter Appelt, Karl Engelhard, Ingo Juchler, Karl-Heinz Otto. Teil C Bereiche der Entwicklungspolitik, OMNIA Verlag, 171 - 174 URL: http://www.omnia-verlag.de/upload_files/teil_c.pdf

Enquete (1994): Die Industriegesellschaft gestalten. Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen. Bericht der Enquete-Kommission des 12. Deutschen Bundestags „Schutz des Menschen und der Umwelt“. – Bonn: Economica, 765 S.

EPRI (2009): Report to NIST on the Smart Grid Interoperability Standards Roadmap. Electric Power Research Institute (EPRI). Project Manager Don Von Dollen. 291 S. URL: http://www.nist.gov/smartgrid/upload/InterimSmartGridRoadmapNISTRestructure.pdf

EU (2010): Richtlinie 2010/31/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung). 23 S. , L 153/ S. 13-35 URL: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:DE:PDF

Everding, Dagmar / Lindner, Sigrid (2007): Solarer Rahmenplan Berlin, Artikel im Bundesbaublatt 10/2007, S. 38-42. URL: http://www.stadtluft.com/Downloads/38-43_solarer_rahmenplan.pdf

Everding, Dagmar (Hrsg.) (2007): Solarer Städtebau. Vom Pilotprojekt zum planerischen Leitbild. Mit Beiträgen von Michael Kloos, Roland Krippner, Dagmar Niebler, Kunibert Wachten, Wolfgang Wiesner und Frank Wouters. – Stuttgart: Kohlhammer, 253 S.

Faist, Mireille Chloé Jeanne Rachel (2000): Ressourceneffizienz in der Aktivität Ernähren. Akteurbezogene Stoffflussanalyse, Dissertation an der ETH Zürich, Nr. 13884 – 272 S.
URL: http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=diss&nr=13884

FAO (2008): The State of Food Insecurity in the World 2008. High food prices and food security –threats and opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rom, 59 S.
URL: ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/i0291e/i0291e00.pdf

Feist, Wolfgang (1993): Passivhäuser in Mitteleuropa: theoretische Untersuchungen von Simulationsmodellen für das thermische Verhalten von Gebäuden und Anwendung auf die Auslegung der Konstruktionsdetails von Passivhäusern. Dissertation an der Universität Kassel, 732 S.

Feist, Wolfgang (1996): Vom Niedrigenergiehaus zum Passivhaus - Erfahrungen mit Gebäuden ohne Heizung. In: LpB (Hrsg.) (1997): Stadt mit Zukunft. Energiebewußt und urban. Dokumentation des 6. Forum der Landeszentrale für politische Bildung Baden-Württemberg (LpB), 21. - 23. März 1996, Haus auf der Alb, Bad Urach, S. 81-92
URL: http://www.lpb-bw.de/publikationen/forum6/forum6m.htm

Feist, Wolfgang (Hrsg.) (1997): Das Niedrigenergiehaus: neuer Standard für energiebewußtes Bauen. 4. völlig neu bearb. Auflage. – Heidelberg: Müller, 217 S.

Feist, Wolfgang (2006): 15 jähriges Jubiläum für das Passivhaus Darmstadt-Kranichstein.
URL: http://www.passivhaustagung.de/Kran/Passivhaus_Kranichstein_15Jahre.pdf

FFI (2011): Geschichte der Fernwärme. Fernwärme-Forschungsinstitut in Hannover e.V.
URL: http://www.fernwaerme.de/Informationen_Geschichte.html

Fisch, Norbert et al. (2001): Solarstadt. Konzepte, Technologien, Projekte. Norbert Fisch, Bruno Möws, Jürgen Zieger. – Stuttgart: Kohlhammer, 244 S.

Fischer-Kowalski, Marina et al. (1997): Gesellschaftlicher Stoffwechsel. Ein Versuch in sozialer Ökologie. Beiträge von Fischer-Kowalski, Marina / Haberl, Helmut / Hüttler, Walter / Payer, Harald / Schandl, Heinz / Winiwarter, Verena / Zangerl-Weisz, Helga. – Amsterdam: Gordon & Breach Fakultas, 292 S.

Fischer-Kowalski, Marina (2003): On the History of Industrial Metabolism. In: Perspectives on Industrial Ecology, edited by Dominique Bourg, University of Troyes, France, Suren Erkman, Institute for the Communication and Analysis of Science, Switzerland, Greenleaf Publishing: 35-45

FNR (Hrsg.) (2000): Leitfaden Bioenergie. Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Herausgegeben von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). 354 S.
URL: http://fnr-server.de/cms35/fileadmin/biz/pdf/leitfaden/leitfaden_bioenergie.pdf

FNR (Hrsg.) (2009a): Biogas Basisdaten Deutschland.
Herausgegeben von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). 7 S.
URL: http://www.bioenergie-weserbergland-plus.de/bioenergie/files/literatur/pdf_185_basisdaten_biogas_2009.pdf

FNR (Hrsg.) (2009b): Biokraftstoffe Basisdaten Deutschland.
Herausgegeben von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). 7 S.
URL: http://www.biokraftstoffverband.de/downloads/1102/FNR_Daten_Biokraftsto.pdf

FNR (Hrsg.) (2010): Wege zum Bioenergiedorf. Leitfaden für eine eigenständige Wärme- und Stromversorgung auf Basis von Biomasse im ländlichen Raum. Leitfaden herausgegeben von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Autoren: Prof. Dr. Hans Ruppert, Dr. Swantje Eigner-Thiel, Prof. Dr. Walter Girschner, PD Dr. Marianne Karpenstein-Machan, Prof. Dr. Folker Roland, Dipl.-Kfm. Volker Ruwisch, Dipl.-Geow. Benedikt Sauer, Prof. Dr. Peter Schmuck. 122 S.
URL: http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_318-leitfaden_bioenergiedorf_2010_web_neu.pdf

Forrester, Jay W. (1969): Urban Dynamics. –
Cambridge, Massachusetts Institute of Technology: MIT Press, 285 S.

Frank, Werner (2003): Die japanischen Metabolisten und kurzer geschichtlicher Abriss der Entwicklung japanischer Architektur vom 15. – 20. Jh. Anhang zur Dissertation von 1980. 19 S.
URL: http://www.architektfrank.at/upload/DOC35.doc

Frank, Susanne / Gandy, Matthew (Hrsg.)(2006): Hydropolis. Wasser und die Stadt der Moderne. – Frankfurt / Main, New York: Campus, 372 S.

Frischknecht, Rolf (2004): Methoden der Umweltbewertung technischer Systeme. Ökobilanzen (Life cycle assessment, LCA). Vorlesung Teil 1, Sommersemester 2004, Studiengang Umweltnaturwissenschaften der ETH Zürich, 113 S.
URL: http://www.esu-services.ch/de/vorlesung.htm

FVEE (2010): Energiekonzept 2050: „Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100% erneuerbaren Energien“ (Juni 2010). Beitrag der Institute: Fraunhofer IBP, Fraunhofer ISE, Fraunhofer IWES, ISFH, IZES gGmbH, ZAE Bayern und ZSW, die im ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE) zusammengeschlossen sind, für das Energiekonzept der Bundesregierung
URL: http://www.fvee.de/fileadmin/politik/10.06.vision_fuer_nachhaltiges_energiekonzept.pdf
URL: http://www.fvee.de/fileadmin/politik/kurzfassung_energiekonzept.pdf

Gerbens-Leenes, P.W. / Nonhebel S. (2002): Consumption patterns and their effects on land required for food. In: Ecological Economics 42 (2002): S. 185–199.
URL: http://ivem.eldoc.ub.rug.nl/FILES/ivempubs/publart/2002/EcolEconGerbensL/2002EcolEconGerbensLeenes.pdf

Geus, Marius de (1999): Ecological Utopias. Envisioning the Sustainable Society. Translated, extended and revised version of the Dutch title: Ecologische Utopieen; Ecozopia’s en het milieudebat, Uitgeverij Jan van Arkel, 1996 – Utrecht: International Books, 318 S.

Gienapp, Christian (2006): Der Landwirt als Energiewirt – Chancen und Perspektiven. Vortrag DECHEMA, Güstrow März 2006, Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei MV. 50 S.
URL: http://www.fnr-server.de/cms35/fileadmin/allgemein/pdf/veranstaltungen/dechema2006/Praesentationen/Gienapp.ppt

Girardet, Herbert (1990): The Metabolism of Cities. In: Cadman, David / Payne, Geoffrey K. (eds.) (1990): The Living city: towards a sustainable future. – London: Routledge. S. 170-180

Girardet, Herbert (1999): Creating Sustainable Cities. Schumacher Briefings No. 2 – Totnes, Devon: Green Books Ltd, 77 S.

Gleich, Arnim von / Stefan Gößling-Reisemann (Hrsg.) (2008): Industrial Ecology – Erfolgreiche Wege zu nachhaltigen industriellen Systemen – Wiesbaden: Vieweg + Teubner., 382. S

Global Footprint Network (2007): 2006 Annual Report
URL: http://www.footprintnetwork.org/download.php?id=104

Global Footprint Network (2008): The Ecological Footprint Atlas 2008. 87 S.
URL: http://www.footprintnetwork.org/download.php?id=506

Göderitz et al. (1957): Die gegliederte und aufgelockerte Stadt. Autoren: Johannes Göderitz, Roland Rainer, Hubert Hoffmann, Heft 4 der Veröffentlichungen der deutschen Akademie für Städtebau und Landesplanung – Tübingen: Ernst Wasmuth, 104 S.

Göllinger, Thomas (1998a): Grundzüge einer ökologischen Orientierung betrieblicher Grundfunktionen - Produktion und Reduktion. IöB-Arbeitspapier Nr. 21, Siegen, 87 S.
URL: http://www.kfunigraz.ac.at/inmwww/goellinger/ap21-netzversion.pdf

Graebig, Markus et al. (2010): Comparative analysis of environmental impacts of maize–biogas and photovoltaics on a land use basis. Autoren: Markus Graebig, Stefan Bringezu, Richard Fenner. Solar Energy 84 (2010): S. 1255–1263

Greenpeace / EREC (2010a): Energie [R]evolution weltweit! Der nachhaltige World Energy Outlook 2010 für eine klimagerechte Energieversorgung. European Renewable Energy Council (EREC), 5 S.
URL: http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/energie/DE_Energierevolution.pdf

Greenpeace / EREC (2010a): energie [r]evolution. A Sustainable World Energy Outlook. 260 S.
URL: http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/climate/2010/fullreport.pdf

Grober, Ulrich (2010): Die Entdeckung der Nachhaltigkeit. Kulturgeschichte eines Begriffs. – München: Kunstmann, 299 S.

Gruhler, Karin et al. (2002): Stofflich-energetische Gebäudesteckbriefe - Gebäudevergleiche und Hochrechnungen für Bebauungsstrukturen. Autoren: Gruhler, Karin; Böhm, Ruth; Deilmann, Clemens; Schiller, Georg. IÖR-Schriften Band 38 – Dresden: IÖR S.307

Gruss, Peter / Schüth, Ferdi (2008): Die Zukunft der Energie. Die Antwort der Wissenschaft. Ein Report der Max-Planck-Gesellschaft. – München: C.H.Beck, 333 S.

Hagemann, Ingo B. (2007): Solarsiedlung am Schlierberg, Freiburg (Breisgau). Case study für PV UPSCALE hergestellt von Dr. Ingo B. Hagemann und dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Hermann Laukamp URL: http://www.pvupscale.org/IMG/pdf/Schlierberg.pdf

Hahn, Sylvia / Reith, Reinhold (Hrsg.) (2001): Umwelt-Geschichte. Arbeitsfelder,Forschungsansätze, Perspektiven. Querschnitte Bd. 8 – Wien: Verlag für Geschichte und Politik / München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 240 S.

Hannemann, Christine (1996): Die Platte. Industrialisierter Wohnungsbau in der DDR. – Braunschweig: Vieweg & Sohn,174 S.

Hanschke, Uta / Beddig, Doreen (1995 / 2005): Flächentypen. Eine Beschreibung der im Informationssystem Stadt und Umwelt (ISU) der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung erfassten und verwalteten Struktur- und Flächennutzungskategorien von Berlin. Verfasserin: Uta Hanschke (1995) überarbeitet von Doreen Beddig (2005) im Auftrag der Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, III F - 43 S. URL: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/e_tab/ISU_Flaechentypen_2001.pdf

Harrison, Paul (1994): Die Dritte Revolution. Antworten auf Bevölkerungsexplosion und Umweltzerstörung. Originaltitel: The Third Revolution. Population, Environment and a Sustainable World“ bei I.B. Taurus mit Penguin Books Ltd. New York, 1992. – Berlin, Heidelberg, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag, 488 S.

Hassler, Uta / Kohler, Niklaus / Wang, Wilfried (Hrsg.) (1999): Umbau. Über die Zukunft des Baubestandes. – Berlin: Wasmuth Berlin 233 S.

Hauff, Volker (Hrsg.) (1987): Unsere gemeinsame Zukunft. Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. – Greven: Eggenkamp Verlag, 421 S.

Hauser, Gerd / Maas, Anton (1994): Konzept und Konsequenzen der neuen Wärmeschutzverordnung. Fachgebiet Bauphysik der Universität / Gesamthochschule Kassel, 13 S. URL: http://www.bp.bv.tum.de/pub/114.pdf

Hausladen, Gerhard (2010): ClimaDesign. Vortrag. Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik, Technische Universität München, 25 S. URL: http://www.forschungsinitiative.de/PDF/Folien_Hausladen.pdf

Heck, Peter / Bemman, Ulrich (Hrsg.) (2002): Praxishandbuch Stoffstrommanagement. Strategien – Umsetzung – Anwendung in Unternehmen / Kommunen / Behörden. – Köln: Fachverlag deutscher Wissenschaftsdienst GmbH & Co. KG, 400 S.

Heck, Peter (2003): Zero-Emission-Village Weilerbach. Abschlußbericht der Projektstudie im Auftrag der Verbandsgemeinde Weilerbach, gefördert durch die Landeszentrale für Umweltaufklärung Rheinland-Pfalz. – Institut für angewandtes Stoffstrommanagement (IfaS), Birkenfeld, 296 S.

Hegemann, Werner (1988): Das steinerne Berlin. Originalfassung von 1930. Nachdruck geringfügig gekürzt. – Braunschweig: Vieweg & Sohn, 344 S.

Heinloth, Klaus (2003): Die Energiefrage. Bedarf und Potentiale, Nutzung, Risken und Kosten. 2. erweiterte und aktualisierte Auflage. – Braunschweig / Wiesbaden: Vieweg, 597 S.

Herrmann, Bernd (Hrsg.) (1986): Mensch und Umwelt im Mittelalter. – Stuttgart: Deutsche Verlagsanstalt, 288. S.

Herzog, Thomas (1992): Bauten 1978-1992. Ein Werkbericht. – Stuttgart: Gerd Hatje, 82 S.

Höhne, Bernd (2006): Stand und Potenzial der Biogasproduktion in Brandenburg. In: Leitfaden Biogas 2006, Kapitel 2 URL: http://www.eti-brandenburg.de/fileadmin/eti_upload/biogasleitfaden/biogasleitfaden_kapitel2.pdf

Hösle, Vittorio (1994): Philosophie der ökologischen Krise. Moskauer Vorträge. 2., um ein Vorwort erw. Aufl. – München: C.H. Beck, 155 S.

Hohmeyer, Olav (2010): 2050. Die Zukunft der Energie. Der Weg in das regenerative Zeitalter und die Folgen einer Laufzeitverlängerung für Kernkraftwerke auf den Ausbau erneuerbarer Energien und dezentraler Mikro-Blockheizkraftwerke. Gutachten von Prof. Dr. Olav Hohmeyer, Universität Flensburg, im Auftrag der LichtBlick AG. 78 S.
URL: http://www.lichtblick.de/uf/Studie_2050_Die_Zukunft_der_Energie.pdf

Howard, Ebenezar (1968): Gartenstädte von morgen. Das Buch und seine Geschichte; Hrsg: Julius Posener; Bauwelt Fundamente Nr. 21. – Berlin, Frankfurt/Main, Wien: Ullstein, 198 S.

Huber, Joseph (1995): Nachhaltige Entwicklung. Strategien für eine ökologische und soziale Erdpolitik. – Berlin: Edition Sigma, 171 S.

Huber, Joseph (2000): Industrielle Ökologie. Konsistenz, Effizienz und Suffizienz in zyklusanalytischer Betrachtung. „Global Change“ VDW-Jahrestagung, Berlin, 28.-29.Oktober 1999, in: Simonis, Udo Ernst (Hg), Global Change, Baden-Baden: Nomos, 2000, 16 S.
URL: www.soziologie.uni-halle.de/huber/docs/industrial.pdf

Hüttler, Walter et al. (1997): Der Stoffwechsel industrieller Gesellschaften. Der Material-Stoffwechsel. Walter Hüttler, Harald Prayer, Heinz Schandl. In: Fischer-Kowalski, Marina et al. (1997), S. 67-79

Hug, Florian (2002): Ressourcenhaushalt alpiner Regionen und deren physiologische Interaktionen mit den Tiefländern im Kontext einer nachhaltigen Entwicklung. Dissertation an der ETH Zürich Nr. 14540, Referent: P. Baccini, Koreferent: B. Messerli. 243 S.
URL: http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:25041/eth-25041-02.pdf#search=%22(author:Florian%20Hug)%22

Hummel, Diana et al. (2006): Virtual Water Trade. Documentation of an International Expert Workshop. July 3-4, 2006. Diana Hummel, Thomas Kluge, Stefan Liehr, Miriam Hachelaf.
In: Materialien Soziale Ökologie. Nr. 24, ISOE. – Frankfurt / Main, 53 S.
URL: http://www.isoe.de/ftp/vwt_documentation.pdf

Huse, Norbert (Hg.) (1987): Vier Berliner Siedlungen der Weimarer Republik. Britz, Onkel Toms Hütte, Siemensstadt, Weiße Stadt. Ausstellungskatalog zur Ausstellung im Bauhaus-Archiv Berlin (24.10.1984 - 7.1.1985). – Berlin: Argon, 241 S.

IPCC (2008): Klimaänderung 2007: Synthesebericht. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Deutsche Übersetzung. Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental) Panel on Climate Change IPCC, WMO/UNEP), 118 S.
URL: http://www.de-ipcc.de/_media/IPCC-SynRepComplete_final.pdf

Irmen, Eleonore / Milbert, Antonia (2002): Nachhaltige Raumentwicklung im Spiegel von Indikatoren. Berichte Bd. 13, Hrsg. vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn: Selbstverlag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung

Isenmann, Ralf (2008): Industrial Ecology auf dem Weg zur Wissenschaft der Nachhaltigkeit?
In: Gleich, Arnim von / Stefan Gößling-Reisemann (Hrsg.) (2008): Industrial Ecology. 304-315

IWU (2006): Gebäudetypologie Bayern. Entwicklung von 11 Hausdatenblättern zu typischen Gebäuden aus dem Wohngebäudebestand Bayerns. Studie im Auftrag des Bund Naturschutz Bayern e.V., Endbericht, Bearbeitung: Eberhard Hinz. – Darmstadt, 98 S.
URL: http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/Bericht_ Hausdatenblaetter_ Bayern.pdf

IWU (2007): Querschnittsbericht Energieeffizienz im Wohngebäudebestand - Techniken, Potenziale, Kosten und Wirtschaftlichkeit. Eine Studie im Auftrag des Verbandes der Südwestdeutschen Wohnungswirtschaft e.V. (VdW südwest) Bearbeitung: Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt. Tobias Loga, Dr. Nikolaus Diefenbach, Dr. Andreas Enseling, Ulrike Hacke, Rolf Born, Dr. Jens Knissel, Eberhard Hinz
URL: http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/IWU_QBer_EnEff_Wohngeb_ Nov2007.pdf

IZNE (2001): Das Bioenergiedorf. Wärme- und Stromversorgung durch Biomasse. Auswirkungen auf Landwirtschaft, Ökologie und Lebenskultur im ländlichen Raum.
URL: http://www.bioenergiedorf.info/pdfs/Infoheft.pdf

Jenni Energietechnik AG (2007): Erstes 100% solar beheiztes Mehrfamilienhaus mit saisonaler Wärmespeicherung. 15 S.
URL: http://www.jenni.ch/pdf/Mediendokumentation_Einweihung%20Solar-MFH%2031.08.07.pdf

Jörissen, J. et al. (1999): Ein integratives Konzept nachhaltiger Entwicklung.
J. Jörissen, J. Kopfmüller, V. Brandl, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse M. Paetau, GMD – Institut für Autonome intelligente Systeme, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung FKZ.: 07OWI12/8. Forschungszentrum Karlsruhe, Technik und Umwelt Wissenschaftliche Berichte FZKA 6393. 200 S.
URL: http://www.itas.fzk.de/deu/Itaslit/joua99a.pdf

Jonas, Hans (1984): Das Prinzip Verantwortung: Versuch einer Ethik für die technologische Zivilisation. – Frankfurt / Main: Suhrkamp, 426 S.

Jungbluth, Nils (2000): Umweltfolgen des Nahrungsmittelkonsums: Beurteilung von Produktmerkmalen auf Grundlage einer modularen Ökobilanz. Dissertation ETH Nr. 13499, Umweltnatur- und Umweltsozialwissenschaften, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Supervisors: Prof. Roland W. Scholz, Prof. Olivier Jolliet, Dr. Olaf Tietje, 316 Seiten, URL: http://www.esu-services.ch/niels-dis/jungbluth-2000-umweltfolgen.pdf

Jungbluth, Nils (2010): Die Ökobilanz von Nahrungsmittelproduktion und Konsum: Handlungsmöglichkeiten der Akteure. Kurzfassung. 7 S. URL: http://www.esu-services.ch/fileadmin/download/jungbluth-2010-oekobilanz-ernaehrung.pdf

Kaiser, Yvonne / Hastings, Robert S. (1998): Niedrigenergie-Solarhäuser. Systeme, Projekte, Technologien. – Basel: Birkhäuser, 159 S.

Kaltschmitt, Martin et al. (2003): Energiegewinnung aus Biomasse. Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten 2003 „Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit“. Autoren: Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt, Dr. oec. Dipl.-Ing. Dieter Merten, Dipl.-Ing. Nicolle Fröhlich, Dipl.-Phys. Moritz Nill, Leipzig: Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, 2002. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 150 S.
URL: http://www.wbgu.de/fileadmin/templates/dateien/veroeffentlichungen/hauptgutachten/jg2003/wbgu_jg2003_ex04.pdf

Kaluza, Bernd, et al. (2001): Überlegungen zur Konzeption eines Produktionsplanungs- und Recyclingplanungs- und -Steuerungssystems für Verwertungs- und Entsorgungsnetzwerke. Diskussionsbeiträge des Instituts für Wirtschaftswissenschaften der Universität Klagenfurt Nr. 2001/01. Autoren: Bernd Kaluza, H. Dullnig und B. Goebel. – Klagenfurt, 105 S.

Karl, Jürgen (2004): Dezentrale Energiesysteme. Neue Technologien im liberalisierten Energiemarkt. – München: Oldenbourg, 430 S.

Karpenstein-Machan, Marianne (2006): Bioenergiedörfer - Bausteine für eine nachhaltige Entwicklung im ländlichen Raum. Vortrag.

Kennedy, Christopher et al. (2007): The Changing Metabolism of Cities. Christopher Kennedy, John Cuddihy, Joshua Engel-Yan. In: Journal of Industrial Ecology, Vol. 11. Nr. 2, 43-59

Kennedy, Margit / Lietaer, Bernard A. (2004): Regionalwährungen. Neue Wege zu nachhaltigem Wohlstand. – München: Riemann, 301 S.

Kieß, Walter (1991): Urbanismus im Industriezeitalter. Von der klassischen Stadt zur Garden City. – Berlin: Ernst & Sohn, 491 S.

Klärle, Martina / Ludwig Dorothea (2006): Standortanalyse für Photovoltaik-Anlagen durch hochauflösende Sensoren in der Fernerkundung. Forschungsprojekt an der Fachhochschule Osnabrück . In: gi-reports@igf, Veröffentlichungen des AK Fernerkundung 5 / 2006. Herausgeber: Ulrich Michel, Kai Behncke, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung (IGF), 35 – 43
URL: http://www.igf.uni-osnabrueck.de/images/pdfs/gi-reports/gi_reports_igf5.pdf?phpMyAdmin=jqVZ0rQxTHiKWrzcNu%2CQYY52BJe

Klärle, Martina (2007): Standortanalyse für Photovoltaik-Anlagen durch hochauflösende Sensoren in der Fernerkundung. Vortrag vom 9. Oktober 2007, GIN-Forum, 35 S.
URL: http://www.gin-online.de/downloads/vortraege_wertschoepfung_07/Vortrag_Klaerle.pdf

Kleemann, Manfred / Meliß, Michael (1993): Regenerative Energiequellen. Zweite, völlig neubearbeitete Auflage. – Berlin / Heidelberg: Springer, 315 S.

Klotz, Arnold / Frey, Otto / Rosinak, Werner (2002): Stadt und Nachhaltigkeit - Ein Diskurs.
Beiträge von Peter Sloterdijk, Marina Fischer-Kowalski, Walter Siebel, Peter Baccini, Thomas Sieverts u.a., Ludwig Boltzmann Institut für Interdisziplinäre Stadtforschung Wien. – Wien / New York: Springer 212 S.

Knoll, Michael / Kreibich, Rolf (1992) (hg.): Solar-City: Sonnenenergie für die lebenswerte Stadt. Zukunftsstudien Bd.5 – Weinheim / Basel: Beltz, 264 S.

Knoll, Michael / Rupp, Johannes (2007): Stoffliche oder energetische Nutzung? Nutzungskonkurrenz um die Ressource Holz. Holzwende 2020 plus. Verbundvorhaben im BMBF-Förderschwerpunkt „Forschung für eine nachhaltige Waldwirtschaft".Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung Berlin, 35 S.
URL: http://www.holzwende2020.de/custom/user/Basis-Studie/Nutzungskonkurrenz_Holz_IZT.pdf

Koch et al (2001): Eignungsprüfung für Energiemodelle. Systematische Analyse der Eigenschaften von Energiemodellen im Hinblick auf ihre Eignung für möglichst praktische Politik-Beratung zur Fortentwicklung der Klimaschutz-strategie. Climate Change-Veröffentlichung 02/03, Autoren: Matthias Koch, Jochen Harnisch, Kornelis Blok, ECOFYS GmbH, Köln. Hrsg.vom Umweltbundesamt, Berlin, 188 S.
URL: http://www.eneff-stadt.info/fileadmin/media/Publikationen/Dokumente/Analyse_der_Eigenschaft_von_Energiemodellen.pdf

Köckler, Heike (2005): Zukunftsfähigkeit nach Mass. Kooperative Indikatorenentwicklung als Instrument regionaler Agenda-Prozesse. Band 4 der Reihe Indikatoren und Nachhaltigkeit. – Wiesbaden: VS Verlag für Sozial-wissenschaften, 274 S.

Koerber, Karl von / Kretschmer Jürgen (2006): Ernährung nach den vier Dimensionen Wechselwirkungen zwischen Ernährung und Umwelt, Wirtschaft, Gesellschaft und Gesundheit. In: Ernährung & Medizin 2006; 21: S. 178–185. Stuttgart: MVS Medizinverlage.
URL: http://www.bfeoe.de/hintergrund/EuM-2006-178_185.pdf

Koerber, Karl von et al. (2008): Globale Ernährungsgewohnheiten und -trends. Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten „Welt im Wandel: Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung". Autoren: Karl von Koerber, Jürgen Kretschmer, Stefanie Prinz. – Berlin 2008, 35 S.
URL: http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008_ex10.pdf

Kohler, Niklaus / Hassler, Uta / Paschen, Herbert (Hrsg.) (1999): Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen. Enquete-Kommission. „Schutz des Menschen und der Umwelt" des 13. Deutschen Bundestages. Konzept Nachhaltigkeit. – Berlin: Springer, 301 S.

Kollath, Werner (2001): Die Ordnung unserer Nahrung. 16. Aufl. der 1941 erschienen Erstveröffentlichung. – Heidelberg: Karl F. Haug Verlag, 323 S.

Kramer, Dieter (1996): Die Dinge und ihr Sinn. Produktkulturen und Lebensqualität im Kulturvergleich.
In: Steffen, Dagmar (1996): Welche Dinge braucht der Mensch? – Frankfurt / Main: anabas, S. 150 - 156

Krey, Volker (2006): Vergleich kurz- und langfristig ausgerichteter Optimierungsansätze mit einem multi-regionalen Energiesystemmodell unter Berücksichtigung stochastischer Parameter.
Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum
URL: http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=981380018&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=981380018.pdf

Kroitzsch, Matthias (1994): Wasser- und Energiekonzept für den Alpenpark Berchtesgarden.
Schriftenreihe des Lehrstuhls für Landschaftsarchitektur und Entwerfen der Technischen Universität München, Band 1. München, 210 S.

Küenzlen, Martin et al. (1985): Ökologische Stadterneuerung. Oekotop-Autorenkollektiv – Karlsruhe: Müller, 274 S.

Kühnhenrich, Helga et. al. (2004): Siedlung Eichkamp. Seminararbeit Energetisches Optimieren – Siedlungstypologien am Fachgebiet Gebäudetechnik und Entwerfen der TU Berlin betreut von Sebastian Hauser, Jörg Lammers und Michael Prytula. Autoren: Helga Kühnhenrich, Carola Scholz, Sarah Voth, Verena Wilke. 27 S.

Kurokawa, Kisho (2005): Das Kurokawa-Manifest. Texte zum symbiotischen Denken.
Herausgegeben von Kennosuke Ezawa. – Berlin: jovis, 384 S.

Küster, Hansjörg (1995): Geschichte der Landschaft in Mitteleuropa. Von der Eiszeit bis zur Gegenwart. – München: C.H. Beck, 424 S.

Lakes, Tobia Maike (2006): Beitrag des Informationsmanagements für den Einsatz neuer Fernerkundungsdaten in der städtischen Planung am Beispiel der Stadtbiotoptypenkartierung mit Flugzeugscannerdaten in Berlin.
Dissertation an der Fakultät VI der Technischen Universität Berlin. Vorsitzender: Prof. Dr. Volkmar Hartje
1. Gutachter: Prof. Dr. Hartmut Kenneweg, 2. Gutachter: Prof. Dr. Birgit Kleinschmit. 259 S.
URL: http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2006/1325/pdf/lakes_tobia.pdf

Landes, David (1999): Wohlstand und Armut der Nationen, Warum die einen reich und die anderen arm sind. Originalausgabe: New York 1998. – Berlin: Siedler, 683 S.

Landesregierung Brandenburg (2008): Energiestrategie 2020 des Landes Brandenburg. Umsetzung des Beschlusses des Landtages, DS 4/2893-B, vom 18. Mai 2006 zum Klimaschutz und zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels URL:http://brandenburg.de/cms/media.php/gsid=lbm1.a.1312.de/Energiestrategie%202020.pdf

Le Corbusier (1979): Städtebau. Übersetzt und herausgegeben von Hans Hildebrandt. Faks.-Wiedergabe der 1. Auflage von 1929. Französische Originalausgabe „Urbanisme“ erschien 1925. – Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, 262 S.

Leibundgut, Hansjürg (2008): viaGialla. Wegbeschreibung für Gebäude in eine nachhaltige Energie-Zukunft. Version 2.1, 63 S. URL: http://www.viagialla.ch/fileadmin/downloads/viaGialla_web.pdf

Leibundgut, Hansjürg (2010): CO2-freies Gebäude B35. Forum, Allianz der Bauindustrie-Organisationen, Forum, Zürich, Vortrag vom 18.03.10, 94 S. URL: http://www.viagialla.ch/fileadmin/downloads/Aktuelles/Vortrag_ABO_Leibundgut_Web_Text.pdf

Leibundgut, Hansjürg (2011): LowEx Building Design für eine ZeroEmission Architecture URL: http://www.viagialla.ch/fileadmin/downloads/Publikation/Publikation_Expedition-viaGialla_Screen.pdf

Lenz, Gerhard (1999): Verlusterfahrung Landschaft. Über die Herstellung von Raum und Umwelt im mitteldeutschen Industriegebiet seit Mitte des neunzehnten Jahrhunderts. Edition Bauhaus Bd. 4, Herausgegeben von der Stiftung Bauhaus Dessau, Konzeption Walter Prigge – Frankfurt / Main / New York: Campus, 234 S.

Lévi-Strauss, Claude (1997): Das Wilde Denken. Erstveröffentlichung unter dem Titel: La pensée sauvage, Paris 1962. – Frankfurt / Main: Suhrkamp, 334 S.

Lichtblick (2010): SchwarmStrom. Die Energie der Zukunft – 11 S. URL: http://www.lichtblick.de/pdf/zhkw/info/zhkw_schwarmstrom.pdf

Lichtensteiger, Thomas (Hrsg.) (1998): Ressourcen im Bau. Aspekte einer nachhaltigen Ressourcenbewirtschaftung im Bauwesen. Mit Beiträgen von: Peter Baccini, Adrian Plüss, Mike Redle, Ruth Scheidegger, Christoph Zeltner, Felix Ziegler, Hans-Peter Bader, Bernhard de Quervain, Mireille Faist, Maureen Ferry, Peter Kruspan, Susanne Kytzia, Thomas Lichtensteiger, Daniel Müller – Zürich: vdf Hochschulverlag, 138 S.

Lichtensteiger, Thomas (Hrsg.) (2006): Bauwerke als Ressourcennutzer und Ressourcenspender in der langfristigen Entwicklung urbaner Systeme. Ein Beitrag zur Expolration urbaner Lagerstätten. – Zürich: vdf Hochschulverlag,168 S.

Living Planet Report 2010. URL: http://www.footprintnetwork.org/press/LPR2010.pdf

LLM (Hrsg.) (2007): Agrarmärkte 2007. Unterlagen für Unterricht und Beratung in Baden-Württemberg als Ergänzung des Kompendium „Markt und Ernährung“. Jahresheft 2007. Herausgegeben von der Landesstelle für landwirtschaftliche Marktkunde (LLM) Schwäbisch Gmünd im Auftrag des Ministeriums für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg URL: http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/show/1220082/Agrarmaerkte%20 2007%20_BW_.pdf

Lomborg, Bjorn (2002): Apokalypse No! Wie sich die menschlichen Lebensgrundlagen wirklich entwickeln. Originalausgabe:Kopenhagen 1998 – Lüneburg: zu Klampen, 556 S.

Lorenz, Konrad (1978): Das Wirkungsgefüge der Natur und das Schicksal des Menschen. – München: Piper, 365 S.

Loske, Reinhard / Schaeffer, Roland (Hrsg.) (2005): Die Zukunft der Infrastrukturen. Intelligente Netzwerke für eine nachhaltige Entwicklung – Marburg: Metropolis, 476 S.

Luther, Joachim / Nitsch, Joachim (1992): Potentiale des rationellen Umgangs mit Energie und der Solarenergienutzung in Städten. In: Knoll, Michael / Kreibich, Rolf (Hrsg.) (1992): Solar-City. Sonnenenergie für die lebenswerte Stadt: S. 57-98

Lutz, Ulrich / Nehls-Sahabandu, Martina (Hrsg.) (2001): Praxishandbuch Integriertes Produktmanagement. Prozesse und Produkte optimieren, Potentiale nutzen, Umweltverträglichkeit verbessern. – Düsseldorf: Symposion Publishing GmbH, 319 S.

Mangold, Dirk (2010): Historie der saisonalen Wärmespeicherung.
URL: http://www.saisonalspeicher.de/Grundlagen/Einf%C3%BChrung/Historie/tabid/149/language/de-DE/Default.aspx

Max Rubner-Institut (Hrsg.) (2008a): Nationale Verzehrsstudie II - Ergebnisbericht, Teil 1
Die bundesweite Befragung zur Ernährung von Jugendlichen und Erwachsenen.
Bundesforschungsinstitut für Ernährung und Lebensmittel. Karlsruhe, 173 S.
URL: http://www.was-esse-ich.de/uploads/media/NVS_II_Abschlussbericht_Teil_1.pdf

Max Rubner-Institut (Hrsg.) (2008b): Nationale Verzehrsstudie II - Ergebnisbericht, Teil 2
Die bundesweite Befragung zur Ernährung von Jugendlichen und Erwachsenen.
Bundesforschungsinstitut für Ernährung und Lebensmittel. Karlsruhe, 307 S.
URL: http://www.was-esse-ich.de/uploads/media/NVSII_Abschlussbericht_Teil_2.pdf

Meadows, Dennis L. et al. (1972): Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. – Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 180 S.

Meadows, Dennis L. et al. (1993): Die neuen Grenzen des Wachstums. Meadows, Donella H., Meadows, Dennis L., Randers, Jorgen. Dt. von Hans-Dieter Heck. Wissenschaftliche Beratung der dt. Ausgabe: Hartmut Bossel. Orig.: Beyond the Limits, Chealsea Green Publishing Co. Post Mills, Vermont, USA, 1992. – Reinbek bei Hamburg: Rowohlt, 319 S.

Michel, Hartmut (2008): Die natürliche Photosynthese: Ihre Effizienz und die Konsequenzen.
In: Gruss, Peter / Schüth, Ferdi (2008): Die Zukunft der Energie. 71-85

Migge, Leberecht (1926): Deutsche Binnenkolonisation. Sachgrundlagen des Siedlungswesens.
Herausgeber: Deutsche Gartenstadt-Gesellschaft, Berlin – Grünau, Berlin: Deutscher Kommunal-Verlag, 197 S.
Neu: (1999): Der soziale Garten. Das grüne Manifest. – Berlin: Gebr. Mann Verlag, 212 S.

MIL (2009): Pressemitteilung 103/2009 Erlass zum Abstand von Windrädern zur Wohnbebauung in Kraft – 1000 Meter Mindestabstand. Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg.
URL: http://www.mil.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.165028.de

Morris, William (1980): Kunde von Nirgendwo. Eine Utopie der vollendeten kommunistischen Gesellschaft. Originalausgabe: News from Nowhere, 1890. Neu herausgegeben von Gert Selle. – Reutlingen: Schwarzwurzel-Verlag, 228 S.

Moser, Peter (2010): 100%-EE-Regionen – Überblick, Perspektiven, Handlungsschwerpunkte Vortrag Berliner Energietage 2010.
URL: http://www.100-ee.de/index.php?id=vortraege&eID=dam_frontend_push&docID=523

MUGV Brandenburg (2010): Biomassestrategie des Landes Brandenburg. Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 43 S.
URL: http://www.mugv.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.2328.de/bmstrategie.pdf

Müller, Daniel Beat (1998): Modellierung, Simulation und Bewertung des regionalen Holzhaushaltes.
Diss. Techn. Wiss. ETH Zürich, Nr. 12990, Ref.: P. Baccini, Korref.: H.-R. Heinimann, Korref.: H.-P. Bader.
URL: http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=diss&nr=12990

Müller-Wenk, Rudolf (1978): Die ökologische Buchhaltung. Ein Informations- und Steuerungsinstrument für umweltkonforme Unternehmenspolitik. – Frankfurt / Main: Campus-Verlag, 120 S.

Neddens, Martin C. (1986): Ökologisch orientierte Stadt- und Raumentwicklung. Genius loci – Leitbilder – Systemansatz – Planung. Eine integrierte Gesamtdarstellung. – Wiesbaden und Berlin: Bauverlag, 254 S.

Nitsch, Joachim et al. (2002): Übergang in das Solarzeitalter. Solarer Wasserstoff – Innovative Techniken zur Erzeugung und Strategien für eine vollständig solare Energieversorgung. Von Rainer Tamme, Dr. Christian Sattler, Dr. Ludwig Jörissen und Joachim Nitsch. FVS Themen 2002, 100 – 111.
URL: http://www.fv-sonnenenergie.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2002/th2002_06.pdf

Odum, Eugene P. (1991): Prinzipien der Ökologie. Lebensräume, Stoffkreisläufe, Wachstumsgrenzen.
Mit einem Vorwort zur deutschen Ausgabe von Jürgen Overbeck. –
Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft - Verlagsgesellschaft, 305 S.

Odum, Eugene P. (1999): Ökologie. Grundlagen, Standorte, Anwendung. Übers. und bearb. von Jürgen Overbeck.
3., völlig neubearb. Aufl., Titel der Originalausgaben: Fundamentals of Ecology, 1971, 1959, 1953 by Saunders College Publ., Philadelphia. – Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 471 S.

Ossimitz, Günther (2000): Entwicklung systemischen Denkens. Theoretische Konzepte und empirische Untersuchungen. Klagenfurter Beiträge zur Didaktik der Mathematik, Band 1. – Wien: Profil, 256 S.

Oswald, Franz / Baccini, Peter (Hrsg.) (1998): Netzstadt. Transdisziplinäre Methoden zum Umbau urbaner Systeme. Ergebnisse aus dem ETH-Forschungsprojekt SYNOIKOS – Nachhaltigkeit und urbane Gestaltung im Raum Kreuzung Schweizer Mittelland. – Zürich: vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, 252 S.

Oswald, Franz / Baccini, Peter (2003): Netzstadt. Einführung in das Stadtentwerfen. – Basel, Bosten, Berlin: Birkhäuser, 303 S.

Ott, Konrad / Döring, Ralf (2004): Theorie und Praxis starker Nachhaltigkeit. – Marburg: Metropolis, 382 S.

Paffhausen Jürgen (2005): Regionale Entwicklung der Einwohnerzahl in Berlin 2000 bis 2004. Monatsschrift 6/05 Berliner Statistik S.180-187
URL: http://www.statistik-berlin.de/aktuell/ms/ms2005/aufsatz0605a.pdf
URL: Paffhausen 2005_Entwicklung EW-Zahl Berlin 2000-2004.pdf

Pauli, Gunter (1999): Up Cycling - Wirtschaften nach dem Vorbild der Natur für mehr Arbeitsplätze und eine saubere Umwelt. Vorwort von Ernst Ulrich von Weizsäcker, Nachwort von Fritjof Capra. – München: Riemann / Bertelsmann, 348 S.

Pauli, Gunter (2010): Neues Wachstum: Wenn grüne Ideen nachhaltig „blau“ werden. Die ZERI Methodik als Startpunkt einer Blue Economy. – Berlin: Konvergenta, 248 S.

Pfeifer, Günter (2002): Das kybernetische Prinzip. In: Der Architekt (2002): Vernetzte Systeme. Zeitschrift des Bundes Deutscher Architekten BDA, Heft 11 / 2002. – Berlin: Nicolai Verlag, 37-44

Pfeifer, Günter (2009): Ökologische Ästhetik und klimagerechte Architektur? Auflösung eines scheinbaren Paradoxons. In: Der Architekt (2009): Verschlungene Wurzeln. An den Quellen der Moderne, Heft 3 / 2009 - Berlin: Nicolai Verlag
URL: http://www.bdada.de/3-2009_06.htm

Pfeiffer, Martin (2007): Außenwände aus Mauerwerk für energieeffiziente Gebäude im nachhaltigen Wohnungsbau. Abschlussbericht Gutachten Institut für Bauforschung e.V. (IFB),
Bearbeitung: Dirk Fanslau, Martin Pfeiffer, Julia Zedler. IFB-Nr. 16506, 119 S.
URL: http://www.bauforschung.org/pub/IFB-16506.pdf

Politische Ökologie (1999): Stoffwechsel. Ausgabe Nr.62

Piorr, H.-P., Kersebaum, K.C. & Koch, A. (1998): Die Bedeutung von Extensivierung und ökologischem Landbau für Strukturwandel, Umweltentlastung und Ressourcenschonung in der Agrarlandschaft. Eberswalder Wissenschaftliche Schriften Bd. 3, 99 - 114.

Piorr et al. (2009): Modellierung des nachhaltig verfügbaren Biogaspotenzials in Brandenburg. Vortrag am 21.04.2009 BranchenTransfer Geoinformation, Potsdam. Mirella Zeidler, Sybille Brozio, H.-P. Piorr, F. Torkler, FH Eberswalde
URL: http://www.geokomm.de/media/de/090421_FHEberswalde.pdf

Prytula, Michael (2006): Energieautarke Regionen - Ein Baustein auf dem Weg zu einer nachhaltigen Energieversorgung. In: ÖKOBAU Fachgespräch zum nachhaltigen Bauen und Wohnen. Dokumentation des Fachgesprächs vom 14.10.2006 in Berlin. Nr. 38, Dez. 2006. S. 41 - 49

Prytula, Michael (2007): Auf dem Weg zur 100% EE – Region. Vortrag am 21.11.07 im Seminar 100% EE-Region, Universität Kassel.

Prytula, Michael (2009a): September 28th. Die Abhängigkeit urbaner Systeme von transnationlalen Energienetzen. In: transIT Band I – Triebkräfte der Architekturentwicklung. Publikationsliste an der EH Zürich, S. 104-107

Prytula, Michael (2009b): Smart Materials und Smart Technologies für zukunftsfähige Infrastruktursysteme. In: Workshop Smart Materials/ Smart Technologies. Dokumentation des Workshops vom 28. Mai 2009, veranstaltet von der IBA Hamburg GmbH und ARCH+, 160 S., 124-129

Prytula, Michael (2010): Der Urbane Metabolismus. Ganzheitliche Betrachtungen zum Ressourcenhaushalt urbaner Systeme. In : Arch Plus, Nr. 196/197 Januar 2010: Post Oil City. Zeitschrift für Architektur und Städtebau, 42. Jahrgang, S. 116-117

Quack, Dietlinde / Rüdenauer, Ina (2007): Stoffstromanalyse relevanter Produktgruppen. Energie- und Stoffströme der privaten Haushalte in Deutschland im Jahr 2005. EcoTopTen Stoffstromanalyse 2005, Öko-Institut e.V., 47 S. URL: http://www.ecotopten.de/download/EcoTopTen_Endbericht_Stoffstrom_2007.pdf

Radermacher, Franz Josef (2005): Was macht Gesellschaften reich?
In: Loske, Reinhard / Schaeffer, Roland (Hg.) (2005): Die Zukunft der Infrastrukturen. Intelligente Netzwerke für eine nachhaltige Entwicklung. – Marburg: Metropolis, 476 S. 97-112

Radkau, Joachim (2000): Natur und Macht. Eine Weltgeschichte der Umwelt. – München: C.H. Beck, 438 S.

Rahmstorf, Stefan / Schellnhuber, Hans J. (2007): Der Klimawandel. Diagnose, Prognose, Therapie. – München: C.H. Beck, 144 S.

Ramesohl, Stephan (Projektkoordination) (2005): Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse. Untersuchung im Auftrag von BGW und DVGW. Band 1: Gesamtergebnisse und Schlussfolgerungen (Wuppertal Institut). Wuppertal, Leipzig, Oberhausen, Essen, November 2005, 83 S.
URL: http://www.biogas.org/datenbank/file/notmember/fach/BGW_Biogas_Zus.pdf

Raskin, Paul et al. (2003): Great Transition - Umbrüche und Übergänge auf dem Weg zu einer planetarischen Gesellschaft. Herausgegeben von ISOE, HGDÖ, SEI. Materialien Soziale Ökologie (MSÖ) 20. Frankfurt / Main, 107 S.
URL: http://tellus.org/documents/Great_Transition.pdf

Real, Markus Georg (1998): A methodology for evaluating the metabolism in the large scale introduction of renewable energy systems. Dissertation an der ETH Zürich Nr. 12937, Referent: P. Baccini, Koreferent: P. Suter, Koreferent: H.P. Bader. 92 S.
URL: http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:22829/eth-22829-02.pdf#search=%22(author:Markus%20Georg%20Real)%22

Redle, Michael (1999): Kies- und Energiehaushalt urbaner Regionen in Abhängigkeit der Siedlungsentwicklung. Dissertation an der ETH Zürich Nr. 13108, Referent: P. Baccini, Koreferent: D. Imboden. 199 S.
URL:http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:23052/eth-23052-02.pdf#search=%22geboren%22

Reuß, Jürgen H.v. (1990): Gartenstadt als „Stadt der Gärten“. Leberecht Migges Beitrag zur Gartenstadt.
In: Bollery et al. (1990): Im Grünen wohnen – im Blauen planen. 247 - 266

Richter, Stephan (2004): Entwicklung einer Methode zur integralen Beschreibung und Optimierung urbaner Energiesysteme. Erste Anwendung am Beispiel Augsburg. Dissertation an der Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät Universität Augsburg. 194 S.
URL: http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?idn=973199415&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=973199415.pdf

Rifkin, Jeremy (1985): Entropie. Ein neues Weltbild. In Zusammenarbeit mit Ted Howard.
Amerikanische Originalausgabe: Entropy: A New World View, erschien 1980, Foundation on Economic Trends, dt. Erstausgabe 1982 bei Hoffmann und Campe, Hamburg – Frankfurt / Main: Ullstein, 350 S.

Ripl, Wilhelm / Wolter, Klaus-Dieter (2002): Ökosystemfunktion und Degradierung. Manuskript. Erweiterte deutsche Fassung von: Chapter 11: Ecosystem function and degradation: In: P.J. le B. Williams, D.R. Thomas & C:S. Reynolds (eds.): Pyhtoplankton productivity. Carbon assimilation in marine and freshwater ecosystems. Blackwell, Oxford: 291-317

Ripl, Wilhelm / Scheer, Hermann (2007): Memorandum zum Klimawandel. Notwendige gesellschaftliche Reformen zur Stabilisierung des Klimas und zur Lösung der Energiefragen. Systeminstitut Aqua Terra (SAT) e.V., Berlin. Manuskript, 15.11.2007, 32 S.
URL: http://www.aquaterra-berlin.de/images/stories/klimamemorandum/ripl-scheer_2007-11-15_memorandum-klimawandel_.pdf

Rose, Peter (2007): Primärenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen in verschiedenen gesellschaftlichen Bereichen – unter besonderer Berücksichtigung der Ernährung. Bachelor-Arbeit an der TU-München. 61 S.
URL: http://www.bfeoe.de/aktiv/klimaschutz/Bachelor-Arbeit_PeterRose-END.pdf

Roth, Ueli et al. (1980): Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen. Ueli Roth, Fritz Häubli, Joachim Albrecht. Schriftreihe „Raumordnung“ des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau 06.044. – Bonn, 276 S.

Ruppert, Hans et al. (2007): Bioenergiedörfer - Dörfer mit Zukunft. Projektgruppe Bioenergiedörfer, Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung (IZNE) der Universität Göttingen. Projektleitung Prof. Dr. Hans Ruppert und Prof. Dr. Peter Schmuck. 36 S.
URL: http://www.bioenergiedorf.info/fileadmin/user_upload/07-08_Brosch_FCre_IZNE_v2.pdf

Ruwisch, Volker / Folker, Roland (2006): Rechnet sich das? Ökonomische Aspekte von Bioenergiedörfern. Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung (IZNE) der Universität Göttingen

RWE (2004): Weltenergiereport 2004. Chancen und Risiken der zukünftigen Weltenergieversorgung. Im Fokus: Versorgungssicherheit in wettbewerblichen Energiemärkten. 124 S.
URL: http://www.rwe.com/generator.aspx/property=Data/id=213670/download30.pdf

Saarinen, Eliel (1943): The City, its growth, its decay, its future. – New York: Reinhold, 280 S.

Sachs, Wolfgang (2000): Wie zukunftsfähig ist Globalisierung?
Wuppertal Papers Nr. 99, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, 30 S.
URL: http://www.wuppertal-institut.de/Publikationen/WP/WP99.pdf

Scheer, Herrmann (2002): Solare Weltwirtschaft. Strategien für die ökologische Moderne. 5. aktualisierte Auflage. Erstveröffentlichung 1999 – München: Antje Kunstmann, 343 S.

Scheffer, Konrad (2007): Bioenergiedorf Jühnde – geht es noch besser? Kongressbeitrag in: ENBIO-REGIO Regionale Bioenergiekonzepte am 11.05.2007 in Kassel. – Kassel, S. 39-43
URL: http://www.uni-kassel.de/uni/fileadmin/datas/uni/umwelt/Regionale_Bioenergiekonzepte.pdf

Scheffer, Konrad (2008): Vom Bioenergiedorf zur autonomen Solarenergie-Region. In: Solarzeitalter 4/2008, 23-30
URL: http://www.eurosolar.de/de/images/stories/pdf/SZA_4_2008_Scheffer.pdf

Scherhorn, Gerhard / Weber, Christoph (Hrsg.) (2003): Nachhaltiger Konsum. Auf dem Weg zur gesellschaftlichen Verankerung. – München: Ökom, 498 S.

Schiller, Georg et al. (2003): Ökologische Effekte der Bestandsentwicklung in schrumpfenden Stadtregionen.
Autoren: Georg Schiller; Clemens Deilmann, Irene Iwanow
URL: http://www.schrumpfende-stadt.de/magazin/0303schiller/0303schiller.htm

Schlieper, Cornelia A. (1997): Grundfragen der Ernährung. – Hamburg: Dr. Felix Büchner Verlag Handwerk u. Technik, 464 S.

Schlögl, Robert / Schüth, Ferdi (2008): Transport- und Speicherformen für Energie. In: Gruss, Peter / Schüth, Ferdi (2008): Die Zukunft der Energie. 246 - 281

Schmidt, Dietrich (2009): Einsatz von innovativen LowEx Systemen für Gebäude und Siedlungsgebiete. In: Tagungsband zum LowEx-Symposium am 28.-29. Oktober 2009 – Fraunhofer IBP, 154 S., 111-120
URL: http://www.enob.info/fileadmin/media/Publikationen/LowEx/LowEx-Tagungsband_10-09.pdf

Schnauss, Matthias (2001): Der ökologische Fußabdruck der Stadt Berlin. Erstellt im Auftrag der Enquetekommission „Lokale Agenda 21/ Zukunftsfähiges Berlin“ des Abgeordnetenhauses von Berlin, 14. Wahlperiode, Juli 2001.
URL: http://www.agenda21berlin.de/fussabdruck

Schrödinger, Erwin (1989): Was ist Leben? Die lebende Zelle mit den Augen des Physikers betrachtet.
Aus dem Englischen von L. Mazurcak, Einführung von Ernst P. Fischer.
Englische Originalausgabe: „What is Life?“, 1944 – München / Zürich: Piper, 156 S.

Schubert, Ernst (1986): Der Wald: wirtschaftliche Grundlage der spätmittelalterlichen Stadt. In: Herrmann, Bernd (Hrsg.) (1986): Mensch und Umwelt im Mittelalter, 257-274

Schütz, Helmut / Bringezu, Stefan (2006): Flächenkonkurrenz bei der weltweiten Bioenergieproduktion.
Kurzstudie im Auftrag des Forums Umwelt und Entwicklung Wuppertal / Bonn, 24 S.
URL: http://www.forum-ue.de/fileadmin/userupload/publikationen/agke_2006_flaechenkonkurrenz.pdf

Schumacher, Ernst Friedrich (1977): Die Rückkehr zum menschlichen Maß. Alternativen für Wirtschaft und Technik.
Originalausgabe: Smal is beautiful, A Study of Economics as if People Mattered, London 1973: Blond & Briggs–
Reinbek: Rowohlt, 314 S.

Schwaiger, Bärbel (2002): Strukturelle und dynamische Modellierung von Gebäudebeständen.
Referent: Professor Dr. sc. techn. Niklaus Kohler, Korreferent: Professor Dr. Ing. Thomas Lützkendorf
URL: http://www.dissertation.de/FDP/3898255875.pdf

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (2005): Nachhaltiges Berlin – 88 S.

SenStadt Berlin (Hrsg.) 2007: Stadtstrukturtypen im Berliner Umweltatlas. Karte Maßstab 1 : 100.000

SenStadt Berlin (Hrsg.) 2008a: Digitaler Umweltatlas Berlin, Karte 06.07/08 Stadtstruktur.
Aktualisierte und erweiterte Ausgabe 2008. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin
URL: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/e_text/kc607.pdf

SenStadt Berlin (Hrsg.) (2008b): Digitaler Umweltatlas Berlin, Karte 08.01 Versorgungsbereiche Gebäudewärme / 08.02 Überwiegende Heizungsarten, Ausgabe 2010. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin
URL: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/e_text/kb801.pdf

SenStadt Berlin (Hrsg.) (2008c): Digitaler Umweltatlas Berlin, Karte 06.09 Städtebauliche Dichte, Ausgabe 2009.
Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin
URL: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/e_text/k609.pdf
URL: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/e_text/kc601.doc
URL: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/e_text/kb601.doc

SenStadt Berlin (Hrsg.) (2008d): Digitaler Umweltatlas Berlin, Karte 08.06 Solare Flächenpotenziale, Ausgabe 2008.
Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin
URL: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/e_text/k806.pdf
URL: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/download/0806_Stadtraumtypen.pdf
URL: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/karten/pdf/08_06_2005.pdf

Siebel, Walter (1999): Ist die europäische Stadt ein zukunftsfähiges Modell?
In: Klotz et al. (2002): Stadt und Nachhaltigkeit, S.149-157

Sieferle, Rolf Peter (1990): Bevölkerungswachstum und Naturhaushalt. Studien zur Naturtheorie der klassischen Ökonomie. – Frankfurt / Main: Suhrkamp, 256 S.

Sieferle, Rolf Peter (1997a): Rückblick auf die Natur: eine Geschichte des Menschen und seiner Umwelt. – München: Luchterhand, 233 S.

Sieferle, Rolf Peter (1997b): Kulturelle Evolution des Gesellschaft-Natur-Verhältnisses.
In: Fischer-Kowalski, Marina et al. (1997): Gesellschaftlicher Stoffwechsel, 37-53

Sieverts, Thomas (1999): Zwischenstadt. Zwischen Ort und Welt, Raum und Zeit, Stadt und Land.
3. verbesserte und um ein Nachwort ergänzt Auflage, 1. Auflage 1997, Bauwelt Fundamente 118. –
Basel, Bosten, Berlin: Birkhäuser, 191 S.

SimuPLAN (2011): Solarpotentialanalyse Berlin – Datendokumentation. 5 S.
URL: http://www.businesslocationcenter.de/imperia/md/content/3d/solaratlas/datendokumentation.pdf

Spreng, Daniel (1994): Graue Energie. Energiebilanzen von Energiesysteme – Zürich: vdf Hochschulverlag,
Koproduktion B.G. Teubner Verlag 152 S.

Spreng, Daniel (2003): Vorlesung Technik - Energie - Energie - Umwelt. Kapitel 7: Klima und Energie, 7 S.
URL: www.cepe.ch/download/teaching/TechEnerEnvir/SS2003/TEU_7.pdf

Sprenger, Jana (2011): Die Landplage des Raupenfraßes. Wahrnehmung, Schaden und Bekämpfung von Insekten in der Forst- und Agrarwirtschaft des preußischen Brandenburgs (1700-1850). Dissertation an der biologischen Fakultät der Georg-August-Universität Göttingen. 340 S.
URL: http://www.jki.bund.de/fileadmin/dam_uploads/_veroeff/diss/Diss_SPRENGER.pdf

Stahl, Wilhelm / Goetzberger, Adolf / Voss, Karsten (1997): Das Energieautarke Solarhaus. Mit der Sonne wohnen. –
Heidelberg: C.F. Müller Verlag, Hüthig GmbH, 146 S.

Steger, Sören (2005): Der Flächenrucksack des europäischen Außenhandels mit Agrarprodukten. Welche Globalisierung ist zukunftsfähig? Wuppertal Papers 152. 82 S.
URL: http://www.econstor.eu/bitstream/10419/21839/1/WP152.pdf

Steffen, Dagmar (1996): Welche Dinge braucht der Mensch? Hintergründe, Folgen und Perspektiven der heutigen Alltagskultur, Katalogbuch zur gleichnamigen Ausstellung, herausgegeben im Auftrag des Deutschen Werkbundes Hessen von Dagmar Steffen – Frankfurt / Main: anabas, 235 S.

Sterr, Thomas (2003): Industrielle Stoffkreislaufwirtschaft im regionalen Kontext. Betriebswirtschaftlich-ökologische und geographische Betrachtungen in Theorie und Praxis.
Dietfried G. Liesgang (Hg.) – Berlin, Heidelberg: Springer, 503 S.

Stuible, Achim (2002): Ein Verfahren zur graphentheoretischen Dekomposition und algebraischen Reduktion von komplexen Energiesystemmodellen. Dissertation an der Fakultät Energietechnik der Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart Prof. Dr.-Ing. A. Voß, Abteilung Systemtechnische Grundlagen und Methoden (SGM) Dr.-Ing. C. Schlenzig
URL: http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2002/1229/pdf/Dissertation.pdf

Sukopp, Herbert / Wittig, Rüdiger (Hrsg.) (1998): Stadtökologie. Ein Fachbuch für Studium und Praxis. 2. Überarb. und ergänzte Auflage, 1. Aufl. 1993 – Stuttgart: Gustav Fischer, 474 S.

SRU (2010): 100% erneuerbare Stromversorgung bis 2050: klimaverträglich, sicher, bezahlbar. Stellungnahme NR. 15, Vorläufige Fassung vom 5. Mai 2010. Sachverständigenrat für Umweltfragen. Mitglieder: Prof. Dr. Martin Faulstich (Vorsitzender), Prof. Dr. Heidi Foth (stellvertretende Vorsitzende), Prof. Dr. Christian Calliess, Prof. Dr. Olav Hohmeyer, Prof. Dr. Karin Holm-Müller, Prof. Dr. Manfred Niekisch, Prof. Dr. Miranda Schreurs. – 92 S.
URL: http://www.umweltrat.de/cae/servlet/contentblob/1001596/publicationFile/63816/ 2010_05_Stellung_15_ erneuerbareStromversorgung.pdf;jsessionid=806C0FB8878201681979307C4B5CCC3C

Taylor, Corinna (2000): Ökologische Bewertung von Ernährungsweisen anhand ausgewählter Indikatoren. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades am Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotrophologie und Umweltmanagement der Justus-Liebig-Universität Gießen
URL: http://bibd.uni-giessen.de/gdoc/2000/uni/d000074.pdf

Tepasse, Heinrich (2001a): Stadttechnik im Städtebau Berlins, 19. Jahrhundert. – Berlin: Gebr. Mann Verlag, 217 S.

Tepasse, Heinrich (2001b): Stadttechnik im Städtebau Berlins, 1945 - 1999. Mitarbeit Torsten Löber. – Berlin: Gebr. Mann Verlag, 184 S.

Tepasse, Heinrich (2007): Stadttechnik im Städtebau Berlins, 20. Jahrhundert. Kompendium Stadttechnikgeschichte: Wasser und Abwasser, Gas, Strom und Fernwärme – Berlin: Gebr. Mann Verlag, 240 S.

Thinh, Nguyen Xuan et. al. (2010): Ermittlung von Energiekennzahlen für Haushalte und Stadtstrukturtypen in Ho Chi Minh City. Autoren: Nguyen Xuan Thinh Katrin Scharte, Doreen Rahe. 5 S.
URL: http://www.corp.at/archive/CORP2010_227.pdf

Tischer, Martin et al. (2006): Auf dem Weg zur 100% Region. Handbuch für eine nachhaltige Energieversorgung von Regionen. Autoren: Martin Tischer, Michael Stöhr, Markus Lurz, Ludwig Karg, B.A.U.M. Consult GmbH – München, 219 S.

Treffny, Raphael (2003): Der „Ökologische Fußabdruck“ der Münchner - Eine Analyse der Lebensweise der Einwohner Münchens durch einen Indikator der Nachhaltigkeit. Freie wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades eines Diplom-Geographen der LMU München – 134 S.

Treberspurg, Martin (Hrsg.) (2007): solarCity Linz-Pichling: Nachhaltige Stadtentwicklung / Sustainable Urban Development. – Wien: Springer, 216 S.

Trepl, Ludwig (1987): Geschichte der Ökologie. Vom 17. Jahrhundert bis zur Gegenwart. Zehn Vorlesungen. – Frankfurt / Main: Athenäum, 280 S.

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (2010): Regionale Biomassepotentiale zur energetischen Nutzung im Freistaat Thüringen. Autoren: Dr. Armin Vetter, Christiana Warsitzka, Dr. Gerd Reinhold, Torsten Graf, Christian Weiser. 22 S. URL: http://www.biobeth.de/fileadmin/download/TLL/Bioenergiepotenziale_TH.pdf

Tuschinski, Melita (Hrsg.) (2011): Kurz-Info und Praxis-Dialog: Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz und Energieeinspar-Verordnung anwenden. Institut für Energie-Effiziente Architektur, Melita Tuschinski / www.EnEV-online.de
URL: http://service.enev-online.de/bestellen/tuschinski_2011_eewaermegesetz_2011_plus_enev.pdf

UBA (Hrsg.) (2007a): Nachhaltige Wärmeversorgung. Sachstandsbericht. Climate Change Nr. 03/2007. Autoren: Jan Strohschein; Christoph Erdmenger; Reinhard Albert; Michael Bade; Anja Behnke; Simone Böhme; Andreas Hannig; Wulf Hülsmann; Bernt Jahnke; Helmut Kaschenz; Christiane Lohse; Anne Miehe; Peter Pichl; Stephan

Saupe; Anja Schubert; Ulrike Wachsmann; Kathrin Werner, Bärbel Westermann. 61 S.
URL: http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3196.pdf

UBA (Hrsg.) (2007b): Potenziale von Nah- und Fernwärmenetzen für den Klimaschutz bis zum Jahr 2020. Climate Change Nr. 17/2007. Autoren: Manfred Fischedick, Dietmar Schüwer, Johannes Venjakob, Frank Merten, Dirk Mitze, Michael Nast, Christoph Schillings, Wolfram Krewitt, Werner Bohnenschäfer, Klaus Lindner. 232 S.
URL: http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3501.pdf

UBA (Hrsg.) (2007c): Ermittlung der Potenziale für die Anwendung der Kraft-Wärme-Kopplung und der erzielbaren Minderung der CO2-Emissionen einschließlich Bewertung der Kosten (Verstärkte Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung). Climate Change Nr. 10/2007. Autoren: Manfred Horn; Hans-Joachim Ziesing; Felix Christian Matthes; Ralph Harthan; Gerald Menzler. 318 S.
URL: http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3291.pdf

UNCED (1992): AGENDA 21. Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung.
Rio de Janeiro, Juni 1992 361 S.
URL: http://www.un.org/Depts/german/conf/agenda21/agenda_21.pdf

VDI (1997): VDI 4600: Kumulierter Energieaufwand - Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure, Juni 1997. – Berlin: Beuth Verlag GmbH, 19 S.

VE Wohnbaukombinat Berlin (1973): Wohnbauserien QP 71, 10 Geschosse in Großtafelbauweise, 5 Mp. WV-Projekt Ausführung 1972. Projektdatenblatt. – Berlin, 12 S.

Vester, Frederic (1976): Ballungsgebiete in der Krise: Eine Anleitung zum Verstehen und Planen menschlicher Lebensräume mit Hilfe der Biokybernetik. Studie im Auftrag des Bundesministerium des Innern. – Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 91 S.

Voss, Karsten (Hrsg.) (1997): Konzeption und Bau eines energieautarken Solarhauses: Schlußbericht zum Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, BMBF 0338973A / Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, ISE. Karsten Voss (Hrsg.). – Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 93, 60, 26 S.

Voss, Karsten et al. (2006): Bürogebäude mit Zukunft. Konzepte, Analysen, Erfahrungen. Autoren: Karsten Voss, Günter Löhnert, Sebastian Herkel, Andreas Wagner, Mathias Wambsganß. 2. überarbeitete Auflage. – Berlin: Solarpraxis, 282 S.

Voss, Karsten et al. (2010): Vom Niedrigenergie- zum Nullenergiehaus: Standortbestimmung und Entwicklungsperspektiven. Autoren: Karsten Voss, Eike Musall, Markus Lichtmeß. In: Bauphysik 32 (2010), Heft 6, 424-434
URL: http://onlinelibrary.wiley.com/store/10.1002/bapi.201010049/asset/424_ftp.pdf?v=1&t=gs8y64j5&s=d2666d457c551b3b5ef2d73c264ebf1710845821

Voss, Karsten / Musall, Eike (2011): Nullenergiegebäude. Internationale Projekte zum klimaneutralen Wohnen und Arbeiten. – München: DETAIL, 190 S.

Wächter, Monika (2003): Die Stadt: umweltbelastendes System oder wertvoller Lebensraum?
Zur Geschichte, Theorie und Praxis stadtökologischer Forschung in Deutschland. Genehmigte Dissertation Fakultät VII Architektur, Umwelt, Gesellschaft der TU Berlin, UFZ-Doktorarbeit, UFZ- Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH 2003, 195 S.
URL: www.ufz.de/data/ufzbericht9-03550.pdf

Wackernagel, Mathis / Rees, William (1997): Unser ökologischer Fußabdruck. Wie der Mensch Einfluß auf die Umwelt nimmt. – Basel: Birkhäuser, 194 S.

Waldrop, Mitchell M. (1993): Inseln im Chaos. Die Erforschung komplexer Systeme. Die Originalausgabe erschien 1992 unter dem Titel: Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos, im Verlag Simon & Schuster, New York. – Reinbek bei Hamburg: Rowohlt, 480 S.

WBGU (2008): Welt im Wandel – Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung.
Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), Berlin, 388 S.
URL: http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008.html

Weiss, Wolfgang (2004): Tragfähigkeit – ein Begriff der Regional-Demographie mit politischen Implikationen, In: UTOPIE kreativ, H. 165/166 (Juli/August 2004), S. 602-616
URL: www.rosaluxemburgstiftung.de/cms/fileadmin/rls_uploads/pdfs/165_166-weiss.pdf

Weiß, Julika / Dunkelberg, Elisa (2009): Erschließbare Energieeinsparpotenziale im Ein- und Zweifamilienhausbestand. Eine Untersuchung des energetischen Ist-Zustands der Gebäude, aktueller Sanierungsraten, theoretischer Einsparpotenziale sowie deren Erschließbarkeit. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) – 113 S. URL: http://www.enef- haus.de/fileadmin/ENEFH/redaktion/PDF/Weiss_Dunkelberg_2010_Potenzialanalyse.pdf

Weizsäcker, Ernst Ullrich von (1992): Erdpolitik. Ökologische Realpolitik an der Schwelle zum Jahrhundert der Umwelt. 3., aktualisierte Auflage, nach dem Erdgipfel von Rio de Janiero, 1. Aufl. 1989 – Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 298 S.

Weizsäcker, Ernst Ulrich von / Lovins, Amory und Hunter (1995): Faktor Vier. Doppelter Wohlstand, halbierter Naturverbrauch. – München: Droemer Knaur, 352 S.

Werheit, Martina (2002): Monitoring einer nachhaltigen Stadtentwicklung. Ein Indikatorengestütztes Ziel- und Monitoringsystem für Stadtstrukturtypen. Dortmunder Beiträge zur Raumplanung Nr. 113, Herausgegeben vom Institut für Raumplanung Fakultät Raumplanung der Universität Dortmund. – Dortmund: Blaue Reihe, 211 S.

Wickop, Evelyne et. al. (1998): Qualitätszielkonzept für Stadtstrukturtypen am Beispiel der Stadt Leipzig: Entwicklung einer Methodik zur Operationalisierung einer nachhaltigen Stadtentwicklung auf der Ebene von Stadtstrukturen. Autoren: E. Wickop, P. Böhm, K. Eitner, J. Breuste. In: UFZ-Bericht 14/98 – Leipzig, 156 S.

Wittmer, Dominic (2006): Kupfer im regionalen Ressourcenhaushalt. Ein methodischer Beitrag zur Exploration urbaner Lagerstätten. Abhandlung zur Erlangung des Titels Doktor der technischen Wissenschaften der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Diss. ETH Nr. 16325, 201 S. URL: http://e-collection.ethbib.ethz.ch/ecol-pool/diss/fulltext/eth16325.pdf Anhang: http://e-collection.ethbib.ethz.ch/ecol-pool/diss/fulltext/ETH16325_anhang.pdf

Wuppertal Institut (2008): Nutzungskonkurrenzen bei Biomasse. Auswirkungen der verstärkten Nutzung von Biomasse im Energiebereich auf die stoffliche Nutzung in der Biomasse verarbeitenden Industrie und deren Wettbewerbsfähigkeit durch staatlich induzierte Förderprogramme. Endbericht der Studie des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt, Energie GmbH (WI) und Rheinisch-Westfälischen Institut für Wirtschaftsforschung (RWI Essen) für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Projektleitung: Stefan Bringezu, Mitarbeiter/-innen: Dr. Helmut Schütz, Karin Arnold, Katrin Bienge, Sylvia Borbonus, Justus von Geibler, Dr.-Ing. Stephan Ramesohl, Michael Ritthoff, Langfassung 253 S. URL: http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wiprojekt/nutzungskonkurrenzen-bei-biomasse.pdf

Wuppertal Institut (2010): Erdgas: Die Brücke ins regenerative Zeitalter. Bewertung des Energieträgers Erdgas und seiner Importabhängigkeit. Hintergrundbericht im Auftrag der Greenpeace Deutschland e.V. Bearbeitung: Dietmar Schüwer (Projektleitung), Karin Arnold, Carmen Dienst, Prof. Dr.-Ing. Manfred Fischedick, Dr. Stefan Lechtenböhmer, Frank Merten, Dr. Nikolaus Supersberger, Christoph Zeiss. Forschungsgruppe 1 Zukünftige Energie- und Mobilitätsstrukturen. Wuppertal, 58 S. URL: http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wiprojekt/Erdgas_GP_Endbericht.pdf

Woithe, Franka (2003): Untersuchungen zur postglazialen Landschaftsentwicklung in der Niederlausitz. Dissertation an der Christian-Albrechts-Universität, Kiel. 159 S. URL: http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=972287671&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=972287671.pdf

Woitowitz, Axel (2007): Auswirkungen einer Einschränkung des Verzehrs von Lebensmitteln tierischer Herkunft auf ausgewählte Nachhaltigkeitsindikatoren – dargestellt am Beispiel konventioneller und ökologischer Wirtschaftsweise. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades am Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues der Technischen Universität München. 251 S. URL: http://www.ernaehrungsdenkwerkstatt.de/fileadmin/user_upload/EDWText/TextElemente/Ernaehrungsoekologie/Klimaschutz_Ernaehrung_Fleisch_Dissertation_TUM_2007.pdf

Wolman, Abel (1965): The Metabolism of Cities, Scientific American, Sept. 1965: 178-193

Wolman, Gordon M. (2003): Abel Wolman 1892-1989. A Biographical Memoir. Biographical Memoirs, Volume 83 – Washington, D.C.: The National Academies Press: 344-361. URL: http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=10830

LEBENSLAUF

Michael Prytula, Dipl.-Ing. Architekt
geboren 1966 in Berlin
Email: Michael.Prytula@TU-Berlin.de
Homepage: http//www.urbaner-metabolismus.de

seit Sep. 2009	Vertretungsstelle als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Gebäudetechnik und Entwerfen, Prof. Claus Steffan Technische Universität Berlin
April 2006 - Feb. 2009	Vertretungsprofessur am Fachgebiet Technische Gebäudeausrüstung Universität Kassel
Jan. 2000 - Jan. 2006	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Gebäudetechnik und Entwerfen, Prof. Claus Steffan Technische Universität Berlin
1999 / 2000	Lehrbeauftragter am Institut für Gebäudelehre, Wohnbau und Entwerfen Prof. Stefano de Martino Technischen Universität Innsbruck
seit Sep. 1998	Selbständige Tätigkeiten als Architekt in Berlin
Juni 1997 - Aug. 1998	Anstellung bei Battle McCarthy, Consulting Engineers, London
April 1997	Eintragung in die Architektenliste der Berliner Architektenkammer
Feb. 1994 - Juli 1996	Freie Mitarbeit und Anstellung im Architekturbüro Prof. Peter und Jakob Lehrecke
Dez. 1993	Diplomarbeit: Solarzentrum Cottbus – Planung eines energieeffizienten Forschungsgebäudes auf dem Campus der TU Cottbus Prof. Rainer Hascher Technische Universität Berlin
Mai 1989 - Nov.1992	Studentische Mitarbeit im Architekturbüro Scheder & Zimmer
Okt. 1985	Beginn des Architekturstudiums an der Technischen Universität Berlin
Dez. 1984	Abitur in Berlin