
Beitrag zur simulationsgestützten Planung von Demontagefabriken für Elektro- und Elektronikaltgeräte

von Diplom-Ingenieur
Markus Ciupek
aus Berlin

von der Fakultät V, Verkehrs- und Maschinensysteme,
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. J. Krüger
Berichter: Prof. Dr.-Ing. G. Seliger
Berichter: Prof. Dr.-Ing. T. Koch

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 27. September 2004

Berlin 2004
D 83

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der Technischen Universität Berlin.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Günther Seliger, dem Leiter des Fachgebietes Montagetechnik und Fabrikbetrieb, danke ich für die Förderung meiner wissenschaftlichen Arbeit sowie den Freiraum der mir hierfür gewährt wurde und für das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Tomasz Koch Leiter des Fachgebietes Robotik und Montagetechnik sowie des Fachgebietes Produktion und Qualität am Institut für Produktionstechnik und Automatisierung der Technischen Universität Wroclaw, danke ich für die Übernahme des Korreferats und die kritische Durchsicht meiner Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger, Leiter des Fachgebietes Industrieller Automatisierungstechnik am IWF sowie Direktor des Bereichs Sicherheits- und Prüftechnik am Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK), danke ich für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss

Allen Kollegen des Fachgebietes Montagetechnik und Fabrikbetrieb danke ich für Ihre vielfältige Unterstützung und stetige Hilfsbereitschaft. Ganz besonderen Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Carsten Franke, Dr.-Ing. Basdere Bahadir, Herrn Dr.-Ing. Thomas Keil und Herrn Dr.-Ing. Sven Schumann für die jahrelange sehr angenehme Zusammenarbeit mit sehr wertvollen fachlichen Diskussionen. Für die organisatorische Unterstützung danke ich ganz herzlich Frau Sabine Lange.

Ferner gilt mein Dank allen Studenten, die durch Ihre Unterstützung die Arbeit in dieser Form ermöglicht haben. Im Besonderen möchte ich dabei den außergewöhnlichen Einsatz von Dipl.-Ing. Martin Gunawan und Dipl.-Ing. Sebastian Kernbaum hervorheben.

In privater Hinsicht gilt mein herzlichster Danke meiner Frau Sabine, die mir den notwendigen Freiraum einräumte, der zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Großostheim, im November 2004

Markus Ciupek

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit.....	3
2	Demontagefabriken in Kreislaufwirtschaftssystemen	5
2.1	Begriffe und Definitionen.....	5
2.2	Akteure und Aufgaben	7
2.3	Rechtliche Rahmenbedingungen	10
2.4	Geschäftsfeldpotential – Demontage	13
3	Planung von Demontagefabriken	16
3.1	Gestaltungsfelder in der Fabrikplanung	16
3.2	Demontagefabrik	17
3.2.1	Funktionale Beschreibung	18
3.2.2	Strukturelle Beschreibung	19
3.2.3	Hierarchische Beschreibung.....	19
3.3	Planungswerkzeug - Simulation.....	21
3.3.1	Simulationstechnologien.....	22
3.3.2	Ablaufsimulation	22
3.3.2.1	Anwendungsfelder.....	23
3.3.2.2	Anwendungspotenzial	24
3.3.3	Kostensimulation	26
3.3.3.1	Grundlagen	27
3.3.3.2	Kostenmodell	27
3.3.3.3	Kosten – Ermittlung und Verrechnung.....	28
3.3.3.4	Anwendungsfelder.....	30
3.4	Stand der Forschung	31
3.4.1	Klassifikationskriterien	32
3.4.1.1	Planung Makro-Ebene.....	32
3.4.1.2	Planung Mikro-Ebene.....	32
3.4.1.3	Planungshorizont	34
3.4.1.4	Demontageziel	34

3.4.1.5	Planungsmethoden	34
3.4.1.6	Planungswerkzeug	34
3.4.1.7	Datenquellen	34
3.4.2	Überbetriebliche Planung – Makro-Ebene	35
3.4.3	Innerbetriebliche Planung – Mikro-Ebene	41
3.4.4	Integrierte Planung – Makro- und Mikro-Ebene	48
3.4.5	Simulationsgestützte Planung	50
3.5	Handlungsbedarf	54
4	Integrierte Demontagefabrikplanung	58
4.1	Planungsablauf	58
4.2	Planungsmerkmale	60
4.2.1	Demontageobjekte	61
4.2.2	Angebots- und Absatzmärkte	63
4.2.3	Fabrik – Standort und Typ	64
4.2.4	Organisation und Verrichtung	65
4.2.5	Materialfluss	70
4.3	Konzept des Planungsansatzes	71
4.4	Referenzmodell	75
4.5	Datenstruktur zur Modellierung und Simulation	77
4.6	Standortplanung	79
4.6.1	Gruppenbildung	81
4.6.1.1	Demontageplanung	83
4.6.1.2	Produkt- und prozessorientierte Merkmalsbasis	86
4.6.1.3	Transformation der Merkmalsbasis	87
4.6.1.4	Vorgehensmodell	88
4.6.2	Standortwahl – Mathematisches Modell	90
4.6.3	Demontagebetriebsmittel – Mathematisches Modell	95
4.6.4	Simulationsgestützte Analyse	97
4.7	Grobplanung	100
4.7.1	Dimensionierung	100
4.7.1.1	Mathematisches Modell	100
4.7.1.2	Simulationsgestützte Analyse	104

4.7.2	Strukturierung.....	106
4.7.2.1	Referenzlayouts	106
4.7.2.2	Simulationsgestützte Analyse.....	110
4.8	Feinplanung	112
4.8.1	Layoutplanung.....	112
4.8.2	Simulationsgestützte Planung	116
4.8.3	Simulationsgestützte Kostenanalyse	116
4.8.3.1	Integration Activity-Based-Costing und Ablaufsimulation.....	117
4.8.3.2	Kosten, Ressourcen und Aktivitäten.....	118
4.8.3.3	Bezugsgrößen der Leistungsverrechnung.....	120
5	Softwaretechnische Implementierung.....	122
5.1	Architektur des Planungswerkzeuges	122
5.2	Benutzungsschnittstellen-Module	125
5.2.1	Standortplanung	125
5.2.2	Grobplanung.....	129
5.2.2.1	Dimensionierung	129
5.2.2.2	Strukturierung.....	131
5.2.3	Feinplanung	133
6	Anwendungsszenario	135
6.1	Randbedingungen	135
6.2	Voruntersuchungen	137
6.3	Planungsdurchführung.....	138
6.3.1	Standortplanung	138
6.3.2	Grobplanung.....	140
6.3.3	Feinplanung	142
7	Zusammenfassung und Ausblick	148
7.1	Zusammenfassung	148
7.2	Ausblick	149
8	Literatur	151

Kurzzeichen

a	Jahr
ABC	Activity-based-Costing
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BMK	Betriebsmittelklasse
BSM	Benutzungsschnittstellen-Module
CADIS	Computer Aided Disassembly Sequence Design
DB	Deckungsbeitrages
DBMS	Datenbankmanagementsystem
DDLE	Disassembly Data Layout Exchange
DE	Demontageerzeugnis
DIS	Demontageinformationssystem
DO	Demontageobjekt
EEE	Directive on the impact on the Environment of Electrical & Electronic Equipment
GAMS	General Algebraic Modeling System
GSC	Green Supply Chains
h	Stunden
ILP	ganzzahliges lineares Optimierungsproblem
InSane	I ntegrated S imulation-based D isassembly P lant D esign
IPP	Integrierten Produktpolitik
kg	Kilogramm
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
LP	lineares Optimierungsmodell
MAS	Multi-Agenten-System
MF	Materialfraktion
MILP	gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell
ODBC	Open DataBase Connectivity
QZOP	quadratisches Zuordnungsproblem
RDO	Referenzdemontageobjekt
RoHS	Directive on the Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical & electronic equipment
s	Sekunden
SDX	Simulation Data Exchange
Stk	Stück
VB	Visual Basic
VR	Virtual Reality
WEEE	Directive on Waste Electrical & Electronic Equipment
WM	Waschmaschinen
XML	Extensible Markup Language
ZVEI	Zentralverband der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.

Indexmengen

A	Demontearbeitsplätze in einem Referenzlayout
B	Demontagebetriebsmittel
D	Demontagestationen
E	Demontageerzeugnisse
F	potenziellen Standorte von Demontagefabriken
K	Kunden von Demontageerzeugnissen
M	Materialfraktionen
O	Typen an Demontageobjekten
P	Demontageprozesse
Q	mögliche Demontagekapazitäten der Demontagefabriken
R	Standorte für das Materialrecycling
S	Sammelstellen vom Demontageobjekten

Entscheidungsvariablen

$V_{b,f}$	Anzahl der Demontagebetriebsmittel b mit der Kapazität Kap_b die der Demontagefabrik f zugewiesen werden [Stk.].
$X_{d,a}$	Binäre Variable zur Beschreibung, ob eine Demontagestation d dem Arbeitsplatz a des Referenzlayouts zugewiesen ist ($X_{d,a} = 1$) oder nicht ($X_{d,a} = 0$).
$X_{d,b}$	Binäre Variable zur Beschreibung, ob ein Demontagebetriebsmittel b der Demontagestation d zugewiesen ist ($X_{d,b} = 1$) oder nicht ($X_{d,b} = 0$).
$X_{s,f,o}$	Menge an Demontageobjekten o die von der Sammelstelle s der Demontagefabrik f zugewiesen werden [Stk./a].
Y_d	Binäre Variable zur Beschreibung, ob eine Demontagestation d eröffnet ist ($Y_d = 1$) oder nicht ($Y_d = 0$).
$Y_{d1,a1,d2,a2}$	Binäre Variable zur Beschreibung welcher Transportstrom zwischen den Demontearbeitsplätzen $a1$ und $a2$ des Referenzlayouts durch die Zuweisung von Demontagestation $d1$ zum Demontearbeitsplatz $a1$ und Demontagestation $d2$ zum Demontearbeitsplatz $a2$ entsteht.
Y_{fq}	Binäre Variable zur Festlegung mit welcher Demontagekapazität q die Demontagefabrik f errichtet werden soll.
$Z_{f,k,o,e}$	Menge der Demontageerzeugnisse e des Demontageobjektes o die von der Demontagefabrik f dem Kunden k zugewiesen werden [Stk.]
$Z_{f,r,o,e}$	Menge der Demontageerzeugnisse e des Demontageobjektes o , die für das Materialrecycling in der Demontagefabrik f demontiert werden und dem Materialrecycling-Standortes r zugewiesen werden [Einheiten].
$Z_{o,p,b,d}$	Binäre Variable zur Beschreibung ob das erforderliche Demontagebetriebsmittel b zur Durchführung des Demontageprozesses p für das Demontageobjekt o einer Demontagestation d zugewiesen ist ($Z_{o,p,b,d} = 1$) oder nicht ($Z_{o,p,b,d} = 0$).

Modellvariablen

$AM_{s,o}$	Jährliche Anfallmenge von Demontageobjekt o an Sammelstelle s [Stk./a].
BD	Anzahl an unterschiedlichen Demontagebetriebsmitteln b , die einer Demontagestation d gleichzeitig zugewiesen werden können.
$BM_{o,p}$	Erforderliches Demontagebetriebsmittel b für die Ausführung des Demontageprozesses p am Demontageobjekt o .
$D_{a1,a2}$	Distanz von Demontagearbeitsplatz $a1$ zu Demontagearbeitsplatz $a2$ des Referenzlayouts [mm].
$DE_{o,e}$	Binäre Variable die beschreibt ob ein Demontageobjekt o in das Demontageergebnis e demontiert werden kann ($DE_{o,e} = 1$: ja; $DE_{o,e} = 0$: nein).
E_m	Erlös für den Verkauf der Materialfraktion m [€/kg].
E_o	Erlös für die Annahme des Demontageobjektes o [€/Stk.]
$E_{o,e}$	Erlös für den Verkauf des Demontageergebnisses e von Demontageobjekt o [€/Stk.].
$F_{d1,d2}$	Stärke des Materialflusses von Demontagestation $d1$ zu Demontagestation $d2$
Fix_f	Jährliche Fixkosten für die Eröffnung der Demontagefabrik f [€ /a].
$Fix_{f,q}$	Jährliche Fixkosten für die Eröffnung einer Demontagefabrik f mit dem Kapazitätsniveau q [€ /a].
Fix_b	Jährliche Fixkosten für die Zuweisung eines Demontagebetriebsmittels b [€/ a]. (Diese stellen den jährlichen Abschreibungsbetrag dar.)
G	Eine sehr große natürliche Zahl.
Kap_f	Maximale Demontagekapazität der Demontagefabrik f [Stk./a].
Kap_b	Maximale Kapazität des Demontagebetriebsmittels b [h/a].
Kap_q	Maximale Demontagekapazität einer Demontagefabrik mit dem zugewiesenen Kapazitätsniveau q [Stk./a].
$Kap_{r,m}$	Maximale Kapazität des Materialrecycling-Standortes r für die Materialfraktion m [kg/a].
K_b	Kosten für die Zuweisung eines Demontagebetriebsmittels b zu einer Demontagestation d [€/Stk].
K_d	Kosten für das Öffnen einer Demontagestation d [€/Station].
$K_{f,k,o,e}$	Transportkosten für das Demontageergebnis e des Demontageobjektes o von Demontagefabrik f zum Kunden k [€/Stk.].
$K_{f,r,m}$	Transportkosten der Materialfraktion m von der Demontagefabrik f zum Materialrecycling-Standort r [€/kg].
$K_{s,f}$	Transportkosten je Demontageobjekt von der Sammelstelle s zur Demontagefabrik f [€/Stk.].

$MF_{f,r,m}$	Menge der Materialfraktion m die von der Demontagefabrik f dem Materialrecycling-Standortes r zugewiesen werden [kg]. Abgeleitete Größe von der Entscheidungsvariable $Z_{f,r,o,e}$.
$M_{o,e,m}$	Menge der Materialfraktion m , die aus dem Demontageergebnis e des Demontageobjektes o gewonnen werden kann [kg].
$N_{k,o,e}$	Jährliche Nachfrage des Kunden k des Demontageergebnisses e des Demontageobjekts o [Stk./a].
$T_{b,o}$	Aggregierte erforderliche Bearbeitungszeit des Demontagebetriebsmittels b für Durchführung aller Demontageoperationen am Demontageobjekt o [s].
$T_{b,o,e}$	Zusätzliche Bearbeitungszeit des Demontagebetriebsmittels b die erforderlich wird, wenn das Demontageergebnis e des Demontageobjektes o nicht erzeugt werden soll, sondern weiter für das Materialrecycling demontiert werden soll [s].
$T_{p,o}$	Erforderliche Bearbeitungszeit zur Durchführung von Demontageprozess p am Demontageobjekt o [s].
TZ	Taktzeit für jede Demontagestation [Stk./s].
W_{b_1,b_2}	Binäre Matrix zur Beschreibung, ob zwei unterschiedliche Demontagebetriebsmittel einer Demontagestationen aufgrund von technologischen oder anderen Restriktionen zugewiesen werden können; $W_{b_1,b_2} \in \{0=\text{konflikt}; 1=\text{kein konflikt}\}$.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Nachhaltige Entwicklung ist ein wichtiges Politikkonzept für das noch junge 21. Jahrhundert. Sie soll weltweit wirtschaftliche Erwartungen mit sozialen, kulturellen und ökologischen Anliegen in Einklang bringen [RAD-02]. Das Prinzip der Nachhaltigkeit als Leitvorstellung für wirtschaftliche Entwicklung ist erstmalig 1987 von der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung im Brundland-Bericht formuliert worden [WCE-87]. Nachhaltige Entwicklung wird hierbei als eine Entwicklung definiert, welche die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass zukünftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können.

Eine langfristige wirtschaftliche Entwicklung erfordert infolge begrenzter Ressourcen, beschränkter Aufnahmefähigkeit der Umwelt für Abfälle und Emissionen sowie wachsender Bedürfnisse einer zunehmenden Bevölkerung den Übergang von der Quellen-Senken-Wirtschaft hin zur Kreislaufwirtschaft [WEI-97]. Das Schließen von Material- und Stoffkreisläufen innerhalb von Kreislaufwirtschaftssystemen bildet hierbei einen wichtigen Bestandteil im Leitbild des nachhaltigen Wirtschaftens [HER-03a]. Kreislaufwirtschaftssysteme erfordern eine enge Kooperation unterschiedlicher Akteure, angefangen bei Zulieferern und Produzenten über den Distributor und Handel bis hin zum Letztutzer und den Akteuren der Nachnutzungsphase, wie Re-Distributor, Demonteur und Re-Monteur. Die Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen wird hierbei als zentrales Ziel angesehen [SEL-04a]. Da am Ende einer Nutzungsphase eines Produktes in der Regel dessen Komponenten nicht vollständig abgenutzt sind, lassen sich durch Anpassungsprozesse wie Warten, Instandsetzen, Aufarbeiten, Erweitern, Umrüsten oder Modernisieren Abnutzungen vermeiden, vermindern oder beseitigen [MÜL-01] und somit die Nutzenproduktivität von Ressourcen steigern.

Der Handlungsbedarf zum Umdenken wird auch an der Entwicklung des weltweiten Mengenaufkommens für Elektro- und Elektronikaltgeräte deutlich, welches im Jahre 2000 55 Mio. Tonnen betrug [SIE-00] (Bild 1). Aufgrund des zu erwartenden weltweiten Wachstums der Elektro- und Elektronikindustrien, charakterisiert durch Markterweiterungen und Marktdurchdringungen sowie technologische Innovationen und beschleunigte Austausch- und Erneuerungsprozesse, wird für das Jahr 2010 mit einem Mengenaufkommen von 95 Mio. Tonnen gerechnet [WBR-04]. Auf Basis der prognostizierten regionalen Wachstumsraten mit einer jährlichen Steigerungsrate des Mengenaufkommens für Elektro- und Elektronikaltgeräte von 3-5% für Europa und Nordamerika, von 5-7% für Lateinamerika und Ozeanien, 9-12% für Asien und 2-3% für Afrika ergeben sich für die einzelnen Regionen unterschiedliche Entwicklungen (Bild 1).

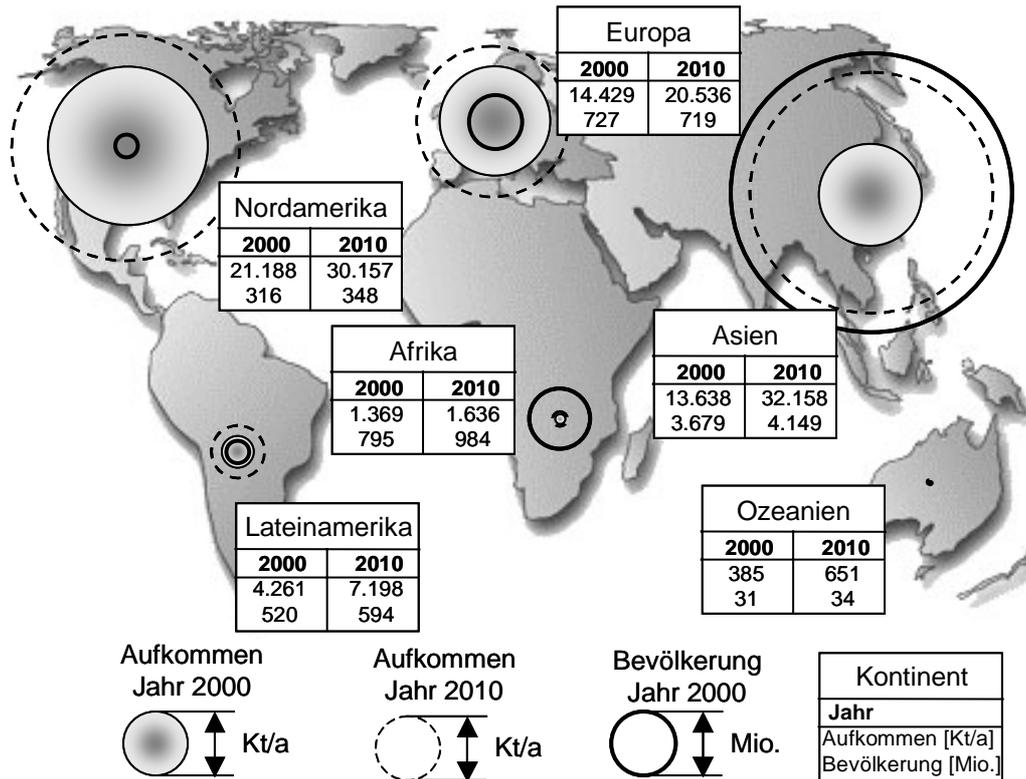


Bild 1: Entwicklung des Mengenaufkommens an Elektro- und Elektronikgeräten im Vergleich zur Anzahl der Bevölkerung nach [HER-03a], [PDD-04], [WBR-04]

Zum August 2004 wird die EU-Richtlinie WEEE (Waste of Electric and Electronical Equipment) in nationale Gesetze umgesetzt. Ab Mitte 2005 sollen die Hersteller die Kosten für die Rücknahme und das Recycling übernehmen und bestimmte Verwertungsquoten erreichen. Da die Richtlinie rückwirkend gilt, sind die Vorgaben auch für Geräte einzuhalten, die lange vor 2005 in den Markt gelangten. Angesichts der etwa 650 Millionen Groß- und rund 1.350 Millionen Kleinelektro- und Elektronikgeräten, die in Europa derzeit im Einsatz sind, ist mit einer jährlichen Rückgabe von etwa 210 Millionen Geräten zu rechnen [BSH-04]. Das Gesamtaufkommen von Elektro- und Elektronikgeräten wird in Deutschland zur Zeit auf ca. 1,8 –2,0 Mio. t/a geschätzt [BVSE-03]. Für die Rückführung und Entsorgung anfallender Elektro- und Elektronikgeräte rechnet der Zentralverband der Elektro- und Elektronikgeräte e.V. (ZVEI) in Deutschland mit jährlichen Kosten von ca. 500 Mio. € [ZVEI-02]. Die Pflicht zur unentgeltlichen Rücknahme lässt erwarten, dass die Entsorgungskosten in die Preise von Produkten einbezogen und somit Bestandteil des Wettbewerbs beim Produktverkauf werden. Somit wird die Senkung der Entsorgungskosten als auch die Gewährleistung einer umweltverträglichen Entsorgung zu einem strategischen Wettbewerbsfaktor der Industrie. Die EU-Richtlinie WEEE wird somit zu einer erhöhten Nachfrage nach kosteneffizienten Kreislaufwirtschaftssystemen führen. Dabei wird die Demontage als wesentlicher Bestandteil der Kreislaufwirtschaft nicht nur ausschließlich am Ende der Produktnutzung zum Zwecke des Recyclings verstanden, sondern als Dienstleistung während des gesamten Produktlebenszyklus [SEL-02a].

Ein wesentlicher Schritt zur wirtschaftlichen Entwicklung von Kreislaufwirtschaftssystemen ist die Planung und der Betrieb effizienter Demontagesysteme. Wirtschaftlich tragbare Konzepte für Demontagefabriken müssen sich u.a. an den kurz- und mittelfristig nur im geringen Maße demontagegerecht ausgelegten Produkten orientieren, die manuelle und automatisierte Demontageprozesse nicht oder nur im geringen Maß informationstechnisch unterstützen.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Gegenstand dieser Arbeit ist die Erarbeitung einer Methode sowie eines Planungswerkzeuges zur simulationsgestützten Planung von Fabriken für die Demontage als Voraussetzung für ein hochwertiges Recycling von Elektro- und Elektronikaltgeräten. Ziel der Methode ist es, sowohl die Standortplanung von Demontagefabriken unter Berücksichtigung der anderen Akteure des Kreislaufwirtschaftssystems als auch die Grob- und Feinplanung der verorteten Demontagefabriken integriert unter Zuhilfenahme der Ablaufsimulation durchführen zu können. Die Durchführung der Planungsmethode soll durch Implementierung in ein Softwarewerkzeug unterstützt werden. Das Planungswerkzeug soll ferner die offene Architektur des von KEIL [KEI-04] entwickelten Demontageinformationssystems berücksichtigen und somit die Integration ermöglichen.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel (Bild 2). In Kapitel 2 werden die begrifflichen Grundlagen und die rechtlichen Rahmenbedingungen dargestellt. Ferner werden die Aufgaben der Demontagefabrik innerhalb eines Kreislaufwirtschaftssystems sowie die aktuelle Situation der Demontage in Deutschland erläutert.

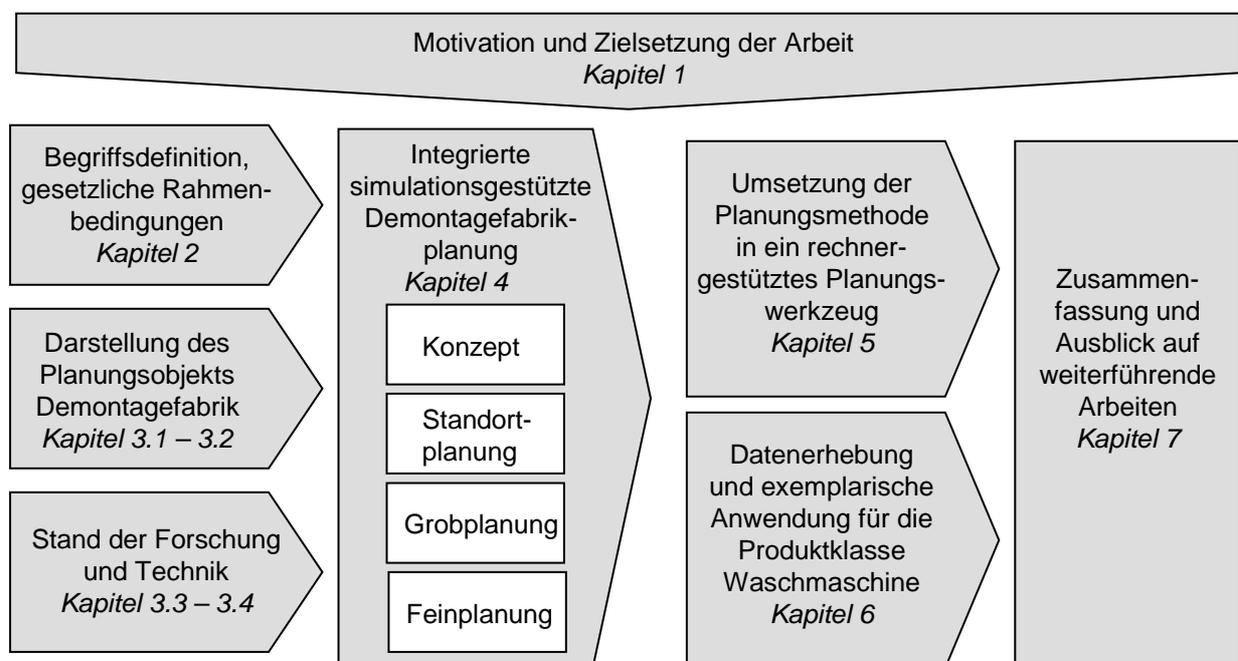


Bild 2: Gliederung und Aufbau der Arbeit

Anschließend werden in Kapitel 3 der Stand der Technik zum Einsatz der Simulationstechnik, um Planungsprozesse zu unterstützen, insbesondere unter Berücksichtigung

von Kosten zusammengefasst als auch aktuelle Forschungsansätze zur Planung von Demontagefabriken analysiert. Aufbauend auf den Erkenntnissen des Standes der Forschung und Technik wird der Handlungsbedarf sowie die Anforderungen für eine simulationsgestützte Methode zur Demontagefabrikplanung abgeleitet. Auf Basis der Anforderungen werden im vierten Kapitel ein Konzept für die Planung entwickelt sowie die einzelnen Bausteine und zugehörigen Module beschrieben. Im Kapitel 5 wird die Implementierung eines rechnergestützten Planungswerkzeuges dargestellt. Kapitel 6 beschreibt die Anwendung des Planungswerkzeuges für Planung von Demontagefabriken von Waschmaschinen für ein Kreislaufwirtschaftssystem Berlin-Brandenburg. Abschließend erfolgt im siebenten Kapitel eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Arbeit, die kritische Betrachtung des entwickelten Ansatzes sowie ein Ausblick auf zukünftige Handlungsfelder.

2 Demontagefabriken in Kreislaufwirtschaftssystemen

2.1 Begriffe und Definitionen

Unter einem *Kreislaufwirtschaftssystem* ist nach SCHULTMANN [SCU-03] eine kosten- und ökologisch effiziente Ausgestaltung der Gesamtheit aller Maßnahmen zu verstehen, die zur Vermeidung, Verminderung, Verwendung und Verwertung von Altprodukten und Reststoffen und der Beseitigung von Abfällen auf betrieblicher und /oder überbetrieblicher Ebene ergriffen werden. Die Ausgestaltung von Kreislaufwirtschaftssystemen umfasst die Auswahl von prozessintegrierten Maßnahmen, Aufarbeitungs- und Aufbereitungsverfahren und -standorten sowie Produktions- und Recyclingnetzwerken. Kreislaufwirtschaftssysteme sind somit Unternehmensnetzwerke, die mit dem Ziel gebildet werden, eine sowohl ökonomische als auch ökologische Realisierung der Kreislaufwirtschaft kooperativ zu erreichen [HAA-02]. In Bild 3 werden mögliche Akteure, ihre originäre Aufgabe sowie der Ressourcenstrom innerhalb eines Kreislaufwirtschaftssystems dargestellt.

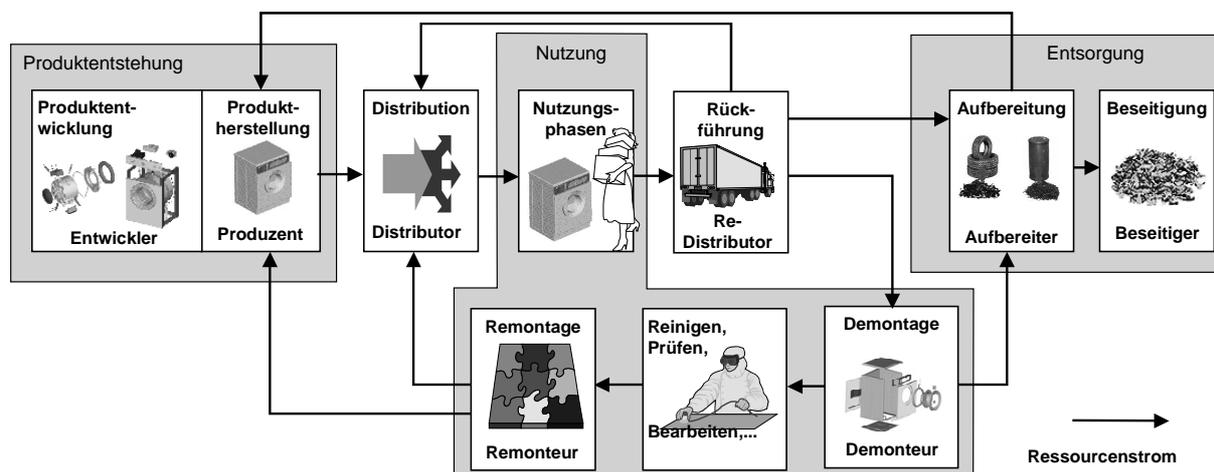


Bild 3: Ressourcenstrom eines Kreislaufwirtschaftssystems nach [MÜL-01]

Recycling wird nach der VDI-Richtlinie 2243 als erneute Verwendung oder Verwertung von Produkten oder ihrer Komponenten definiert. Die Verwertung erfolgt durch Prozesse des Materialrecyclings. Ressourcen werden hier stofflich oder rohstofflich zurückgewonnen. Eine erneute Verwendung wird durch Produktrecycling erreicht. Hier werden ganze Produkte oder Komponenten in Rahmen einer Instandsetzung oder Aufarbeitung zurückgewonnen, ohne ihre Gestalt aufzulösen [VDI-2243]. Abnutzungen, als Ursache für das Ende von Nutzungsphasen, können durch Anpassung vermieden, vermindert oder beseitigt werden [MÜL-01]. Als Anpassungsarten werden die Wartung, die Erweiterung, das Umrüsten und die Modernisierung unterschieden.

Das Anpassen hat gegenüber dem Materialrecycling den Vorteil, dass sich die Höhe der Wertschöpfungsstufe positiv auf die Entsorgungskosten bzw. –erlöse und auf die Recyclingquote auswirkt [BUL-00]. Durch Anpassen kann die Nutzenproduktivität von Ressourcen gegenüber dem Materialrecycling gesteigert werden [SEL-04a].

Demontage ist die Gesamtheit aller geplanten Vorgänge, die der Vereinzelung von Mehrkörpersystemen zu Baugruppen, Bauteilen und/oder formlosen Stoff durch Trennen dienen, sowie vor- und nachbereitende Handhabungs-, Mess- und Prüfvorgänge [HEN-96].

Es existiert keine eindeutige und allgemeingültige Definition des Begriffes „Fabrik“ (lat.: *fabrica* = Werkstätte) [KET-84]. Nach MELLEROWICZ ist ein Fabrikbetrieb ein industrieller nach dem Prinzip der Arbeitsteilung arbeitender gewerblicher Produktionsbetrieb, dessen Zweckbestimmung die Gewinnung, Veredelung oder Verarbeitung von Stoffen zur Erzeugung von Konsumgütern oder Produktionsmitteln ist [MEL-68]. In Anlehnung an GUTENBERG, HEIDEBROECK und SPUR dienen Fabrikbetriebe der Gütererzeugung im Bereich der sekundären Produktion mit der Verarbeitung von Rohstoffen zu Gütern [GUT-83], [HEI-23], [SPU-94]. In Anlehnung zur Definition des Begriffs Fabrikbetrieb werden Demontagefabriken in dieser Arbeit als Fabriken verstanden, die nach erwerbswirtschaftlichem Prinzip Altprodukte zu dem Zweck der Schadstoffentfrachtung, der Sekundärrohstoff- und Komponentengewinnung demontieren, um sie für die weitere Verwertung oder Verwendung zu veräußern. Die Demontagefabrik stellt dabei Systeme und Elemente bereit, die Demontageprozesse mit dem Ziel der Gewinnmaximierung durchführen [HUB-00]. Demontageprozesse werden in Analogie zur Prozessdefinition als die Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem Demontagesystem verstanden, die Materie, Energie und Information transformieren [DIN-1319].

Die *Entsorgungslogistik* wird definiert als die Planung, Steuerung, Durchführung und Kontrolle der Altgüter-, Wert- und Reststoffströme mit ihren dazugehörigen Informationen. Sie umfasst die Gestaltung aller relevanten inner- und außerbetrieblichen Prozesse mit dem Ziel einer ökonomisch und ökologisch effizienten Kreislaufwirtschaft [BAU-01], [WIL-97]. Die Entsorgungslogistik umfasst somit die Funktionsbereiche der Kreislaufwirtschaft wie Altprodukt- und Wertstoffströme sowie der Abfallwirtschaft, wie Wert- und Reststoffströme [HIE-02a]. Sie ist somit das Bindeglied zwischen den Entsorgungsmärkten und den klassischen Beschaffungsmärkten [PFO-96]. Der Funktionsbereich der Entsorgungslogistik wird in die externe und interne Logistik aufgeteilt [VDI-2343]. Die externe Logistik hat die Aufgabe der Gestaltung wirtschaftlicher überbetrieblicher Systeme für die Vernetzung von Sammelstellen, Lager-, Demontage-, Aufbereitungs-, Aufarbeitungs- oder Beseitigungsstandorten. Die externe Logistik wird als *Rückführlogistik* bezeichnet, wenn die logistische Funktion in der Gestaltung von Netzwerken für Altprodukt- und/oder Wertstoffströme mit dem Ziel der Verwertung und/oder Verwendung liegt. *Reststofflogistik* als Bestandteil der externen Logistik dient der Gestaltung von Wert- und/oder Reststoffströmen mit dem Ziel der Beseitigung.

Das US-amerikanische Council of Logistics Management (CLM) definiert Reverse Logistics als “the process of planning, implementing, and controlling the efficient, cost effective flow of raw materials, in-process inventory, finished goods and related information from the point of consumption to the point of origin for the purpose of recapturing value or proper disposal” [ROG-98]. Somit entspricht diese Definition im wesentlichen dem im deutschsprachigen Raum verwendeten Begriff der Entsorgungslogistik. Es wird jedoch in

den einschlägigen englischsprachigen Veröffentlichungen zum Thema Reverse Logistics keine begriffliche Differenzierung der Entsorgungslogistik in Rückführlogistik und Reststofflogistik vorgenommen. Befassen sich die Planungsaufgaben vorwiegend mit überbetrieblichen Aspekten wird auch von Closed-loop Supply Chains [FLE-01a], [GUI-03], Reverse Supply Chains [SCU-03] oder Green Supply Chains [SAR-03] gesprochen. Eine Einordnung der Rückführlogistik und Reststofflogistik in die Abfall- und Kreislaufwirtschaft wurde in Bild 4 vorgenommen.

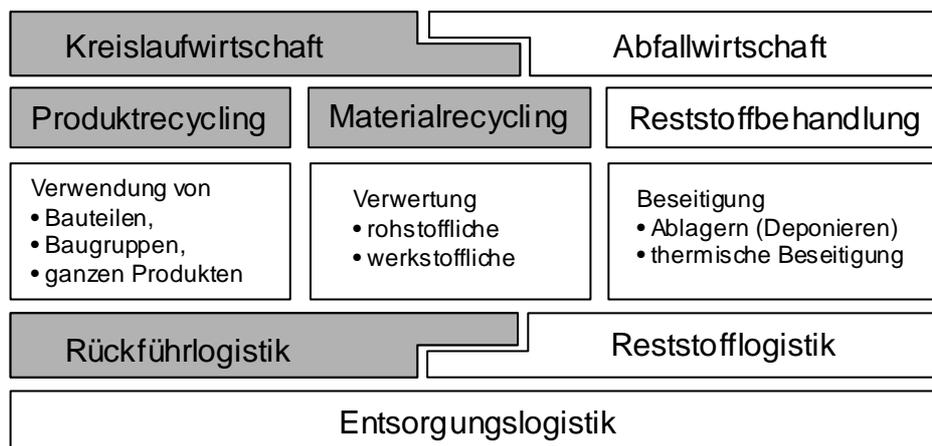


Bild 4: Einordnung der Rückführlogistik und Reststofflogistik

2.2 Akteure und Aufgaben

Kreislaufwirtschaftssysteme sind Unternehmensnetzwerke, die mit dem Ziel der Schonung natürlicher Ressourcen im Sinne des Sustainable Development durch das Schließen von Stoff-, Material-, und Produktkreisläufen gebildet werden. Dies beinhaltet sowohl die *Produktinnovation* (z.B. Berücksichtigung der Demontagefähigkeit sowie von umweltfreundlichen Materialien bei der Entwicklung eines Produktes), *Prozessinnovation* (z.B. Einsatz von aufgearbeiteten Bauteilen im Produktionsprozess [FLE-01b]), innovative Markterschließung (z.B. Schaffung von Märkten für aufgearbeitete Altprodukte [SEL-04b]), *Entwicklung von Rückführlogistiksystemen* unter ökonomischen, ökologischen und technischen Gesichtspunkten [HIE-02a] sowie Schaffung geeigneter Organisationsstrukturen, welche neben dem überbetrieblichen Materialfluss auch den korrespondierenden unternehmensübergreifenden Informations- und Entscheidungsfluss entsprechend einer Geschäftsprozessausrichtung berücksichtigen [HAA-02].

Innerhalb von Kreislaufwirtschaftssystemen sind die Aufgaben der Zulieferung, der Produktion, der Distribution, des Handels, der Redistribution, der Demontage, der Anpassung, der Aufbereitung und Beseitigung von entsprechenden Akteuren zu erfüllen. In Bild 5 werden die möglichen Akteure sowie deren mögliche Aufgaben innerhalb eines Kreislaufwirtschaftssystems dargestellt.

Aufgabe \	Logistikdienstleistung	Zulieferung	Produktion	Distribution	Handel	Gebrauch	Redistribution	Demontage	Anpassung	Aufbereitung	Beseitigung
Logistikdienstleister	■	■	■	■	■	□	■	■	■	■	■
Zulieferer	■	■	□	□	□	□	□	■	■	■	■
Produzent	□	■	■	■	■	□	■	■	■	■	■
Distributor	□	■	■	■	■	□	■	■	■	■	■
Händler	□	■	■	■	■	□	■	■	■	■	■
Kunde	□	□	□	□	□	■	■	□	□	□	□
Redistributor	□	■	■	■	□	□	■	■	■	■	■
Demonteur	□	■	□	□	□	□	□	■	■	■	■
Anpasser	□	■	■	□	■	□	■	■	■	■	■
Aufbereiter	□	■	□	□	□	□	■	■	■	■	■
Beseitiger	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	■

■	Originäre Aufgabe des Akteurs	■	Aufgabe kann zum Teil vom Akteur übernommen werden
■	Aufgabe kann vom Akteur übernommen werden	□	Aufgabe kann nicht vom Akteur übernommen werden

Bild 5: Akteure und deren Aufgaben in Kreislaufwirtschaftssystemen nach [HAA-02]

Es kann keine allgemeine Aussage darüber gemacht werden, welche und wie viele Akteure an diesem System beteiligt sind, denn es sind unterschiedliche Konfigurationsmöglichkeiten möglich. So können einzelne Akteure mehrere Aufgaben, wie z.B. die Distribution und Redistribution vollständig übernehmen und andere Akteure Aufgaben nur teilweise erfüllen, wie z.B. der Aufbereiter als Zulieferer für Sekundärrohstoffe dienen kann. Die Bindungsintensität der Akteure ist in der Regel durch gemeinsam verfolgte Ziele, Investitionen und vertragliche Regelungen als strategisch zu bezeichnen. Bezogen auf die räumliche Verteilung der Akteure ist sowohl lokale/regionale, nationale als auch internationale Verteilung denkbar. Für Elektronikaltgeräte ist eine vollständige lokale bzw. regionale Verteilung der Akteure eher nicht praktikabel [WAL-03], [HIE-02b]. Die Organisation von Kreislaufwirtschaftssystemen kann sowohl hierarchisch als auch gleichgeordnet gestaltet sein. Aufgrund der Verfolgung des Verursacherprinzips sind die Kreislaufwirtschaftssysteme in der Regel durch Hersteller getrieben um somit hierarchisch organisiert.

Die endgültige Ausprägung eines Kreislaufwirtschaftssystems wird sehr stark von den Produkten, die in den Kreislauf geführt werden sollen, beeinflusst. Durch die Produkte werden die wirtschaftlichen, technischen und rechtlichen Rahmenbedingungen des Kreislaufwirtschaftssystems gesetzt [BRÜ-03].

Im Sinne der Kreislaufwirtschaft dürfen Demontagebetriebe nicht das letzte Glied der Kette darstellen, sondern müssen vielmehr als Bindeglied zu den Akteuren der Wert-

schöpfungskette fungieren [ZUN-98]. Sie sind mit anderen Akteuren in überbetriebliche Organisationsformen eingebunden. In Abhängigkeit der Beziehungen zwischen den Akteuren kann die Demontage in die folgenden drei Arten eingeteilt werden [KUR-98]:

- *Herstellerdemontage*: Der Produkthersteller führt die Demontage seiner Altgeräte in seiner Demontagefabrik selbst durch.
- *Kooperative Demontage*: Ein oder mehrere Demontageunternehmen übernehmen im Auftrag eines oder mehrerer Produkthersteller die Demontage.
- *Anonyme Demontage*: Es bestehen zwischen Produkthersteller und dem für die Demontage verantwortlichen Unternehmen keine Beziehungen.

Eine große Herausforderung für die Planung und den Betrieb von Demontagefabriken und –systemen besteht in der prinzipiellen Unvorhersehbarkeit der genauen Demontageaufgaben aufgrund [SEL-03b], [SEL-99]:

- der unsicheren Altprodukthanfallmengen,
- der großen Variantenvielfalt,
- der unsicheren Altproduktzustände,
- der mangelnden Information über das Altprodukt und somit der enthaltenden Stoffe, Komponenten, Verbindungen,
- der mangelnden demontagegerechten Altproduktkonstruktion
- des fehlenden Erfahrungswissens und somit des möglichen Auftretens von unerwarteten Prozesskräften bei der Demontage und
- der ungewissen Demontageaufgabe aufgrund der sich verändernden rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen.

Deshalb müssen Demontagefabriken für einen wirtschaftlichen Betrieb ein Höchstmaß an Flexibilität gewährleisten. Flexibilität ist die Eigenschaft eines Produktionssystems, sich verändernden Anforderungen aus Produktprogramm und technologischem Prozess ohne Veränderungen von Elementmenge und Struktur anpassen zu können [SCM-95]. Es werden hierbei verschiedene Flexibilitätsarten unterschieden. Demontagesysteme müssen nach SELIGER [SEL-00a] folgende Flexibilitätsarten erfüllen:

- *Ablaufflexibilität*, d.h. die Eignung eines Systems, Demontageverrichtungen sowie deren Reihenfolge an unterschiedliche Produkt- und Ergebnisforderungen anpassen zu können,
- *Produktvariantenflexibilität*, d.h. die Eignung eines Systems, unterschiedliche Produkttypen und -varianten in beliebiger Reihenfolge demontieren zu können,
- *Produktzustandsflexibilität*, d.h. die Eignung eines Systems, Produkte unterschiedlicher Anlieferungszustände demontieren zu können,
- *Produktmengenflexibilität*, d.h. die Eignung eines Systems, unterschiedlich anfallende Produktmengen wirtschaftlich demontieren zu können, sowie
- *Umbauflexibilität*, d.h. die Eignung eines Systems, auf veränderte Eingangsgrößen durch eine räumlich veränderte Anordnung der Systemelemente reagieren zu können.

2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die in Deutschland wesentliche Rechtsgrundlage für das Elektronikschrottreycling stellt das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) dar [KRW-94]. Darin wird der Gedanke der Kreislaufwirtschaft mit dem Ziel der Schonung natürlicher Ressourcen sowie der Sicherung einer umweltverträglichen Abfallbeseitigung festgeschrieben. Im Rahmen dieses Gesetzes spielt die Produktverantwortung der Hersteller bei der Entwicklung, der Produktion und dem Vertrieb eine wesentliche Rolle. Darüber hinaus wird eine Hierarchie der Pflichten festgelegt, die für die Erzeuger und Besitzer des Abfalles gelten und die Abfallvermeidung vor deren Verwertung und Beseitigung setzt. Die Behandlung und Entsorgung von Elektronikschrott findet im KrW-/AbfG keine besonders ausgewiesene Berücksichtigung [SPE-02c]. Die Bundesregierung wird durch das Gesetz ermächtigt, entsprechende Anforderungen in Rechtsvorordnungen festzulegen. Zu diesen zählt der Entwurf einer Elektrogeräteverordnung, die zum Ziel hat, die Umweltwirkungen der elektrischen und elektronischen Geräte durch Vermeidung und Verminderung des Abfallaufkommens zu minimieren. Diese Verordnung wurde aufgrund fehlender Einigung mit der Industrie sowie in Erwartung der Richtlinien auf europäischer Ebene nicht verabschiedet.

Mit der Veröffentlichung der Richtlinien „zur Rücknahmeverordnung für Elektro- und Elektronikaltgeräte (WEEE-Directive) [EU-03a] sowie „zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikaltgeräten“ (RoHS-Directive) [EU-03b] im Amtsblatt der Europäischen Union am 13.02.2003 wurde festgeschrieben, dass alle EU-Mitgliedsstaaten eine nationale Umsetzung der Vorgaben bis August 2004 in die Wege geleitet haben müssen.

Das Ziel der RoHS-Directive ist es, eine Senkung des Schadstoffgehaltes in Elektro- und Elektronikaltgeräten zu erreichen. In Artikel 4 Absatz 4 dieser Richtlinie werden umfangreiche Vorgaben gemacht, die eine Beschränkung oder sogar den vollständigen Verzicht der Verwendung bestimmter Schwermetalle (Blei, Quecksilber, sechswertiges Chrom oder Cadmium) und bromhaltiger Stoffe (polybromierte Diphenylether – PBDE und Biphenyle –PBB) in Neuprodukten ab dem Jahr 2006 vorsieht [EU-03b].

Die WEEE verpflichtet alle Hersteller und Vertreiber von Elektroprodukten bis August 2005 Rücknahmesysteme zu etablieren, die alle Altgeräte von den Endverbrauchern kostenlos zurücknehmen und die fachgerechte Verwertung ermöglichen. Dabei fordert der Artikel 1 der Richtlinie: „... die Vermeidung von Abfällen von Elektro- und Elektronikgeräten und darüber hinaus die Wiederverwertung, das Recycling und andere Formen der Verwertung solcher Abfälle, um die zu beseitigende Abfallmenge zu reduzieren“ [EU-03a]. Zudem werden Zielvorgaben für die Kreislaufführung in Form von Recycling- und Verwertungsquoten gemacht. Die individuelle Herstellerverantwortung wurde hierbei als neues Paradigma der Rücknahme und Verwertung gebrauchter Elektrogeräte eingeführt und legt den marktwirtschaftlichen Gedanken zugrunde [KOR-03], da zu den jetzigen ökonomischen Rahmenbedingungen die Hersteller zur Entwicklung neuer Elektrogeräte unter Einbeziehung des Ressourcenschutzes nur durch den direkten wirtschaftlichen

Anreiz zu bewegen sind. Durch die finanzielle Verantwortung für die Rücknahme und Verwertung für die von den Herstellern in den Markt gebrachten Geräte und den im allgemeinen vorherrschenden harten Wettbewerb ist davon auszugehen, dass Hersteller durch ressourcenschonende Produktentwicklungen und Betreiberkonzepte sowie die Etablierung eines kosteneffizienten Rücknahme-Managements Wettbewerbsvorteile erschließen werden.

Für die vollständige Umsetzung der WEEE und RoHS hat der Europäische Gesetzgeber zeitliche Meilensteine festgelegt. Die festgelegten Verwertungs- und Recyclingquoten sollen bis Dezember 2006 erreicht sein (Bild 6).

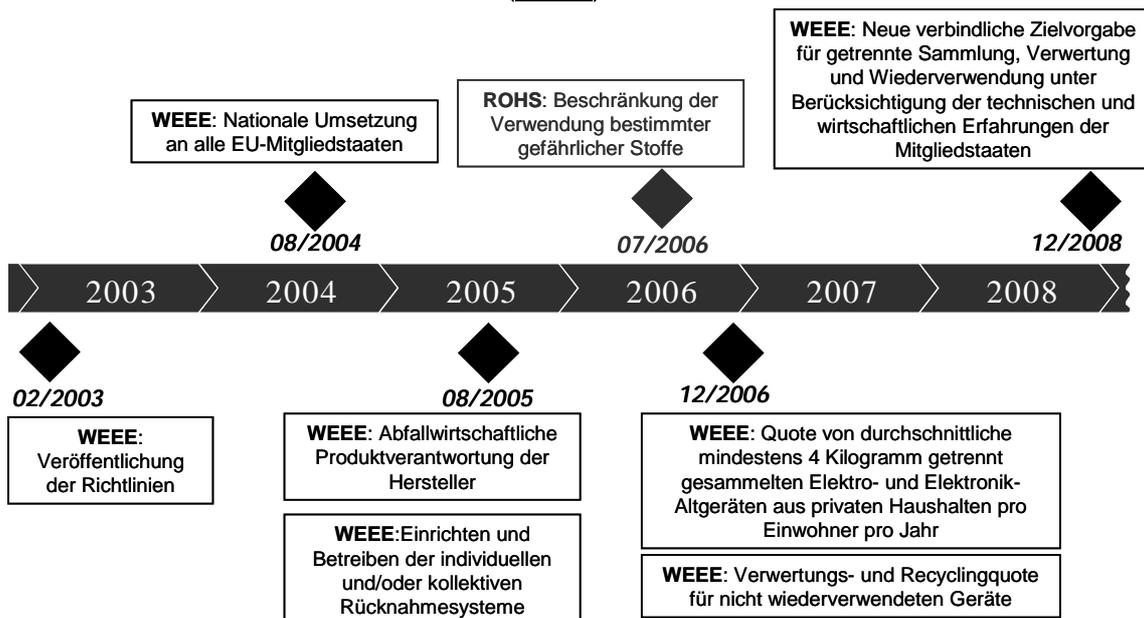


Bild 6: Meilensteine für die Umsetzung der WEEE und RoHS nach [OHL-03], [EU-03a]

Die wichtigsten Anforderungen die sich aus der WEEE-Directive an Kreislaufwirtschaftssysteme ergeben, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Flächendeckende für private Haushalte kostenfreie Rücknahme von Elektroaltgeräten.
- Geteilte Produkt- und Kostenverantwortung für Geräte aus privaten Haushalten.
- Getrennte Erfassung und Sammlung von 10 Produktkategorien von den anderen Abfallströmen (Tabelle 1).
- Festgelegte Verwertungsziele durch Verwertungs- und Recyclingquoten für die 10 Produktkategorien (Tabelle 1). Die Quoten beziehen sich auf das durchschnittliche Gewicht je Gerät.
- Erfassungsquote von 4 kg je Einwohner pro Jahr.
- Einheitliches Monitoringsystem.

Zusätzlich befindet sich der Entwurf für eine „Richtlinie über die Auswirkungen elektrischer und elektronischer Geräte“ (EEE-Directive) [EEE-01] von der Europäischen Kommission in Vorbereitung. Die EEE-Richtlinie kann als lebenszyklusorientierter Ansatz gesehen werden, in dem für jede Produktlebensphase die umweltrelevanten Aspekte wie Ressourcenverbrauch, Immissionen in der Luft, Wasser und Boden und Möglichkeiten

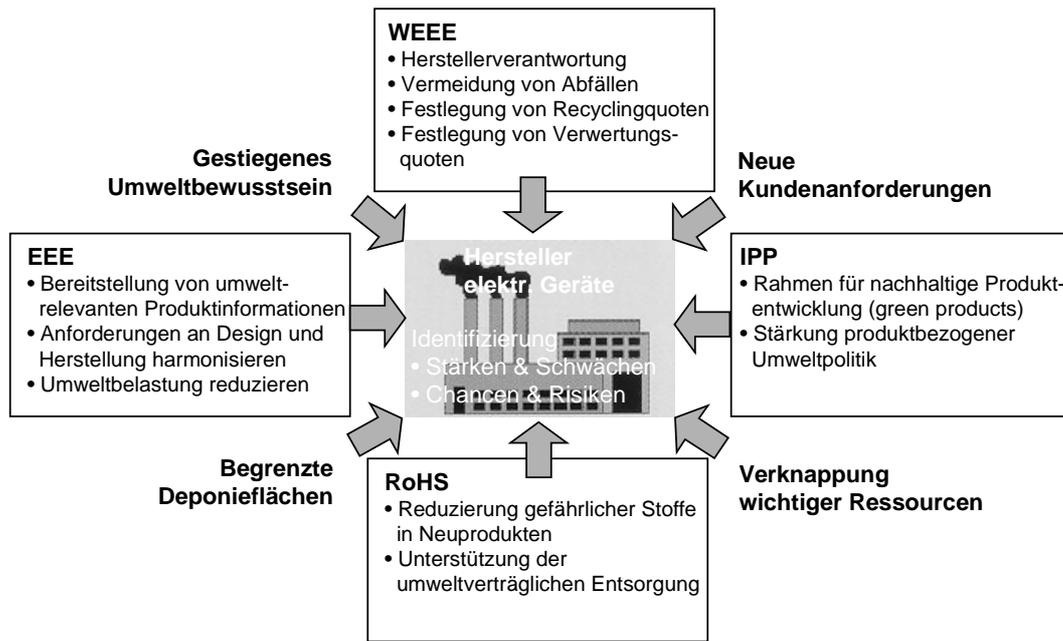
der Wiederverwendung, des Recyclings und der Verwertung von Materialien bewertet werden [HER-03a]. Die Richtlinie basiert auf dem sogenannten „New Approach“ zur Produktsicherheit. So sollen beispielsweise Hersteller von elektronischen Komponenten und Geräten verpflichtet werden, alle notwendigen Produktinformationen ihren Käufern bereitzustellen, damit diese den Einfluss auf die Umwelt beurteilen können.

Gerätekategorie	Verwertungsquote	Wiederverwendungs- u. Recyclingquote
Haushaltskleingeräte Automatische Ausgabegeräte	80%	75%
IT- & Telekommunikationsgeräte Unterhaltungselektronik	75%	65%
Haushaltsgroßgeräte Beleuchtungskörper Elektrische und Elektronische Werkzeuge Spielzeug sowie Sport- und Freizeitgeräte	70%	50%
Überwachungs- und Kontrollinstrumente Medizinische Geräte	-	80%

Tabelle 1: Recycling und Verwertungsquoten nach Produktkategorie

Ferner hat die Europäische Kommission im Jahre 2001 das Grünbuch zur Integrierten Produktpolitik – IPP (Green Paper on Integrated Product Policy) vorgestellt [GIP-01]. Das IPP stellt eine Strategie zur Verstärkung produktbezogener Umweltpolitik vor mit dem Ziel, die Entwicklung des Marktes für umweltgerechte Produkte zu fördern. In dem IPP-Papier werden relevante Aspekte wie die umweltorientierte Produktgestaltung, Kundenentscheidungen auf Basis relevanter Produktinformationen und die Berücksichtigung des Verursacherprinzips im Produktpreis identifiziert.

Zusammenfassend werden die rechtlichen mit den nicht rechtlichen Herausforderungen für die Hersteller von elektrischen und elektronischen Geräten in Bild 7 dargestellt.



- WEEE:** Directive on waste electrical & electronic equipment [EU03a]
EEE: Directive on the impact on the environment of electrical & electronic equipment [EEE-01]
RoHS: Directive on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical & electronic equipment [EU-03b]
IPP: Integrated Product Policy [GIP-01]

Bild 7: Herausforderungen für Hersteller von elektrischen und elektronischen Geräten nach [HES-02a]

2.4 Geschäftsfeldpotential – Demontage

Derzeit fallen schätzungsweise 8 Mio. t Elektroaltgeräte jährlich in Europa in privaten Haushalten an, wobei mit einer jährlichen Steigerung von 3-5 Prozent gerechnet wird [CHR-03]. Allein in Deutschland wird derzeit von einem Abfallaufkommen in Höhe von 1,1 Mio t/a. ausgegangen [BRÜ-03], was nach dem Zentralverband der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) geschätzten Entsorgungskosten von 350 – 500 Mio. € für eine umweltverträgliche Verwertung entspricht [ZVEI-02]. Die Verteilung der Entsorgungskosten auf die Produktkategorien nach der WEEE wird in **Bild 8** dargestellt. Der größte Teil dieser Entsorgungskosten wird ab dem August 2005 in der finanziellen Verantwortung aller Hersteller von Elektrogeräten liegen.

Verteilung der Entsorgungskosten (Basis 350 – 500 Mio. €)

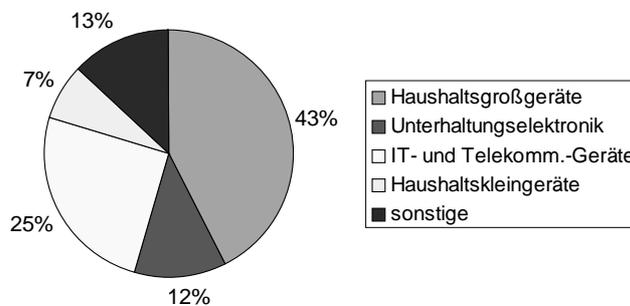


Bild 8: Verteilung der Entsorgungskosten auf die Produktkategorien [ZVEI-02]

In **Bild 9** ist die prognostizierte Verteilung des Abfallaufkommen in Deutschland für das Jahr 2005 nach den in der WEEE festgelegten Produktkategorien dargestellt. Es verdeutlicht, dass die Haushaltsgroßgeräte mit 72% den Löwenanteil des jährlichen

deutlich, dass die Haushaltsgroßgeräte mit 72% den Löwenanteil des jährlichen Abfallaufkommens sowie mit 210 Mio. € den größten Entsorgungskostenblock ausmachen. Den Haushaltsgroßgeräten kommt somit in den kreislaufwirtschaftlichen Betrachtungen eine besondere Rolle zu.

Die Gesamtzahl der deutschlandweit im Bereich der Demontage von Elektro(nik)altgeräten beschäftigten Arbeitskräfte wird derzeit auf 4.600 geschätzt, der Umsatz der beteiligten Unternehmen auf 235 Mio. € [HES-02a]. Unternehmen, die sich mit der Demontage von Elektro(nik)altgeräten beschäftigen, sind derzeit hauptsächlich kleine und mittlere Unternehmen, die weniger als 1000 t Elektroschrott pro Jahr verarbeiten [KLA-01]. Es sind aktuell starke Konzentrationstendenzen zu verzeichnen. So zeigt eine Umfrage von [HAL-01], dass nur zehn Unternehmen 69% der erfassten Altgerätemengen verarbeiten sowie 66% des Gesamtumsatzes erwirtschaften. Durch die nationale Umsetzung des WEEE wird sich der Konzentrationsdruck verschärfen. Es ist eine Zentralisierung der Auftragsvergabe zu beobachten, was zum Entstehen großer Demontagezentren führt, die in der Regel zusätzlich nachgelagerte Prozesse der Aufarbeitung und Aufbereitung durchführen [BVSE-02]. Neben diesen Kapazitätsunterschieden weisen Demontageunternehmen sehr unterschiedliche Organisationsformen auf – sozial geförderte Unternehmen zur Wiedereingliederung von Langzeitarbeitslosen existieren neben Behindertenwerkstätten, kommunalen sowie rein privatwirtschaftlichen Unternehmen [SPE-02b].

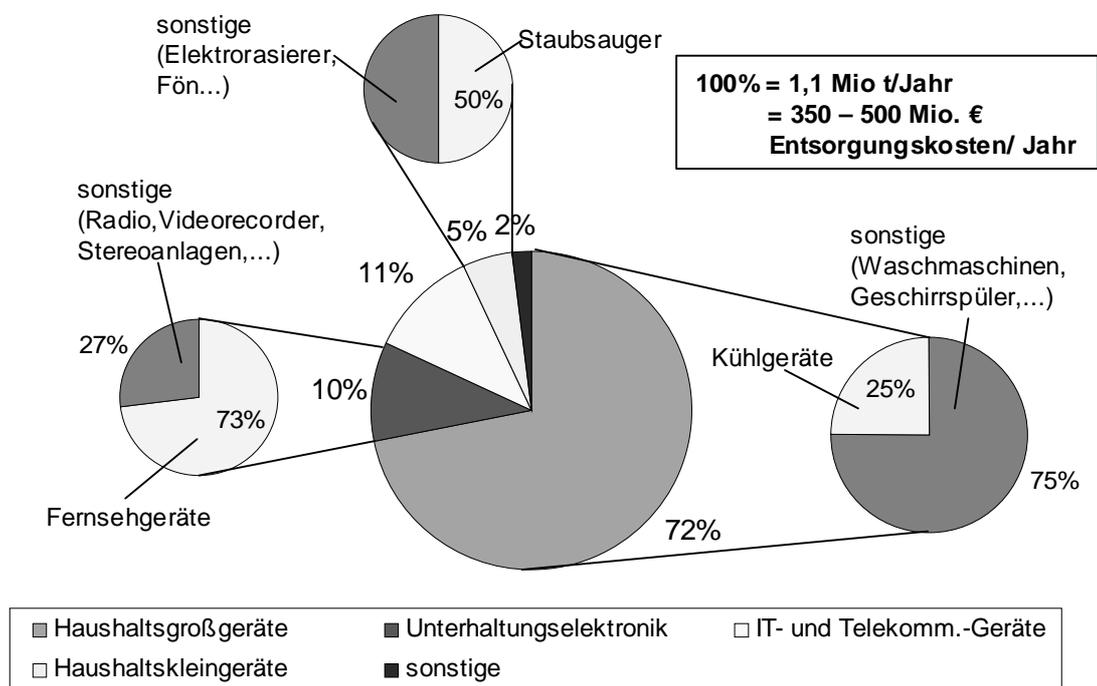


Bild 9: Verteilung des Abfallaufkommens nach Produktkategorien [FRE-03]

Die Demontage von Altgeräten erfolgt in diesen Demontagefabriken mit dem Ziel der Schadstoffentfrachtung sowie der Wertstoff- und Bauteilegewinnung. Aufgrund der Vielfalt der Altgerätetypen und –varianten sowie der Unsicherheiten hinsichtlich der Altgeräteaufkommen und ihrer Zustände dominiert die manuelle Demontage. Vor dem Hinter-

grund der zunehmenden Konzentration und des steigenden Wettbewerbsdrucks ist die Bildung von Netzwerken zwischen kleineren und mittleren auf die Demontage und die Aufarbeitung oder Aufbereitung spezialisierten Unternehmen zu verzeichnen [WAL-03]. Der Schwerpunkt der Recyclingnetzwerke liegt derzeit in der Erbringung von Entsorgungsdienstleistungen. Aspekte des Wiedereinsatzes von Komponenten und der dazu notwendigen Demontage und Aufarbeitung spielen eine untergeordnete Rolle. Dieses wird sich jedoch aufgrund der neuen rechtlichen Rahmenbedingungen, wie der WEEE und RoHS in Richtung der Demontage und Aufarbeitung verschieben müssen, damit die geforderten Recycling- und Verwendungsquoten bei Elektro- und Elektronikgeräten erfüllt werden können [HOR-03].

3 Planung von Demontagefabriken

3.1 Gestaltungsfelder in der Fabrikplanung

Historisch gesehen ist die Fabrikplanung aus dem Aufgabengebiet der Arbeitsvorbereitung entstanden. Die Notwendigkeit der systematischen Fabrikplanung ergab sich aus der Zielsetzung, die räumlichen, strukturellen und organisatorischen Aspekte auf eine Fabrik zu beziehen [WES-99a]. Für den Begriff Fabrikplanung werden in der Literatur unterschiedliche Begriffe wie Werksplanung, Werkstrukturplanung, Industrieplanung oder Betriebsstättenplanung synonym verwendet [AGG-90], [DOL-81], [KET-84], [KOE-01], [SCM-95]. Allgemein ist die Fabrikplanung ein vielseitiges und komplexes Planungsgebiet, welches sämtliche Planungs-, Gestaltungs-, Auslegungs-, und Realisierungsaufgaben von Produktionsstätten bis hin zu deren Anlauf umfasst. Die wichtigste Aufgabe besteht darin, die Fabrik auf die Erstellung einer von den Kunden erwarteten Marktleistung in Form von Produkten oder produktintegrierten Dienstleistungen auszurichten. Hierbei sind die Gestaltungsfelder der Fabrik zu berücksichtigen (**Bild 10**). Den Kern der Fabrikplanung bildet somit die Planung der Technik, der Ablauf- und Aufbauorganisation unter Berücksichtigung der Belange der Mitarbeiter. Die Technik beinhaltet hierbei die gesamte Produktionstechnik mit der dazugehörigen Logistik- und Informationstechnik. Arbeitsorganisatorische Aspekte, wie Entgeltsystem und Arbeitszeitmodell stellen das Gestaltungsfeld für die Mitarbeiter dar. Daneben spielen die Unternehmenskultur und die an Bedeutung wachsende Nachhaltigkeit von Technologien, Prozessen und Produkten eine Rolle [WIR-99]. Die Gestaltungsfelder sollten nicht isoliert betrachtet werden. Sie sind an den Prozessen, die sich auf Material-, Informations-, Kommunikations-, Personal-, Arbeits-, Energie-, Medien- und Kapitalfluss beziehen, auszurichten [FIE-04], [WIE-96].

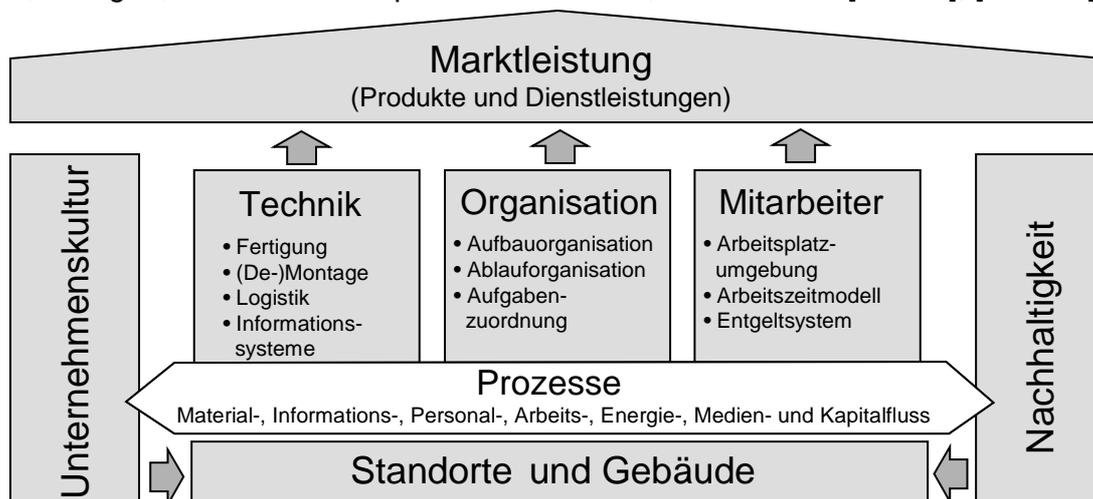


Bild 10: Gestaltungsfelder der Fabrik [WIE-96]

Organisatorisch ist die Fabrikplanung ein Teilgebiet der Unternehmensplanung. Sie ist somit stets unter den Rahmenbedingungen und Zielvorgaben der gesamten Unternehmensplanung vorzunehmen [WES-99b]. Durch dynamische Veränderungen in den Bereichen des Marktes, der Gesellschaft sowie der Technologieentwicklung ergeben sich

Anlässe für Fabrikplanungen, wobei die allgemeinen Ziele der Wirtschaftlichkeit, der Wandlungsfähigkeit und der Wettbewerbsfähigkeit verfolgt werden müssen.

3.2 Demontagefabrik

Ziel dieses Kapitel ist mit Hilfe der Systemtheorie die allgemeinen Eigenschaften des Planungsobjektes Fabrik zu beschreiben, sowie einen Überblick über die generellen Gestaltungsfelder einer Fabrik zu geben. Die Demontagefabrik wird als eine spezielle Ausprägungsform einer Fabrik definiert wird, die nach dem erwerbswirtschaftlichem Prinzip Altprodukte zu dem Zweck der Schadstoffentfrachtung, der Sekundärrohstoff- und Komponentengewinnung demontiert, um sie für die weitere Verwertung oder Verwendung zu veräußern.

Die Systemtheorie bildet in den Ingenieurwissenschaften das theoretische Gerüst für die Systemtechnik. Sie dient dazu, technisch aufwendige Systeme sicher zu beherrschen [DAE-99], [PAG-91]. Die Systemtechnik konkretisiert die abstrakte Systemtheorie auf vorgegebene Systeminhalte [SPU-98] und stellt dabei Denkmodelle, Arbeitsmodelle, Arbeitsmethoden und Organisationsformen zur Verfügung, die sich auf die Planung, die Gestaltung und den Betrieb komplexer technischer Systeme in ökotechnischen und soziotechnischen Zusammenhängen beziehen [ROP-75]. Ein System ist als eine Menge von Elementen mit bestimmten Eigenschaften und Handlungsmöglichkeiten zu verstehen, die untereinander durch Relationen/Beziehungen verknüpft sind, um gesetzte Ziele zu verfolgen [PAT-82], [ROP-99]. Die Vernetzung der Beziehungen der Systemelemente wird als Struktur bezeichnet. Ein System kann in logische Subsysteme niedriger Ordnung zerlegt werden. Besteht zwischen Elementen unterschiedlicher Subsysteme eine Beziehungsform, bilden diese ein Teilsystem. Ein System ist grundsätzlich durch eine Systemgrenze gegenüber seiner Umwelt abgegrenzt. Unter dem Gesichtspunkt der Anwendungsorientierung, der in der Produktionstechnik bestimmend ist, gelten technische Systeme, wie eine Fabrik, als die Zusammenfassung von technisch-organisatorischen Mitteln zur autonomen Erfüllung eines Aufgabenkomplexes. Nach ROPHOL lassen sich technische Systeme durch drei grundlegende sich einander ergänzende Aspekte beschreiben Es handelt sich um den funktionalen, strukturellen und hierarchischen Aspekt [ROP-75].

Für das langfristige Überleben des Systems Demontagefabrik ist ihre Entwicklungsfähigkeit Voraussetzung. Eine Demontagefabrik interagiert mit ihrer Umwelt. Sie nimmt Kapital, Mitarbeiter und Demontagebetriebsmittel auf und reagiert auf Umweltveränderungen. Die Entwicklungsfähigkeit ermöglicht, das Verhaltenspotenzial zu erweitern und eine Neugestaltung oder Neuwahl von Zielen zu verfolgen. Eine Demontagefabrik erfüllt in der Gesellschaft eine bestimmte Aufgabe. Sie ist zweck- und zielorientiert und somit von der Akzeptanz ihrer erstellten Leistungen abhängig. Die Zweck- und Zielorientierung stellt somit die Treibkraft dar, die Fabrikumwelt an sich verändernde menschliche Wertvorstellungen und Verhaltensregeln anzupassen.

3.2.1 Funktionale Beschreibung

Die funktionale Beschreibung erklärt, welche Funktionen und Zwecke eine Demontagefabrik erfüllt. Die Beschreibung der Hauptgeschäftsprozesse bildet hierfür einen geeigneten Anfang [WIE-02a]. Analog zur Beschreibung der Hauptgeschäftsprozesse eines Produktionsunternehmens, welche sich an einer für den Kunden zu erbringenden Marktleistung orientieren, lassen sich auch die Hauptgeschäftsprozesse für ein Demontageunternehmen in Markterschließung, Marktleistungsentwicklung, Auftragsgewinnung, Auftrags-erfüllung und Service untergliedern. Die Marktleistung definiert dabei, mit welcher Leistung bestehend aus Produkten und/oder Dienstleistungen wann, wo, welche Ergebnisse erzielt werden sollen [GAU-99]. Auf Basis der Unternehmensstrategie werden durch den Prozess der Markterschließung die genauen Anforderungen an die Marktleistung definiert. Die Demontagefabrik muss hierbei den Angebots- und den Absatzmarkt erschließen. Sie nimmt somit neben einer Service- auch eine Produzentenfunktion ein [WIE-98], [TRI-96]. Einerseits löst die Demontagefabrik Entsorgungsaufgaben ihrer Kunden - Servicefunktion, andererseits bedient sie die Nachfrage nach Demontageerzeugnissen - Produzentenfunktion, also Komponenten die im Rahmen von Produktions-, Instandhaltungs- oder Reparaturprozessen wieder eingesetzt werden, oder die Nachfrage nach Materialfraktionen, die als Substitut für Primärrohstoffe wieder eingesetzt werden (Bild 11). Der sich anschließende Prozess der Marktleistungsentwicklung kreiert aus den definierten Marktleistungen marktreife Dienstleistungen. Darunter ist zu verstehen, wie und welche Altgeräte (Demontageobjekte) bezogen werden und welche marktreife Demontageerzeugnisse angeboten werden sollen.

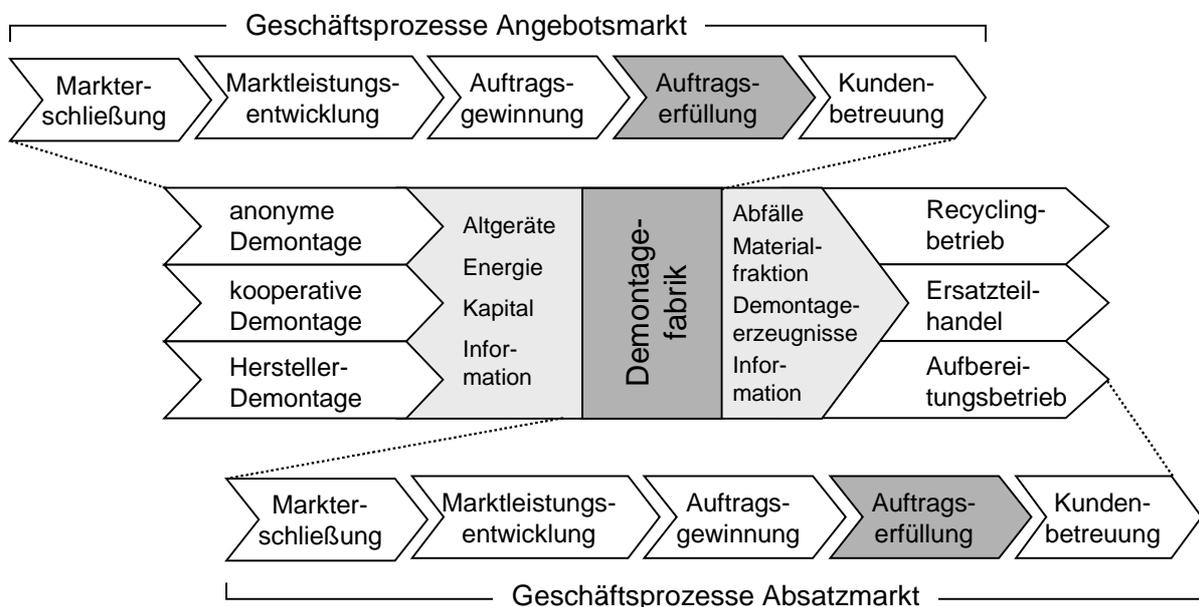


Bild 11: Funktionale Beschreibung einer Demontagefabrik

Die Auftragsgewinnung umfasst den Kundenkontakt bis zur endgültigen Auftragserteilung. Der nachfolgende Prozess der Auftragserfüllung ist die originäre Aufgabe der Demontagefabrik. Aus funktionaler Sicht stellt die Demontagefabrik ihre Ressourcen zur Verfügung, um den Prozess der Auftragserfüllung auszuführen. Als Eingangsgrößen

hierzu dienen Energie, Demontageobjekte, Informationen und Kapital. Auf Basis der Ressourcen entstehen daraus in der Demontagefabrik durch Demontage-, Lager- und Logistikprozesse Marktleistungen. Die primären Ausgangsgrößen der funktionalen Betrachtung sind demnach Demontageerzeugnisse, Serviceleistungen, Abfälle und Informationen.

3.2.2 Strukturelle Beschreibung

Die strukturelle Beschreibung betrachtet die Organisation der Demontagefabrik anhand ihrer Elemente und Relationen (Bild 12). Unter den Elementen sind die Ressourcen Demontagemittel, Demontageobjekt, Gebäude, Mitarbeiter und Informationen zu verstehen [EVE-96], [LAN-03]. Diese werden primär hinsichtlich Qualität und Quantität unterschieden. Demontagemittel sind hierbei alle Dinge mit Arbeitsvermögen, die bei der Demontage mittelbar oder unmittelbar zum Einsatz kommen [HEN-96]. Als Demontageobjekte sollen hier Altgeräte verstanden werden, die in die Demontagefabrik eingehen, um demontiert zu werden.

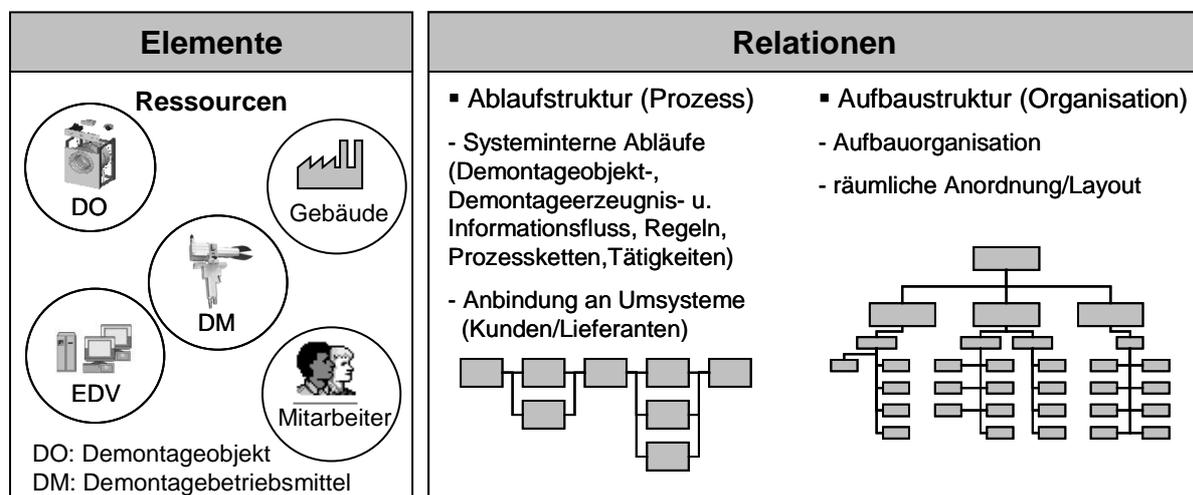


Bild 12: Strukturelle Beschreibung einer Fabrik

Die Organisation umfasst die Gesamtheit der durch eine Ordnung der Elemente entstehenden Gestalt (Aufbauorganisation) und Prozesse (Ablauforganisation). Dabei stellen die Gebäude und die Fläche die entscheidenden räumlichen Basiselemente dar. Die Relationen eines Demontagefabrikensystems werden einerseits durch die Beziehungen der Ressourcen untereinander, andererseits durch die Anbindung an die Umsysteme, wie z.B. Lieferanten, Kunden, Standorte auf Recyclingnetzwerkebene, definiert. Dabei kann es sich um Materialfluss-, Informationsfluss-, Energiefluss- und Wirkungszusammenhänge handeln [DAE-99]. Die spezifische Vernetzung der Elemente mittels Beziehungen ergibt die Grundlage für die Darstellung und Beschreibung der Struktur einer Demontagefabrik.

3.2.3 Hierarchische Beschreibung

Die hierarchische Systembeschreibung berücksichtigt den Vernetzungsgrad von Systemelementen innerhalb eines Systems durch Bildung von Subsystemen. Elemente eines Systems lassen sich somit wieder als Subsysteme auf einer niedrigeren Aggregatensebene beschreiben. Umgekehrt kann man ein System als ein Element eines überge-

ordneten Systems betrachten [BRU-91]. Mit der hierarchischen Betrachtungsweise können Demontagefabriken durch Aggregationsebenen beschrieben werden. Hinsichtlich der Aggregationsebenen lassen sich Demontagefabriken auf fünf Ebenen von der Anordnung der Demontagemittel an einem Arbeitsplatz bis zum Zusammenspiel der Demontagefabriken in einem Recyclingnetzwerk betrachten (Bild 13).

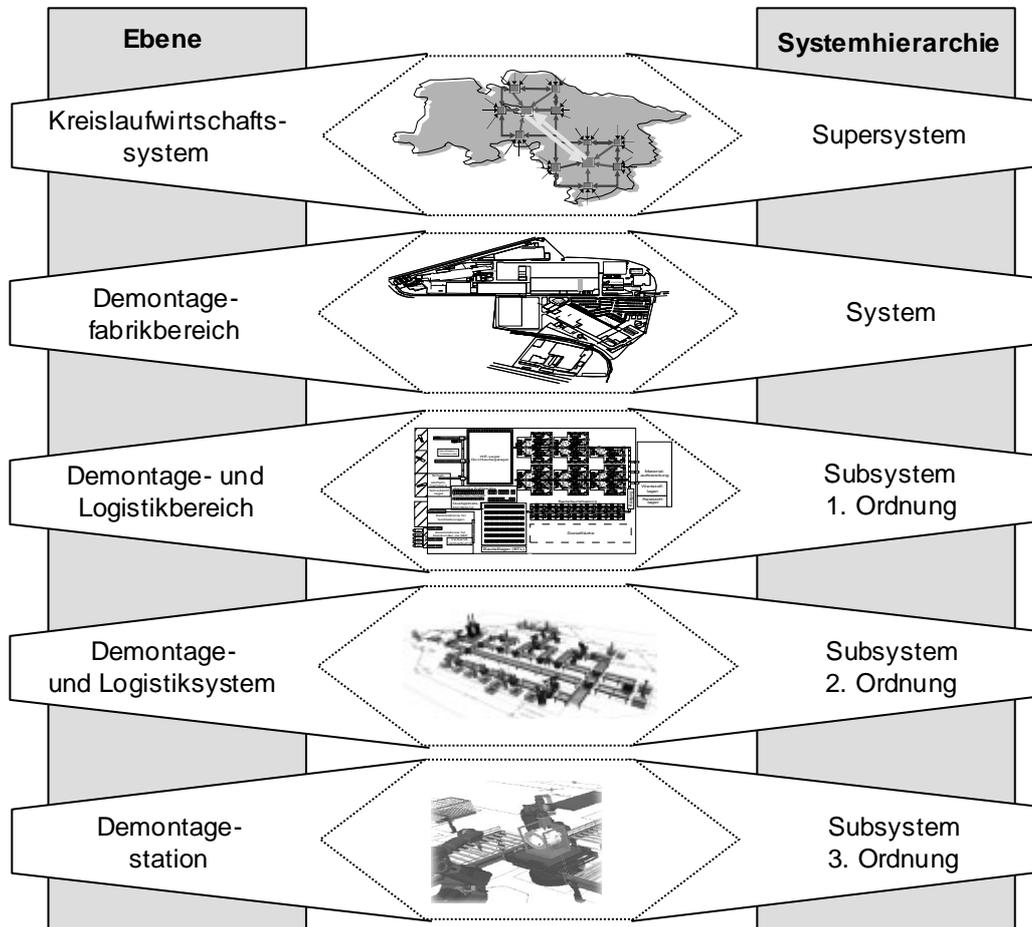


Bild 13: Hierarchische Beschreibung der Demontagefabrik

So wie Teile des Demontagefabriksystems ihrerseits Systeme, im folgenden Subsysteme genannt, darstellen, so ist das Demontagefabrikssystem selbst Teil eines umfassenden Systems, das als Supersystem bezeichnet wird. Als Supersystem fungiert das *Kreislaufwirtschaftssystem*, in das jede Demontagefabrik eingebettet ist. Aus fabrikplanerischer Sicht werden durch die Anforderungen der Akteure des Kreislaufwirtschaftssystems die notwendigen strategischen Demontagekapazitäten sowie der Standort der Demontagefabrik bestimmt. Die Ebene *Demontagefabrikbereich* beinhaltet aus fabrikplanerischer Sicht das Grundstück, dessen Erschließung und die Gebäude. Dabei werden aus räumlicher Sicht unter Berücksichtigung der Materialströme die Nutzungsbereiche zugeordnet und die Bauten angeordnet, die Hauptverkehrswege und die Ver- und Entsorgungssysteme gestaltet sowie das Werksgelände erschlossen. Die Ebene des *Demontage- und innerbetrieblichen Logistikbereichs* stellt ein Subsystem des Demontagefabrikbereichs dar. Sie beinhaltet die Bildung und Anordnung von Demontage- und Logistikbereichen und legt die Demontage- und innerbetriebliche Logistikstrategie fest. Es werden

Lager-, Steuerungs- und Materialflusskonzepte determiniert. Als Subsysteme des Demontage- und Logistikbereichs werden die *Demontage- und Logistiksysteme* verstanden. Diese beschreiben die Verknüpfung von Mitarbeitern, Demontagemitteln und Logistik-elementen (Fördermittel, Puffer) zu Systemen, z.B. Demontageinseln oder Demontagelinien mit dem Ziel der Demontage von Altprodukten. Auf unterster Demontagefabrikebene sollen die *Demontagestationen* gelten. Diese bestehen aus den Grundelementen Mitarbeitern, Demontagemitteln und der Fläche. Das Zusammenwirken dieser Elemente führt zur Ausführung des Demontageprozesses am Demontageobjekt.

3.3 Planungswerkzeug - Simulation

Der Begriff Simulation wird durch die wörtliche Übersetzung seines lateinischen Ursprungs „simulare“ beschrieben und bedeutet soviel wie „nachbilden, nachahmen, etwas vortäuschen“. Zur Eingrenzung des Begriffs in diesen Bereichen definiert der Verein deutscher Ingenieure (VDI) Simulation folgendermaßen [VDI-3633]:

„Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“

Im einzelnen sind aus einer solchen Definition folgende Informationen zu entnehmen:

- Die Nachbildung eines Systems läuft über den Schritt der Abstraktion der Realität hin zum Modell. Demzufolge erfolgt mit Hilfe eines Ersatzsystems die Untersuchung eines realen Systems. Die Abstraktionen bzw. zulässigen Vereinfachungen bei einer Modellerstellung führt naturgemäß zu keiner exakten Abbildung realer Prozesse bzw. Systeme. Beachtet werden muss daher die Homogenität sowie der Detaillierungsgrad des Modells. Weder macht es Sinn, Eigenschaften eines Systems ohne Relevanz abzubilden, noch macht es Sinn, feine Spezifikationen von Teilsystemen vorzunehmen, wenn eine grobe Abbildung ausreicht, um gewünschte Aussagen zu treffen.
- Die dynamischen Prozesse spiegeln zeitliche Abfolgen von Ereignissen eines realen Systems wieder. Jedes der im Simulationssystem simulierten Ereignisse wird registriert und kann statistisch ausgewertet werden. Ebenso kann ein Ereignis andere Ereignisse und deren zeitliches Auftreten beeinflussen.
- Das experimentierfähige Modell ermöglicht dem Anwender, durch zielgerichtetes Experimentieren das Systemverhalten zu verstehen sowie verschiedene Strategien für Systemoperationen zu entwickeln.
- Um die Erkenntnisse in die Wirklichkeit zu übertragen, finden Experimente am entstandenen bzw. vorhandenen Simulationsmodell statt. Die Art der gewünschten Erkenntnisse bestimmt die Art des Simulationsmodells. Für die Übertragbarkeit bedeutet das, dass ein Modell validiert und verifiziert werden muss. Über ein solches Modell werden gewonnene Erkenntnisse auf das reale Systemverhalten übertragen.

3.3.1 Simulationstechnologien

Die Simulation kann mit unterschiedlichen Simulationstechnologien durchgeführt werden, deren Anwendung findet in Unternehmen auf verschiedenen Planungsebenen mit unterschiedlichen Planungsinhalten statt (Bild 14). Der Einsatzbereich der Simulationstechnik reicht von der detaillierten mechanischen Analyse mit der Finite-Elemente-Simulation bei der Produktkonstruktion bis hin zu den strategischen Geschäftsprozesssimulationen [WUT-00] bzw. der Abbildung ganzer Netzwerkstrukturen in sog. Supply-Chain-Simulationen (SCS) [HER-03b], [JAI-01]. In Abhängigkeit des betrachteten Planungsobjektes und der verfolgten Planungsinhalte können unterschiedliche Simulationstechnologien eingesetzt werden (Bild 14).

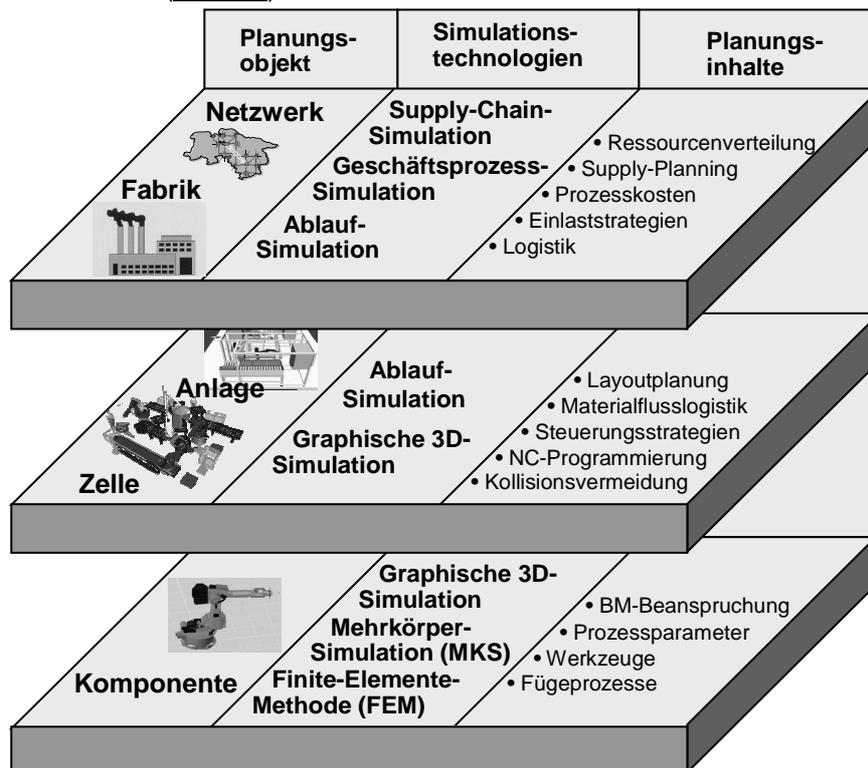


Bild 14: Einsatzgebiete der Simulationstechnologien

3.3.2 Ablaufsimulation

Mit Hilfe der Ablaufsimulation können das dynamische Verhalten von Fabrikssystemen und deren Montage- und Demontageanlagen bzw. die Verkettung von Ressourcen, Arbeitsplätzen und Fördertechnik abgebildet werden. Die Ablaufsimulation wird vor allem in der Materialflussplanung, der Layoutplanung sowie zur Steuerung des Betriebsmittelflusses eingesetzt. Komplexe Wirkungszusammenhänge, stark vernetzte Produktionsprozesse und die große Anzahl zeitabhängiger stochastischer Systemgrößen können im Gegensatz zu den herkömmlichen Analyseverfahren in den Modellen der Ablaufsimulation berücksichtigt werden. Für das Anwendungsgebiet der Fabrik-, und Logistikplanung erreicht die Ablaufsimulation in der Automobilindustrie eine Durchdringung von mehr als 70% [WAT-02]. Da im Rahmen der Umsetzung der Digitalen Fabrik die Ablaufsimulation eine wesentliche Komponente spielt ist mit einer vermehrten Anwendung in anderen Industrien zu rechnen, um die Potenziale der Ablaufsimulation zu erschließen.

3.3.2.1 Anwendungsfelder

Fabrikssysteme unterliegen einer Vielzahl von Einflussgrößen, welche in Folge immer kürzerer Innovationszyklen einen kontinuierlichen dynamischen Anpassungsprozess erfordern. Die Fabrikplanung ist auf diese Weise zu einer permanenten Betriebsaufgabe geworden [MOR-03]. Herkömmliche Methoden und Verfahren werden dabei den Anforderungen einer schnellen, flexiblen und transparenten Planung nicht mehr gerecht. Die Ablaufsimulation stellt ein Verfahren dar, dass gerade die Dynamik in den komplexen Systemen der Fabrikplanung berücksichtigt und durch realitätsnahe Abbildung der Prozesse mit Hilfe der Animation die Transparenz in der Logistik-Planung erhöht. Die Ablaufsimulation als praktisches Planungswerkzeug wird in unterschiedlichen Phasen der Fabrikplanung angewendet [BLE-99], [WIE-01b].

Bild 15 gibt einen Überblick über die Anwendungsgebiete der Simulation in der Fabrikplanung. Dabei orientiert sich die Darstellung an den Ablaufphasen des Fabrikplanungsprozesses nach KETTNER [KET-84].

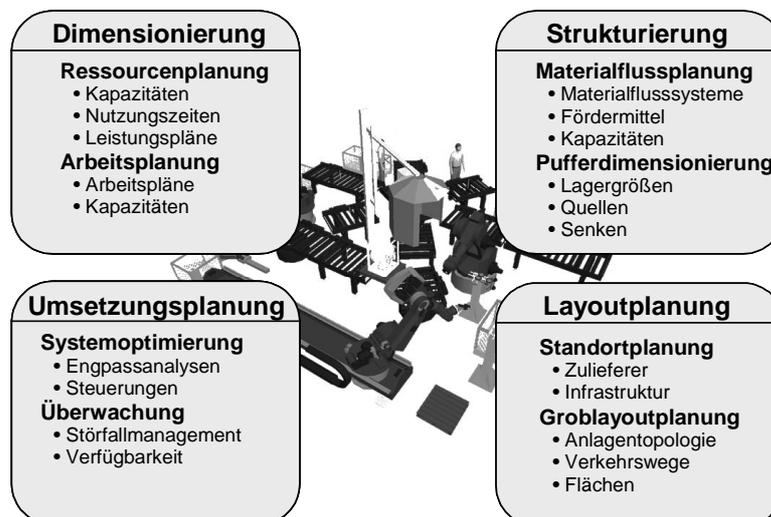


Bild 15: Anwendungsbereiche der Ablaufsimulation in der Fabrikplanung

Aufgrund der komplexen und vernetzten Abläufe mit zeitversetzten Kapazitätsbedarfen werden die statischen Dimensionierungen der Betriebsmittel durch die dynamische Analyse mit Hilfe der Ablaufsimulation abgesichert. Die Ergebnisse der Simulationsmodelle stellen dynamische Auslastungsverläufe der Anlagen dar, die den schwankenden Ressourcenbelastungen ausreichende Kapazitäten gegenüberstellen [WIR-02].

In der Analyse der Wechselwirkungen zwischen der funktionell bzw. organisatorischen und der räumlichen Strukturierung hat sich die Ablaufsimulation als Hilfsmittel durchgesetzt [FÖR-03]. Mit Hilfe der hinterlegten Arbeitspläne und unter Einbeziehung des Mengengerüsts aus dem Produktionsprogramm wird die Struktur der Materialflüsse bestimmt und in Form einer Materialflussmatrix bzw. Transport-Intensitätsmatrix quantitativ aufbereitet. Auf Basis dieser Angaben können mit Hilfe der Ablaufsimulation dynamische Materialflussanalysen zur Neugestaltung oder Auslegung der Transportsysteme durchgeführt werden [NOC-97], [WIE-02a]. Unter Berücksichtigung der Dynamik können die

Wechselwirkungen von Strukturen, Ressourcenanordnung und Transportsystemen analysiert und somit die Puffer hinreichend genau dimensioniert werden.

Bei den Überlegungen der materialflussorientierten Layoutplanung steht die räumliche Anordnung der Ressourcen zur Schaffung optimaler Rahmenbedingungen für den innerbetrieblichen Transport im Vordergrund. Die simulationsbasierte Layoutplanung kann die räumlichen Ausdehnungen der Puffer- und Lagergrößen in den konkreten Bedingungen der Werksgeometrien verifizieren [MÜL-03], [WIE-02b].

Die Anwendung der Ablaufsimulation innerhalb der Umsetzungsplanung basiert auf der Entwicklung eines virtuellen Anlagenmodells [ADU-03], [MIL-01]. Ziel ist es, unterschiedliche Teilsysteme wie Förder- und Steuerungstechnik in den frühen Phasen der Planung als ein Gesamtsystem zu erproben [BRA-98], [HAG-98]. Hierbei werden die Informationsflussebenen des Systems bis zur Sensorebene berücksichtigt. Die Anbindung realer Peripherie an die virtuelle Anlage in der Simulationsumgebung ermöglicht genaue Analysen der Prozesssicherheit in der Gesamtanlage [CIU-02], [KIM-04a].

Die kontinuierlichen Anpassungsprozesse in der Fabrikplanung können mit Hilfe der Ablaufsimulation in kürzester Zeit sicher geplant und abgesichert werden [GRI-99], [EVE-03]. Die Ziele, die mit dem Einsatz der Simulation in der Fabrikplanung verfolgt werden, können wie folgt zusammengefasst werden [DOM-02]:

- Erprobung neuer und Verbesserung bestehender Organisations- und Materialflusstategien,
- Untersuchung des Systemverhaltens bei unterschiedlichen Szenarien,
- Ermittlung von Engpässen und Änderungspotenzialen unter Berücksichtigung zeitdynamischen Verhaltens und
- Visualisierung vorhandener oder geplanter Konzepte, Prozesse und Strukturen.

Insgesamt soll die Simulation eine verbesserte Planungssicherheit und eine Minimierung des Planungsrisikos garantieren und somit zur Investitionsabsicherung verwendet werden [KOC-02], [KUH-93], [WES-02].

3.3.2.2 Anwendungspotenzial

Die Simulationstechnik hat in den letzten Jahren Werkzeuge hervorgebracht, mit denen sich nahezu alle dynamischen Prozesse modellieren und analysieren lassen. Fabrikkonzepte können mit Hilfe der Ablaufsimulation bereits in der Planungsphase bis ins Detail evaluiert und Anlaufschwierigkeiten in der Prozessentwicklung vermieden werden [REI-02]. Durch den Einsatz der Ablaufsimulation werden somit erhebliche Potenziale erschlossen, wie die Steigerung der Planungsgeschwindigkeit und –qualität sowie die Reduzierung der Planungskosten [HEI-99]. Bild 16 verdeutlicht diese Zusammenhänge.

Einer der wesentlichen Gründe für die Steigerung der Planungsgeschwindigkeit mit Hilfe der Ablaufsimulation liegt in der allgemein verständlichen Darstellung und der vereinfachten Handhabung komplexer dynamischer Prozesse. Ebenso ermöglicht der Simulationseinsatz ein verbessertes Planen mit unscharfen Daten [FRI-01]. Aufgrund der schnellen Konfiguration der Ablaufmodelle kann die Simulation sogar als Entscheidungshilfsmittel in der operativen Produktionsplanung eingesetzt werden [WIE-97]. Planungsänderungen können mit der Simulation in jeder Phase ohne großen Zeit- und Kostenaufwand im Modell überprüft und eingepflegt werden.

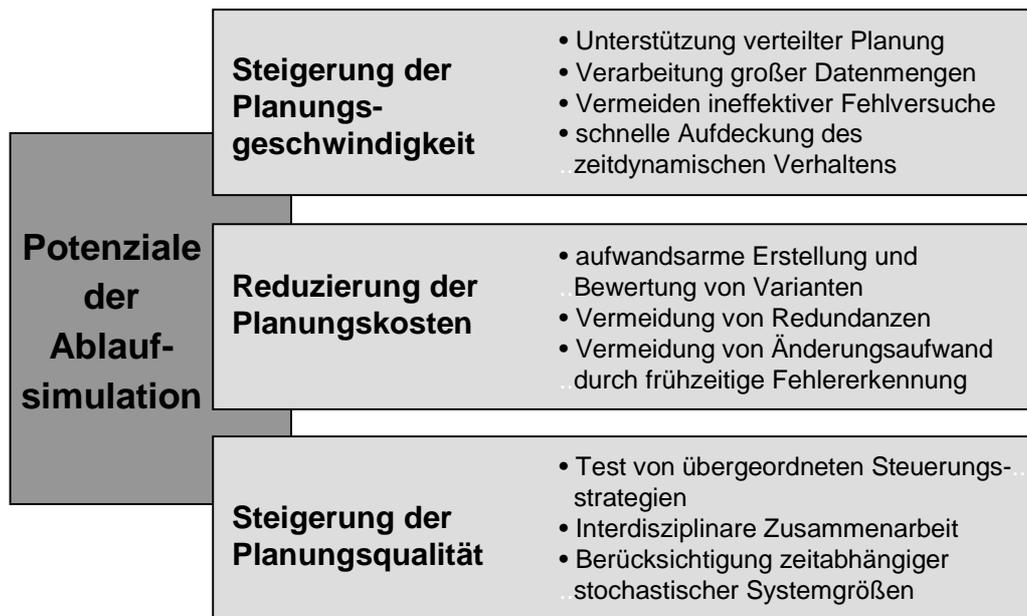


Bild 16: Potenziale der Ablaufsimulation

Analog zum kontinuierlichen Verbesserungsprozess steigt die Wirksamkeit der Simulation durch deren frühzeitigen Einsatz [KRU-01]. Ebenso ist die Erstellung von Planungsvarianten unter Zuhilfenahme von Experiment-Assistenten der Ablaufsimulation relativ aufwandsarm und die Bewertungsmöglichkeiten der verschiedenen Varianten aufgrund der Anschaulichkeit der Animation besser gewährleistet. Die Aufrechterhaltung einer hohen Qualität stellt bei zunehmender Geschwindigkeit hohe Ansprüche an die Planung. Die Ablaufsimulation wird diesen Ansprüchen als eine projektbegleitende Kommunikationsplattform für eine interdisziplinäre Zusammenarbeit gerecht [BRA-98]. Besonders die rechtzeitige Berücksichtigung aller Planungsabteilungen im Simulationsprozess fördert die Akzeptanz gegenüber der Simulationsanwendung [GAU-00]. Neben den Nutzeneffekten in der Planung bietet die Simulation weitere Vorteile in der Realisierung und im Anlauf von Produktions- und Logistiksystemen. Steuerungsstrategien mit realer Steuerungssoftware können in der Simulationsumgebung getestet werden [CIU-02], [SEL-00b], [WOR-02]. Die Planungsqualität wird hier durch die Berücksichtigung zeitabhängiger stochastischer Systemgrößen in den Simulationsläufen gesteigert [FLE-03]. Zusätzlich stellt die Ablaufsimulation eine Ergänzung zur Prozessdokumentation dar.

Der erfolgreiche Einsatz der Simulation hängt im Wesentlichen von der guten Zusammenarbeit zwischen dem Planer und dem Simulationsexperten ab. Daher ist die Simula-

tion rechtzeitig, d.h. planungsbegleitend und in laufender Abstimmung durchzuführen. Die Anwendung der Ablaufsimulation zwingt zum genaueren Durchdenken der Planungsaufgabe und zu einer hohen Qualität der Planungsdaten. Hierdurch ergeben sich neben der Absicherung der Planung weitere Vorteile:

- Mit den Simulationsergebnissen fließen frühzeitig und iterativ Verbesserungsansätze in die Planung ein.
- Ein übersichtliches Abbild des zu gestaltenden Systems spiegelt den aktuellen Stand der Planung wieder und kann somit als gemeinsame Informationsbasis aller Beteiligten dienen.
- Durch die Ergebnisse wird frühzeitig Verständnis für das dynamische Verhalten des Systems entwickelt, wodurch Diskussionen und Entscheidungen versachlicht werden.

Diese Maßnahmen ermöglichen zudem eine Parallelisierung und Beschleunigung der Planungstätigkeiten. Eine Quantifizierung des Nutzens kann jedoch nur projektbezogen erfolgen. Als Anhaltspunkt können Erfahrungen dienen, die zeigen, dass bei rechtzeitiger Anwendung der Simulation Einsparungen in Höhe des Mehrfachen der Simulationskosten erzielt werden können [WES-03]. Nach Angaben der Automobilindustrie ist bei sehr teuren Systemelementen sogar ein Kosten-Nutzen-Verhältnis von 1:10 bis 1:100 durchaus realistisch [RAB-01]. Die nicht quantifizierbaren Faktoren führen häufig zu weiteren erheblichen Einsparungen. Auch die Vorteile eines regelmäßigen Einsatzes der Ablaufsimulation sollten nicht unterschätzt werden. Die ständige Auseinandersetzung mit der Dynamik der Systeme in der Produktion und deren Auswirkungen auf vor- und nachgelagerte Prozesse schafft Transparenz und Problembewusstsein.

3.3.3 Kostensimulation

Bei der Konzeption, Einführung und dem Betrieb von Produktions- und Demontagesystemen sind Entscheidungen in einem Spannungsfeld zwischen technischen und kaufmännischen Anforderungen zu treffen. Für den Fabrikplaner wird es immer wichtiger, die Kostenentstehung gezielt zu beeinflussen, entscheidungsorientierte und verursachungsgerechte Kostennachweise zu ermöglichen [WES-00].

Zahlreiche Autoren wie BECK [BEC-00], EVERSHEIM [EVE-94], FELDMANN [FEL-00] und ZÜLCH [ZÜL-96] sehen in der simulationsgestützten Entscheidungsfindung unter Berücksichtigung von Kosten ein Instrumentarium, das diesen Zielen gerecht wird, da die zeitbehafteten Einflussfaktoren auf den Werteverzehr unabhängig von der Realität auch ex ante sehr genau ermittelt werden können. Unter Kostensimulation werden Simulationsstudien verstanden, bei denen in Ergänzung zu den sonst üblichen technischen Leistungsdaten (wie Durchlaufzeiten, Bestände, Terminabweichungen und Kapazitätsauslastungen) zusätzlich Auswertungen unter kosten- und betriebswirtschaftlichen Aspekten durchgeführt werden [VDI-3633].

3.3.3.1 Grundlagen

Die Kostensimulation ist grundsätzlich ein Zusatz zur klassischen Ablaufsimulation [DIL-91], [KLU-94]. Während die im System erbrachten Leistungen vom Simulationssystem ermittelt werden müssen, kann die eigentliche Kostenrechnung, also die Verknüpfung mit den Kostensätzen, sowohl simulationsintern als auch außerhalb des Simulationssystems erfolgen.

Integrierte Kostenmodule sind Bausteine innerhalb des Simulationssystems, die während des Simulationslaufes das Ermitteln, Verrechnen und Auswerten der Kostendaten vornehmen. Dies ermöglicht neben der permanenten Kostentransparenz zum Ablaufzeitpunkt (Monitoring) auch eine situative, kostenrelevante Entscheidungsfindung innerhalb des Simulationslaufes, wie z.B. die Auftragsreihenfolgeentscheidung nach Aufruf der bisherigen Wertschöpfung. Nachteilig ist, dass man bei bestimmten Fragestellungen zwei Simulationsläufe benötigt (z.B. bei der Berechnung dynamischer Maschinenstundensätze oder simulationsbasierter Verrechnungssätze).

Bei den nachgeschalteten Kostenmodulen außerhalb des Simulationssystems wird zunächst eine klassische Ablaufsimulation durchgeführt. Die während des Laufes erzeugte „Trace“-Datei enthält alle Ereignisse und steht für die Simulationsauswertung zur Verfügung. Ein Kostenmodul zur Kostenbewertung und –auswertung kann dann im Nachgang zur Simulation die kostenrelevanten Daten ermitteln, bewerten und auswerten. Vorteilhaft ist, dass ein Kostenmodul mit unterschiedlichen Simulationswerkzeugen kombiniert werden kann, wenn alle kostenrelevanten Informationen in der „Trace“-Datei enthalten sind.

Die Kostenberechnung kann simultan (online) zum Simulationslauf erfolgen oder aber erst nach dessen Beendigung (offline). Eine simultane Kostenberechnung unterstützt die Online-Verfolgung der Kostenentwicklung, wobei allerdings die Gemeinkosten bei variablem Ausbringungsverhältnis nur ungenau zugeteilt werden können. Deshalb sollte diese Art der Kostenberechnung nur für die Ermittlung des ungefähren Kostenverlaufs herangezogen werden [KLU-95]. Da erst nach Beenden eines Simulationslaufes der genaue Verteilungsschlüssel bekannt ist, sollte eine verursachungsgerechte Kostenberechnung offline erfolgen. Des Weiteren sprechen der geringere Bedarf an zusätzlicher Rechenkapazität, die Durchführbarkeit von „what if“-Szenarien ohne erneuten Simulationslauf und eine mögliche Verbindung separater Kostenfunktionen mit den Controllingdaten von Produktivsystemen für eine Kostenberechnung nach dem Simulationslauf [FEL-00], [FRI-97], [RAU-98].

3.3.3.2 Kostenmodell

Als Kostenmodell wird die Erweiterung klassischer Ablaufsimulationsmodelle um kosten-spezifische Parameter, Modellelemente und Kostendaten bezeichnet. Das Kostenmodell untergliedert sich in die Kostendaten, das Kostenstrukturmodell und das Kapazitätsrechnungsmodell. Für den Aufbau ist entscheidend, welches Kostenrechnungssystem im Rahmen der Simulation genutzt werden soll [WER-01].

Im Rahmen der Ermittlung von Kosten ist zu klären, welche Kostendaten in Abhängigkeit von der zu unterstützenden betrieblichen Entscheidung benötigt werden. Dabei dient die Kostenartenrechnung zur Ermittlung der Höhe der einzelnen Kostenarten. Kostendaten können zunächst nach Art der Verrechnung in Einzelkosten und Gemeinkosten unterschieden werden. Nach Art der verbrauchten Produktionsfaktoren lassen sich des Weiteren Kapital-, Raum-, Werkzeug-, Lohn-, Instandhaltungs-, Energie-, Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffkosten unterscheiden. Aus Sicht der betrieblichen Funktionen können Kostendaten für Beschaffung, Demontage, Absatz sowie Verwaltung ermittelt werden. In Anlehnung an FLOEL [FLO-02] lassen sich für Demontagefabriken im Rahmen einer Prozesskostenbetrachtung die Aktivitäten des Demontierens, Handhabens, Rüstens, Transportierens, Lagerns, Prüfens und der Störung unterscheiden.

Im Kostenstrukturmodell werden alle während der Kostensimulation betrachteten Kostenarten im Rahmen einer Kostenstellenrechnung auf die Modellelemente verteilt. Für nicht unmittelbar einem Kostenträger zurechenbare Kosten (Gemeinkosten) werden Verrechnungssätze für die jeweiligen Leistungsstellen definiert. Einzelkosten können den Elementen direkt zugeordnet werden. Die Verteilung von Einzel- und Gemeinkosten kann sowohl auf bewegliche (Kostenträger) als auch unbewegliche Simulationsbausteine (Kostenstellen) erfolgen [HAR-99], [LOR-97], [RAU-98].

In Abhängigkeit von dem genutzten Kostenrechnungssystem werden in der Kostenträgerrechnung sämtliche angefallenen Kosten möglichst verursachungsgerecht auf die Kostenträger verteilt. Über die im Kapazitätsrechnungsmodell zu spezifizierenden und zu ermittelnden Bezugsgrößen können auf Basis der im Simulationslauf erfassten Leistungen die Kosten ermittelt werden.

3.3.3.3 Kosten – Ermittlung und Verrechnung

Die Ermittlung und Verrechnung der Kosten erfolgt über Leistungs- und Gemeinleistungskonten, auf denen die in einer Simulationsperiode angefallenen Kosten gesammelt werden (Bild 17).

Im Rahmen der Ermittlung von Kosten ist zu klären, an welchen Elementen des Simulationsmodells, den sog. Leistungsstellen, die vom Kostenträger in Anspruch genommenen Leistungen als Ausgangsgrößen für die kostenmäßige Bewertung erfasst werden können. Auf den Konten sind die Demontageablaufdaten zu sammeln und in Abhängigkeit von dem verwendeten Kostenrechnungssystem mit Hilfe der spezifischen Leistungssätze zu verknüpfen. Die auf den Leistungskonten (LK) in den entsprechenden Listensätzen hinterlegten Kostendaten stellen die Ausgangsgrößen für die kostenmäßige Bewertung bzw. zur Durchführung der Kostenstellen- und Kostenträgerrechnung dar [WER-01].

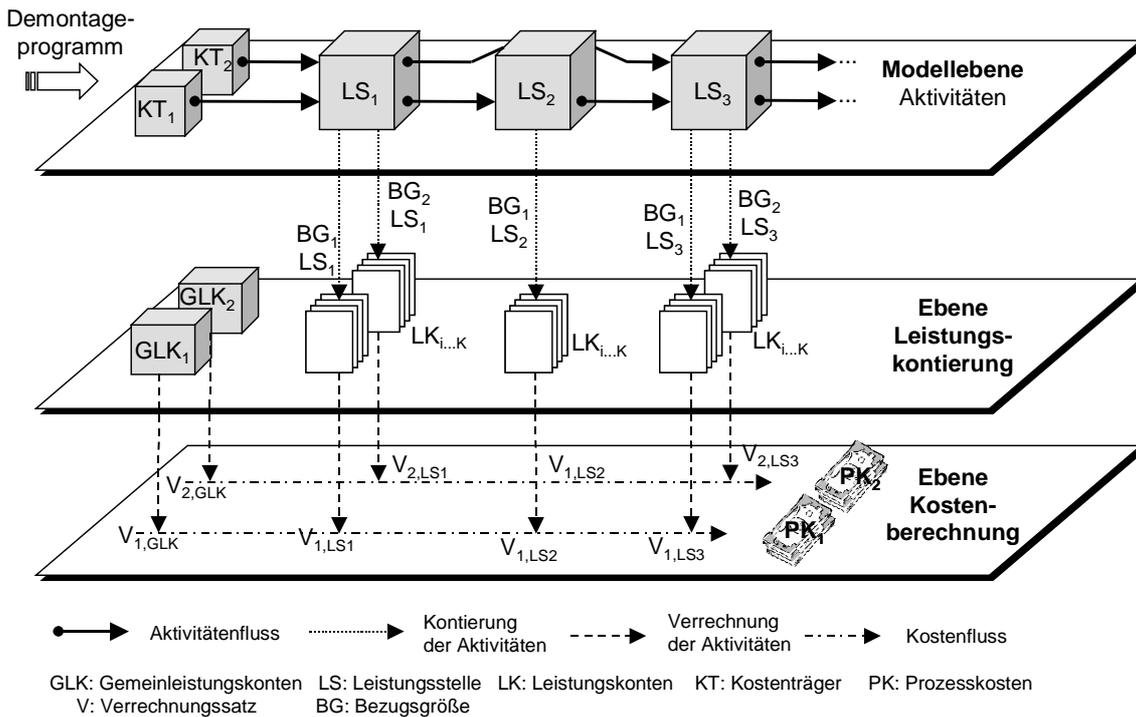


Bild 17: Ebenenkonzept für die simulationsgestützte Kostenberechnung nach [RAU-98]

Die Listensätze der Leistungskonten werden vom Simulationsanwender bei der Parametrierung der Simulationsbausteine mit Kostendaten gefüllt. Gleichzeitig versorgen die Kostenstellen, welche während eines Simulationslaufes von den Kostenträgern durchlaufen werden, die Leistungskonten mit Informationen über den stattgefundenen Ressourcenverbrauch. Bei der integrierten Kostensimulation müssen die Elemente des Simulationsmodells um Leistungskonten ausgeweitet werden, auf denen die Produktionsablaufinformationen (u.a. Zeiten, Betriebszustände, Zustandswechsel) ereignisgesteuert gesammelt werden. Erfolgt hingegen eine externe Kostensimulation, so wird für jeden zu simulierenden Kostenträger ein Leistungskonto (=Trace-Datei) erzeugt, auf dessen Basis im nachgeschalteten Kostenmodul die Verrechnung durchgeführt wird [STR-94].

Bei der Verrechnung muss neben dem Kostenmodell zusätzlich festgelegt werden, nach welchem Kostenrechnungssystem die Kosten aus den Demontageablaufdaten gewonnen werden. Beispielhaft für den Einsatz von Kostenrechnungssystemen auf Vollkostenbasis seien hier die Maschinenstundensatzrechnung, die Funktional-differenzierte Kostenrechnung sowie die Prozesskostenrechnung genannt. Bei der Teilkostenrechnung kann u.a. auf das Direct Costing zurückgegriffen werden. Eine gute Übersicht zu den für die Kostensimulation relevanten Kostenrechnungssystemen findet sich bei [EVE-94], [LOR-97], [RAU-98], [WER-01].

Die Wahl des Kalkulationsverfahrens hat Auswirkungen auf die Kostenstellenrechnung und somit auf die Frage der verursachungsgerechten Verteilung der Gemeinkosten. Sie sollte die jeweils systemimmanenten Mängel bei der Simulation beachten und gemäß des Postulates einer verursachungsgerechten Kostenzuordnung in Abhängigkeit vom

Ressourcenverbrauch, der zeitlichen Inanspruchnahme und Abschreibungsraten erfolgen.

3.3.3.4 Anwendungsfelder

Die Kostensimulation kann bei der Planung, der Realisierung oder im Betrieb eingesetzt werden, wobei eine Datenkonsistenz der technischen und betriebswirtschaftlichen Bewertung von der Planungs- bis zur Betriebsphase zu realisieren ist [FEL-00]. Die Entwicklungen auf dem Gebiet der Kostensimulation konzentriert sich auf Produktionssysteme. Es kommen hierbei nur selten kommerzielle Simulatoren wie ARENA [HAR-99], eM-Plant [RAU-98] und WITNESS [SPE-98] zum Einsatz. In der Regel werden Eigenentwicklungen verwendet. Der Einsatz der Kostensimulation bei der Planung und den Betrieb von Demontagefabriken ist dem Autor nicht bekannt.

Die zu erschließenden Anwendungsfelder und –potenziale der Kostensimulation werden in Bild 18 dargestellt. Eine zeitnahe Kostenrechnung kann einen Wirtschaftlichkeitsnachweis der Demontagesysteme erbringen. Zusätzlich zur Verbesserung der Darstellung der beeinflussbaren Kostenanteile werden Anwender frühzeitig für betriebswirtschaftliche Aspekte ihrer Arbeit sensibilisiert, was zu einer Erhöhung der Planungssicherheit und zur Verbesserung von Entscheidungsprozessen führt [TAK-97].

Phase	Anwendungsfelder	Anwendungspotenziale
Planung	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionsentscheidungen • Evaluierung von Realisierungsalternativen • Kostensensitive Demontagesystemen • Nutzwertanalyse • Kosten-/Nutzen-Analysen • Sensitivitätsanalyse 	<ul style="list-style-type: none"> • Identifikation von Kostentreibern • Kosten-Leistungs-Relation (Prozesswirkungsgrad) • Sensitivität logistischer Kennzahlen (Servicegrad, Termintreue, Lagerbestand, Durchlaufzeit) • Verbesserter Demontageobjektmix
Realisierung	<ul style="list-style-type: none"> • Anlaufprozesse von Demontagesystemen optimieren (Investitionszeitpunkte festlegen) • Kostenstrukturen eruiieren im simulierten Probebetrieb • Investitionscontrolling • s.a. Planungsphase 	<ul style="list-style-type: none"> • Anlaufkosten im Zeitablauf unter Berücksichtigung von Lernkurven • Anlaufkosten bei schrittweiser Kapazitätsauslastung • Anlaufkosten bei schrittweiser Einsteuerung von Demontageobjektvarianten
Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> • Bewertung von Ablaufvarianten • Produktionsmengen oder -terminplanung unter Berücksichtigung von Kosten für Mehrarbeit und Kapazitäten 	<ul style="list-style-type: none"> • Demontagestationsbelegung bewerten • Personaleinsatzstrategien bewerten • Demontagekostenveränderungen aufgrund von veränderten Absatzmarktsituationen • Störungsfolgekosten bestimmen

Bild 18: Anwendungsfelder und Potenziale der Kostensimulation

Bei der Planung von Demontagesystemen ist die Kostensimulation eine zusätzliche Entscheidungshilfe und unterstützt die Kommunikation mit anderen Bereichen. Sie ermöglicht eine frühe, umfassende betriebswirtschaftliche Bewertung alternativer Systemausprägung unter Einbeziehung von Aspekten wie der Qualitätssicherung, der Instandhaltung oder des Störungsmanagements. Ein besonderer Vorteil für Investitionsrechnungen

liegt darin, die zusätzlichen Kosten ermitteln zu können, die sich aus den Wechselwirkungen innerhalb eines Demontageablaufes ergeben.

Ein grundlegendes Einsatzfeld der Kostensimulation ist die Kalkulation der Demontageskosten von Demontageobjekten. Im Rahmen der Kostensimulation können die Kostenentwicklung über der Zeit dargestellt werden. Dadurch wird es erleichtert, Rationalisierungspotentiale zu erkennen sowie Bestandskosten und Durchlaufzeiten sinnvoll zu reduzieren. Weiterhin unterstützen Kennzahlen wie Deckungsbeitrag, Kapitalbindung, Amortisationszeit oder Gewinn die Beurteilung und Entscheidungsfindung. Jedoch können weder die Simulation selbst noch die sich anschließende Ergebnisaufbereitung dem Planer die Interpretation der Ergebnisse abnehmen. Für die Dokumentation der Entwicklung der Demontageskosten eines Demontageobjektes im Laufe der Demontage können Demontageskostenzuwachskurven verwendet werden, welche den Einfluss von zeit- und qualitätsbezogenen Faktoren auf die Kostenentwicklung aufzeigen (Bild 19). Die Kostensimulation ermöglicht durch die genauere Berücksichtigung der Auslastung, der Ausbringung sowie der Liege- und Transportzeiten die exaktere Bestimmung der Demontagesstückkosten und damit eine verursachungsgerechtere Zuordnung von Gemeinkosten.

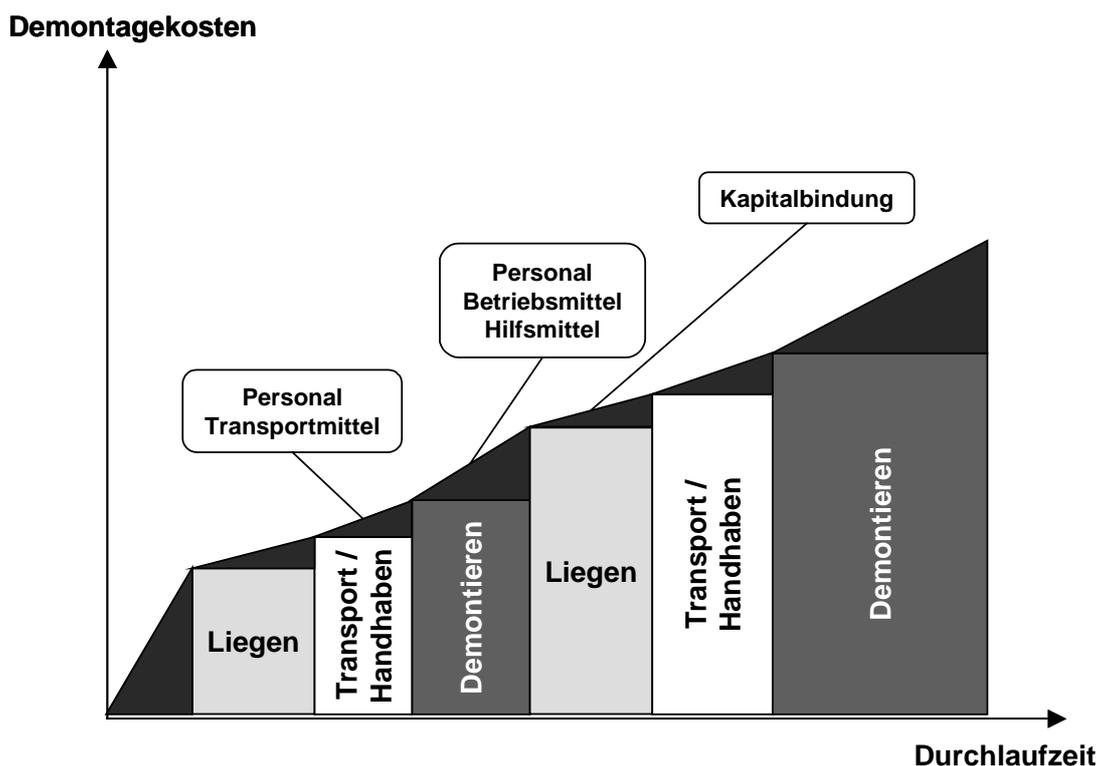


Bild 19: Darstellung einer Demontageskostenzuwachskurve

3.4 Stand der Forschung

In dem folgenden Kapitel wird der Stand der Forschung auf dem Gebiet der Planung von Demontagefabriken dargestellt. Die umfangreiche und detaillierte Analyse von insgesamt 51 Forschungsansätzen lässt vier allgemeine Forschungsbereiche erkennen:

- 1 *Überbetriebliche Planung von Demontagefabriken (Makro-Ebene)*: Hier werden Ansätze vorgestellt, die bei der Planung von Demontagefabriken deren Integration ins Kreislaufwirtschaftssystem, also die der Demontage vorgelagerten und nachgelagerten Prozesse, berücksichtigen.
- 2 *Innerbetriebliche Planung von Demontagefabriken (Mikro-Ebene)*: Hier werden Ansätze vorgestellt, die sich nur noch mit der innerbetrieblichen Planung von Demontagefabriken beschäftigen.
- 3 *Integrierte Planung von Demontagefabriken* : In diesem Forschungsbereich werden Ansätze vorgestellt, die bei der Planung von Demontagefabriken sowohl die Makro-Ebene und als auch die Mikro-Ebene berücksichtigen.
- 4 *Simulation in der Demontagefabrikplanung* stellt: Hierbei werden Planungsansätze vorgestellt, die bei der Planung von Demontagefabriken primär die Simulation als Hilfsmittel verwenden sowie Simulationswerkzeuge entwickeln oder deren Funktionalität erweitern, um sie für die Demontagefabriksimulation einzusetzen. Es sei hierbei angemerkt, dass einige der vorgestellten Planungsansätze der Makro- und Mikro-Ebene ebenfalls die Simulation verwenden.

Die vier Forschungsbereiche stellen jeweils einen Focus auf die Gesamtansicht Demontagefabrikplanung dar. Es handelt sich nicht um scharfe Abgrenzungen.

3.4.1 Klassifikationskriterien

Die untersuchten Forschungsansätze zur Planung von Demontagefabriken werden in Anlehnung an HENTSCHEL [HEN-96], HERMANN [HER-03a], HUBER [HUB-01], KEIL et al. [KEI-00], PERLEWITZ [PER-00] und WESTERNHAGEN [WET-01] mit Hilfe der sieben Hauptkriterien Planung Makro-Ebene, Planung Mikro-Ebene, Planungshorizont, Demontageziel, Planungsmethoden, Planungssoftware und Datenquellen, die wiederum in Unterkriterien aufgeteilt werden klassifiziert und bewertet.

3.4.1.1 Planung Makro-Ebene

Demontagefabriken stellen einen bedeutenden Akteur innerhalb von Kreislaufwirtschaftssystemen dar. Durch die Festlegung der Standorte von Demontagefabriken werden die Materialflussströme des Kreislaufwirtschaftssystems wesentlich bestimmt. Somit sind bei der Standortplanung, die der Demontage vorgelagerten und nachgelagerten Akteure zu berücksichtigen [SPE-02c]. Die *Kapazität* einer Demontagefabrik definiert die Anzahl der Demontageobjekte die in einer Betrachtungsperiode auf Basis des verfolgten Demontageziels und des festgelegten Demontageumfangs demontiert werden können [HES-01a].

3.4.1.2 Planung Mikro-Ebene

Die Entwicklung und Anwendung von Verfahren zur *Gruppenbildung* auch Klassifikation genannt, mit dem Ziel eine Menge von Demontageobjekten in einer überschaubaren Anzahl von Gruppen oder Klassen dergestalt einzuteilen, dass ähnliche Demontageobjekte derselben und unähnliche Demontageobjekte dagegen verschiedenen Gruppen angehören hat sich im Bereich der Demontageplanung bewährt [HEN-96], [WER-96], [WET-01].

Das *Organisationsprinzip* von Demontagefabriken beschreibt in Anlehnung an BULLINGER [BUL-01] die Form der räumlichen und zeitlichen Zusammenfassung von Arbeitskräften und Demontagebetriebsmitteln.

Der Materialfluss bezeichnet die Bewegung stofflicher Güter innerhalb eines vorgegebenen räumlichen Bereich [BUL-01]. Das *Materialflussprinzip* beschreibt die Organisation des Materialflusses. Grundsätzlich kommen sowohl für den Transport von Demontageobjekten zum Demontagearbeitsplatz oder -station als auch für den Abtransport der Demontageerzeugnisse und deren Sortierung und Lagerung zentrale und dezentrale Strukturen in Frage [OHL-03], [WES-01].

Das *Layout* beinhaltet die grafische Darstellung räumlicher Anordnungsformen von Funktionseinheiten (Demontagebetriebsmitteln) unter Berücksichtigung der räumlichen und prozessspezifischen Gegebenheiten [AGG-90].

Demontagebetriebsmittel sind alle Dinge mit Arbeitsvermögen, die bei der Demontage mittelbar oder unmittelbar zum Einsatz kommen [HEN-96]. Sie können analog zu VDI 2815 in Mess- und Prüfmittel zum Erkennen sowie Demontagebetriebsmittel für das Handhaben, Trennen und Sonderverfahren sowie Betriebsmittel zum Lagern und Fördern eingeteilt werden [VDI-2815].

Demontageprozess ist die Gesamtheit aller Arbeitsabläufe und Veränderungen materieller, energetischer und informationstechnischer Art im Demontagesystem [SPU-97]. Ein Demontageprozess wird determiniert durch das Zusammenwirken von Demontageobjekt, Demontageverfahren und Demontagebetriebsmittel.

Demontageverfahren sind Verfahren zur Unterstützung und Durchführung von Demontageprozessen [PER-00]. Sie können in die vier Verfahrensgruppen Erkennen, Trennen, Handhaben und Sonderverfahren eingeteilt werden [KIM-04a].

Demontageumfang oder Demontagetiefe bestimmt die durchzuführenden Demontageschritte und deren Demontageoperationen für ein Demontageobjekt. Hauptziel ist die Bestimmung des Demontageumfangs, der den erzielbaren Deckungsbeitrag unter Berücksichtigung

- des Kosten-/Erlösverhältnisses,
- der Absatzmöglichkeiten der Demontageerzeugnisse,
- der Beschaffungsmöglichkeiten für Demontageobjekte,
- der notwendigen Handlungen im Rahmen gesetzlicher Vorgaben und
- der technischen, personellen und logistischen Fähigkeiten der Demontagefabrik maximiert [TRI-96], [WER-96].

Der *Demontageablauf* beinhaltet die zeitliche, örtliche sowie logische Reihenfolge der für die Durchführung der Demontage notwendigen Aufgaben [KIR-94]. Der Demontageablauf ist durch eine Abfolge von Demontageschritten definiert, die aus einer beliebigen

Kombination der vier grundlegenden Demontageverfahrensarten Erkennen, Trennen, Handhaben und Sonderoperation bestehen [KIM-04a]

3.4.1.3 Planungshorizont

Die Planungswerkzeuge können für die Unterstützung der strategischen, taktischen und/oder operativen Planung entwickelt worden sein [HER-03a]. Die *strategische Planung* ist für einen Planungshorizont von 5-10 Jahren ausgerichtet. Dabei werden Strategien zur Schaffung und Erhaltung einer wettbewerbsfähigen und leistungsfähigen Produktion entwickelt. Die Standortplanung ist ein wesentliches Planungselement. Während der *taktischen Planung* mit einem Planungshorizont von 1-5 Jahren erfolgt die Konkretisierung der Strategien. Es werden Entscheidungen über die Leistungsfelder wie dem Demontageprogramm sowie die dafür notwendigen Technologien getroffen [ZÄP-96]. In der *operativen Planung* mit einem Planungshorizont von kleiner als einem 1 Jahr erfolgt die Demontageprogrammplanung, also welche Demontageobjekt in welchen Mengen demontiert werden, die Ablaufplanung, Reihenfolgeplanung und Demontagesteuerung mit der Auftragsveranlassung und Überwachung.

3.4.1.4 Demontageziel

Die Demontage kann als Ziel das Produktrecycling und /oder Materialrecycling verfolgen. Beim *Materialrecycling* erfolgt die sortenreine Gewinnung Materialfraktionen mit dem Ziel der anschließenden Verwertung. Werden Komponenten/Baugruppen bei der Demontage mit dem Ziel der Wiedereinsatzes erzeugt, wird das Ziel des Produktrecyclings verfolgt. Sowohl bei dem Produktrecycling als auch bei dem Materialrecycling wird die Schadstoffentfrachtung als Nebenziel verfolgt [WÖR-99], [SIE-00].

3.4.1.5 Planungsmethoden

Die entwickelten *Planungsmethoden* zur Gestaltung von Demontagefabriken und -systemen können heuristisch, analytisch oder simulativ umgesetzt werden [HER-03c].

3.4.1.6 Planungswerkzeug

Für die softwaretechnische Umsetzung der Planungsansätze, die entwickelte Planungssoftware, können als Komponenten Standardsoftware, wie MS-Access und MS-Excel, Spezialsoftware, wie eM-Plant und AutoMod und Eigenentwicklungen verwendet werden.

3.4.1.7 Datenquellen

Die für die Anwendung des Planungsansatzes erforderlichen Produkt- und Prozessinformationen können von unterschiedlichen *Datenquellen* stammen. Als eine Datenquelle kann auf Expertenwissen zurückgegriffen werden, das in der Regel auf Grundlage von Probedemontagen aufgebaut wurde [OHL-03], aber auch auf Herstellerinformationen [KUR-99], wie die über den Recyclingpass [LCE-03]. Die Bereitstellung der Daten sollte über ein Datenbankmanagementsystem eines Demontageinformationssystems erfolgen [KEI-04].

3.4.2 Überbetriebliche Planung – Makro-Ebene

KRIKKE [KRI-99b] stellt ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell (MILP-Modell) für die Planung eines mehrstufigen Einprodukt Reverse Logistik Netzwerkes vor, bei dem Lieferung und Nachfrage im voraus als ausgeglichen definiert sind. Der Kern seines Modells liegt in dem Konzept der „Bearbeitungs-Route“. Eine „Bearbeitungs-Route“ beschreibt die notwendigen Schritte für die Umsetzung der gewählten Verwertungs-, Verwendungs- oder Entsorgungsalternativen. Eine Menge möglicher „Bearbeitungs-Routen“ wird für jede Verwertungs- und Entsorgungsalternative erzeugt. Wenn eine „Bearbeitungs-Route“ benutzt wird, entstehen variable Kosten in dem Verwertungsstandort und die Transportkosten zwischen den Verwertungsstandorten. Ein Verwertungsstandort muss eröffnet werden, wenn mindestens eine Bearbeitungs-Route ausgewählt wird, die diesen Verwertungsstandort benutzt. Dieses führt zu fixen Kosten, welche zu den variablen Kosten hinzuaddiert werden. Zusätzlich zu den „Bearbeitungs-Routen“ werden „Eingangs-Route“ und „Liefer-Route“ benötigt. Eine „Eingangs-Route“ ist die Verbindung zwischen einem Lieferpunkt (Supply Point) und dem ersten Verwertungsstandort auf der Bearbeitungs-Route. Die Verwendung von „Eingangs-Routen“ lässt variable Transportkosten entstehen. Analog dazu wird der Kunde mit aufgearbeiteten oder aufbereiteten Produkten, Komponenten oder Materialien über eine „Liefer-Route“ beliefert. Durch die Verwendung des Solver LINGO wird die optimale Konfiguration der Eingangs-, Bearbeitungs- und Liefer-Routen gefunden.

LIECKENS und VANDAELE [LIE-02] stellen einen zweistufigen Ansatz für die strategische Auslegung von Reverse Logistics Netzwerken vor. In der ersten Stufe wird ein MILP Modell zur Netzwerkauslegung eingesetzt. Das Modell betrachtet ein Mehrprodukt und ein mehrstufiges Netzwerk unter Berücksichtigung einer Planungsperiode. Das Netzwerk besteht aus potenziellen Standorten für Reparatur, Umschlag, Recycling (Komponentengewinnung, Materialrecycling) und festgelegten Standorten von Mülldeponien und Kunden für Komponenten. Ziel ist es, aus den potenziellen Standorten diejenigen auszuwählen, welche die Transportkosten, fixen und variablen Bearbeitungskosten und Deponierungskosten minimieren. Da MILP Modelle nicht die Durchlaufzeit der Produkte durch das gesamte Netzwerk und somit die damit verbundenen Kosten, wie Lagerkosten und Leerkosten, sowie Unsicherheiten hinsichtlich der Menge und Qualität berücksichtigen können, schlagen die Autoren für die genauere Analyse des Netzwerkes in der zweiten Planungsstufe die Verwendung von Warteschlangen vor. Das mit Hilfe des MILP-Modell geplante Netzwerk wird in ein Warteschlangensystem transformiert. Das Warteschlangensystem ist durch Ankunfts- und Austrittsprozesse in den einzelnen Knoten des Netzwerkes (wie Reparatur- und Demontagestandorte) charakterisiert. Es ermöglicht die Berechnung der Durchlaufzeiten und kann stochastische Schwankungen berücksichtigen.

POCHAMPALLY und GUPTA [POC-03] stellen ein Drei-Phasen Konzept für die Planung eines Reverse Supply Chain vor, um die bei der Planung auftretenden Unsicherheiten hinsichtlich Menge und Terminierung der ankommenden Produkte, unbekannter Anzahl und Qualität der Komponenten in den Produkten, sowie der unsicheren Prozesszeiten bestmöglich berücksichtigen zu können. Für die Netzwerkauslegung werden drei Akteure

angenommen: (1) Sammelzentren, an die die Konsumenten die gebrauchten Produkte abgeben, (2) Aufarbeitungsfabriken und (3) Nachfragezentren für den Verkauf der aufgearbeiteten Produkte. In der ersten Phase werden durch ein MILP Modell die wirtschaftlichsten Produkte aus einer Menge von unterschiedlichen Produkttypen identifiziert. Dabei wird für jedes Produkt der Gewinn maximiert, der sich aus den potenziell entstehenden Materialrecycling- und Komponentenwiederverkaufserlösen sowie die dadurch anfallenden Deponierungs- und Re-Manufacturingkosten ergibt. In der zweiten Phase werden mit Hilfe des Analytic Hierarchy Prozesses (AHP) aus einer Menge von Aufarbeitungsfabriken die vorteilhaftesten ausgewählt. In der dritten Phase wird ein einperiodisches Standortplanungsmodell in Form eines MILP Modells angewandt, welches die Bereitstellungskosten an den Sammelzentren, Transportkosten zwischen den Sammelstellen, Recyclingfabriken und Nachfragezentren, Aufarbeitungskosten, die fixen Kosten der Standorte sowie die Lagerhaltungskosten berücksichtigt. Das MILP bestimmt die kostenoptimale Zuweisung von Produkten und deren Mengen innerhalb des Netzwerks.

KRIKKE et al. [KRI-99a] stellen ein MILP-Modell für die Gestaltung eines mehrstufigen Reverse Supply Chain für langlebige Konsumgüter vor. Das Modell wird an einer Fallstudie der Firma Océ, eines Kopiererherstellers, exemplarisch eingesetzt. Die Studie konzentriert sich auf die Festlegung eines kosteneffizienten Re-Manufacturing. Beim Re-Manufacturing werden die benutzten Kopierer bis zu einer vorgegebenen Tiefe demontiert. Dabei werden defekte Teile entfernt. Anschließend werden aufgearbeitete oder neue Komponenten (mit verbesserter Funktionalität) in den Kopierer montiert. Somit entsteht ein vollständig neuer Typ von Kopierer. Der Reverse Chain besteht aus drei Prozessen (1) Demontage, die zurückkommenden Kopierer werden bis zu einer bestimmten Tiefe demontiert, (2) Aufarbeitung, kritische Komponenten werden überprüft und falls notwendig ausgetauscht und (3) Remontage, das verbleibende Gerüst des alten gebrauchten Kopierers wird durch das Re-Montieren von aufgearbeiteten oder neuen Komponenten zu einem neuen Kopierer. Zusätzlich gibt es noch unterstützende Prozesse wie die zentrale Lagerhaltung, die Vormontage und das Materialrecycling. Während die Anliefer- und die Demontageprozesse fest vorgegeben sind, müssen Standorte und der Güterfluss für die Prozesse Aufarbeitung und Remontage optimiert werden. Das Modell soll die operativen Kosten minimieren.

THIERRY [THI-97] beschreibt ein lineares Optimierungsmodell (LP-Modell) des Entscheidungs-Unterstützungs-Systems REVLOG. REVLOG dient zur Gestaltung von Netzwerken für vorwärts- und rückwärtsgerichtete Materialflüsse. Für gegebene Standorte von Lagern, Produktionsanlagen und Aufarbeitungsanlagen soll der Warenfluss optimiert werden. Dabei wird untersucht, inwiefern es vorteilhaft ist, neue Produkte durch aufgearbeitete zu ersetzen, Produkte aufzuarbeiten oder als Abfall zu entsorgen. Alle Lager, Produktions- und Aufarbeitungsanlagen, außer den Transportkapazitäten, werden als kapazitiert betrachtet. Das Ziel ist die Maximierung des Deckungsbeitrages (DB), wobei sich der DB hier aus Umsatz neuer oder aufgearbeiteter Produkte abzüglich der variablen Bearbeitungs- und Transportkosten errechnet. Das Aufkommen und die Nachfrage des Marktes gilt als gegeben, wobei die Nachfrage nicht vollständig bedient werden

muss. In diesem Falle werden Opportunitätskosten, für den entgangenen Gewinn in der DB-Berechnung berücksichtigt.

BERGER und DEBAILLIE [BER-97] stellen ein Modell für die Erweiterung von bestehenden Produktions-/Distributionsnetzwerken um Demontagezentren vor. Die Verantwortung für die Produktaufarbeitung liegt hier beim OEM Hersteller, der alle Kosten tragen muss. Das Modell wird am Beispiel eines hypothetischen Computerherstellers beschrieben. Das bestehende Distributionsnetzwerk umfasst Fabriken, Verteilzentren und Kunden. In dem erweiterten Netzwerk werden Altprodukte von den Kunden eingesammelt. Die gesammelten Altprodukte werden in Demontagezentren inspiziert und danach in drei weitere Materialströme unterteilt: (1) qualitativ hochwertige Produkte, welche remontiert und an die Verteilzentren zum Wiederverkauf geschickt werden; (2) Produkte, die wiederverwendbare Bauteile enthalten, welche nach der Demontage zur Wiederverwendung an die Fabriken geschickt werden; (3) alle übrigen Produkten werden auf die Deponie geschickt. Jeder Fabrik und jedem Verteilzentrum kann nur eine begrenzte Anzahl an wiederverwendbaren Komponenten zugewiesen werden. Während im Originalnetzwerk die Einrichtungen in Anzahl, Standorten und Kapazitäten festgelegt sind, werden in dem erweiterten Modell weitere Stufen durch die Trennung der Inspektion von der Demontage/Reparatur eingeführt, die Kapazitäten bleiben unbestimmt. Nach der Inspektion werden die ausgesonderten Altprodukte entsorgt. Die wiederverwendbaren Produkte werden dagegen zu den Demontagezentren geschickt werden. Die Autoren schlagen zur Lösung der Problemstellung ein mehrstufiges kapazitiertes MILP- Modell vor.

KRIKKE et al. [KRI-01] entwickeln ein quantitatives Modell zur Planung eines Closed Loop Supply Chain (Forward und Reverse Supply Chain) unter Berücksichtigung von mehreren Produktgestaltungsmöglichkeiten, wie der Modularität, der Remontierbarkeit und der Recyclingfähigkeit. Es wird davon ausgegangen, dass unterschiedliche Produktgestaltungsprägungen unterschiedliche Kosten, wie die durch die Reverse-Supply-Chain entstehenden Transportkosten, verursachen. Unterschiedliche Produktgestaltungsprägungen führen ebenfalls zu unterschiedlichen wirtschaftlichen Verwertungs- und Verwendungsszenarien, die wiederum andere Prozesskosten induzieren. Neben den fixen Kosten für das Eröffnen von Standorten, für die Demontage, die Reparatur, die Inspektion, die thermische Verwertung sowie die Deponierung und den variablen Kosten für deren Betrieb wird der Einfluss auf die Umwelt durch den Energieverbrauch und den entstehenden Abfall berücksichtigt. Es wird nur eine Planungsperiode berücksichtigt, da bei langfristiger Betrachtung von einem konstanten Netzwerkzustand ausgegangen wird. Das Problem wurde als MILP Modell formuliert und anhand der Planung eines europäischen Closed Loop Supply Chains für einen Japanischen Kühlschrankhersteller validiert. Es wurden dabei vier Typen von Produktkonstruktionen untersucht: die traditionelle, die recyclinggerechte, die wartungsgerechte, und wiederverwendbare Produktkonstruktion.

BETTAC et al. stellen in [BET-99] die Ergebnisse des *RELOOP* Projektes, die sog. *RELOOP* Software, vor. Ziel des Projektes war die Entwicklung von Modellen und Methoden für die taktische und operative Optimierung des Rückführ- und Recyclingnetzwerk-Management unter Berücksichtigung von Kosten, Umwelteinflüssen, Gesetzgebung,

Produktgestaltungs- und Recyclingstrategien. Die RELOOP Software besteht im wesentlichen aus vier Komponenten. Die Komponente *RecycleNet* soll die Lücke zwischen dem Endnutzer und den Reverse Logistik Provider schließen. Dazu wurde für den Endnutzer ein internetgestütztes geografisches Informationssystem (GIS) zum Auffinden von End-of-Life Produktmöglichkeiten entwickelt. Die zweite Komponente *ChannelCom* ermöglicht den Informationsaustausch zwischen den Netzwerkpartnern. Dabei wird das Verfolgen der ökonomischen und ökologischen Daten innerhalb der Rückführlogistikkette ermöglicht sowie Gestaltungsregeln für die Rückführlogistik und das Recycling bereitgestellt. Die Komponente *RoutOpt* ermöglicht die Transportwegoptimierung innerhalb des Netzwerkes. Die letzte Komponente *RecyclePro* unterstützt den Recycler in der Planung kosteneffizienter Recyclingstrategien unter Berücksichtigung der induzierten Material- und Komponentenströme, der Demontageprozessspezifikation und der Verkaufserlöse.

JAYARAMAN et al. [JAY-97] haben durch empirische Studien festgestellt, dass die Sammlung gebrauchter Produkte, die Aufarbeitung und die Rückführung zu den Kunden optimal aufeinander abgestimmt werden müssen, damit eine Aufarbeitungsfabrik gewinnbringend betrieben werden kann. Die Autoren stellen ein MILP Modell zur Minimierung der Distributions-, Lager- und Aufarbeitungskosten für die Planung eines Reverse Supply Chain vor. Als Ergebnis des Modells werden die Standorte für die Distributionszentren und Aufarbeitungsfabriken determiniert. Es erfolgt die Zuweisung der Produktklassen aus den verschiedenen Sammelzonen zu den Aufarbeitungsfabriken und die Verteilung der aufgearbeiteten Produkte auf die Kundenzonen. Das Modell wurde unter Benutzung der General Algebraic Modeling System (GAMS) Modellierungssprache implementiert und anhand realer Daten validiert.

JAYARAMAN [JAY-99] analysiert ein logistisches Netzwerk von einem amerikanischen Elektronik-Gerätehersteller. Die Aktivitäten des Herstellers umfassen das Sammeln von gebrauchten Produkten vom Kunden, das Aufarbeiten der Produkte und die Distribution der aufgearbeiteten Produkte. Das Aufkommen von ausrangierten Produkten und die Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten muss dabei nicht ausgeglichen sein. Vielmehr ist der Rückfluss begrenzt. In diesem Netzwerk sollen die optimale Anzahl und Standorte für die Aufarbeitungsfabriken unter der Berücksichtigung des Investments, der Transport-, Bearbeitungs- und Lagerkosten bestimmt werden. Der Autor stellt ein kapazitiertes Mehrprodukt Warehouse Location MILP Modell vor, welches zur Optimierung unterschiedlicher Aufkommen- und Nachfrageszenarien verwendet wird.

FASANO et al. [FAS-02] untersuchen am Beispiel einer Fallstudie einer Reverse Logistics Supply Chain für Computer welche Auswirkungen unterschiedliche End-of-Life Optionen wie das Deponieren, die Aufarbeitung und die Demontage für den Verkauf von Ersatzteilen auf die Kosten-Erlösstruktur des Netzwerkes haben. Die Autoren modellieren das Rückführnetzwerk bestehend aus vier Sammelumschlagzentren, einem zentralen Aufarbeitungs- und Demontagezentrum und 15 Computerklassen mit dem am IBM's Watson Research Center entwickelten Supply Chain Optimierungstool WIT. Das WIT Werkzeug berücksichtigt Transport-, Handhabungs- und Prozesskosten für die jeweilige End-of-Life Strategie, die Nachfragemenge und die Erlöse für aufgearbeitete Computer oder

Komponenten. Es wird ebenfalls ein sog. Ertragsfaktor berücksichtigt. Dieser gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass sich ein funktionsfähiges Teil im Computer befindet. Das Werkzeug determiniert den bestmöglichen Mix der End-of-Life Optionen bei Maximierung des Gewinnes für den Betrieb des Netzwerkes.

HIEBER [HIE-02a], [HIE-02b] zeigt auf, dass Rückführlogistik-Netzwerke nur wirtschaftlich betrieben werden können, wenn diese produktspezifisch geplant werden. Es erfolgte eine Strukturierung der Rückführlogistik-Netzwerke in Systeme und Systemkomponenten und die Beschreibung Ihrer Merkmale und Merkmalsausprägungen. Darauf aufbauend wurde ein allgemeines Beschreibungsmodell für Rückführlogistik-Netzwerke entwickelt. Ferner entwickelt der Autor ein Produktmodell, das eine rückführlogistikrelevante Produkttypisierung vornimmt, sowie eine aufgabenanpassbare Zuordnungssystematik zur Verknüpfung des Produktmodells mit dem Rückführlogistikmodell. Dabei werden die Produktmerkmalskombinationen zu Produktmerkmalsverbänden zusammengefasst und über Auswertungstabellen die Rückführlogistik-Systemkomponententypen abgeleitet. Die entwickelte Methodik wurde am Beispiel der Planung von Kreisläufen für portable Medizingeräte eingesetzt.

HESSELBACH et al. [HES-01b], [HES-03a] stellen das im Rahmen des Stream Projekt (Substance Flow Oriented Closed-Loop Supply Chain Management) mit den Partnern Agfa-Geavert AG und Electrocyling GmbH entwickelte Konzept zur Planung von Closed-Loop Supply Chains vor. Ziel war es, neben der Optimierung der Materialflüsse effiziente Informationsflüsse zu gestalten, um eine optimale Zusammenarbeit zwischen den Kunden, den Herstellern und den Recyclern zu ermöglichen. Die Planung erfolgt auf strategischer und operativer Ebene. Auf strategischer Ebene muss der Hersteller sich für ein Recyclingszenario (z.B. Verwendung, Verwertung) entscheiden. Dabei müssen exogene Einflussfaktoren, wie die aktuellen rechtlichen Rahmenbedingungen und mögliche Recyclingerglöse aus Materialien und Komponenten, berücksichtigt werden. Ferner werden Prognosen über Anfallmengen und Qualität der zukünftigen Demontageobjekte benötigt. Auf Basis der Daten erfolgt die Gestaltung des Netzwerkes mit Hilfe eines Modells für Referenzprozesse der Verwertung und Verwendung. Für den Hersteller werden dabei als Kernprozesse beispielsweise die Distribution und das Ersatzteilmanagement innerhalb des Netzwerkes definiert. Diese Prozesse müssen mit den Prozessen der Recyclingbetriebe, wie der Ersatzteilerzeugung, koordiniert werden. Dieses Referenzmodell dient als Handlungsanleitung für die Gestaltung des stoffstrombasierten Netzwerkes. Auf operativer Ebene erfolgt die Koordination der Produktionsplanung und der Steuerung zwischen dem Hersteller und dem Recycler mit entwickelten OR-Ansätzen, die eine kostenoptimale Festlegung der Stoffströme ermöglichen.

WANG et al. [WAN-03] stellen ein Konzept zur Konfiguration eines dynamischen Green Supply Chains (GSC) durch den Einsatz von Software-Agenten vor. Das Ziel des GSC ist die Minimierung des Verbrauchs an Ressourcen (wie Rohstoffen) und Energie sowie der Umweltverschmutzung. Deswegen wird von einem geschlossenen Kreislauf des Material- und Komponentenflusses von den Recyclern direkt zu den Herstellern ausgegangen. Um eine dynamische Reaktion unter Beachtung der Ziele des GSC zur ermögli-

chen, ist eine viel höhere Integration des Informationssystems als in normalen Supply Chains notwendig. Das Internet und die mobile Agententechnologie stellen die Basis für eine schnelle Konfiguration eines GSC, weil in Echtzeit komplizierte, verteilte und dynamische Aufgaben unter Beachtung sog. „Green Credits“ gelöst werden. Als Agentenarchitektur wurde ein Multi-Agenten-System (MAS) entwickelt, in dem jeder potenzielle Netzwerkakteur, wie der Produzent, der Re-Manufacturer, der Recycler, die Sammelstellen und die Transportdienstleister durch ein Subsystem von Agenten repräsentiert wird. Auf Basis der aktuellen Situation und der Prognosen aller potenziellen Netzwerkakteure wird mit Hilfe des MAS ein Supply Chain konfiguriert. Die Autoren sehen für das entwickelte System Anwendungsfelder sowohl in der kurzfristigen Netzwerkanpassung als auch in der langfristigen strategischen Planung. Das entwickelte MAS kann als Simulationsumgebung zur Untersuchung dynamischen Netzwerkverhaltens für die strategische Entscheidungsunterstützung eingesetzt werden.

KARA et al. [KAR-03] stellen eine zweistufige Vorgehensweise für die Planung eines Recyclingnetzwerks für Weiße Ware vor. Dabei wird von einem bestehenden Recyclingnetzwerk im Ballungsgebiet Sydney, bestehend aus Sammelstellen, Transportdienstleistern, Recyclern und Deponien ausgegangen, welches um eine Demontage- und Aufarbeitungsfabrik erweitert wird. Zur Bestimmung des besten Standortes der Demontage- und Aufarbeitungsfabrik hinsichtlich der induzierten Transportkosten wird im ersten Schritt die Rastertechnikanalyse verwendet. Diese ermittelt Gravitationszentren für die ankommenden Demontageobjekte und legt somit die geografische Lage des Standortes fest. Im zweiten Schritt soll das dynamische Verhalten des Netzwerkes untersucht werden. Dazu wird das neu geplante Netzwerk mit Hilfe der Simulationssoftware Arena modelliert. Aufgrund der Netzwerkkomplexität wurde wegen des möglichen modularen Modelaufbaus von Arena das Netzwerkmodell in die folgenden Teilmodelle gegliedert: Generierung der Demontageobjekte, Zuweisung der Sammelstellen, Umschlagzentren, Demontagefabrik, Aufarbeitungsfabrik und Recycler. Mit Hilfe des Simulationsmodells konnten die wichtigsten Einflussfaktoren, wie Sammlungsstrategie, Transportlose, Lagerhaltungskosten und die Anzahl der wiederverwendbaren Komponenten je Demontageobjekt für das Recyclingnetzwerk von Weißer Ware am Beispiel des Ballungsgebiets Sydney ermittelt werden.

In Tabelle 2 werden die vorgestellten Ansätze für die überbetriebliche Demontagefabrikplanung zusammenfassend dargestellt und hinsichtlich den aufgestellten Klassifikationskriterien bewertet.

bindungstechnik, Materialfraktion, Betriebsmittel und sonstiger Eigenschaften mit dem Verfahren der hierarchischen Clusteranalyse in homogene Gruppen unterteilt. Im Rahmen der Prozess- und Belegungsplanung werden die gebildeten Recyclinggruppen den zur Verfügung stehenden Demontagestationen zugeordnet. Ziel der entwickelten Heuristik ist die Minimierung der Fraktionsbreite, der Anzahl von Verrichtungen und manuellen Betriebsmitteln pro Station sowie deren gleichmäßige Auslastung. Das so geplante System wird als geschlossenes Warteschlangennetz modelliert, wobei die Abbildung von parallelen Stationen nicht möglich ist.

BRÖTE [BRÖ-98] hat ein allgemeines Demontageprozessmodell zur Demontagesystemplanung entwickelt, welches in Demontagestrategie, -ablauf sowie -verrichtungen gegliedert ist. Mit Hilfe dieses Modells werden die Beziehungen zwischen Demontageprozess und -system analysiert und Möglichkeiten zur Gestaltung von Demontagesystemen hinsichtlich des Organisationsprinzips, der Struktur und der Betriebsmittel abgeleitet. Weiterhin werden strategische Betrachtungen zur Stellung von Demontagesystemen im Markt vorgestellt. Die Betrachtungen zur Demontagesystemplanung erfolgen von einem holistischen Standpunkt aus. Es wird keine detaillierte Planungsmethode vorgestellt, sondern ein Hilfsmittel für die strukturierte Durchdringung des Problemfeldes und das Aufzeigen prinzipieller Lösungsansätze.

VON WERDER [WER-96] stellt ein Konzept zur Demontageplanung mittels Gruppierung von Altprodukten vor. Der Autor geht dabei von der Situation aus, dass die Demontage manuell an Einzelarbeitsplätzen erfolgt, an jedem dieser Arbeitsplätze ein großer Produktmix vorherrscht und somit nur geringe Lerneffekte erzielt werden können. Grundlage der Planungen bildet ein entwickeltes Gerätemodell. Basierend auf den im Modell abgelegten Daten erfolgt eine demontageorientierte Gruppenbildung von elektrischen und elektronischen Altgeräten, die ähnliche oder gleiche Demontageverfahren und -reihenfolgen aufweisen. Hierzu wird ein hierarchisches Clusteranalyseverfahren angewandt. Es sollen höhere Losgrößen erreicht werden, die eine Mechanisierung rechtfertigen, eine Arbeitsteilung ermöglichen und beim Demonteur einen Lerneffekt bewirken. Für die gebildeten Altgerätegruppen wird der optimale Demontageumfang sowie -ablauf aus wirtschaftlicher Sicht bestimmt. Dies erfolgt mit Hilfe von Kosten-Erlös-Betrachtungen, wobei der minimale Demontageumfang durch eine vollständige Schadstoffentfrachtung vorgegeben ist.

Im Rahmen des Verbundvorhabens „Industrieller Rückbau von Elektronik-Altgeräten in Kreisläufen“ (IREAK) [IREAK-99], [SCH-00] wurden Methoden und Hilfsmittel für eine kreislaufgerechte Entwicklung von Elektro(nik)geräten entwickelt, ein flexibles Demontage- und Verwertungssystem für kleine und mittelständische Unternehmen konzipiert und prototypisch umgesetzt sowie Lösungen zur informationstechnischen Gestaltung der Kommunikationsbeziehungen in der Kreislaufwirtschaft erarbeitet. Bei der zu entwickelnden Demontageanlage stand die Sicherung der Qualität und die Wirtschaftlichkeit der Verwertung sowie die Flexibilität bezüglich der Produktarten, der Verwertungsebenen und der zu bearbeitenden Massenströme im Vordergrund. Ein konzipierter Modulbaukasten ermöglicht es, die Demontage- und Verwertungsanlage optimal an die jeweilige ak-

tuelle Situation anzupassen und die Demontage unterschiedlicher Produkte (Größe und Gewicht) zu realisieren. Die Qualitätssicherung von Stoffen und Baugruppen erfolgt an spezifischen Arbeitsplätzen (Schadstoffentfrachtung, Sortierung und Prüfung). Die Wirtschaftlichkeit wird durch die Verknüpfung aller Arbeitsplätze durch ein Transportsystem erhöht. Die Entwicklung einer Methode zur Planung und Modellierung eines Demontagesystems ist nicht Gegenstand des Verbundvorhabens. Es werden nur manuelle Demontageprozesse betrachtet.

SCHILLER [SCI-98] stellt eine Methode zur adaptiv-dynamischen Demontagearbeitsplanung vor. Der Ansatz zielt auf die Beherrschung von Unsicherheiten innerhalb der Demontage ab, welche durch unbekannte Altprodukteigenschaften verursacht werden. Die erforderlichen Planungsdaten werden mittels strukturierter Testdemontagen gewonnen und auf ihrer Basis ein stochastisches Demontagenetzwerk generiert. Mit Hilfe dieses Netzwerks wird der wirtschaftlich optimale Demontageumfang und -ablauf ermittelt. Zur Unterstützung des Demonteurs wurde die Methode in ein Demontage-Informationssystem (DAISY) umgesetzt, welches in Abhängigkeit vorgefundener Altprodukteigenschaften den Demontageablauf dynamisch adaptiert. Der vorgestellte Ansatz ist auf eine Optimierung des Ablaufs manueller Demontagen auf Arbeitsplatz- bzw. Systemebene gerichtet. Die Auslegung von Arbeitsplatz und Demontagesystem und ihre Reorganisation ist nicht Gegenstand der Betrachtungen.

WIENDAHL et al. stellen in [WIE-98], [WIE-99] ein Ansatz zur Planung und Steuerung von Demontagesystemen vor. Der Ansatz geht von vorhandenen Betriebsmitteln für die manuellen, teilautomatisierten und automatisierten Demontageprozesse aus. Zielsetzung ist die Belegungs- und Prozessplanung der Demontagebetriebsmittel unter Berücksichtigung der drei Grundformen des Einzelarbeitsplatzes, der Demontagezelle und der Montagelinie. Mit Hilfe der Ablaufsimulation werden unterschiedliche Einlastungsstrategien zur Durchsatzverbesserung der geplanten Demontagesysteme getestet. In [WIE-01c] stellen WIENDAHL et al. unterschiedliche prototypisch mit Hilfe des Planungsansatzes umgesetzte manuelle und automatisierte Demontagesysteme aus Industrie und Forschung vor. Die eingesetzten Betriebsmittel und Systemarchitekturen werden beschrieben.

DIETERLE [DIE-95] hat eine Methodik für die Einbindung von Recyclinganforderungen in die Produktentwicklung entwickelt. Ziel der Methode ist die simultane Entwicklung von Produkt, Produktionssystem, Recyclingkonzept und Demontagesystem durch ein interdisziplinäres Projektteam. Der Ansatz von DIETERLE gliedert die Planung von Demontageanlagen in die beiden Phasen der Demontageprozessplanung und der Demontagestrukturplanung. In der Demontageprozessplanung erfolgt die geeignete Auswahl der Prozesse für die Demontage. Eine ABC-Klassifizierung von Recyclinggruppen (A-Baugruppen für Wiederverwendung, B-Baugruppen für Schadstoffaufbereitung und C-Baugruppen für stoffliche Verwertung) bietet eine Hilfe bei der Auswahl der geeigneten Trennverfahren. Beispielsweise sollten A-Baugruppen aufgrund des Wiederverwendungsziels zerstörungsfrei demontiert werden. Daran schließt sich der Planungsprozess für die Detaillierung der Vorrichtungen und Werkzeuge an. Die Strukturplanung unter-

scheidet zwei Ebenen, die des Demontagesystems und die der dazugehörigen Teilsysteme. Bei der Planung des Demontagesystems findet die Aufteilung des gesamten Demontageumfanges auf verschiedenen Demontagestufen statt. Die Planung der Teilsysteme definiert Demontageumfänge, Demontagestationen, Stationsverkettung und Bereitstellung auf den einzelnen Planungsebenen.

ECKERTH stellt in [ECK-01] eine Methode zur Planung von hybriden Demontagezellen vor, die in die drei Phasen: (1) Konfigurationsplanung, (2) Aktionsplanung und (3) Planung des Layouts und der Anordnung unterteilt wird. Ausgehend von der Demontageaufgabe werden innerhalb der Konfiguration die zur Demontage der Altgeräte erforderlichen Betriebsmittel ausgewählt. Das Ziel ist es, eine Liste mit den benötigten Betriebsmitteln zu erstellen. Es werden die Roboter, die Steuerung, die Sensorik und die Effektoren geplant. In der Aktionsplanung werden sämtliche zur Erfüllung der Aufgabenstellung erforderlichen dynamischen und kinematischen Vorgänge in der Demontagezelle bestimmt. Das Ziel dieses Planungsschrittes ist die Festlegung der Arbeitsvorgänge und ihrer Reihenfolge. Hierbei werden die Betriebsmittel mit einzelnen Aktionen logisch verknüpft. Während der Layoutplanung werden die geplanten Elemente des Systems zu Stationen zusammengefasst und unter Berücksichtigung der Gebäuderestriktionen angeordnet. Jede Planungsphase wird durch entwickelte Softwarekomponenten unterstützt. Die Methode wurde bei der Planung einer Demontagezelle zur automatisierten Demontage von Fernsehern angewandt und validiert.

HENTSCHEL [HEN-96] stellt eine Planungsmethode für die Organisation von Demontagesystemen vor. Demontageinseln werden als besonders vorteilhafte Organisationsform für die Demontage identifiziert, da sie die Vorteile der Verrichtungs- und Objektorientierung kombinieren und somit sehr flexibel auf die existierenden Unsicherheiten des Demontageobjektspektrums und des Absatzmarktes für Demontageerzeugnisse reagieren können. HENTSCHEL unterteilt die Planung in eine prädiktive und eine reaktive Komponente. Die prädiktive Planung dient zur Bereitstellung von Demontagesystem-Alternativen sowie der schnellen Bewertung und Auswahl einer Alternative unter der Berücksichtigung angenommener Unsicherheiten. Es wird ein Algorithmus zur Fuzzy-Clusterbildung vorgestellt, der die Einteilung der Demontageobjekte in homogene Gruppen durchführt und somit die Anzahl erforderlicher Demontageinseln auf Basis von Altprodukteigenschaften ermittelt sowie die notwendigen Demontagefunktionen bestimmt. Die reaktive Planung beginnt, falls Abweichungen von den zuvor getroffenen Annahme eintreten. Diese Planung berücksichtigt die zusätzlichen Informationen, die beim Betrieb des Systems gewonnen werden.

PERLEWITZ [PER-00] beschreibt in seiner Arbeit eine Vorgehensweise der Planung des Demontagefabrikbetriebes. Ausgangspunkt bildet die Systematisierung von Kriterien für die Planung von Demontagefabriken und somit die Darstellung des möglichen Lösungsraums für Demontagefabriken. Die Planung der Demontagefabrik wird in die drei Phasen Zielplanung, Konzeption und Realisierung unterteilt. Die Zielplanung beinhaltet die Informationserhebung sowie die Bestimmung und Gewichtung der Ziele. Die Phase der Konzeption unterteilt sich in Ablauf- und Auslegungsplanung. Diese Phasen der Planung

werden iterativ durchlaufen. Dabei werden auf der Fabrikebene das Organisationsprinzip, der Materialfluss und das Layout definiert. Um das dynamische Verhalten der Demontagefabrik zu analysieren und zu bewerten, wird das Konzept der Demontagesimulation vorgestellt. Ein Planungsschwerpunkt wird auf die wirtschaftliche Verfahrens- und Betriebsmittelauswahl gelegt. Auf Basis einer generierten Demontageablaufstruktur wird eine Heuristik zur Reduzierung der Leerkosten geplanter Betriebsmittel vorgestellt. Diese findet eine wirtschaftliche Zuordnung von Demontageverfahren und Betriebsmitteln zu den Demontageverrichtungen. Mit Hilfe der entwickelten Software „Demosis“ werden alternative Ablaufpläne generiert und bewertet.

PENEV [PEN-96] stellt einen allgemeinen Ansatz zur Demontagesystemplanung vor. Die Planung erfolgt in den vier Schritten der (1) Analyse der Produktstruktur, der (2) Demontageprozessplanung, der (3) Demontagesystemplanung und der (4) Implementierung. Ausgehend von der Altproduktanalyse, die die verwendeten Werkstoffe, die Struktur und die Bauteile beschreibt, werden mit Hilfe von And/Or-Graphen die möglichen Demontagealternativen generiert. Hierbei bestimmen schadstoffhaltige Bauteile und Baugruppen den Mindestumfang und wertstoffhaltige Bauteile und Baugruppen den gewünschten Demontageumfang. Die generierten Demontagealternativen werden hinsichtlich ihres Demontageaufwandes bewertet und der wirtschaftliche Demontageumfang sowie Demontageablauf abgeleitet. Aufbauend auf dem Demontageablauf erfolgt mit Hilfe von morphologischen Kästen die Festlegung geeigneter Betriebsmittel. Die Demontagesystemplanung beginnt mit dem Schritt der Konzepterarbeitung. Hierbei werden erste Layoutlösungen erarbeitet und somit die Anordnung und die Betriebsmittel der Demontagestationen festgelegt. Nach Iterationsschleifen wird aus dem vorläufigen ein endgültiges Layout. In der sich anschließenden Phase „Detailliertes Design“ werden die Werkzeuge, Vorrichtungen und Maschinen konstruiert. Hier findet die Kontrolle auf Vollständigkeit statt. In der letzten Phase wird das Demontagesystem in den betriebsbereiten Zustand überführt. Der Ansatz wurde am Beispiel der Planung eines Systems für die Demontage von Kühlschränken angewandt. Das Inselprinzip hat sich hierbei als beste Organisationsform erwiesen.

KAHMEYER [KAH-95] entwickelt einen Ansatz für die Planung automatisierter Demontagesysteme. Es werden technische, organisatorische und wirtschaftliche Voraussetzungen für die automatisierte Demontage systematisiert und Automatisierungshemmnisse aufgezeigt. Aufbauend auf diesen Hemmnissen werden alternative Gesamtsysteme konzipiert und Grundlagen für die Auslegung der Systeme erarbeitet. Es werden Lösungen für Einplatz- und Mehrplatz-Demontagesysteme, Bereitstellungs-, und Handhabungssysteme vorgestellt sowie Anforderungen an zu entwickelnde Verfahren und Werkzeuge für die automatisierte Demontage abgeleitet. Für diese Anforderungen werden Lösungen entwickelt und teilweise erprobt. So werden beispielsweise verschiedene Greiferprinzipien für die automatisierte Demontage von elektronischen Bauelementen; z.B. IC's oder Elektrolytkondensatoren, verglichen. Die vorgestellten Erkenntnisse und Verfahren wurden in einer prototypischen Demontagezelle für eine Komplettdemontage von Telefonen umgesetzt.

TRITSCH [TRI-96] stellt ein Konzept zur Unterstützung der Planung und Durchführung einer automatisierten Altprodukt demontage vor. Dieses basiert auf einem integrierten Informationsmodell, welches auf Basis von Testdemontagen entwickelt wurde. Mit Hilfe des Informationsmodells bestehend aus dem Strukturmodell, Prozessmodell, Systemmodell, Geometriemodell und Marktmodell werden der wirtschaftliche Demontageumfang und günstige Demontageabläufe ermittelt. Das Strukturmodell beinhaltet die Sichtweise auf das Altprodukt und dessen Aufbau. In dem Prozessmodell werden die Demontagemöglichkeiten und ihre Reihenfolgerestriktionen abgebildet. Das Systemmodell beschreibt das zur Verfügung stehende Demontagesystem und dessen hierarchischen Aufbau. Zur Unterstützung der Demontageplanung erfolgt eine Strukturierung der Aufgaben automatisierter Demontagesysteme sowie die Entwicklung von Systemkomponenten für die automatisierte Demontage. Zur Unterstützung der Demontageplanung und -durchführung wurde die prototypische Software „DEPLUS“ entwickelt.

MEEDT [MEE-98] stellt eine Methode zur Realisierung einer effizienten Demontage vor, indem Produktgestaltung, Demontageplanung und Demontagetechnologien zusammen betrachtet werden. Ausgangspunkt bildet die recyclingorientierte Produktanalyse. Hierbei erfolgt eine Produktmodellierung auf Basis von Konstruktionsdaten und gewonnenen Daten aus Probedemontagen. Das Produktmodell bildet die Grundlage für die Ermittlung des wirtschaftlichen Demontageumfangs und -ablaufs. Mit Hilfe des entwickelten Softwaresystems „DisPlay“ werden durch Simulation von Recycling- und Demontagealternativen Aussagen über wirtschaftliche Demontage- und Recyclingstrategien eines Produktes gewonnen. Die primären Bewertungskriterien sind die potentiellen Kosten und Erlöse alternativer Demontagesequenzen sowie den resultierenden Verwertungsmöglichkeiten. Bei der Simulation werden alle technisch möglichen Demontagekombinationen berücksichtigt. Die Software besteht aus der graphischen Benutzeroberfläche und den entwickelten Bewertungs- und Optimierungsalgorithmen. Die Planungsmethode kann sowohl zum Zeitpunkt der Produktkonstruktion als auch am Ende der Nutzungsphase eingesetzt werden.

ZUSSMAN [ZUS-00] stellt eine Methode für die Entwicklung und Implementierung eines adaptiven Prozessplaners für automatisierte Demontagesysteme vor. Seine Methode verfolgt das Ziel, schnell auf unvorhersehbare Produktzustände und unsichere Demontageprozesse reagieren zu können. Für die Prozessplanung und -modellierung werden Petri-Netze verwendet, da sie dynamisches Verhalten visualisieren können sowie Demontageprozesse und die dazugehörigen Demontageressourcen für die qualitative temporäre Analyse zusammen darstellen können. Es wird ein Algorithmus zur adaptiven Planung eingeführt, der auf Basis der aktuell ausgeführten Demontageprozesse und der aktuell identifizierten Produktzustände unter Berücksichtigung von entstehenden Kosten die Demontageprozessplanung durchführt. An einem System zur automatisierten Demontage von Autoradios wurde die auf Petri-Netzen basierende Methode zur Demontageprozessplanung validiert. Der adaptive Prozessplaner kann die Leistungsbewertung von Demontagesystemalternativen durch eine entsprechende Kopplung der Petri-Netze mit einem Simulationsmodell unterstützen.

GÜNGÖR [GÜN-99] stellt einen Algorithmus vor, um einen Vorranggraphen aus grafischen Produktmodellen abzuleiten. Er dient der automatischen Erstellung einer Demontagesequenz mit einem modifizierten Branch-&Bound Algorithmus. Darüber hinaus wird eine Heuristik zur Zuweisung von Demontageaufgaben zu Arbeitsstationen beschrieben. Ziel ist es, den Bedarfs nach Demontageerzeugnissen zu erfüllen und die Kapazitätsauslastung zugewiesener Demontagestationen zu maximieren. In [GÜN-01] wird sein Ansatz für die Demontagebandaustattung dahingehend erweitert, dass Wahrscheinlichkeiten für das Fehlschlagen von Demontageprozessen Berücksichtigung finden. Technologische Restriktionen, die sich durch die für die Prozesse erforderlichen Betriebsmittel ergeben, werden nicht betrachtet. Zur Validierung des Lösungsansatzes wird der Einsatz eines Simulationswerkzeuges vorgeschlagen.

MASCLE [MAS-02] stellt eine Methode zur integrativen Planung von Demontage- und Montagelinien vor. Der Autor geht davon aus, dass die erreichbare höhere Wertschöpfung bei der industrialisierten Demontage für das nachgelagerte Re-Manufacturing im Vergleich zum reinen Materialrecycling dazu führen wird, dass Systeme sowohl für Montage- als auch Demontageprozesse genutzt werden. Es wird ein Werkzeug vorgestellt, welches bei der Planung von Montage-/Demontage-Linien unterstützt. Kernstück stellt ein Algorithmus dar, der die beste Demontagesequenz für eine Baugruppe eines Produktes erzeugt. Dies erfolgt in Abhängigkeit des verfolgten Demontageziels, wie der Wartung, der Aufarbeitung oder des Materialrecyclings und unter Berücksichtigung der vorhandenen Montage- und Demontagetechnologien. Ausgangspunkt bildet ein Produktmodell, welches im wesentlichen aus Geometrieinformationen der einzelnen Bauteile sowie deren Verbindungsarten besteht. Ergebnis ist die kostenminimale Demontagesequenz unter Berücksichtigung von zerstörenden und nicht zerstörenden Demontageprozessen.

Der in der Arbeit von HUBER [HUB-01] vorgestellte Ansatz verfolgt eine systematische, marktorientierte Planung von Demontagefabriken zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von Demontageprozessen. Der Autor stellt hierbei zwei Grundforderungen auf. Der Planungsprozess muss durch die Demontageerzeugnisse bestimmt werden und die Unsicherheit sowie Komplexität innerhalb der Demontage müssen reduziert werden. Es werden Demontagesysteme, -prozesse und -strategien sowie deren Aufbau- und Ablauforganisation vorgestellt und für die Planung klassifiziert. Ausgehend von diesen allgemeinen Grundformen wird eine Demontagefabrik-Betriebstypologie unter Berücksichtigung der überbetrieblichen Organisationsformen abgeleitet. Diese Betriebstypologie bildet die Grundlage für die Entwicklung eines morphologischen Kastens für die strategische Planung von Demontagefabriken.

In Tabelle 3 werden die vorgestellten Ansätze für die innerbetriebliche Demontagefabrikplanung zusammenfassend dargestellt und hinsichtlich den aufgestellten Klassifikationskriterien bewertet.

schen der Gestaltung des Recyclingnetzwerkes (überbetriebliche Ebene) und das in das Netzwerk zu integrierende Demontagesystem durch den Datenaustausch zwischen den Planungsebenen. Es wird von iterativen Optimierungsschleifen zwischen den Planungsebenen ausgegangen. Für die Gestaltung der überbetrieblichen Ebene wurde ein Stoffstrommodell für ein Netzwerk aufgestellt. Innerhalb der Systemgrenzen des Stoffstromnetzwerkes werden die Geräte von den Quellen angenommen und zu den Demontageunternehmen transportiert, die Altgeräte demontiert sowie die entstehenden Demontagefraktionen an Recyclingunternehmen verkauft. Aufbauend auf dem Stoffstrommodell wurde ein LP-Modell mit dem Ziel der optimalen Allokation der Stoffströme im Netzwerk entwickelt. Es werden die variablen Kosten und Erlöse, wie Annahmeerlöse, Transportkosten, Sortierkosten, Zerlegekosten, Verwertungserlöse und Beseitigungskosten der Demontagefraktionen berücksichtigt. Nachdem das Altgerätespektrum den Demontagestandorten zugewiesen wurde, erfolgt die innerbetriebliche Planung der Demontagesysteme in den folgenden vier Schritten. Bei der (1) Geräteklassifikation erfolgt die Klassifizierung des Produktspektrums anhand produktspezifischer Daten mit Hilfe der Clusteranalyse. Ergebnis sind Referenzgeräte die homogene Eigenschaften bezüglich Fraktionsentstehung, Demontagezeiten und Betriebsmittel besitzen. Dieser schließt sich die (2) Systemauslegung an. Dazu wurde eine statische Berechnungsmethode entwickelt, die die Anzahl der notwendigen Demontageplätze bestimmt. Dies geschieht auf Basis der definierten Referenzgeräte mit den zugehörigen Demontagezeiten der manuellen Demontageprozesse. Für die Strukturierung der Demontearbeitsplätze wurden entkoppelte Fließsysteme angenommen. Die Zuweisung von Demontageoperationen zu den Stationen wird durch eine spezielle Heuristik unterstützt. Danach ist die grobe Struktur des Demontagesystems festgelegt. Mit Hilfe der geschlossenen Warteschlangen erfolgt die (3) Systemanalyse dieses Systems. Nach positiver Systemanalyse erfolgt die detaillierte (4) Simulation.

HANSEN stellt in [HAN-00a], [HAN-00b] das an dem Fraunhofer IML entwickelte Drei-Phasen-Konzept der Zieldefinition, Systemanalyse und Modellentwicklung zur Gestaltung von Reverse Logistic Networks vor. Für die Systemanalyse wurde ein Referenzmodell für die Modellierung der relevanten Prozesse eines End-of-Life Netzwerkes entwickelt. Es werden Transferprozesse wie das Sammeln, Transportieren, Umschlagen oder Lagern und Transformationsprozesse wie die Demontage, Aufarbeitung und Entsorgung unterschieden. Während der Phase der Modellentwicklung erfolgt die Neu- oder Anpassungsplanung von Recyclingnetzwerken mit Hilfe des entwickelten Planungswerkzeugs *EDS-Rlog*. Das Werkzeug unterstützt die Gestaltung von kostenoptimierten Rückführ-, Demontage- und Recyclingstrategien. Das Anfallpotenzial an den Sammelstellen bildet dabei die Basis für die Dimensionierung des Rückführsystems und des Layouts der Demontage, Aufarbeitungs- und Aufbereitungsfabriken. Während des Planungsprozesses werden die strategische, taktische und operative Planung unterschieden. Während der strategischen Planung wird das Netzwerk hinsichtlich der Kapazitäten und Funktionen der Sammelstellen und der Recyclingfabriken determiniert. In der taktischen Planung erfolgt die Zuweisung der erforderlichen Transportmittel. Die operative Planung weist Aufgaben/Prozesse den Transport- und Betriebsmitteln zu. Die Planungsmethoden, welche in das Werkzeug implementiert wurden, konnten während einer Vielzahl von durch-

geführten Industrieprojekten validiert werden. Sie stellen Planungsheuristiken dar und führen somit nicht unbedingt zu einem Optimum.

In Tabelle 4 werden die vorgestellten Ansätze für die integrierte Demontagefabrikplanung zusammenfassend dargestellt und hinsichtlich den aufgestellten Klassifikationskriterien bewertet.

		Klassifikationskriterien																										
		Planung: Makro-Ebene		Planung: Mikro-Ebene								Planungs-Horizont		Demontageziel	Planungsmethoden		Planungswerkzeug		Datenquellen		Produktkategorie nach WEEE							
Ansätze		DF-Standorte	DF-Kapazitäten	Gruppenbildung	Organisationsprinzip	Materialflussprinzip	Layout	Demontageverfahren	Demontagebetriebsmittel	Demontageumfang	Demontageprozess	Demontageablauf	strategische Planung	taktische Planung	operative Planung	Produktrecycling	Materialrecycling	heuristisch	analytisch	simulativ		Standardsoftware	Spezialsoftware	Eigenentwicklung	Expertenwissen	Probedemontagen	Herstellerinformationen	Datenbanksystem
		[HAN-00]	●	●	○	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	●	○	○	●	○
	[WAL-03]	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	●	○	●	●	●	○	4
Legende:		● berücksichtigt									● teilweise berücksichtigt									○ nicht berücksichtigt		k.A. keine Angaben						

Tabelle 4: Bewertung der Ansätze – Integrierte Demontagefabrikplanung

3.4.5 Simulationsgestützte Planung

OHLENDORF et al. stellen in [OHL-03] ein Konzept zur simulationsbasierten Planung von Demontagesystemen vor. Die simulationsbasierte Planung erfolgt in sechs Schritten. Zuerst werden die Altgeräte mit Hilfe der Clusteranalyse zu homogenen Gruppen zusammengefasst. Im zweiten Schritt wird das System mit einer statischen Berechnungsformel dimensioniert. In dem sich daran anschließenden Schritt der Strukturierung stehen acht Typen von Demontagesystemen für eine nach dem Objektprinzip orientierten manuellen Demontage zur Verfügung. Diese Typen unterscheiden sich im wesentlichen in der Organisation des Materialflusses und der Fraktionssortierung. In dem vierten Schritt wird das Demontagesystem mit Hilfe des Simulationswerkzeuges eM-Plant modelliert. Dazu wurden spezielle Benutzeroberflächen entwickelt, die bei entsprechender Konfiguration die automatische Modellgenerierung ermöglichen. Dabei wird auf die Ergebnisse der vorherigen Phasen zurückgegriffen. Weitere notwendige Daten wie Demontagezeiten und -sequenzen, Demontagewerkzeuge, entstehende Fraktionen werden über eine Schnittstelle aus dem Werkzeug aus ATROID (Assesment Tool for Recycling Oriented Design) in des Modell importiert. Der Modellierung schließt sich die

ling Oriented Design) in des Modell importiert. Der Modellierung schließt sich die Simulation, also Experimentdurchführung und Bewertung der Demontagesystemalternativen, an.

LIMAYE et. Al. [LIM-99] und CHAUDHRI [CHA-00] haben unter Verwendung des Simulators ARENA für Elektroaltgeräte Schnittstellenmodule sowie demontage- und verwertungsspezifische Logikmodule entwickelt. Mit den entwickelten Logikmodulen können die Aktivitäten der Lagerung, des Prüfens, der Demontage, des Shredderns und Sortierens modelliert werden. Der Planer wählt aus einer Menüleiste die Module aus, konfiguriert sie und platziert sie in das zu planende Demontagelayout. Des weiteren wurde zur Analyse der Demontagekosten- und Erlösstruktur für eine geplante und modellierte Demontagefabrik auf Basis des Activity-based-Costing Ansatzes, ein Aktivitätskostenmodul für den Simulator ARENA entwickelt. Es werden variable und fixe Kosten identifiziert, Aktivitäten sowie deren Kostentreiber definiert. Bei der Erlösmodellierung werden der Verkauf aufgearbeiteter Produkte, Materialfraktionen und Komponenten berücksichtigt. Die Berücksichtigung automatisierter Betriebsmittel bei der Systemauslegung sind nicht Gegenstand der Betrachtungen.

VALLONE [VAL-02] beschreibt die im Rahmen des DEER2 Projektes gewonnenen Erkenntnisse und Möglichkeiten beim Einsatz eines Virtual Reality (VR) Simulationsmodells zur Planung und Bewertung von Aufarbeitungs- und Verwertungsfabriken für Elektro(nik)altgeräte. Besonders hervorgehoben werden die effiziente Layoutgestaltung und -analyse sowie die hervorragenden Demonstratorfähigkeiten eines VR Simulationsmodells. Aufbauend auf den Erkenntnissen von VALLONE entwickelt LIMAYE [LIM-03] eine VR Modellierungsumgebung für Aufarbeitungs- und Verwertungsfabriken unter Verwendung des Simulators Quest. Die VR Modellierung erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird das Fabrikgebäudemodell entwickelt. Dazu werden die entwickelten VR-Bereichsmodule Demontage, Testen, Komponentenaufarbeitung, Wareneingang und -ausgang, Kunststoff-, Metall- und Glasverwertung zu einem Fabrikmodell zusammengefügt. Im zweiten Schritt werden die Betriebsmittelmodelle für die zuvor modellierten VR-Bereichsmodule definiert. Dazu stehen eine große Anzahl von Referenzobjekten zur Verfügung, die nur noch konfiguriert werden müssen. Dem so erstellten VR Fabrikmodell können neben der graphischen Repräsentation prozessrelevante Daten zugewiesen werden. Unter Berücksichtigung der Prozesszeiten, Ausfallwahrscheinlichkeiten, Kapazitäten, Rüstzeiten und der Materialflussbeziehungen kann das dynamische Verhalten der VR-Aufarbeitungsfabrik analysiert werden.

HAUSER stellt in [HAU-00] einem Modellierungsansatz von Logistikprozessen für Recyclingfabriken unter Verwendung des Simulators DOMISIS-3 vor. Dabei dient eine existierende Recyclingfabrik für Braune Ware als Anwendungsbeispiel für die Modellierung, Simulation und Verbesserung des Materialflusses und der Demontageprozesse. Die Demontage erfolgt manuell und dient der Schadstoffentsorgung sowie der Gewinnung von marktfähigen Materialfraktionen und Komponenten. Ziel der Simulationsstudie ist es, die bestmögliche Auslastung der Demontagefabrik durch Variation der Demontagetiefe und der zugewiesenen Arbeitsbereiche für die Werker zu erhalten. Es wird zwischen den

Demontagetiefen (1) für die Schadstoffentsorgung, (2) vollständige Demontage und (3) optimale Demontagetiefe unterschieden. Die Arbeitsbereiche sind durch ein flexibles Transportsystem verbunden. Die Zeiten für die Demontageprozesse sind durch Zeitaufnahmen in der Fabrik ermittelt worden. Die Modellierung eines Demontageprozesses erfolgt durch das im Simulator DOMISIS-3 entwickelte Demontageelement. Über eine benutzerfreundliche Eingabemaske kann das Demontageelement konfiguriert werden. So können beispielsweise entstehende Fraktionen oder Komponenten sowie deren Qualitätszustände über entsprechende Verteilungsfunktionen definiert werden.

Hesselbach et. al. [HES-02b] stellen die Planung eines Demontagesystems für die Demontage von Fernsehgeräten unter Nutzung des objektorientierten Simulationswerkzeuges eM-Plant vor. Wesentliche Modellelemente sind der Warenein- und -ausgang, die manuellen Demontagestationen, die Fraktions-sortierung und logistische Funktionsträger, wie Förderbänder und Gabelstapler. Diese werden mit Hilfe der vorhandenen Standard-Modellierungsobjekte des Simulationswerkzeuges eM-Plant modelliert. Die Planung, Modellierung und Simulation des Demontagesystems orientiert sich an der allgemeingültigen Vorgehensweise, die sich in die drei Phasen der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung untergliedert. Die Datengrundlage für die simulationsgestützte Planung bilden die im Rahmen des CycleNet-Projektes gewonnenen Informationen über Produktvolumen und -varianten, Demontagezeiten und Demontagesequenzen. Die Modellerstellung erfolgt auf Basis der statischen Berechnung der Kapazitäten für alle notwendigen Ressourcen. Dabei werden Demontagenvolumen und die durchschnittliche Arbeitszeit je Demontageprodukt zugrundegelegt. Ziel der Arbeit ist vor allem, die Leistungsbewertung des geplanten Demontagesystems unter Berücksichtigung von Unsicherheiten zu ermitteln. So wird das Verhalten des modellierten Demontagesystems bei Schwankungen der Demontage-, und Sortierzeiten und der entstehenden Fraktionsmengen untersucht.

SUTHERLAND [SUT-02] stellt eine in SLAM (Simulation Language for Alternative Modeling) modellierte Demontagefabrik vor. Ziel der Simulation ist die Planung der innerbetrieblichen Logistik sowie des Lager- und Bestandmanagements unter Berücksichtigung von Unsicherheiten bzgl. der Menge des Altgeräterückflusses, der Altgerätezustände und der Nachfrage nach Komponenten sowie unterschiedlicher Verkaufsstrategien für die erzeugten Komponenten. Der Focus wird hierbei auf die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Demontagefabrik gelegt. Das Modell besteht aus den beiden Sub-Modellen Demontage und Lagermanagement. Im Sub-Modell Demontage werden die Bereiche Inspektion, Demontage, Eingangs- und Ausgangslager inklusive der notwendigen Logistikelemente, wie Förderbänder und Gabelstapler abgebildet. Das Sub-Modell Lagermanagement modelliert die sich verändernden Marktpreise für Komponenten sowie die drei Verkaufsstrategien: Verkäufe der Bestände am Ende des Tages, am nächsten Tag oder wenn der Marktpreis ein Preisniveau übersteigt. Des Weiteren werden die entstehenden Kosten in den einzelnen Bereichen modelliert, so dass am Ende der Experimentierphase eine Art Gewinn- und Verlustrechnung durchgeführt wird.

SOMA et al. [SOM-03b] verwenden die diskrete ereignisorientierte Simulation, um das Problem der unausgewogenen Materialflüsse, zwischen dem sog. vorwärtsgerichteten

vom Nachfragemarkt bestimmten und dem sog. rückwärtsgerichteten vom Rückführmarkt induzierten Materialfluss in einer Aufarbeitungsfabrik zu untersuchen. Als Hauptgründe werden die Schwankungen der Menge und der Qualität der rückgeführten Produkte, Unterschiede zwischen der Nachfrage nach Neuprodukten und der Lieferung von Altprodukten sowie die sich schnell technologisch weiterentwickelnden Neuprodukte genannt. Das Simulationsmodell wurde mit dem Simulationswerkzeug Quest erstellt und besteht aus einem Produkt- und Prozessmodell. Mit dem Produktmodell werden die einzelnen Komponenten über die Eigenschaften Lebenszeit, Nutzungszeit und Qualität des Altproduktes beschrieben. Je nach Ausprägung dieser Eigenschaften werden in dem Prozessmodell Entscheidungen über den Materialfluss getroffen. Das Prozessmodell bildet die Inspektions-, Reparatur-, und Demontageprozesse als auch die Prozesse für die Herstellung von neuen Produkten mit oder ohne aufgearbeitete Komponenten ab. Die durchgeführten Simulationsexperimente mit einem sehr einfachen Produktbeispiel, nur aus zwei Komponenten bestehend, führen zu dem Ergebnis, dass die Kapazitäten der modellierten Demontageprozesse sowie die gewählten Kriterien für die Wiederverwendung für einen ausgewogenen Materialfluss verantwortlich sind.

In Tabelle 5 werden die vorgestellten Ansätze für die simulationsgestützte Demontagefabrikplanung zusammenfassend dargestellt und hinsichtlich den aufgestellten Klassifikationskriterien bewertet.

		Klassifikationskriterien																				Produktkategorie nach WEEE					
		Planung: Makro-Ebene		Planung: Mikro-Ebene								Planungs-Horizont		Demontageziel		Planungsmethoden		Planungswerkzeug		Datenquellen							
Simulationsbeiträge	[CHA-00]	○	○	○	○	●	●	○	○	◐	○	●	○	●	●	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	k.A.	
	[HAU-00]	○	○	○	◐	●	●	○	○	●	◐	●	○	●	●	●	○	○	●	○	○	○	○	○	○	4	
	[HES-02b]	○	○	○	◐	●	◐	○	○	○	○	●	○	○	●	●	○	○	●	●	●	○	○	●	◐	◐	4
	[OHL-03]	○	○	●	●	●	◐	○	○	●	○	◐	○	●	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	3,4
	[SOM-03b]	○	○	○	○	○	◐	○	○	●	◐	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	k.A.
	[SUT-02]	○	○	○	○	○	●	◐	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	k.A.
	[VAL-02]	○	○	○	◐	●	●	○	○	○	○	◐	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	k.A.
	Legende:		● berücksichtigt										◐ teilweise berücksichtigt														
		○ nicht berücksichtigt										k.A. keine Angaben															

Tabelle 5: Bewertung der Ansätze- Simulation in der Demontagefabrikplanung

3.5 Handlungsbedarf

Die detaillierte Analyse der aktuellen Forschungsansätze verdeutlicht das vorhandene Defizit hinsichtlich eines ganzheitlichen softwaregestützten Planungsansatzes (Bild 20). Es existieren im Wesentlichen nur Ansätze, die sich auf spezielle Planungsaufgaben von Demontagefabriken und -systemen konzentrieren. Unter der Annahme, dass jeder analysierter Planungsansatz für jedes berücksichtigte Klassifikationskriterium einen Punkt, für jedes teilweise berücksichtigte 0,5 Punkte und nicht berücksichtigte 0 Punkte erhält, wären maximal 25 Punkte zu erreichen. In Bild 20 wird mit Hilfe eines Histogramms dargestellt, dass es nur zwei Planungsansätze gibt die zwischen 13 und 14 Punkte erreichen. Die meisten Planungsansätze der ca. 34 erreichen gerade 5 bis 8 Punkte, was ca. 32 % des Maximalwertes von 25 Punkten entspricht.

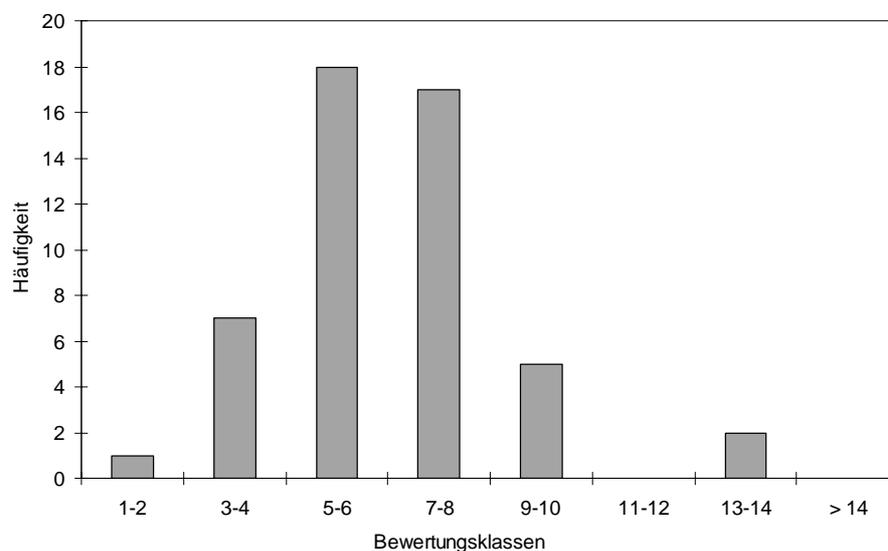


Bild 20: Bewertung der analysierten Forschungsansätze

Die durchgehende Planung von Demontagefabriken mit Hilfe einer integrierten Datenbasis von der Standortplanung bis zur Detailplanung wird von keinem hier vorgestellten Ansatz unterstützt. Das Potenzial der Ablaufsimulation bei die Planung von Demontagefabriken findet nur unzureichend Beachtung. So verwenden von den 51 untersuchten Ansätzen nur 14 weniger als 30% die Ablaufsimulation als Planungshilfsmittel. Diese sind durch die konventionellen Defizite der Ablaufsimulation gekennzeichnet.

- Mehrfachnutzung von Simulationsmodellen ist durch die speziell zugeschnittene Programmierung der meisten Simulationsanwendungen kaum möglich [KAP-03].
- Die Logik und Abbildungsgenauigkeit eines erstellten Modells sind detailliert zu verifizieren und validieren [KRU-01].
- Ein vorzeitiges Simulieren mit unscharfen Daten ist nicht möglich [HIR-00].
- Die Erstellung von Simulationsmodellen ist kostenintensiv und durch ein hohes Investitionsvolumen in Hard- und Software sowie Personalschulungen gekennzeichnet [RAB-03].
- Der Einsatz von Objektbibliotheken mit standardisierten Bausteinen für die Demontagesimulation fehlt meistens [SAD-99].

- Methoden zur Erzeugung von Planungsalternativen für die weitere Simulation fehlen [CIU-03c]
- Algorithmen für die automatische Modellgenerierungen fehlen [COL-02]
- Die Integration der Simulation in Planungs- und Informationssysteme ist unzureichend [FRN-03].

Ziel ist es, eine Methode und ein softwaregestütztes Werkzeug für die Planung von Demontagefabriken unter Berücksichtigung von sowohl manuellen und mechanisierten als auch automatisierten Demontageprozessen bei Beachtung der anderen Akteure des Kreislaufwirtschaftssystems zu entwickeln. Hierbei steht die Erschließung der Potenziale der Ablaufsimulation für die einzelnen Planungsschritte bei gleichzeitiger Reduzierung der aktuellen Defizite im Mittelpunkt. Die einzelnen Anforderungen für die zu entwickelnde simulationsgestützte Planungsmethode sowie des softwaregestützten Planungswerkzeuges werden im folgenden hergeleitet.

Eine einfache und universelle Modellierung stellt eine wesentliche Forderung in der Simulationsanwendung dar [BLE-03]. Über einen modularen Modellaufbau mit übersichtlichen Strukturierungsmöglichkeiten kann die Modellierung der Prozesse des abgebildeten Systems erleichtert werden. Dies setzt einen mehrstufigen Detaillierungsprozess voraus, in dem die Komplexität der Aufgabenstellung schrittweise reduziert wird [HAN-02]. Die effiziente Modellierung von Demontagefabriken kann durch modulare und anpassbare Referenzmodelle für die einzelnen Planungsphasen unterstützt werden, was eine Wiederverwendung der Modelle unter Kosten- und Zeiteinsparungen ermöglicht. Die Entwicklung von Algorithmen für die automatische Modellgenerierung erleichtert die Integration der Ablaufsimulation in ein rechnergestütztes Planungswerkzeug. Auf diese Weise kann die Anwendung der Simulationstechnik auch Nicht-Simulationsexperten ermöglicht werden [HIR-00].

Die fehlende Kopplung der Simulation an Planungs- und Informationssysteme verhindert bisher eine automatische Übernahme der aktuellen Planungs- und Zustandsdaten von dem Demontagesystem. Häufig müssen umfangreiche Datenaufbereitungen und -analysen vorgenommen werden, ehe das verfügbare Datenvolumen den Simulationsanforderungen genügt [FRN-03]. Daher ist die Entwicklung einer Datenstruktur für die durchgehende Modellierung und Simulation in allen Planungsphasen ebenso notwendig wie die Entwicklung einer IT-Architektur, die die Simulationstechnik in ein softwaregestütztes Planungswerkzeug integriert.

Bei der Analyse des dynamischen Verhaltens des Simulationsmodells soll der Anwender dahingehend unterstützt werden, dass Änderungen der Einstellungen in den Modellelementen nicht zu Neuprogrammierungen führen. Über Datentransfers mit externen Programmen müssen die Modelle parametrisierbar sein, um die ständigen Anpassungen der Modellelemente an die geänderte Datenbasis zu erleichtern [BLE-03], [WIE-03]. Dies gilt ebenso für die Forderung nach flexiblen Auswertungsmöglichkeiten [GÜT-98]. Daher ist es erforderlich, für jede Planungsphase Benutzungsschnittstellen-Module zu entwickeln, die den Nicht-Simulationsexperten beim Experimentieren intuitiv leiten.

Bei der Planung von Demontagefabriken und ihrer Systeme müssen eine sehr große Anzahl unterschiedlicher Demontageobjekte mit ihren produkt- und prozessspezifischen Anforderungen berücksichtigt werden. Es ist erforderlich, für jeden Planungsschritt die notwendigen Informationen in aggregierter oder reduzierter Form dem Planer zur Verfügung zu stellen, damit diese für ihn handhabbar werden. Die Clusteranalyse hat sich hierbei für die Planung von Demontagesystemen bewährt [WER-96], [WET-01].

Die Potenziale der Ablaufsimulation, wie die schnelle Analyse und Bewertung mehrerer Systemalternativen, können nur erschlossen werden, wenn die Systemalternativen mit hinreichender Detaillierung geplant wurden. Aufgrund der Vielzahl von zu berücksichtigenden Planungsparametern sowie deren möglicher Ausprägungen und Restriktionen ist der Entwurf von Systemalternativen eine besondere zeitintensive sowie mit vielen Risiken verbundene Planungsphase. Die Verwendung der mathematischen Modellierung zur Generierung von Systemalternativen, die für die weitere simulationsgestützte Planung verwendet werden, ist hierbei ein vielversprechender Ansatz [LOU-02], [HIC-99]. Die mathematische Modellierung kann hierbei auf Basis der vorhandenen Planungsdaten für bestimmte Grundtypen von Demontagesystemen (wie Zellen-, Fließ- oder Inselfemontagesysteme) Systemalternativen erzeugen.

Bei der Planung von Fabriken wird es immer wichtiger, die Kostenentstehung gezielt zu beeinflussen sowie entscheidungsorientierte und verursachungsgerechte Kostennachweise zu ermöglichen. Die simulationsgestützte Entscheidungsfindung unter Berücksichtigung von Kosten, d.h. die Kostensimulation, ist ein Ansatz, der diesen Zielen gerecht wird. Hierbei können die zeitbehafteten Einflussfaktoren auf den Werteverzehr unabhängig von der Realität auch ex-ante sehr genau ermittelt werden [FEL-00], [WER-01]. Ziel muss es daher sein, bereits in der Planungsphase von Demontagefabriken eine Kontrolle der Wirtschaftlichkeit zu ermöglichen sowie Maßnahmen aufzuzeigen, die eine effizientere Nutzung der Ressourcen und eine bessere Ausnutzung von Flexibilisierungspotentialen ermöglichen. Es ist ein Referenzkostenmodell für die Demontage zu entwickeln, das auf Basis kommerzieller Simulationssysteme die Durchführung einer betriebswirtschaftlichen Bewertung der Simulationsergebnisse ermöglicht. Das einzusetzende Kostenrechnungssystem sollte sich verursachungsgerecht an den Prozessen orientieren, die für Demontage von Altprodukten erforderlich sind. Hier ist die Demontage nicht isoliert, sondern in Verbindung mit den vor- und nachgelagerten Prozessen zu betrachten.

In Tabelle 6 wird der identifizierte Handlungsbedarf bei den analysierten Planungsansätzen und Planungswerkzeugen zusammenfassend gegenübergestellt.

Planungsansatz	Planungswerkzeug
Planung von Demontagefabriken unter Berücksichtigung weiterer Akteure des Kreislaufwirtschaftssystems	Werkzeug für die durchgängige Planung von Demontagefabriken von der Standort- und Grobplanung bis zur Feinplanung
Erschließung der Potenziale der Ablaufsimulation und der mathematischer Modellierung in jeder Planungsphase	Modellierungs- und Simulationsdatenstruktur für die automatische Modellgenerierung in jeder Planungsphase
Verursachungerechte Kostenermittlung in den Planungsphasen	Kopplung von Ablaufsimulation und mathematischer Modellierung an Planungs- und Informationssysteme sowie die Integration von kommerziellen Planungswerkzeugen

Tabelle 6: Zusammenfassung des Handlungsbedarfs

4 Integrierte Demontagefabrikplanung

4.1 Planungsablauf

Aufgrund der Komplexität von Fabrikplanungsprojekten ist für eine erfolgreiche Abwicklung eine iterative Vorgehensweise erforderlich. Der Grundsatz der iterativen Planung sieht eine stufenartige Vorgehensweise der Fabrikplanung vor, die zunehmend konkreter wird und Rückwirkungen auf vorherige Planungsschritte berücksichtigt. Damit wird gewährleistet, dass Teilaufgaben in eine den Anforderungen entsprechenden Gesamtlösung überführt werden können. Die stufenartige Vorgehensweise der Fabrikplanung ist in der Praxis und Wissenschaft anerkannt und wird mit geringfügigen Unterschieden von zahlreichen Autoren verwendet [KET-84], [DOL-81], [AGG-90], [SCM-95], [WIE-96]. In Analogie zur Fabrikplanung lässt sich die Planung von Demontagefabriken in die fünf grundsätzlichen Phasen der Vorbereitung, der Standortplanung, Grobplanung der Feinplanung und Realisierung einteilen (Bild 21). In der Phase der Standortplanung bedürfen die Interdependenzen zu den weiteren Akteuren des Kreislaufwirtschaftssystems besonderer Berücksichtigung.

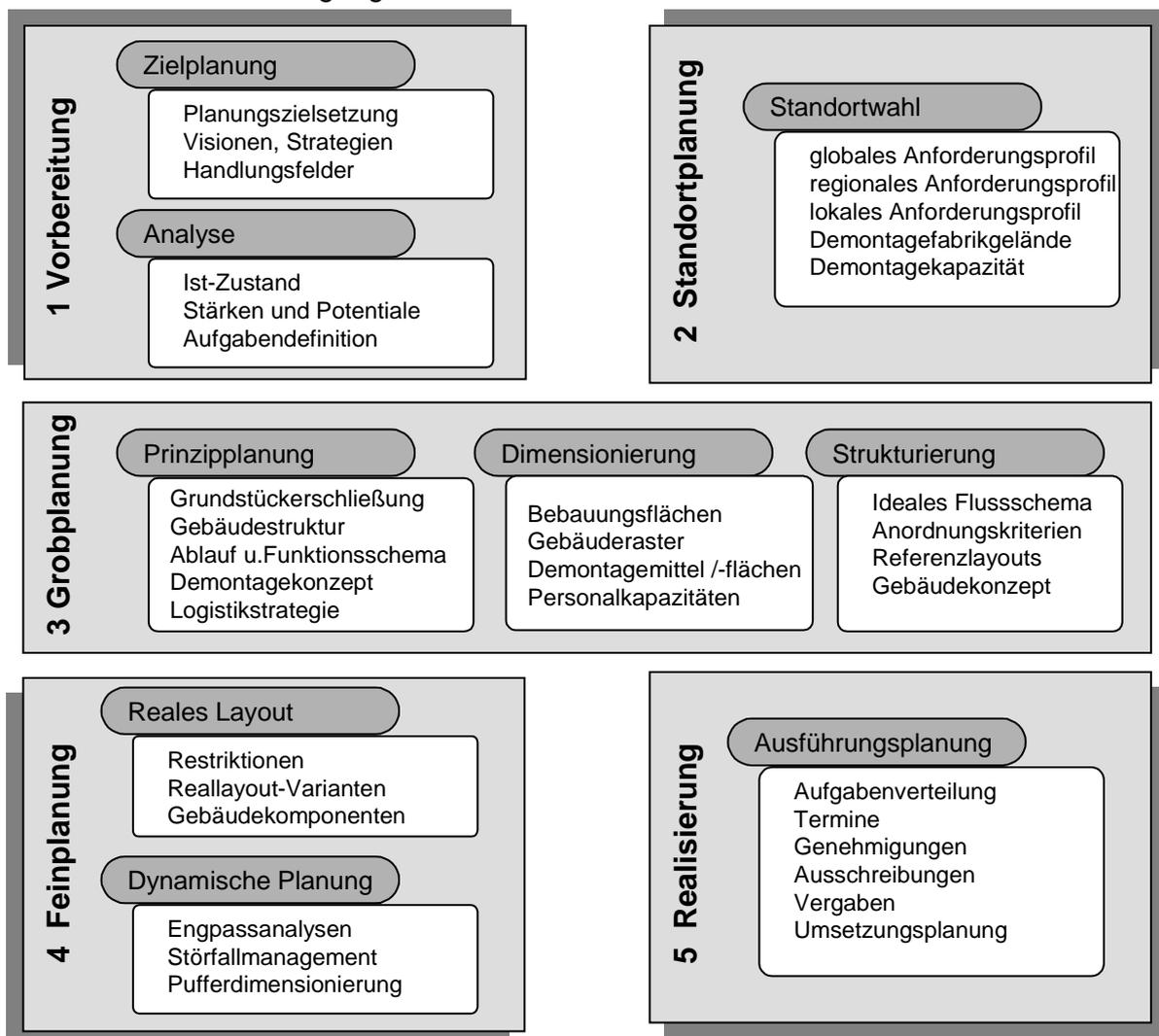


Bild 21: Phasen der Demontagefabrikplanung nach [KET-84], [AGG-90], [WIE-96]

Die *Vorbereitungsphase* beginnt mit der Festlegung der Planungsaufgabe. Bei der Planung von Demontagefabriken können Neu-, Um- sowie Anpassungsplanungen unterschieden werden. Je nach Planungsfall werden die Ablaufphasen der Demontagefabrikplanung mit einem unterschiedlichen Detaillierungsgrad durchlaufen. Bei einer Um- oder Anpassungsplanung wird in der Regel keine Standortplanung durchgeführt. Ziel dieser Phase ist es den Ist-Zustand des Untersuchungsgegenstandes zu analysieren, um Schwächen und Potenziale aufzudecken, und somit die Planungsaufgabe zu konkretisieren.

Die Aufgabenstellungen bei der *Standortplanung* beinhalten grundsätzlich Entscheidungen im Rahmen der strategische Planung und sind somit von wesentlicher Bedeutung für den wirtschaftlichen Erfolg des Unternehmens. Die allgemeinen Schwerpunkte und Zielsetzung der Standortplanung sind:

- Standortbestimmung unter Beachtung von vorteilhaften Beschaffungs- und Absatzmarktbedingungen sowie den Demontagebedingungen (Umfeldbeziehungen)
- Einbindung des Demontagestandortes (Grundstück) in
 - das lokale, regionale und globale Umfeld
 - das Beziehungsfeld der Akteure des Kreislaufwirtschaftssystems
- Sicherung der Verfügbarkeit der notwendigen Standortressourcen sowie deren effiziente Nutzung.

Bei der Standortplanung von Demontagefabriken sind im besonderen Maß die anderen Akteure des Kreislaufwirtschaftssystems zu berücksichtigen, da zwischen den Akteuren und der Demontagefabrik Materialströme induziert werden.

Die Phase der *Grobplanung* ist eine wichtige und zugleich schwierige Phase im Rahmen der Demontagefabrikplanung. Es werden grundsätzliche Lösungen zur Gestaltung der Demontageabläufe und der Demontagestrukturen gebildet. Im Planungsschritt Prinzipplanung werden zunächst die Prozessabläufe geplant. Ergebnis ist eine Folge an Operationen (Demontageschritte, Transportvorgänge, Umschlagvorgänge usw.). Dieses dient als Vorgabe zur Entwicklung alternativer Demontagekonzepte und Logistikstrategien bei gleichzeitiger Auswahl geeigneter Demontageverfahren und mündet in alternativen Strukturvarianten. Im Falle einer Demontagefabrikneuplanung müssen außerdem erste Lösungen für die Erschließung des Fabrikgeländes sowie für die Gebäudestruktur entworfen werden. Im anschließenden Planungsschritt Dimensionierung werden die alternativen Strukturvarianten hinsichtlich der Betriebsmittel, der Flächen, der Transportkapazitäten und des Personals dimensioniert. Im Falle einer Neuplanung werden die Gesamtbebauungsflächen festgelegt und die Gebäudeplanung durch ein Gebäuderaster präzisiert. Im nächsten Planungsschritt Strukturierung wird unter Berücksichtigung von Anordnungskriterien und Flächenangaben ein Ideallayout erstellt, das von einem idealen Flussschema ausgeht, welches auf den in der Prinzipplanung festgelegten Prozessab-

läufen und Strukturen aufbaut. Dieses Ideallayout ist ein von Restriktionen unabhängiges Ergebnis und dient für die sich anschließende Feinplanungsphase als Referenzlösung. Die Phase der *Feinplanung* kann in die beiden Planungsschritte Gestaltung und Detaillierung unterteilt werden. Im Planungsschritt Gestaltung werden schrittweise betriebliche, bauliche und finanzielle Restriktionen und Randbedingungen detaillierter berücksichtigt und somit Reallayouts mit zunehmenden Detaillierungsgrad entwickelt. Basierend auf den Referenzlayouts werden unter Beachtung der realen Flächen- und Raumstrukturen sowie möglicher Organisationsausprägungen Reallayoutvarianten entworfen. Die Reallayouts enthalten den genauen Plan der Ressourcenaufstellung, die genaue Darstellung der Arbeitsplätze mit den entsprechenden logistischen Funktionsträgern, die Verkehrswege sowie Sozial- und Funktionsflächen. Die entwickelten Reallayoutvarianten werden bewertet und eine Vorzugsvariante abgeleitet. Diese Vorzugsvariante wird im Planungsschritt Detaillierung bis zur Erreichung der Qualitätsstufe für die Ausführungsreife weiter geplant. Dazu sind Daten und Lösungsinhalte zu überprüfen, zu vervollständigen, zu präzisieren und gegebenenfalls deutlich zu erweitern, um ein anforderungsgerechtes und störungsfreies Zusammenwirken von Mitarbeitern, Demontagebetriebmitteln und Demontageobjekten an jedem Demontearbeitsplatz im Demontagefabrikkonzept zu sichern

In der *Realisierungsphase* werden die Vorbereitungen zur Ausführung der Fabrikplanungsergebnisse getroffen. Es wird ein Realisierungsplan erstellt, der in Form eines Projektes durchgeführt wird. Der Realisierungsplan legt Zeiten für Ausschreibungen, Mitarbeiterschulungen und Umsetzung einzelner Gewerke fest.

Wesentlich ist, dass die Planungsphasen weder klar voneinander abgegrenzt, noch ausschließlich nacheinander durchzuführen sind. Vielmehr handelt es sich um fließende Übergänge mit einem Ineinandergreifen der einzelnen Stufen und zahlreichen Rückkopplungen im Planungsablauf [MOR-03]. Das iterative Vorgehen bei der Planung wird dabei nicht allein durch den Weg „vom Groben zum Feinen“, sondern auch durch die vielfach wiederkehrenden Schritte „vom Idealen zum Realen“ charakterisiert [KET-84].

AGGTELEKY mahnt an, die Wirksamkeit der Planung zu beachten [AGG-90]. Die Erfahrung zeigt, dass die Steigerung der Planungstiefe einen überproportionalen Anstieg des Planungsaufwandes zur Folge hat. Somit muss der notwendige Planungsaufwand die Wirksamkeit der Planungstiefe rechtfertigen.

4.2 Planungsmerkmale

Die Planung von wirtschaftlichen Demontagefabriken gestaltet sich aufgrund der gleichzeitigen Erfüllung ihrer Service- und Produzentenfunktion als eine große Herausforderung. Demontagefabriken können nach PERLEWITZ [PER-00] als dynamische, sich variabel an Produkten und Prozessen entlang des Produktlebenszyklus ausrichtende flexible Systeme verstanden werden.

Bei der Planung von Demontagenfabriken sind für eine Vielzahl von Planungsmerkmalen Entscheidungen zu treffen. In der Tabelle 7 erfolgt eine umfangreiche Systematisierung der Planungsmerkmale Altprodukt, Angebots- und Absatzmarkt, Fabrik, Organisation

und Verrichtung, Materialfluss sowie ihrer möglichen Ausprägungen. Die Planungsmerkmale stellen nur eine Orientierungshilfe bei dem Planungsprozess dar, erheben jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit und sollen nicht als Planungsansatz verstanden werden. Welche Ausprägungen der Merkmale als vorteilhaft einzustufen sind, hängt im wesentlichen von vorliegenden und zu erwarteten gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technologischen Rahmenbedingungen, den verfolgten Unternehmenszielen sowie den Altprodukteigenschaften ab. So umfassen die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen beispielsweise den Wertewandel der Gesellschaft mit gestiegenem Umweltbewusstsein und die damit einhergehenden gesetzlichen Vorschriften und Verordnungen, z.B. WEEE und das Abfall- und Kreislaufwirtschaftsgesetz. Die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen spiegeln die Situation des Absatz- und Beschaffungsmarktes mit den Preisen, Lieferzeiten und Qualitäten für Altprodukte und Demontageerzeugnisse wieder. Die Unternehmensziele sind von den zu erschließenden Geschäftsfeldern abhängig. Die technologischen Rahmenbedingungen werden unter anderem durch verfügbare Demontageverfahren, Demontagegerechtheit der Altprodukte, sowie die Demontage substituierende Shredderverfahren determiniert. Ferner haben die zu erwartenden Altprodukteigenschaften die nach HENTSCHEL [HEN-96] von der Menge (Zeitpunkt und Ort des Anfalls), den Varianten (konstruktiv bedingte Eigenschaften) und den Zuständen (gebrauchsbedingte Eigenschaften) einen großen Einfluss auf die Demontagefabrikausprägung.

4.2.1 Demontageobjekte

Voraussetzung für die Planung von Demontagefabriken ist die Auswahl und Klassifizierung der zu demontierenden Produkte hinsichtlich Variantenvielfalt und Produktstruktur. Hieraus werden Rückschlüsse auf die Anforderungen an die Demontageprozesse gezogen. Im Falle von Elektro- und Elektronikgeräten bietet es sich an, die gebildeten zehn Produktkategorien aus der WEEE als Referenzgruppen zu verwenden. Da bei der Planung der Demontageprozesse innerhalb jeder Produktkategorie die gleichen Bestimmungen hinsichtlich der geforderten Recycling- und Verwertungsquoten gelten, kann von ähnlichen Demontagetiefen ausgegangen werden. Durch die Festlegung der Produktkategorie und des Produkttyps sind Aussagen über die Produktstruktur möglich, die wiederum in Abhängigkeit des verfolgten Ziels der Demontage (Produkt- oder Materialrecycling) erste Annahmen und Aussagen über die Anforderungen an die Demontageprozesse zulassen.

Planungsmerkmal		Ausprägungsmöglichkeiten				
Altprodukt	Kategorie	Haushalts- großgeräte	Unterhaltung- selekt.	IT- & Tele- kommu.	Haushalts- kleingeräte	
	Struktur	einfache	einfache mehnteilige	komplexe mehnteilige		
Markt	Angebots- markt	lokal	regional	national	international	
	Bindung an Angebots- markt	anonyme Demontage	kooperative Demontage	Hersteller- demontage		
	Absatzmarkt	lokal	regional	national	international	
	Bindung an Absatzmarkt	Demontage auf Bestellung	Demontage auf Lager	On-demand Demontage		
	Art d. Märkte	zyklisch	gleichmäßig	sporadisch		
Fabrik	Standort	innerstädtisch	Stadtrand	„Grüne Wiese“		
	Typ	Ein-Mann- Betrieb	Werkstatt	Kleinfabrik	Großfabrik	Demontage- netzwerk
	Mobilität	fahrbar	transportabel	ortsfest		
Organisation und Verrichtung	Recycling- integration	keine Integration	vorgelagerte Prozesse	nachgelagerte Prozesse	vollständige Integration	
	Arbeitsteilung	Mengen teilung	Artenteilung			
	Organisations- form	Objekt- orientiert	Verrichtungs- orientiert			
	Anordnungs- struktur	Einzelarbeits- platz	Insel	Linie	Ring	Netz
	Demontage- mengen	Einmal- demontage	Kleinserien- demontage	Serien- demontage	Massen- demontage	
	Automatisie- rung	manuell	mechanisiert	automatisiert	hybrid	
	Demontageart	zerstörungs- frei	teilzerstörend	zerstörend		
Materialfluss	Ext. Trans- portmittel	PKW	LKW	Bahn	Schiff	
	Prinzip	stationär	kontinuierlich	synchron intermittierend	asynchron intermittierend	
	Fördermittel	ohne	Gurtband	Hängebahn	FTS	
	M.-Zufluss	zentral	dezentral			
	M-Abtransport	zentral	dezentral			
	M-Sortierung	zentral	dezentral			

Tabelle 7: Morphologischer Kasten für die Planung von Demontagefabriken

4.2.2 Angebots- und Absatzmärkte

Von entscheidender Bedeutung bei der Festlegung der strategischen Rahmenbedingungen bei der Planung einer Demontagefabrik sind die Ausprägungen des Merkmals Markt. Dieses Merkmal lässt sich in die Unterkriterien Angebots- und Absatzmarkt, Bindung an den Angebots- und Absatzmarkt sowie die Art des Angebotes und des Absatzes einteilen. Demontagefabriken sind als ein Akteur in ein überbetriebliches Unternehmensnetzwerk eines Kreislaufwirtschaftssystems zu binden. Der Beschaffungsmarkt von Altgeräten sowie der Absatzmarkt von Demontageerzeugnissen befinden sich auf lokalen, regionalen, nationalen oder internationalen Einzugs- und Absatzgebieten. Der Angebotsmarkt wird in der Regel durch die Art der Einbindung in das Kreislaufwirtschaftssystem determiniert. Soll eine zentrale Demontagefabrik für ein Kreislaufwirtschaftssystem geplant werden, können regionale und nationale Angebotsmärkte angesprochen werden. Stellt die Demontagefabrik eine von vielen innerhalb des Kreislaufwirtschaftssystems dar, werden eher regionale Angebotsmärkte angesprochen. Bei den Absatzmärkten hängt es unter anderem von der Art der Demontageerzeugnisse ab. In Deutschland demontierte und aufbereitete Mobiltelefone werden beispielsweise nach Afrika oder Osteuropa exportiert [SEL-03a]. Die Bindung an den Angebotsmarkt kann durch vertraglich festgelegte Beziehungen zwischen dem Demontageunternehmen und dem Produkthersteller erfolgen.

Das Kriterium Bindung an den Absatzmarkt kann in seinen verschiedenen Ausprägungen darüber beschrieben werden, was den Primärbedarf der Demontage auslöst [RAU-97]. Die Demontage kann einerseits durch das Vorliegen langfristiger Rahmenverträge mit wenigen Abnehmern ausgelöst werden, eine sog. Demontage auf Bestellung mit Rahmenaufträgen, andererseits können Kundenbedarfe auch über Komponenten- bzw. Materialfraktionslager auf Basis von Absatzprognosen befriedigt werden. Es erfolgt eine Demontage nach dem Push-Prinzip, wenn die anfallenden Altgeräte auf Basis der Rahmenverträge oder auf Basis von Prognosen demontiert werden. In Abgrenzung zu der push-orientierten Demontage kann der Absatzmarkt eine pull-orientierte bzw. on-demand-Demontage verlangen [SEL-03b]. Hierbei erfolgt die Demontage der Altgeräte erst, wenn der Kunde nach konkreten Demontageerzeugnissen verlangt. Ferner können die einzelnen Absatzmärkte unterschiedliche Anforderungen an die Art, Qualität und den Aufarbeitungsumfang der Demontageerzeugnisse verlangen. In Bild 22 werden die potenziellen Absatzmärkte für Demontageerzeugnisse zusammenfassend dargestellt.

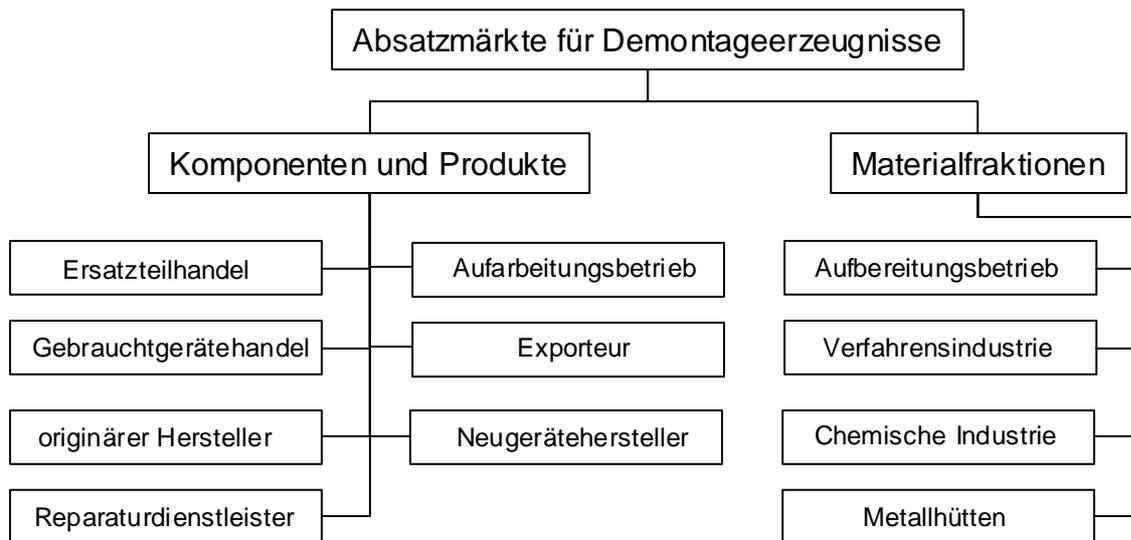


Bild 22: Absatzmärkte für Demontageerzeugnisse

4.2.3 Fabrik – Standort und Typ

Das Planungsmerkmal Fabrik wird in die Unterkriterien Standort, Mobilität und Typ eingeteilt. Der Standort von Demontagefabriken wird vor allem von der geplanten Einbindung der Fabrik in bestehende Strukturen von Kreislaufwirtschaftssystemen beeinflusst. Es kann grob zwischen innerstädtischen Gebieten, dem Stadtrand, und der „Grünen Wiese“ unterschieden werden. Hier wird nach dem Aufwand für die der Demontage vor- und nachgelagerten Prozesse, wie Sammlung, Erfassung und Transport entschieden, wobei die vorhandene Infrastruktur, die Höhe von Gewerbemieten oder Bodenpreisen, sowie die Akzeptanz der Bevölkerung von Bedeutung bei der Standortwahl sind. Als Typen von Fabriken können der Ein-Mannbetrieb, die Werkstatt, die Kleinfabrik, die Großfabrik oder Demontagenetzwerke unterschieden werden. Die Bildung von Netzwerken zwischen kleineren und mittleren auf die Demontage und die Aufarbeitung spezialisierten Unternehmen ist eine derzeitige Tendenz, um gegenüber Großfabriken konkurrenzfähig zu bleiben [SPE-02b]. Dabei tritt das Demontagenetzwerk als ein Unternehmen auf den Markt und schließt Exklusivverträge für eine ganze Region. Das Demontagenetzwerk ist dabei in der Lage, die anfallende Demontageobjekt mengen auf lokaler Ebene zu demontieren, was zu reduzierten Transportkosten führt. Ein-Mannbetriebe sind als mobiler Service geeignet, um vor Ort beim Kunden Instandhaltungs- oder Re-Montageaufgaben durchzuführen [MÜL-01]. Demontagewerkstätten sind besonders gut als Servicedienstleister für den Handel geeignet, da sie gleichzeitig Wartungs- und Reparaturaufgaben übernehmen können. Großfabriken erscheinen als vorteilhaft unter der Bedingung, dass für die anfallende Demontageobjektmenge Economics of Scale und für die Demontageobjekttypen Economics of Scope erschlossen werden können und diese die entstehenden Mehraufwendungen für Transport und Lagerung kompensieren. Mit dem Kriterium Fabrikmobilität kann beschrieben werden, ob die Fabrik fahrbar, transportabel oder ortsfest ist. Konzepte für fahrbare Demontagefabriken in Form von Lastkraftwagen oder Binnenschiffen, d.h. Fabriken die sich zum Demontageobjekt bewegen, werden im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 281 „Demontagefabriken“ vorgestellt [FRA-03a]. Ein Konzept für eine mobile manuelle Demontage auf einem Lastkraftwagen wird in

Bild 23 dargestellt. Mit Hilfe eines modularen Werkzeugbaukastens [REB-03] können effizient ortsflexibel Demontageaufgaben übernommen werden, um die Anpassung von Produkten, die Versorgung ländlicher Regionen oder den Ausgleich von Schwankungen hinsichtlich des Altgeräteaufkommens im Demontagenetzwerk zu unterstützen. Zur Unterstützung der mobilen manuellen Demontage kann ein Personal Digital Assistant (PDA) zur Bereitstellung von Demontageinformationen eingesetzt werden. BUCHHOLZ [BUC-03] stellt eine auf dem Betriebssystem Windows CE basierende Anwendung zur Darstellung eines Demontageplans auf einem PDA vor.

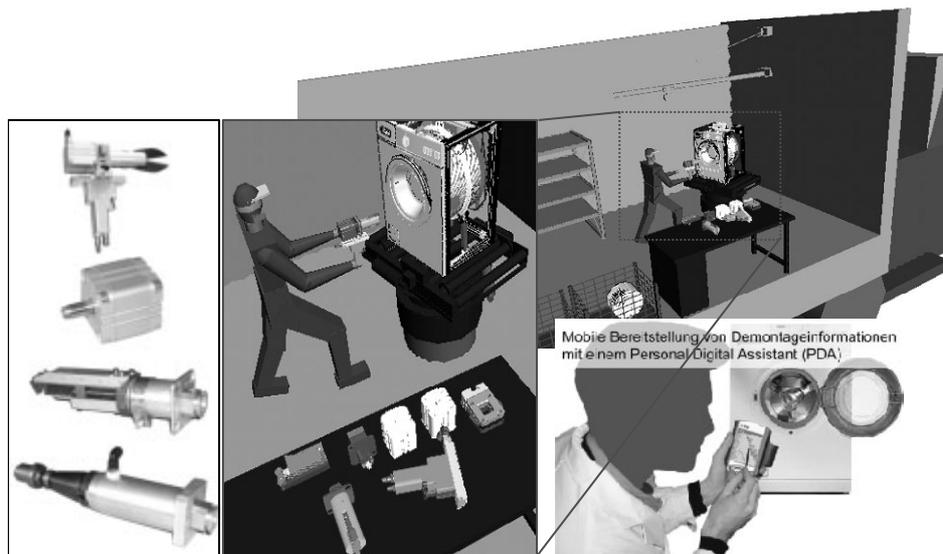


Bild 23: Konzept für eine mobile manuelle Demontagewerkstatt mit modularem Werkzeugbaukasten nach [FRA-03a]

Transportable Fabriken zeichnen sich dadurch aus, dass sie nur für bestimmte Zeiträume an vorgegebenen Orten aufgebaut werden, um nach Erfüllung ihrer Demontageaufgabe an anderen Orten des Bedarfs wieder aufgebaut zu werden. Die modulare Konstruktion unterstützt dabei schnelle Montage- und Demontageprozesse der Fabrikhüllen

4.2.4 Organisation und Verrichtung

Mit dem Kriterium *Recyclingintegration* wird beschrieben, inwiefern sich die Fabrik auf die erforderlichen Prozesse der Demontage spezialisiert oder ebenfalls vorgelagerte und nachgelagerte Prozesse durchführt wie die Sortierung, die Schadstoffentfrachtung und die Reinigung und/oder die Aufarbeitung wie die Reinigung, Prüfung, Bearbeitung und (Re-)Montage oder die Aufbereitung wie das Pressen oder Shreddern. Die Integration von vor- und nachgelagerten Prozessen mit dem Ziel des Produktrecyclings wird vorrangig im Rahmen des Herstellerrecyclings durchgeführt, d.h. der Produkthersteller führt die Demontage und Aufarbeitung selber durch. Als Beispiele für die Integration von Demontagen und (Re-)Montage seien hier die Firmen Xerox, Canon und Océ mit Fotokopierern und die Firma Fuji Foto Film mit Einwegkameras genannt [FLE-01b].

Das Kriterium *Organisationsform* beschreibt die Formen der räumlichen und zeitlichen Zusammenfassung von Betriebsmitteln und Arbeitskräften zu organisatorischen Einhei-

ten [BUL-93]. Die Produktivität und die Flexibilität von Demontagesystemen werden im wesentlichen durch die funktionale, räumliche und zeitliche Struktur der Organisationsformen bestimmt [HEN-96]. Analog zur konventionellen Fertigung können Organisationsformen nach dem Verrichtungsprinzip und dem Objektprinzip unterschieden werden [SPU-94]. Beim Verrichtungsprinzip erfolgt eine räumliche Zusammenfassung von Demontagebetriebsmitteln gleicher Art. Werden die Demontagebetriebsmittel nach ihrer Funktion räumlich angeordnet, ergibt sich eine hohe Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Demontageabläufe und -altprodukte. Sind die Demontagebetriebsmittel nach den Demontageablaufanforderungen der Altprodukte zusammengefasst und in der Reihenfolge des Demontagefortschritts räumlich so angeordnet, dass sie sich ergänzen, wird vom Objektprinzip gesprochen. Aus den beiden prinzipiellen Organisationsformen können weitere Grundformen der Demontageorganisation in Abhängigkeit ihrer funktionalen, räumlichen und zeitlichen Ausprägungen abgeleitet werden (Bild 24).

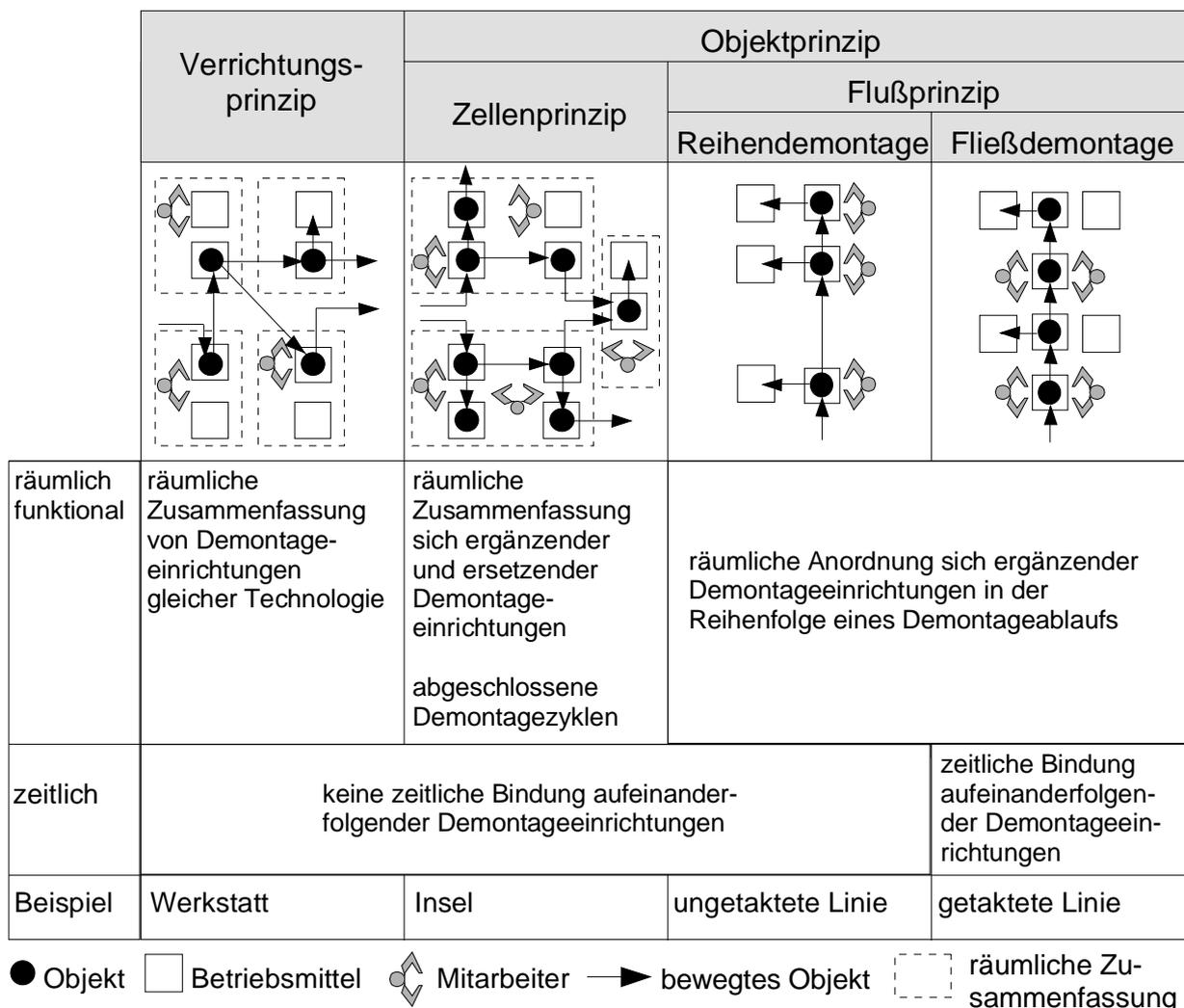


Bild 24: Grundformen der Demontageorganisation [HEN-96]

Das Kriterium der *Arbeitsteilung* beschreibt, wie die anstehenden Arbeitsaufgaben der Demontage auf die zur Verfügung stehenden Kapazitätseinheiten wie Mitarbeiter, Demontagestationen aufgeteilt werden. Die Arbeitsteilung lässt sich hinsichtlich der Arten- und Mengenteilung differenzieren. Bei der Artenteilung wird der Arbeitsumfang zur De-

montage eines Altproduktes auf mehrere Kapazitätseinheiten aufgeteilt, die jeweils nur einen Teil aller Demontagetätigkeiten ausführen. Bei der Mengenteilung hingegen, wird der Arbeitsumfang zur Demontage auf mehrere Kapazitätseinheiten verteilt, die jeweils den gesamten Umfang der Demontagetätigkeiten an einer Teilmenge des Arbeitsumfanges durchführen.

Das Kriterium *Demontageart* beschreibt, ob der Trennprozess das Verbindungselement und/oder die Teilegestalt zerstörungsfrei, teilzerstörend oder zerstörend löst. Die Auswahl der Demontageart hängt im wesentlichen von dem zu demontierenden Altprodukt, dem verfolgten Demontageziel sowie den zur Verfügung stehenden Demontagetechnologien ab. Tendenziell wird die zerstörungsfreie und teilzerstörende Demontage für das Produktrecycling und die zerstörende für das Materialrecycling durchgeführt.

Mit dem Kriterium *Demontagenvolumen* wird in Analogie zum Montagevolumen die Häufigkeit der Leistungswiederholung beschrieben [WAR-96]. Fallen ähnliche Demontageobjekte gleichmäßig und in großen Mengen an, kann von einer Massendemontage ausgegangen werden, wie z.B. bei der Demontage von Einwegkameras der Firma Fuji. Die Einmaldemontage stellt hierbei das andere Extrem dar und wird in der Regel in keiner Demontagefabrik durchgeführt sondern direkt am Demontageobjekt, wie z.B. die Demontage von Bohrinseln oder Schiffen. Aufgrund der Heterogenität, Komplexität und kleinen bis mittleren Häufigkeit der anfallenden Altprodukte sind die derzeitigen Demontagefabriken für die Kleinserien- und Serierendemontage ausgelegt [BVSE-02].

Die *Anordnungsstruktur* oder das Layout beschreibt, wie die einzelnen Kapazitätseinheiten, d.h. Demontagestationen und -arbeitsplätze unter Berücksichtigung der räumlichen und prozessspezifischen Randbedingungen verteilt sind. Als Grundtypen für die Demontage kommen der Einzelarbeitsplatz, die Linie, die Insel, das Kreuz, der Ring, der Stern oder das Netz sowie die Gitterstruktur in Frage (Bild 25) [KEI-00]. Die Gitterstruktur bezeichnet hierbei die Aufteilung der Demontage auf verschiedene Stockwerke in der Demontagefabrik.

Für die Demontage von Weißer Ware haben KEIL et al. [KEI-00] ein hybrides Demontagesystem in Sternstruktur prototypisch realisiert (Bild 26). Hentschel [HEN-96] schlägt für die manuelle Demontage von Fernsehgeräten Inselstrukturen mit sich ersetzenden und ergänzenden Demontagestationen vor. WIENDAHL et al. [WIE-01c] und WESTERNHAGEN [WET-01] sehen in der Ringstruktur eine geeignete Anordnung, um braune Ware wirtschaftlich manuell zu demontieren.

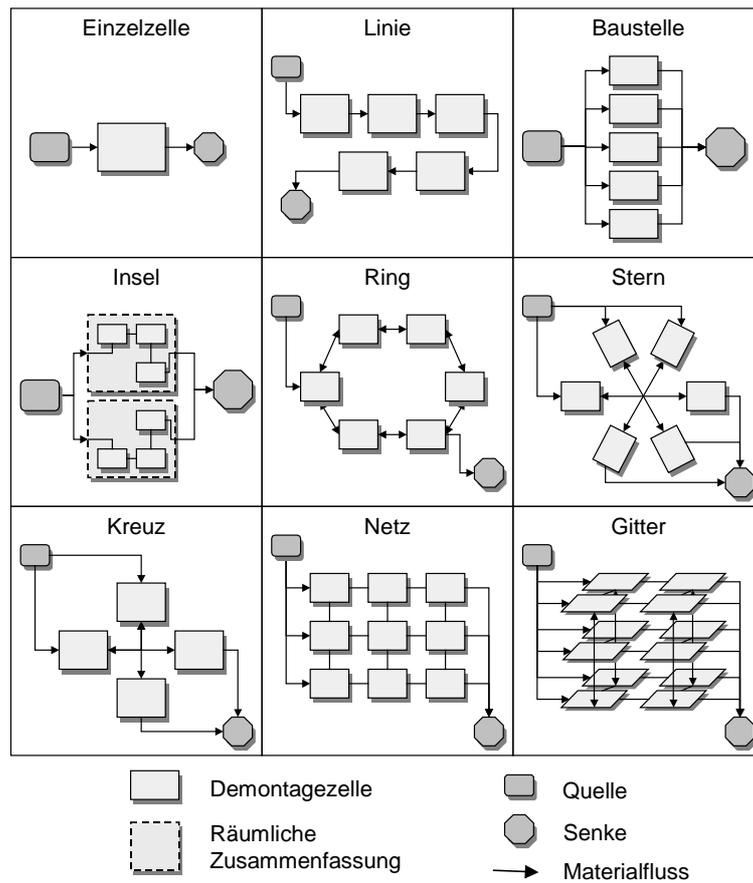


Bild 25: Anordnungsstrukturen nach [KEI-00]

Beim Kriterium *Automatisierung* wird zwischen manueller, mechanisierter, automatisierter und hybrider Demontage unterschieden. Hybride Demontage bezeichnet die Kombination aus manueller, mechanisierter und automatisierter Demontage [KEI-04]. Die aktuelle Situation in den Demontagebetrieben ist durch überwiegend manuelle oder mechanisierte Demontageprozesse gekennzeichnet [WAL-03], [BVSE-02].

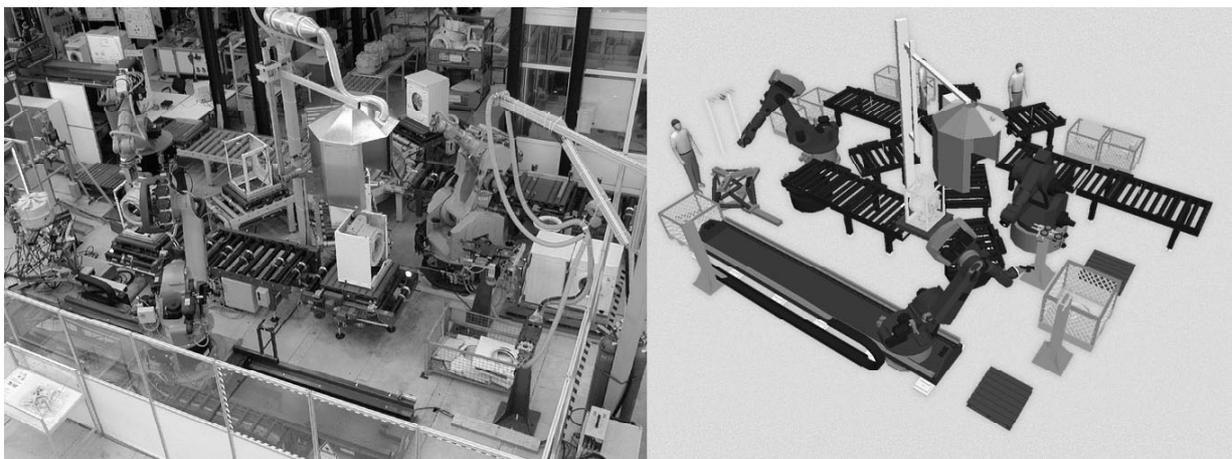


Bild 26: Sternlayout für die hybride Demontage Weißer Ware [CIU-03a], [KEI-00]

Die Wirtschaftlichkeit dieser Betriebe ist relativ gering, wobei den größten Kostenblock hierbei die Personalaufwendungen stellen [ZVEI-02]. Die Einführung von automatisierten Demontageprozessen würde die Produktivität und somit die Wirtschaftlichkeit von De-

montagesystemen erhöhen. Die vollständige Automatisierung ist jedoch aufgrund der zu demontierenden großen Produktvielfalt und den unbekanntem Altprodukteigenschaften nur schwer möglich. Hybride Demontagesysteme stellen hierbei eine vielversprechende Ausprägungsform dar. So können für bestimmte Altprodukttypen und -eigenschaften robuste Demontageprozesse automatisierte Lösungen neben den konventionellen manuellen Demontageprozesse in einem System integriert werden. Durch prototypische Lösungen in Forschung und Praxis an den Produktbeispielen Waschmaschine [KEI-00], Fernseher und Monitore [SCO-99], Autoradio [ZUS-00] und Mobiltelefonen [SEL-03a] wurde bereits gezeigt, dass die Integration flexibler manueller Demontageprozesse mit produktiven automatisierten Demontageprozessen ein aussichtsreicher Ansatz zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit von Demontage ist.

Die Frage, welche Organisationsausprägungen und Anordnungsstrukturen für die Demontage von Altprodukten am besten geeignet ist kann nicht allgemeingültig beantwortet werden. In Anlehnung an HENTSCHEL [HEN-96], KEIL [KEI-00] und WESTERHAGEN [WET-01] werden vier Grundformen von Demontagesystemausprägungen identifiziert. In der Tabelle 8 werden diese anhand von Kriterien wie Flexibilität und wirtschaftliche Demontagemengen verglichen. Die Beurteilung in Tabelle 8 ist als Tendenzaussage zu interpretieren, die im Einzelfall, in Abhängigkeit von den zu demontierenden Altprodukten oder den verwendeten Demontagetechnologien anders ausfallen kann.

Kriterien	Demontageszelle	Demontageinsel	Demontagesnetz	Demontage- linie
Ablaufflexibilität	●	◐	●	○
Variantenflexibilität	●	◐	●	○
Zustandflexibilität	●	◐	●	○
Mengenflexibilität	◐	◐	◐	◐
kurze Durchlaufzeiten	●	◐	◐	◐
geringer Transportaufwand	◐	◐	○	●
Einmaldemontage	●	◐	○	○
kleine Demontagemenge	●	●	◐	◐
mittlere Demontagemenge	○	●	●	●
große Demontagemenge	○	◐	●	●
● geeignet ◐ bedingt geeignet ○ nicht geeignet				

Tabelle 8: Eignung von Organisationsausprägungen für die Demontage

Die *Demontageszelle* wird als manueller oder mechanisierter Einzeldemontagearbeitsplatz definiert, in der nach dem Prinzip der Mengenteilung die vollständige Demontage des Altproduktes durchgeführt werden kann [KEI-04]. Der Mitarbeiter einer Demontageszelle kann sich bei vollständiger Mengenteilung sehr gut auf unterschiedliche Produktvarianten und -zustände einstellen. Der Demontageablauf kann von dem Mitarbeiter in Rahmen der technischen Möglichkeiten individuell gestaltet werden. Mit zunehmendem Demontagenvolumen, steigt die Anzahl der benötigten Demotagezellen, was zu einem

zunehmenden Transportaufwand führt. Somit sind Demontagezellen für kleine Demontagevolumen gut geeignet.

Eine *Demontageinsel* ist eine Gruppe von mehreren sich ergänzenden und ersetzenden Demontageplätzen oder -stationen zur Demontage von Altproduktgruppen oder -familien. Da keine richtungsorientierte Verkettung der Demontagearbeitsplätze existiert können flexible Demontageabläufe realisiert werden, die aufgrund der unbekanntem Altprodukteigenschaften erforderlich ist. Ein wesentliches Merkmal einer Demontageinsel ist analog zur Montageinseln, deren häufige Ausprägung in Form einer U-Anordnung zu finden ist, die Übertragung erweiterter Handlungsspielräume hinsichtlich Planung, Steuerung und Qualitätssicherung auf ihre Mitarbeiter [KOC-03a]. Mehrere Demontageinseln können zu einer netzartigen Struktur führen, die auch bei hoher Variantenvielfalt der Altprodukte eine wirtschaftliche Demontage ermöglicht.

Eine *Demontagenetz* ist eine Kombination von sich ergänzenden sowie ersetzenden Demontageplätzen, auf denen große Serien mit vielen Varianten demontiert werden können. Der Demontageablauf durch die Demontageplätze ist dabei variabel. Demontagenetze sind somit ablauf-, produktvarianten-, und produktzustandflexibel, induzieren jedoch einen großen Transportaufwand.

Die *Demontagelinie* ist ein Sonderfall des Demontagenetzes, bei der der Materialfluss gerichtet ist. Sie ist besonders geeignet für die Demontage großer Mengen gleichartiger Altprodukte. Es werden kurze Durchlaufzeiten erreicht und eher geringe innerbetriebliche Transportaufwendungen induziert. Nachteilig ist die mangelnde Anpassungsfähigkeit an Demontageproduktvielfalt und die Starrheit gegenüber Ablaufstörungen, da ein wiederkehrender Demontageablauf vorausgesetzt wird.

Systemausprägungen die nur einen einzigen, gleichbleibenden Demontageablauf ermöglichen, können die Flexibilitätsanforderungen nur bedingt erfüllen. Es zeigt sich, dass Systemausprägungen, die die Vorteile des Verrichtungs- und Objektprinzips kombinieren, wie die Inseldemontage, sehr geeignet für die wirtschaftliche Demontage sind. So kann sich beispielsweise die Inselorganisation innerhalb kurzer Zeit auf Schwankungen der zu demontierenden Altproduktmengen, -varianten und -zustände reagieren.

4.2.5 Materialfluss

Das Planungsmerkmal Materialfluss wird in die Unterkriterien externe Transportmittel, innerbetriebliche Fördermittel, Materialflusprinzip, Materialzufluss, Materialabtransport und Sortierung unterschieden. Das Kriterium *externe Transportmittel* beschreibt, mit welchen Transportmitteln (PKW, LKW; Schiff, Bahn) die Demontageobjekte zur Demontagefabrik gebracht werden.

Mit dem Kriterium *Materialflusprinzip* wird festgelegt, wie die Bewegung der Demontageobjekte und der entstehenden Demontageprodukte innerhalb eines vorgegebenen räumlichen Bereichs zwischen den einzelnen Demontagestationen durchgeführt werden soll. Es kann zwischen stationärem, synchron und asynchron intermittierenden sowie

dem kontinuierlichem Materialflussprinzip unterschieden werden [BUL-93.] Der stationäre Materialfluss, bei dem sich das Demontageobjekt während der Demontage nicht bewegt, wird vor allem bei Demontageobjekten mit großem Volumen und Gewicht angewandt. Bei dem intermittierenden, d.h. schrittweisen Materialfluss, wird das Demontageobjekt nach dem Transport zwischen den Stationen angehalten und die Demontage wird am ruhenden Demontageobjekt durchgeführt. Der Transport kann hierbei synchron durchgeführt werden, d.h. alle Demontageobjekte werden zum gleichen Zeitpunkt transportiert, oder aber asynchron, wobei die Demontagestationen zeitlich entkoppelt sind. Das synchron intermittierende Materialflussprinzip ist nur dann anzustreben, wenn die Demontageobjektvielfalt und die Demontageobjektzustände eine Austaktung der Demontagestationen zulassen. Können die Demontageumfänge in den Demontagestationen zeitlich nicht aufeinander abgestimmt werden, sollte das asynchron intermittierende Materialflussprinzip angewandt werden. Wird die Demontage am bewegten Objekt durchgeführt, handelt es sich um das kontinuierliche Materialflussprinzip.

Die Kriterien *Materialzufluss und -abtransport* sowie *Sortierung* legen fest, ob zentrale oder dezentrale Materialflussstrukturen entstehen (Bild 27). So ist festzulegen, wie die Demontageobjekte zu den Demontagearbeitsplätzen/-stationen transportiert werden und wie der Abtransport für die Demontageerzeugnisse organisiert ist, oder auch, ob die Fraktionssortierung an der Station oder an einem zentralen Ort erfolgt. Tendenziell sind dezentrale Materialzufluss- und Abtransportstrukturen für kleine Demontagemengen von schweren, großen Demontageobjekten von Vorteil.

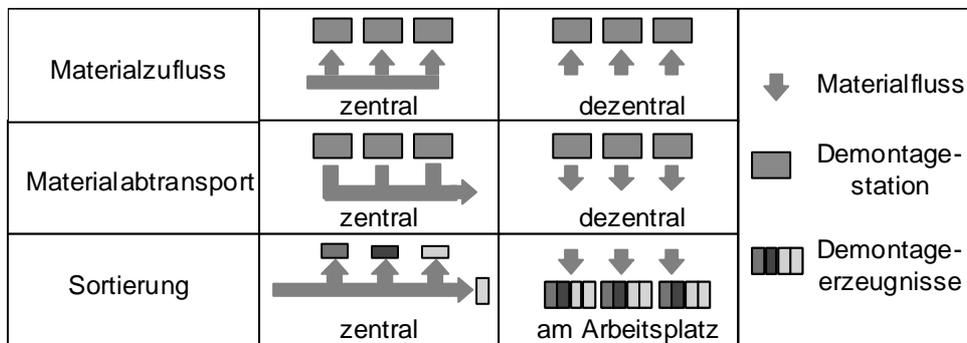


Bild 27: Zentrale und dezentrale Materialflüsse

Mit dem Kriterium *innerbetriebliche Fördermittel* wird festgelegt, womit die Demontageobjekte und entstehenden Demontageprodukte innerhalb der Fabrik zwischen den unterschiedlichen Funktionsbereichen transportiert werden.

4.3 Konzept des Planungsansatzes

Aufbauend auf den in Kapitel 4.1 dargestellten allgemeinen Ablauf bei der Planung von Demontagefabriken und den in Kapitel 4.2 eingeführten Planungsmerkmalen wird das Konzept für die simulationsgestützte Demontagefabrikplanung abgeleitet. Das entwickelte Konzept unterstützt die durchgehende simulationsgestützte Planung für Demontagefabriken in den Planungsphasen Standortplanung, Grobplanung und Feinplanung unter Berücksichtigung der anderen Akteure des Kreislaufwirtschaftssystems.

In jeder Planungsphase gilt es unterschiedliche Planungsschritte zu unterstützen, die in **Bild 28** zusammenfassend dargestellt sind und in den angegebenen Kapiteln detailliert beschrieben werden. In der Phase der Standortplanung werden die Schritte Gruppenbildung für die Demontageobjekte, Bestimmung der Standorte und erforderlichen Kapazitäten der Demontagefabriken berücksichtigt. Während der Phase der Grobplanung erfolgt die Dimensionierung und Strukturierung der Demontagesysteme für die Demontagefabriken. In der sich anschließenden Phase der Feinplanung wird auf Basis der Ergebnisse der Strukturierung der Schritt der Layoutplanung durchgeführt, deren Ergebnisse in den letzten Planungsschritt der simulationsgestützten Feinplanung fließen. Ein durchgängiges Modellierungs- und Simulationsdatenmodell soll die Planungsergebnisse der einzelnen Planungsschritte ohne Verlust für die nachfolgenden Planungsschritte zur Verfügung stellen.

In den einzelnen Planungsschritten wird eine kombinierte Anwendung der mathematischen Modellierung und der Ablaufsimulation konzipiert. Diese Vorgehensweise hat sich bereits bei der Planung von Logistiknetzwerken bewährt [FAR-99], [SPE-02a].

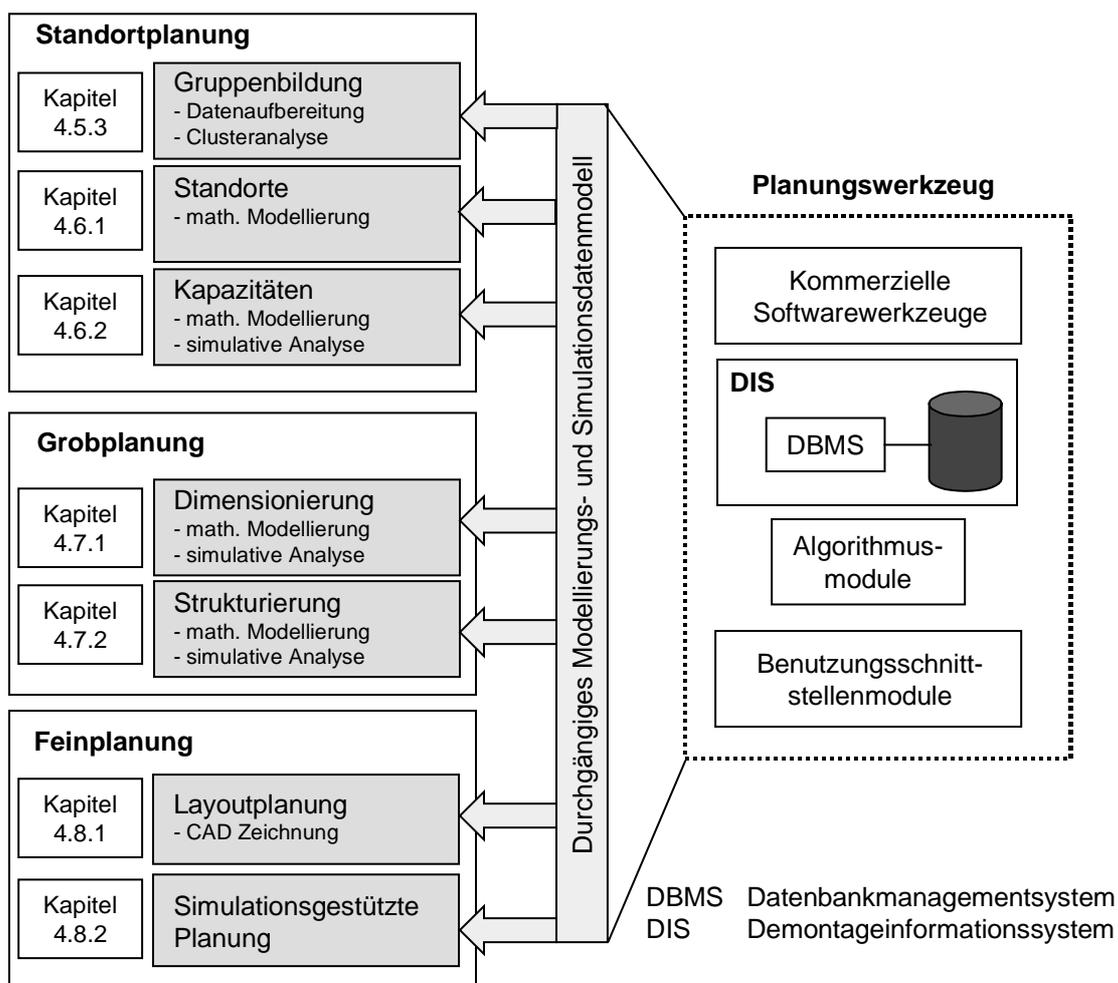


Bild 28: Planungsschritte des Konzeptes

Der Grund liegt hierbei in der Verschmelzung der Vorteile beider Technologien (Tabelle 9). Die mathematische Modellierung kann den sehr großen Lösungsraum an

Alternativen durch die optimale Lösung für eine Netzwerk- oder Fabrikstruktur reduzieren. Mit Hilfe der Ablaufsimulation wird diese Lösung detaillierter analysiert und die Entscheidung für die finale Netzwerk- und Fabrikprägung unterstützt.

Mathematische Modellierung	Ablaufsimulation
Bewertung großer Anzahl von Alternativen	Bewertung kleiner Anzahl von Alternativen
Bewertung nur der Modellstruktur	Bewertung der Modellstruktur und des Modellverhaltens
Betrachtung von Varianz schwer möglich	Betrachtung von Komplexität und stochastischen Schwankungen möglich
aggregierte statistische Auswertung	detaillierte Leistungsstatistiken
optimale Lösung	keine optimale Lösung
Verwendung zur Bestimmung von Netzwerk- oder Fabrikstrukturen	Verwendung zur Bestimmung der finalen Netzwerk- und Fabrikprägung
Schwäche der Technologie	Stärke der Technologie

Tabelle 9: Mathematische Modellierung vs. Ablaufsimulation

Für die softwaretechnische Umsetzung des Konzeptes zur simulationsgestützten Demontagefabrikplanung ist das in Bild 29 dargestellte funktionale Konzept des Planungswerkzeuges entwickelt worden. Das Planungswerkzeug soll in die Architektur eines Demontageinformationssystems (DIS), wie von KEIL in [KEI-04] vorgeschlagen, integriert werden. KEIL definiert ein DIS als ein Datenbanksystem erweitert um informationstechnische Werkzeuge zur Auswertung und Darstellung demontagerrelevanter Informationen. Mit Hilfe des Datenbankmanagementsystems ist eine Datenstruktur für die durchgängige Modellierung und Simulation für allen Phasen des simulationsgestützten Planungskonzept zu entwickeln. Es wird hierbei zwischen den Systemlastdaten, technischen Daten, Organisationsdaten und Betriebsdaten unterschieden. Zur Dateneingabe und Planungsergebnisvisualisierung in den einzelnen Planungsphasen sind Benutzungsschnittstellen-Module zu entwickeln. Für den bidirektionale Datenfluss zwischen den Benutzungsschnittstellen-Modulen und dem Datenbankinformationssystem sind Algorithmus-Module zur Aggregation und Transformationen der Daten in ein durchgängiges Modellierungs- und Simulationsdatenmodell zu entwickeln.

Das Planungswerkzeug greift während der einzelnen Planungsschritte auf kommerzielle Softwarewerkzeuge für die Gruppenbildung, der mathematischen Optimierung, der Ablaufsimulation und der Layoutgestaltung zu. Für die Gruppenbildung ist ein Algorithmus-Modul zu entwickeln, welches aus den Modellierungsdaten die erforderliche Merkmalsbasis erzeugt. Der Einsatz der mathematischen Optimierung erfordert ein Algorithmus-Modul für die Konfiguration der anzuwendenden Optimierungsmodelle. Der effiziente Einsatz der Ablaufsimulation innerhalb der einzelnen Planungsschritte wird durch Algorithmus-Module zum automatischen Generieren von Simulationsmodellen, auf Basis der Planungsergebnisse, unterstützt. Das Ergebnis der Layoutgestaltung, die detaillierte CAD-Zeichnung, soll über ein Algorithmus-Modul in eine für das entwickelte Modellierungs- und Simulationsdatenmodell konforme Datenstruktur transformiert werden, damit

diese während des letzten Planungsschrittes der simulationsgestützten Feinplanung berücksichtigt werden können.

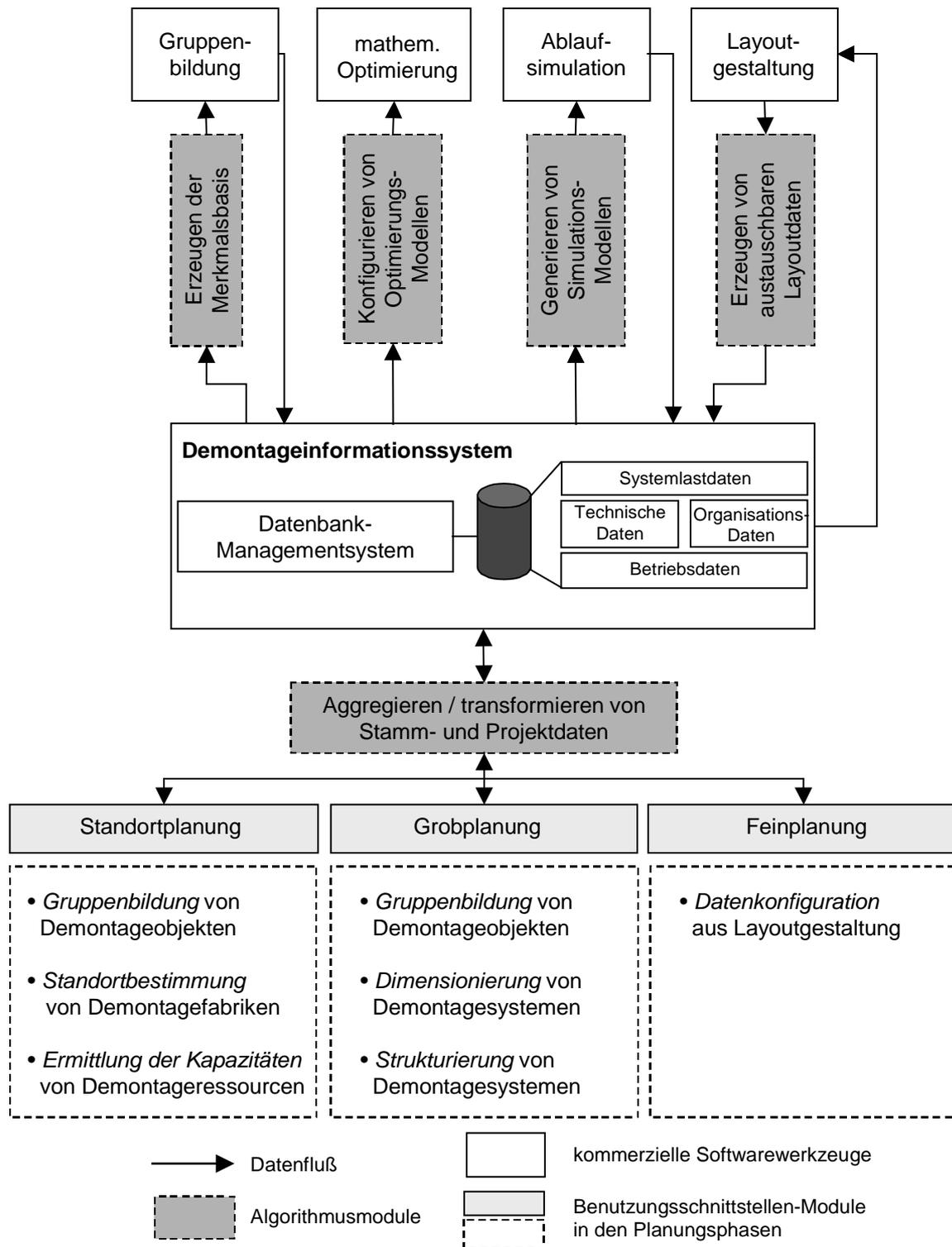


Bild 29: Funktionales Konzept des Planungswerkzeuges

4.4 Referenzmodell

Für die simulationsgestützte Planung wurde ein Referenzmodell für ein Kreislaufwirtschaftssystem entwickelt. Ein Referenzmodell umfasst eine systematische und allgemeingültige Beschreibung eines definierten Bereichs der Realität mit den für eine vorgegebene Aufgabenstellung relevanten charakteristischen Eigenschaften und legt das zugehörige Modellierungskonzept fest. Im Bereich der Simulation dienen Referenzmodelle als Konstruktionsschema für den Entwurf von aufgabenbezogenen Simulationsmodellen.“ [WEN-00]. Ein Referenzmodell soll durch Vorgabe von vordefinierten, anwendungsorientierten Modellen den Modellbildungsprozess vereinfachen. KLINGER schreibt einem Referenzmodell folgende charakteristische Merkmale zu [KLI-00]:

- Vorlagencharakter, d.h. sie dienen als Vorlage für die Erstellung eines konkreten anwendungsspezifischen Modells,
- ·Einen gewissen Grad an Allgemeingültig im Rahmen der Aufgabenstellung, so dass es die Offenheit bietet, Modelle für unterschiedliche reale Systeme ableiten zu können,
- Übertragbarkeit und leichte Anpassbarkeit an die jeweiligen systemspezifischen Anforderungen;
- Modularer Aufbau und leichte Erweiterbarkeit,
- Starker inhaltlicher Bezug zum Erfahrungswissen der Anwendung,
- Eine leichte Verständlichkeit und einheitliche Begriffswelt und
- Möglichkeit zur Erstellung von Implementierungsmodellen mit reduziertem Aufwand.

Bei der Entwicklung des Referenzmodells wurde ein hierarchisch objektorientierter Ansatz verfolgt, um die zuvor genannten Merkmale zu erfüllen. Akteure des betrachteten Kreislaufwirtschaftssystems werden in zwei Hierarchiestufen beschrieben, wohingegen das Planungsobjekt Demontagefabrik auf fünf Hierarchiestufen abgebildet wird (Bild 30). Auf der obersten Ebene wird die Grundstruktur des Kreislaufwirtschaftssystems mit den betrachteten Akteuren wie den Sammelstellen, den Materialrecyclern, den Anpassern (Re-Manufacturer), den Demontagefabriken sowie den Logistikdienstleistern mit den Transportwegen abgebildet.

Auf der zweiten Ebene werden die Akteure mit dem Detaillierungsgrad der verwendeten Datenbasis aus dem ersten Planungsschritt der Standortplanung beschrieben. Die Demontagefabriken des Kreislaufwirtschaftssystems werden auf dieser Ebene schon detaillierter dargestellt.

schlüssel beschrieben. Die Nacharbeitsstation stellt somit einen manuellen Nacharbeitsplatz dar. Da die Zuverlässigkeit automatisierter Demontageprozesse von der aktuellen Beschaffenheit des Demontageobjektes abhängt und diese am Ende des Produkt-Lebenszyklus nicht vorhersagbar ist, sind manuelle Nacharbeitsstationen bei dem Betrieb von hybriden Demontagesystemen zwingend notwendig.

Während die ersten vier Hierarchieebenen im allgemeinen zur Modellierung des Materialflusses dienen, wird auf der Demontagebetriebsmittelebene nur der Informationsfluss nachgebildet. Es werden für alle aktiven Demontagebetriebsmittel gleichzeitig eine Reihe von Bedingungen überprüft wie die Störungsbedingung. Weiterhin werden Berechnungen durchgeführt wie die der Ausfallwahrscheinlichkeit, Überlebenswahrscheinlichkeit und Ausfallrate nach der Weibull-Verteilung.

4.5 Datenstruktur zur Modellierung und Simulation

Entscheidend für die erfolgreiche simulationsgestützte Planung von Demontagefabriken ist die richtige Festlegung der erforderlichen Modellelemente der Demontagefabrik mit all den zu ihrer Beschreibung notwendigen Eigenschaften und Merkmalen. Eigenschaften und Merkmale lassen sich durch den aus der Systemtechnik stammenden Begriff Attribut charakterisieren, der Merkmale und Eigenschaften der Elemente von soziotechnischen Systemen beschreibt [DAE-99]. Die Übertragung der Attribute erfolgt in einem spezifischen Datensatz für das jeweilige Modellelement. Im Fall von komplexen Systemen werden zum Aufbau der Datensätze allgemein folgende Daten benötigt [VDI-3633]:

- Daten zur Beschreibung der Topologie und Struktur des Systems,
- Daten zur Beschreibung der Systemkomponenten,
- Daten zur Beschreibung der Zustandsänderung des Systems,
- Daten zur Systemlastbeschreibung sowie
- Daten zur Beschreibung von Funktionen und Prozessen.

Die den Modellelementen zugrunde gelegten Datensätze beinhalten daher räumliche, zeitliche und mengenmäßige Angaben. Ihre Beschreibung kann sowohl von numerischen Typ, d.h. mess- und zählbar, textlichem Typ, d.h. wörtliche Beschreibungen und Beurteilungen, oder logischem Typ, d.h. Regel/Strategien, sein. Die Daten, die als Grundlage der Informationsbeschaffung in der Modellierungs- und Simulationstechnik dienen, lassen sich in Anlehnung an die VDI-3633 in Systemlastdaten, organisatorische Daten und technologische Daten unterteilen (Bild 31). Zusammen stellen diese die Stammdaten für die Erstellung eines Modells dar.

Die *technische Daten* beschreiben die technologischen Grundlagen des Systems, die modelliert und simuliert werden sollen. Die Angaben setzen sich aus der Beschreibung der Kreislaufwirtschaftssystemstruktur, des Logistikdienstleisters, der Demontagefabrikstruktur mit Detailangaben zu den einzelnen Komponenten der Demontagesysteme, wie der Demontagestation, der Demontagebetriebsmittel und der Pufferkapazitäten sowie Angaben über die Materialflusstopologie zusammen. Die Layoutdaten bilden die Grundlage für die Modellierung und Simulation in der Phase der Detailplanung von Demonta-

gefabriken. Sie bezeichnen die in der Demontagefabrik vorhandenen physischen Elemente (Demontagestationen und –betriebsmittel, Fördermittel, Lager und Pufferplätze, Werker usw.) sowie deren geometrische Anordnung. Durch die graphische Aufarbeitung der Zusammenhänge innerhalb der Demontagefabrik können aus dem Layout Informationen zur Materialflusstopologie, wie die Anordnung von Förderstrecken oder die Anzahl und Lage der Demontagestationen entnommen werden. Alle physischen Elemente einer Demontagefabrik werden durch die Angabe zum Typ und durch die Angabe der Kapazität, der Nutzungszeit, der Schichtzuordnung, der Störungsverteilung und der Wartungsintervalle beschrieben. Es müssen jedoch nicht alle Daten angegeben werden. Mit den technischen Daten könne auch Angaben zu Störungen für die jeweiligen physischen Elemente definiert werden. Störungen sind optionale Bestandteile von Modellen. Sollen Störungen berücksichtigt werden, sind Angaben zur Störzeit (time to repair) und Funktionszeit (time between failure) notwendig.

Die *Organisationsdaten* beschreiben Vorgänge, welche die Organisation der Arbeits- sowie Materialflussabläufe betreffen. Dazu gehören die Daten über die Arbeitszeit- und Ablauforganisation sowie Daten der Ressourcenzuordnung. Angaben zur Arbeitszeitorganisation beschreiben, nach welchen zeitlichen Voraussetzungen Demontagestationen, Demontagebetriebs- und Fördermittel eingesetzt werden. Sie definieren somit die Arbeits- und Pausenzeiten. Die Ressourcenzuordnung definiert die Auswahl eines oder mehrerer Mitarbeiter zur Durchführung von Tätigkeiten an festgelegten Demontagestationen mit festgelegten Demontagebetriebsmitteln in Abhängigkeit der geforderten Mitarbeiterqualifikation. Die Ablauforganisation wird durch alle lokalen und globalen Regeln definiert, die den Material- und Informationsfluss steuern. Hierzu zählen u.a. Auswahlstrategien, das Störfallmanagement oder auch besondere Restriktionen. Zu den Auswahlstrategien gehören z.B. die Materialflusspläne mit Angaben zur Auswahl der Materialflussrichtung an Verzweigungen oder Aussagen zur Auswahl eines Lagerortes. Das Störfallmanagement beinhaltet Angaben zu Verhaltensweisen bei auftretenden Prozessstörungen. Restriktionen beschreiben Beschränkungen während des Ablaufs, wie z.B. die maximale Anzahl an Demontageobjekten, die sich im Demontagesystem zur gleichen Zeit aufhalten dürfen.

Die *Systemlastdaten* beschreiben die notwendigen Angaben zur Dynamisierung des Ablaufes des Modells. Als Systemlast werden Transportmittel, Material und Informationen bezeichnet, die sich zur Laufzeit der Simulation im Modell befinden. Sie stellen sog. Bewegungsdaten dar, die für die Durchführung von Prozessen erzeugt und nur für einen begrenzten Zeitraum benötigt werden. Sie beziehen sich in der Regel auf sogenannte Grunddaten und sind von diesen abhängig. Eintrittspunkte, Art und Reihenfolge der Systemlasten sind zu spezifizieren. In Abhängigkeit davon, welche Akteure des Kreislaufwirtschaftssystems neben der Demontagefabrik Modellierungsgegenstand sind, können bis zu fünf Klassen von Systemlasten erforderlich sein. Die abzubildenden Systemlastdaten für Demontagefabriken, Sammelstellen, Logistikdienstleister, Aufarbeiter und Aufbereiter müssen Produktdaten des Demontageobjektes und Auftragseinlastungen definieren. Für Demontagefabriken müssen die Demontageobjektdaten Demontagepläne und Prozesszeiten beinhalten. Die Auftragseinlastung beschreibt die während der Simulation

abzuarbeitenden Aufträge und deren Reihenfolge. Bei Sammelstellen beschränken sich die Systemlastdaten auf die Anzahl der zu erzeugenden Demontageobjekte. Sie stellen somit die Angebotsgenerierung für das betrachtete Kreislaufwirtschaftssystem sicher. Für den Logistikdienstleister müssen Transportaufträge erzeugt werden. Die Transportaufträge setzen sich im wesentlichen aus dem gewünschten Transportmittel dem Start- und Zielort sowie den zu transportierenden Demontageobjekten oder -erzeugnissen zusammen. Die Systemlastdaten für Aufarbeiter und Aufbereiter stellen die Nachfragegenerierung nach Demontageerzeugnissen sicher.

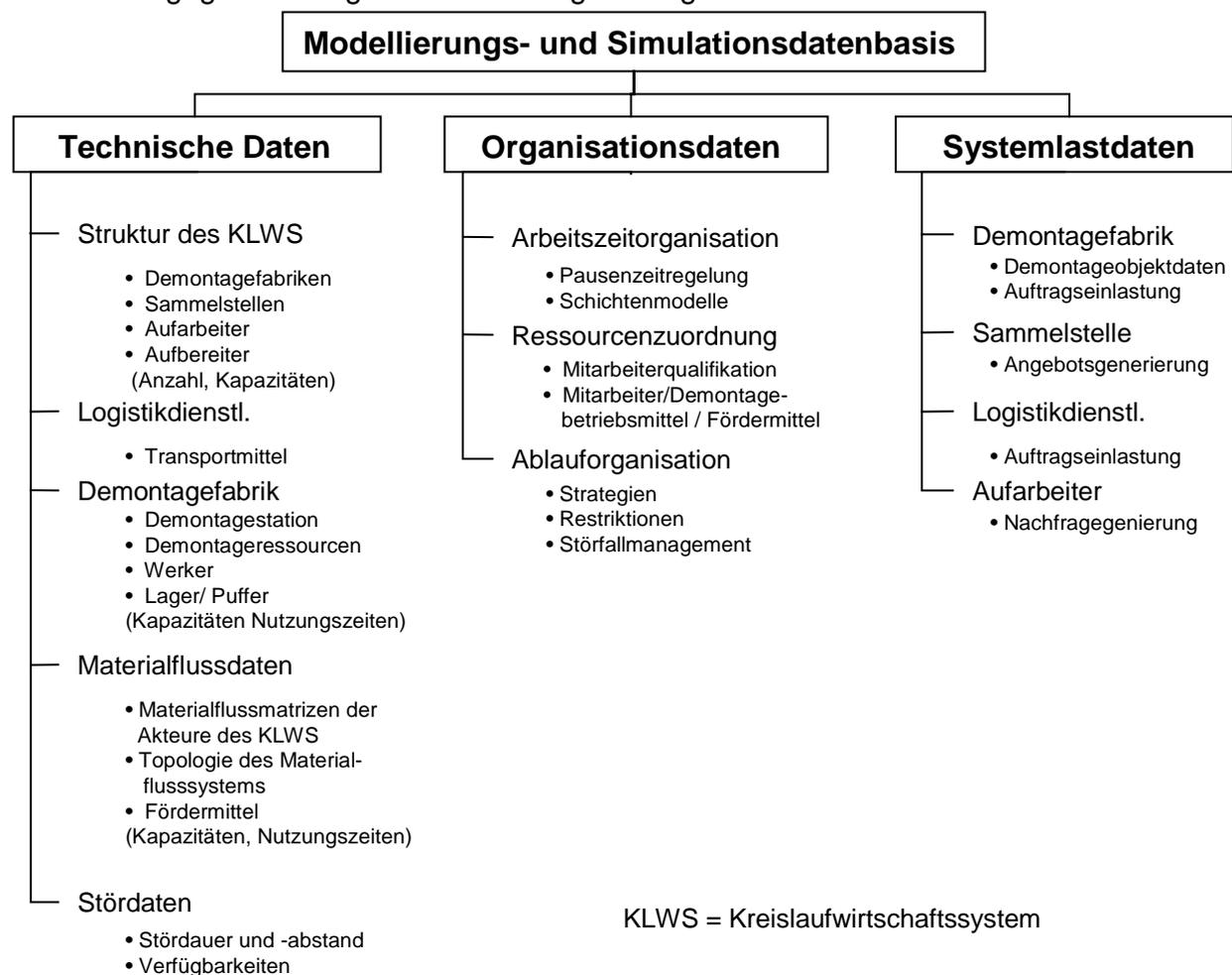


Bild 31: Datenbasis zur Modellierung und Simulation von Demontagefabriken

4.6 Standortplanung

Bei der Standortplanung von Demontagefabriken sind im besonderem Maße die anderen Akteure des Kreislaufwirtschaftssystems zu berücksichtigen, da zwischen den Akteuren und der Demontagefabrik Materialströme induziert werden. Somit ist im Sinne des wirtschaftlichen Betriebs eines Kreislaufwirtschaftssystems die induzierte Materialstromintensität so gering wie möglich zu halten. So müssen bei der Planung die Standorte die vorlagerten Akteure in der Regel Sammelstellen, d.h. die Quellen, und deren Aufkommen an Demontagealtgeräten, potentielle Standorte für Demontagefabriken mit den möglichen Demontagekapazitäten sowie die Standorte und Kapazitäten der nachgelagerten Akteure wie Materialrecycler und Kunden für Demontageerzeugnisse d.h. die

Senken berücksichtigt werden. Hierbei kann es aus wirtschaftlichen Erwägungen von Vorteil sein, insbesondere bei der Berücksichtigung von vielen Akteuren an unterschiedlichen Standorten, mehrere Standorte für Demontagefabriken mit unterschiedlichen Kapazitäten innerhalb eines Kreislaufwirtschaftssystems zu haben [SPE-02b]. Die Demotagekapazität einer Demontagefabrik stellt die mögliche durchschnittliche jährliche Demontageleistung (Demontageobjekte pro Jahr) dar. Diese wird auf Basis der je Standort zur Verfügung stehenden Fabrikflächen und einem Demontageleistungsflächenfaktor, der für die Produktklasse Haushaltsgroßgeräte beispielsweise in Abhängigkeit der Kapazitäten des Demontageobjekteingangslagers und des Demontageerzeugnis-Ausgangslagers, der Struktur des Demontagesystems sowie der Anzahl an geplanten Schichten zwischen 0,06 und 0,1 m²/Stk. betragen kann, grob abgeschätzt werden.

Parallel zur Bestimmung der Standorte für Demontagefabriken unter Berücksichtigung der induzierten Transportaufwendungen ist es erforderlich die auf Basis der zugewiesenen Demontagealtgeräte, die für die Demontage erforderlichen Demontagebetriebsmittel der Demontagefabrik zu zuweisen. Insbesondere bei der Planung von hybriden Systemen, bei denen kostenintensive Betriebsmittel nur für spezielle Demontagealtgeräte benutzt werden können, ist es unter Auslastungsaspekten dieser Betriebsmittel wirtschaftlicher, bestimmte Typen von Demontagealtgeräten aus mehreren Sammelstellen einer Demontagefabrik zuzuweisen [CIU-03b], [CIU-03e].

Der Lösungsansatz für das Standortplanungsproblem von Demontagefabriken hat demzufolge die Aufgabe, Standorte und deren Demontagekapazitäten zu bestimmen sowie den Standorten die benötigten Demontagebetriebsmittel sowie deren Kapazitäten zuzuweisen. Für diese Art von Standortplanungsproblem hat sich die Formulierung von gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsmodellen (MILP) als Lösungsansatz bewährt [BER-97], [HES-03a], [SPE-02a], [KRI-99a].

Das zu entwickelnde Modell zur Lösung des beschriebenen Standortplanungsproblem wird ebenfalls als ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell formuliert. Ziel des Modells ist es die entstehenden Kosten für den Betrieb der Demontagefabriken innerhalb des Kreislaufwirtschaftssystems zu minimieren. Als Ergebnis werden Kapazitäten der Standorte ermittelt, somit ist das Modell unkapazitiert. Da bei der Planung der Standorte die Transportkosten von den direkten vorgelagerten und zu den nachgelagerten Akteuren der Demontagefabrik berücksichtigt werden, sowie die notwendige Infrastruktur am Standort, die Anzahl und Kapazitäten für Demontagebetriebsmittel bestimmt werden müssen, wird ein zwei-stufiges Modell entwickelt. Das Modell wird mehrere Typen von Demontagealtgeräten berücksichtigen und ist somit eine Mehrprodukt-Modell. Es werden bei dem Planungsansatz keine Zusammenhänge zwischen dem Standort der Demontagefabrik und der Nachfrage nach Demontageerzeugnissen angenommen. Es ist ausschließlich der Preis, den der Kunde zahlen muss für die Nachfrage verantwortlich. Somit ist es ein Modell mit nicht elastischer Nachfrage. Das Modell berücksichtigt keine variierenden Modellvariablen über den Zeithorizont und ist somit statisch. Es werden keine Unsicherheiten bei den Eingangsdaten, wie Altgeräteaufkommen berücksichtigt. Damit ist das Modell deterministisch. Zur Lösung des Standortortplanungsproblems von

Demontagefabriken innerhalb von Kreislaufwirtschaftssystemen wird somit ein gemischt-ganzzahliges lineares, unkapazitiertes, zwei-stufiges, statisches, deterministisches Mehrprodukt-Optimierungsmodell mit elastischer Nachfrage formuliert. Gemischt-ganzzahlige lineare, unkapazitierte, zwei-stufige Standortplanungsprobleme gehören zur Klasse der NP-vollständigen Probleme [KLO-01].

Zur Abschätzung des benötigten Rechenaufwandes zur Bestimmung der optimalen Lösung gemischt-ganzzahliger linearer Optimierungsprobleme werden die in der Komplexitätstheorie definierten Problemklassen P und NP herangezogen [NEU-75]. P bezeichnet die Klasse aller Probleme, die in einer polynomial begrenzten Anzahl an Rechenschritten gelöst werden können.

Exakte Lösungsverfahren zur Lösung von NP-vollständigen Problemen wachsen in der Anzahl der benötigten Rechenschritte exponentiell mit der Anzahl der zu berücksichtigenden Modellvariablen, so dass für praxisrelevante Größenordnungen oftmals keine optimale Lösung in vertretbarer Rechenzeit gefunden werden kann [SPE-94]. Deshalb gewinnen heuristische Verfahren hier immer mehr an Bedeutung. So haben sich für die Lösung solcher Probleme sukzessive, zwei- oder mehrstufige Lösungsalgorithmen bewährt [KRI-01], [WAL-03], [POC-03].

Andere Entwicklungen zeigen die Notwendigkeit und das Potenzial hybrider Ansätzen, in denen mathematische Modelle mit diskreter ereignisorientierter Simulation kombiniert werden [LOU-02], [HIC-99]. Da mathematische Modelle nur mit Durchschnittswerten rechnen und keine zufälligen Werte für Menge und Qualität der Demontageobjekte und der Nachfrage berücksichtigen können. Die mathematischen Ansätze dienen für die strategische Auslegung von Demontagefabriken, auf Basis von Jahresprognosen. Die Ergebnisse der mathematischen Ansätze dienen als Einganggrößen für den nächsten Schritt in dem mit Hilfe der diskreten ereignisorientierten Simulation die taktische und operative Planung durchgeführt wird.

Im folgenden wird eine vier-stufige Vorgehensweise für die Standortplanung von Demontagefabriken vorgestellt.

4.6.1 Gruppenbildung

Das Hauptproblem bei der Planung von Fabriken sowie deren Systemen für die Demontage ist die Berücksichtigung der enormen Demontageobjektvielfalt. So ergibt sich beispielsweise bei der Planung einer Fabrik für die anonyme Demontage von Waschmaschinen innerhalb der Produktkategorie Haushaltsgroßgeräte, dass ca. 23 verschiedene Hersteller, die ca. 95% des Deutschen Marktes bedienen, mit ihren spezifischen Produkten berücksichtigt werden müssen. Unter der Annahme, dass jeder Hersteller in den letzten 15 Jahren im Durchschnitt alle drei Jahre fünf Produktvarianten, die sich hinsichtlich der Produktkenngrößen wie der Materialzusammensetzung, der Verbindungstechnik und der Baustruktur unterscheiden und somit unterschiedliche Prozesskenngrößen hinsichtlich der erforderlichen Demontagebetriebsmittel, Prozesszeiten und Verrichtungsabfolgen erfordern, sind bei der Demontagesystemplanung allein für Haushaltsgroßgeräte ca.

500 Produktvarianten zu berücksichtigen. Zur Zeit stellt es Stand der Technik dar [WAL-03], dass ein Demontagesystem nicht nur einen Produkttypen innerhalb einer Produktkategorie sondern sogar mehrere Produkttypen unterschiedlicher Produktkategorien demontieren soll. Damit steigt die Anzahl der bei der Planung zu berücksichtigenden Produktvarianten von ca. 500 um den Faktor der Produkttypen. Da es schier unmöglich ist, alle Produktvarianten im einzelnen bei der Demontagefabrikplanung zur berücksichtigen, ist es sinnvoll, die vielen Produktvarianten hinsichtlich ihrer Produkt- und Prozesskenngrößen in Gruppen einzuteilen. Innerhalb dieser homogenen Gruppen können entweder repräsentative Demontageobjekte für die Planung von Demontagefabriken identifiziert werden wie im Kapitel 4.6 bei der Standortplanung oder für jede Gruppe ein Demontagesystem geplant werden wie im Kapitel 4.7.1 bei der Dimensionierung. Die Gruppenbildung mit Hilfe der Clusteranalyse hat sich hierbei als effiziente Methode zur Unterschätzung der Planung von Demontagefabriken und deren -systemen bewährt [CIU-03a], [CIU-03e].

Die Clusteranalyse verfolgt das Ziel, eine Menge von Objekten in einer überschaubaren Anzahl von Gruppen oder Klassen dergestalt einzuteilen, dass ähnliche Objekte derselben Gruppe, unähnliche Objekte dagegen verschiedene Gruppe angehören [BAK-00]. Clusteranalyseverfahren lassen sich in unvollständige, deterministische und probabilistische Clusteranalyseverfahren einteilen. Die unvollständigen Verfahren erlauben eine Clusterbildung nur bei einem Merkmalsraum mit höchstens drei Dimensionen. Die deterministischen Verfahren sind alle Verfahren bei denen die Objekte mit einer Wahrscheinlichkeit von 100% einem Cluster zugeordnet werden. Wohingegen die probalistischen Verfahren bei der Zugehörigkeit eines Objektes Wahrscheinlichkeiten zwischen 0% und 100% ermöglichen.

Im weiteren wird nur kurz auf die Grundlagen der Clusterbildung eingegangen, zur Vertiefung sei auf die einschlägige Literatur wie etwa BACHER [BAC-96], BACKHAUS et.al [BAK-00], STAHL [STA-85] und STEINHAUSEN [STE-77] verwiesen.

Die allgemeine Vorgehensweise der Gruppenbildung wird in Bild 32 dargestellt. Die ersten beiden Phasen dienen der Entwicklung der Merkmalsbasis, mit deren Hilfe die Produkt- und Prozessinformationen abgebildet werden können. Hierbei ist die Eignung der bestimmten Merkmale in Beziehung auf das Klassifikationsziel zu analysieren. Die Merkmale müssen vor allem voneinander unabhängig sein, um innere Gewichtungen zu verhindern, was durch eine Korrelationsanalyse untersucht werden kann [BAC-96]. Des weiteren sollten die Merkmalsausprägungen einer hinreichenden Streuung unterliegen, damit eine Klassifizierung möglich ist. Im nächsten Schritt erfolgt die Normierung der metrisch skalierten Variablen der Merkmalsbasis, wie der Prozesszeit, mit Hilfe von Transformationsalgorithmen auf eine dimensionslose Einheitsskala, um Ungleichgewichtungen bei der Benutzung verschiedener Skalenmaße und Wertebereiche zu verhindern. Bei binär skalierten Variablen der Merkmalsbasis, die das Vorhandensein oder nicht Vorhandensein von Merkmalen ausdrücken, ist eine Normierung nicht erforderlich. Anschließend erfolgt die Proximitätsmaßermittlung, d.h. die Quantifizierung der Ähnlichkeit oder Distanz zwischen den Objekten, auf Basis ihrer Merkmalausprägungen. D.h. es

wird für jeweils alle möglichen Paare von Objekten aus der Gesamtmenge mit Hilfe von Ähnlichkeits- oder Distanzfunktionen deren Ähnlichkeits- oder Distanzmaße bestimmt. Auf Basis der Proximitätsmaße erfolgt die Klassifizierung durch den Clusteralgorithmus, der schrittweise Objekte mit ähnlichen Merkmalen zu einer Gruppe zusammenfasst. Die Ergebnisse der Clusterung lassen sich in einfachen Tabellen darstellen, in denen die Objekte der errechneten Clusterzugehörigkeit (Clusternummer) in der entsprechenden Clusterlösung gegenübergestellt werden. Sie sind allerdings in den Tabellen schwer interpretierbar, da die Ähnlichkeit in hier nicht grafisch anschaulich dargestellt werden kann. Deshalb sollten die Ergebnisse einer Clusteranalyse in sog. Dendogrammen dargestellt werden, welches die stufenweise Vereinigung der Objekte wiedergibt und eine Plausibilitätsprüfung der errechneten Clusterzugehörigkeit ermöglicht [GÜH-91].

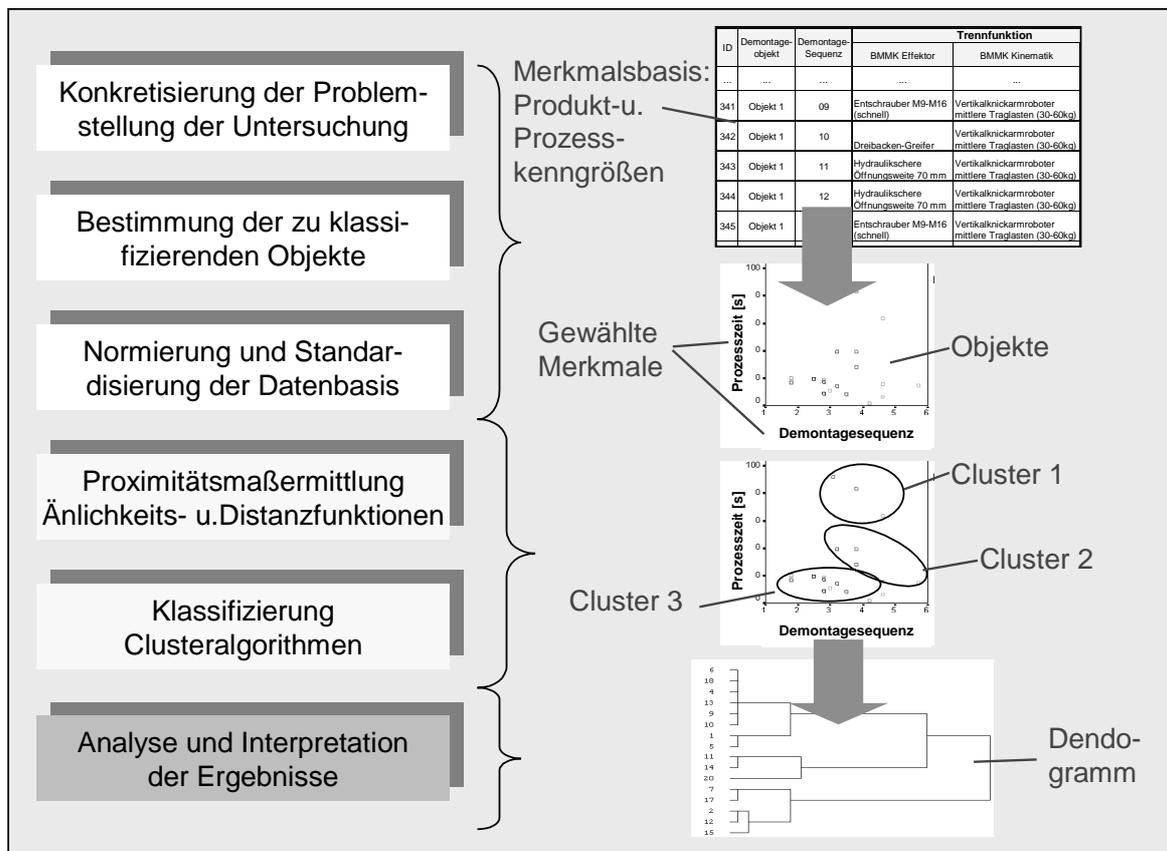


Bild 32: Vorgehensweise bei der Gruppenbildung

4.6.1.1 Demontageplanung

Im Bereich der Demontageplanung für Elektro- und Elektronikaltgeräte hat sich die Gruppenbildung mit Hilfe der Clusteranalyse bewährt. Die wesentlichen Entwicklungen von sowohl produktorientierten als auch prozessorientierten Verfahren sind von HENTSCHEL [HEN-96], WERDER [WER-96] und WESTERNHAGEN [WET-01] durchgeführt worden. Im folgenden werden diese vorgestellt um die Anforderungen für die konzipierte Methode zur Gruppenbildung abzuleiten.

WERDER geht in seiner Arbeit von der Situation aus, dass elektrische und elektronische Altgeräte manuell an Einzelplatzarbeitsplätzen vollständig zerlegt werden. Die für die

Clusteranalyse herangezogenen Merkmale werden in Struktur und Inhaltsstoffe der Geräte gegliedert, um die Entsorgungslogistik am Arbeitsplatz zu vereinfachen. Eine Untergliederung erfolgt auch in demontagebezogene Merkmale wie Trennverfahren und Demontagereihenfolge, um die Voraussetzung für arbeitsteilige und mechanisierte Demontagesysteme zu schaffen und zudem einen Lerneffekt beim Zerleger zu bewirken. Bei den für die demontageorientierte Gruppenbildung relevanten Merkmalen treten folgende drei Skalierungsarten auf:

- binär , Trennwerkzeug notwendig oder nicht notwendig,
- metrisch, Menge an Fraktion und
- indirekt, Demontagereihenfolge.

Die binären und metrischen Daten werden mit Hilfe von Standardproximitätsmaßen in Ähnlichkeits- oder Distanzmatrizen umgewandelt. Für die Distanzbestimmung von indirekt skalierten Merkmalen werden Matrizen, wie z.B. Vorrangmatrizen definiert, welche die Vorzeitigkeitsverhältnisse für den Demontageablauf beschreiben. Um Vorrangmatrizen vergleichbar zu machen, werden die Methoden der Matrixreduktion und der Matrixerweiterung verwendet, da nicht alle Demontageobjekte gleichgroße Vorrangmatrizen aufweisen. Diese Vorgehensweise führt bei einer großen Anzahl zu untersuchender Objekte zu einer starken Reduzierung der Matrizen. Infolgedessen ist der Aussagegehalt und damit die Eignung für eine Clusteranalyse geschwächt.

WESTERNHAGEN'S vorgestellter Ansatz zur Clusteranalyse soll die Planung von manuellen Fließdemontagesystemen unterstützen. Der entwickelte Ansatz lehnt sich an den von WERDER an. Als Merkmalsbasis werden Produkt- und Prozesskenngrößen zugrunde gelegt, die mittels Transformationen in eine für die Clusteranalyse geeignete Datenbasis abgeleitet wird. Die Merkmale lassen sich in die Gruppen Betriebsmittel, Fraktion, Verbindungstechnik und Eigenschaften einteilen. Die Merkmale sind in objektspezifischen Datenbanken hinterlegt. Die Datenbank *Betriebsmittel* enthält die verschiedenen Betriebsmittel mit ihren Spezifikationen und den jeweils kumulierten Ausprägungen, wie etwa der Einsatzdauer. Die Datenbank *Fraktion* enthält Angaben über die fraktionsbezogene kumulierte Demontagezeit und optional Angaben zum Gewicht des entsprechenden Bauteils. Weiterhin werden Information über die Verbindungstechnik, welche sich auf die jeweilige Häufigkeit und die spezifische Lösedauer beziehen, zur Klassifizierung herangezogen. In der Datenbank *Eigenschaften* werden Kenngrößen wie die Zerlegeleistung zusammengefasst. Die Bildung der Distanzen erfolgt getrennt nach den jeweiligen Skalenniveaus. Es werden Distanzmatrizen für metrische, wie Betriebsmittel und Operationen und Distanzmatrizen für binäre, wie Materialfraktion, Merkmalsbasen erstellt, die anschließend gewichtet und in einer Gesamtdistanzmatrix kumuliert werden. Als Vorteil nennt WESTERNHAGEN, dass höherskalierte Merkmale nicht in ihrem Informationsgehalt durch eine Niveauregression eingeschränkt werden müssen, sondern in ihrer ursprünglichen Form in die Gruppierung eingehen können. Durch dieses Verfahren kann eine variable Anzahl von Merkmalen mit unterschiedlichen Skalierungsarten und Gewichtungen zur Gruppenbildung herangezogen werden.

HENTSCHEL geht in ihrem Ansatz davon aus, dass die durchzuführenden Demontageabläufe stark von den unterschiedlichen Produkteigenschaften beeinflusst und nicht exakt vorherbestimmbar sind. Mit Hilfe einer Clusterbildung sollen die vielfältigen und insbesondere unsicheren Altprodukteigenschaften für die prädikative Planung von Demontagesystemen systematisiert werden. Die Clusterbildung erfolgt unter Nutzung der Fuzzy Set Theorie, die es erlaubt altproduktspezifische Kriterien mit Hilfe linguistischer Variablen zu beschreiben. Somit kann die Zugehörigkeit eines Produktes zu einem Cluster graduell abgestuft werden. Es entstehen unscharfe Klassen, da eine strenge Abgrenzung zwischen verschiedenen Zuordnungen der Objekte nicht möglich ist. Für Merkmale, die unsicher sind oder für die keine binäre Beschreibung möglich ist, werden Zugehörigkeitsfunktionen aufgestellt. Durch Zugehörigkeitsfunktionen wird der Zusammenhang zwischen Merkmalen und Klassen hergestellt. Durch sie wird ausgedrückt, zu welchem Grad ein Produkt ein bestimmtes Merkmal ausweist. Die Merkmalszugehörigkeiten werden in einer Matrix zusammengefasst. Mit Hilfe der Matrix erfolgt ein paarweiser Vergleich der Objekte durch Berechnung der quadrierten euklidischen Distanz. Die Berechnung von Fuzzy Clustern zielt darauf ab, eine mit den Zugehörigkeitswerten gewichtete Distanz zwischen den Clusterzentren und den Datenpunkten zu minimieren. Es ist also das Ziel, Clusterschwerpunkte oder –zentren zu bilden und dorthin zu legen, wo die Distanz zwischen den betrachteten Objekten und Schwerpunkten minimal ist.

Clusteransätze Anforderungen	[WER-96]	[WET-01]	[HEN-96]	EIGENER ANSATZ
Eindeutige Zuordnung der Demontageobjekte zu Gruppen	●	●	○	●
Ganzheitlicher Ansatz - Berücksichtigung aller möglicher Demontageobjekte	○	○	○	●
Betrachtung prozessorientierter Merkmale	●	●	○	●
Betrachtung produktorientierter Merkmale	●	●	●	●
Berücksichtigung automatisierter Demontageprozesse	○	○	○	●
Verwendung verschiedener Standardverfahren für Proximitätsmaßbestimmung	◐	●	●	●
Verwendung verschiedener Standardverfahren für die Klassifizierung	●	●	◐	●
Generierung der Merkmalbasis aus Datenbanken	○	●	○	●
Verwendung von Standardsoftware zur Umsetzung	○	●	○	●
Einfache Anwendung der Methode zur Gruppenbildung	○	◐	◐	●
Universeller Ansatz für die Planung unterschiedlicher Organisationsformen von Demontagesystemen	○	◐	◐	●
● anwendbar/berücksichtigt ◐ teilweise anwendbar/berücksichtigt ○ nicht anwendbar/berücksichtigt				

Tabelle 10: Bewertung von Clustermethoden zur Demontagesystemsplanung

Die vorgestellten Arbeiten sind durch ihre spezifischen Vor- und Nachteile gekennzeichnet, die sich durch die jeweiligen Anwendungen ergeben. In Tabelle 10 werden die vorgestellten Clustermethoden anhand der identifizierten Anforderungen an eine allgemeingültige Methode zur Demontageobjektklassifizierung im Rahmen der Planung von Demontagefabriken und ihrer Demontagesysteme mit dem Ziel der Datenreduzierung bewertet.

Die zu entwickelnde Methode zur Demontageobjektklassifizierung im Rahmen der Planung von Demontagefabriken und ihrer Demontagesysteme mit dem Ziel der Bildung von homogenen Demontageobjektgruppen und der damit einhergehenden Reduzierung:

- der unterschiedlichen Fraktionen pro Gruppe und
- der notwendigen Anzahl an Betriebsmitteln pro Gruppe

muss die in Tabelle 10 aufgestellten Anforderungen erfüllen.

4.6.1.2 Produkt- und prozessorientierte Merkmalsbasis

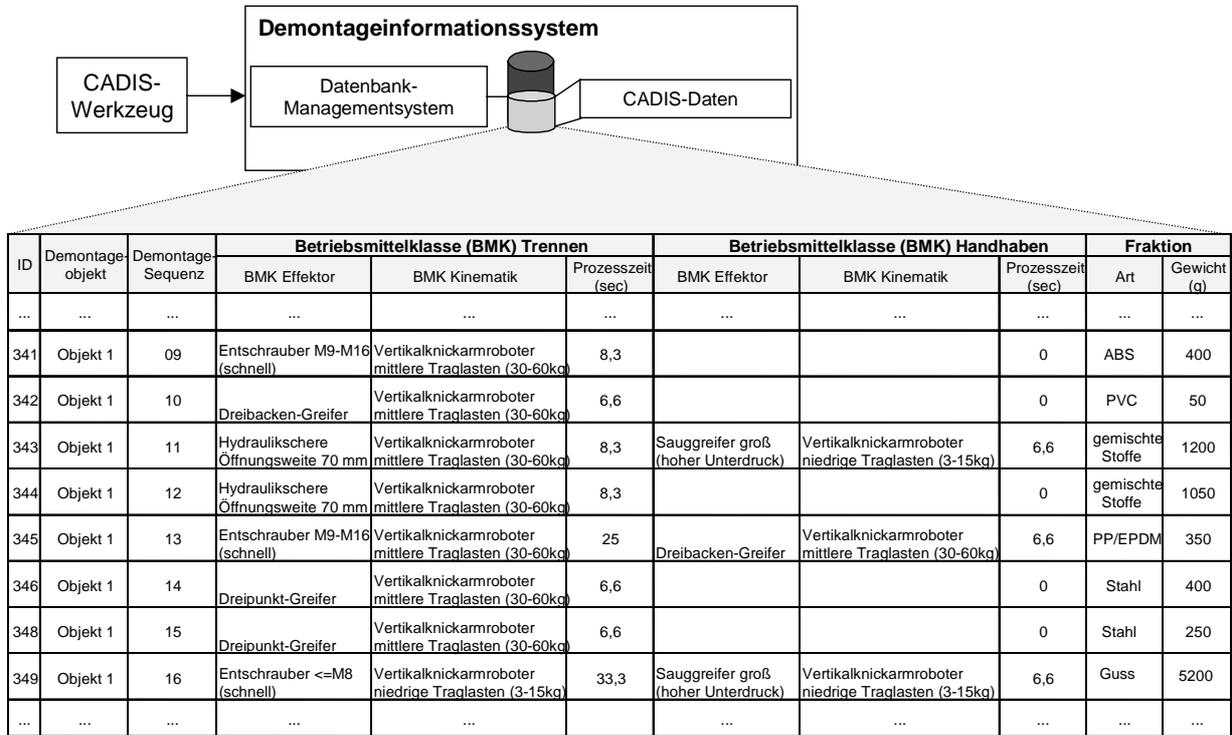
Die Planung von wirtschaftlichen Demontagefabriken kann nur erfolgen, wenn die zu demontierenden Demontageobjekte hinsichtlich ihrer produkt- und prozessorientierten Merkmale detailliert beschrieben werden. Die Schwierigkeit in der Demontageplanung besteht in der Gewinnung von relevanten produkt- und prozessorientierten Daten über die zu demontierenden Demontageobjekte. Da nach der WEEE die Hersteller ab 2005 die Pflicht haben, Recycler und Nutzer ihrer Produkte über Möglichkeiten der Entsorgung zu informieren und die Altgeräte nach ihrem Gebrauch zurückzunehmen und zu entsorgen, ist davon auszugehen, dass sich in der nächsten Zeit Standards oder Dienstleistungen wie das Internetportal www.RecyclingPass.net entwickeln [LCE-03]. Dieses Internetportal bietet Herstellern die Möglichkeit, den Demontage- und Recyclingbetrieben relevante Informationen für die effektive Planung und den Betrieb ihrer Systeme schnell und aktuell zur Verfügung zu stellen.

Um für die Demontagesystemplanung relevante Daten zu gewinnen, wird das im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 281 „Demontagefabriken“ entwickelte Produkt-, Betriebsmittel- und Prozessmodell für die Demontagesequenzplanung als Basis genommen [FRA-03a]. Mit Hilfe des entwickelten Werkzeuges CADIS (Computer Aided Disassembly Sequence Design) können den einzelnen Demontageschritten des Demontageplans eines Demontageobjektes (Produktmodell) die erforderlichen Demontagebetriebsmittel (Betriebsmittelmodell) zugeordnet und eine grobe Abschätzung der Prozesszeit (Prozessmodell) vorgenommen werden [CIU-03a], [FRA-03b].

Das CADIS-Werkzeug ist entwickelt worden, um Demontagesequenzen für hybride Demontagesysteme zu planen. Es ist möglich, für jeden Demontageschritt einen Trenn- und Handhabungsprozess zu definieren. Diese beiden Prozesse werden jeweils durch Endeffektoren und Kinematiken charakterisiert, die jeweils eine Betriebsmittelklasse (BMK) repräsentieren. Die Betriebsmittelklassen werden durch spezielle Attribute beschrieben. Beispielsweise wird die BMK Entschrauber über die Attribute der Schraubengröße und der Entschraubgeschwindigkeit spezifiziert. Der Vorteil der Beschreibung einer Kinematik oder eines Endeffektors als Klasse liegt in der erst zum späteren erforderlichen Zuordnung von spezifischen Betriebsmitteln zu den Klassen. Bei manuellen Demontageprozessen erhält die BMK Kinematik die Ausprägung „Werker“ und die BMK Effektor die Ausprägung „Hände“ zugewiesen. Die Merkmale, die für eine Clusteranalyse auf Basis der Planungsergebnisse des CADIS-Werkzeuges betrachtet werden können, sind:

- für den Trennprozess: BMK Effektor, BMK Kinematik, Prozesszeit Trennen,
- für den Handhabungsprozess: BMK Effektor, BMK Kinematik, Prozesszeit Handhaben und
- Art und Gewicht der entstehenden Materialfraktionen für jeden Demontageschritt.

Die exemplarische Beschreibung einer Demontagesequenz mit den für die Clusteranalyse relevanten Merkmalen ist in Bild 33 dargestellt.



CADIS (Computer Integrated Disassembly Sequence Design)

Bild 33: Berücksichtigte Produkt- und Prozesskenngößen für die Clusteranalyse.

4.6.1.3 Transformation der Merkmalsbasis

Die direkte Verwendung der CADIS-Datenbasis für die Clusteranalyse ist noch nicht möglich, weil einerseits die einzelnen Datensätze der demontageobjektspezifischen Produkt- und Prozesskenngößen zu einem gemeinsamen Datensatz zusammengelegt werden müssen und andererseits die Umwandlung der noch nominal skalierten Merkmalsbasen notwendig ist. Die Ausprägungen der Merkmale BMK-Effektor und -Kinematik für den Trenn- und Handhabungsprozess sowie die Art der entstehenden Fraktionen liegen in nominalen, mehrkategorialen Skalenniveaus vor. Diese werden in quantitative Merkmale umgewandelt, indem für jedes Demontageobjekt die kumulierte Anzahl an notwendigen BMK-Effektor und -Kinematik für alle Trenn- und Handhabungsprozesse bestimmt wird (Bild 34). In den gemeinsamen Datensatz werden diese demontageobjektspezifischen Häufigkeiten, mit denen die Betriebsmittelklassen auftreten, eingetragen. Dies hat zur Folge, dass ebenfalls die kumulierten Prozesszeiten für jede einzelne BMK sowie die kumulierten Gewichte der entstehenden Fraktionen berechnet werden müssen.

Nach der Transformation steht eine metrische Datenbasis mit unterschiedlichen Maßniveaus (dimensionslos, Zeit in Sekunden, Gewicht in kg) für die Clusteranalyse zur Verfügung. Fehlende Werte, wie sie beispielsweise in Bild 34 bei der Handhabung und bei

den entstehenden Fraktionen exemplarisch dargestellt sind, werden bei der Transformation nicht berücksichtigt.

Demontage- objekt	Betriebsmittelklasse (BMK) Trennen							
	Effektor [Anzahl]			kum. Prozesszeit Trennen [sec]			Kinematik [Anzahl]	
	Entschrauber M9-M16 (schnell)	Dreibacken- Greifer	Hydraulische Öffnungsweite 70 mm	Entschrauber M9-M16 (schnell)	Dreibacken- Greifer	Hydraulische Öffnungsweite 70 mm	Vertikalknick- armroboter niedrige Traglasten (3-15kg)	Vertikalknick- armroboter mittlere Traglasten (30- 60kg)
...
Objekt 3	2	0	2	12	0	8	1	1
Objekt 4	0	4	3	0	12	11	0	3
Objekt 5	1	1	1	5	10	10	1	2
Objekt 6	0	0	2	0	0	5	0	2
...

Bild 34: Beispielhafter Auszug einer transformierten Merkmalsbasis

4.6.1.4 Vorgehensmodell

Nachdem eine für die Clusteranalyse geeignete Datenbasis entwickelt wurde, werden die anwendbaren Algorithmen zur Transformation, zur Bildung von Ähnlichkeits- oder Distanzmatrizen und zur Clusterung identifiziert. Es soll aufzeigen, welche Algorithmen sinnvoll zu verknüpfen sind, um später eine erfolgreiche Anwendung zu garantieren. Auf die detaillierte Beschreibung von verwendeten Distanzfunktionen und Clusteralgorithmen wird verzichtet, weil diese einerseits in allen Standardwerken zur Clusteranalyse wie in BACKHAUS et. al [BAK-00] beschrieben werden, andererseits durch die Verwendung der statistischen Standardsoftware SPSS zur Berechnung der Proximitätsmaße und Durchführung der Klassifizierung, keine eigenständige Implementierung erfolgen muss.

Der erstellten Datenbasis liegen ausschließlich metrische Skalenniveaus verschiedener Maßeinheiten wie Anzahl an Betriebsmittel X [dimensionslos], Prozesszeiten [s] und Gewicht an Fraktion X [kg] zugrunde. Generell kommen für die Proximitätsmaßbestimmung metrischer Skalen die Distanzmaße City-Block-Metrik, euklidische Distanz, quadrierte euklidische Distanz und Chebychev-Distanz in Betracht [STE-77]. Die euklidische Distanz sowie die quadrierte euklidische Distanz haben sich aufgrund ihrer Robustheit gegen Transformationen durchgesetzt [GÜH-91], [SPÄ-77]. Zudem hebt die quadrierte euklidische Distanz die Randlage von Ausreißerobjekten besonders hervor.

Für die Anwendung der Distanzmaße müssen aufgrund der unterschiedlichen Maßeinheiten der Variablen der Datenbasis Transformationen durchgeführt werden. Besonders gute Ergebnisse werden mit den Verfahren der z-Transformation und der Extremwertnormalisierung erzielt. Für die vorliegende Datenbasis kann sowohl die z-Transformation als auch die Extremwertnormalisierung angewendet werden, wenn Variablen mit gleichen Maßeinheiten zur Clusterung herangezogen werden. Die Anwendung der Transformation ist jedoch nicht zwingend erforderlich. Werden hingegen Variablen mit unterschiedlichen Maßeinheiten für eine Clusterung herangezogen, ist die Anwendung der Transformation zwingend notwendig.

Prinzipiell lassen sich für die Klassifizierung der gebildeten Merkmalsbasis das kontrahierende Single-Linkage-Verfahren, das dilatierende Complete-Linkage-Verfahren und konservative Average-Linkage-Verfahren, Zentroid-Verfahren, Median-Verfahren und Ward-Verfahren anwenden. Dilatierende Verfahren neigen dazu, einzelne gleichgroße Gruppen zu bilden, während kontrahierende Verfahren eher dazu tendieren, zunächst wenige große Gruppen zu bilden, denen viele kleine gegenüberstehen. Kontrahierende Verfahren sind eher dazu geeignet, Ausreißer in einem Objektraum zu identifizieren. Die konservativen Verfahren bilden einen Kompromiss aus Dilatation und Kontraktion, da sowohl Homogenität als auch Separiertheit berücksichtigt werden. Untersuchungen von WESTERNHAGEN [WET-01] haben ergeben, dass die Verfahren Complete-Linkage, Median und Zentroid häufig Inversionen zur Folge haben, wodurch die Clusterergebnisse nicht mehr eindeutig und interpretierbar sind. Deshalb wird auf die weitere Betrachtung dieser Verfahren verzichtet und nur die weiter berücksichtigten Clusteralgorithmen kurz beschrieben.

Das *Single-Linkage Verfahren* vereinigt im ersten Schritt die Objekte, deren Distanz am geringsten ist, d.h. die Objekte, die sich am ähnlichsten sind. Sind diese Objekte zu einer Gruppe vereint, wird im nächsten Schritt die geringste Entfernung eines weiteren Objektes und der Gruppe gesucht. Als Distanz der Gruppe zu dem Objekt wird die geringste Einzeldistanz herangezogen. Ist die Distanz der Gruppen größer als die Distanz zweier Einzelobjekte, die noch zu keinem Cluster gehören, bilden die beiden Einzelobjekte eine neue Gruppe. Dieses Vorgehen wird solange durchgeführt, bis alle Objekte zu Clustern vereinigt sind.

Das *Ward-Verfahren* unterscheidet sich nun darin, Gruppen nicht aufgrund geringer Distanzen zu bilden, sondern Objekte zu Gruppen zu vereinigen, wenn diese die Streuung (Varianz) innerhalb einer Gruppe möglichst wenig erhöhen, bzw. die Streuung zwischen den Clusterzentren maximiert wird. Dadurch werden möglichst gleichgroße, homogene Cluster gebildet. Da das Ward-Verfahren als ein sehr guter Fusionierungsalgorithmus angesehen wird, wenn alle Variablen auf metrischem Skalenniveau gemessen wurden und keine Ausreißer enthalten sind, bzw. diese vorher eliminiert worden sind, sollte dieses Verfahren bevorzugt verwendet werden [GÜH-91]. Es ist jedoch zu beachten, dass das Ward-Verfahren nur in Verbindung der quadrierten euklidischen Distanz angewendet werden sollte, da es sonst prinzipbedingt zu Problemen bei der Berechnung und Schwierigkeiten bei der Interpretation kommen kann [BAC-96].

Für die Durchführung der Klassifizierung lässt sich zusammenfassen, dass die Datenbasis nach der Proximitätsmaßbestimmung zunächst mit Hilfe des Single-Linkage-Verfahrens auf die Existenz von Ausreißern untersucht und anschließend die Gruppenbildung der reduzierten Objektmenge mit Hilfe des Average-Linkage oder Ward-Verfahren durchgeführt wird. Die errechneten Clusterzugehörigkeiten der Demontageobjekte werden im letzten Schritt des Vorgehensmodell mit Hilfe eines Dendogramms auf Ihre Plausibilität hin analysiert. Eine Zusammenfassung des Vorgehensmodells ist in Bild 35 dargestellt.

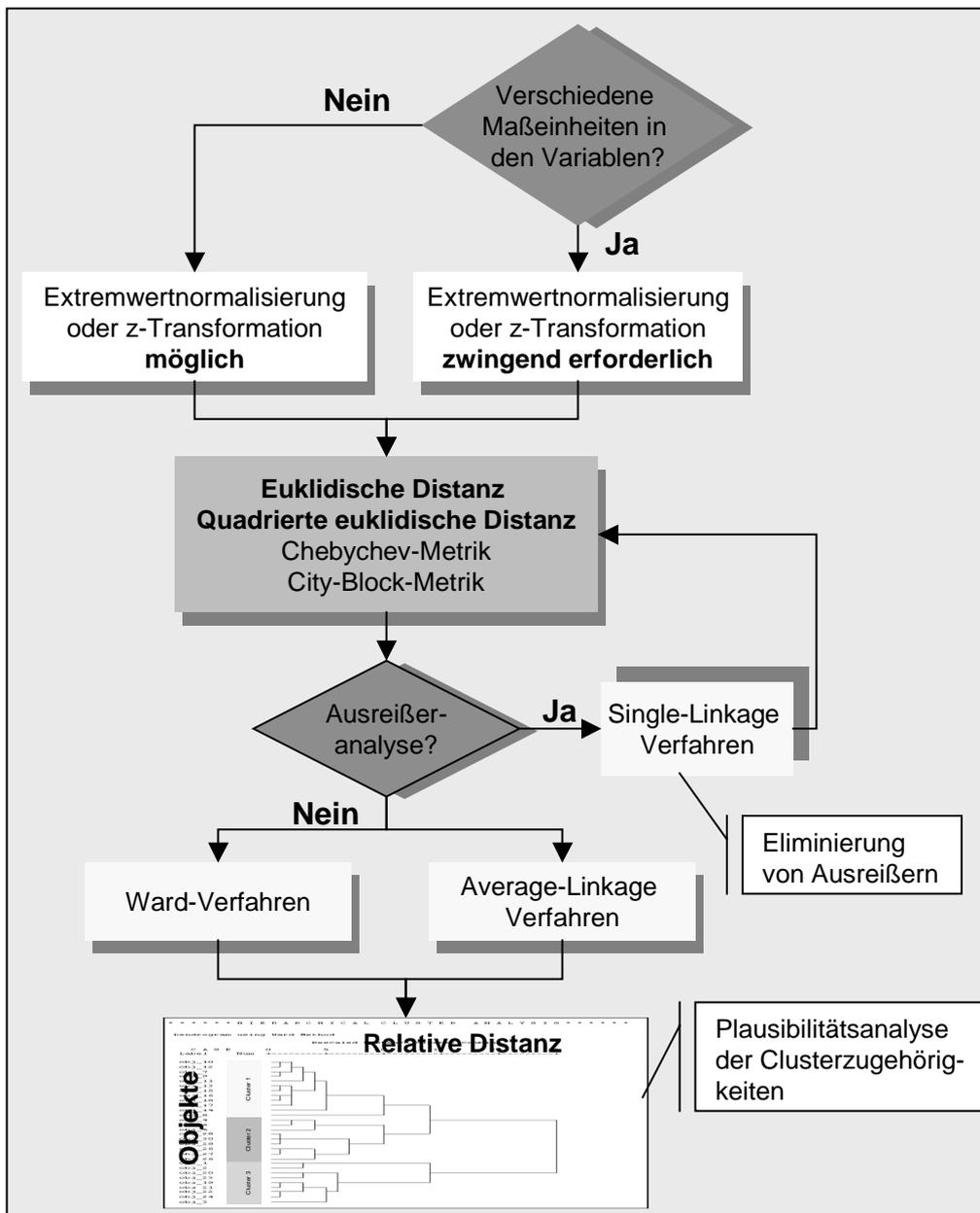


Bild 35: Vorgehensmodell der Klassifizierung

4.6.2 Standortwahl – Mathematisches Modell

Die im Kapitel 4.6.1 vorgestellte Clusteranalyse zur Datenreduktion anzuwenden, ist eine entscheidende Voraussetzung, um den Planungsschritt der Standortplanung durchführen zu können. Die Rechenzeit, die gebraucht wird, um das entwickelte mathematische Modell – Standortwahl zu lösen, wird im wesentlichen von der Anzahl der zu berücksichtigenden Demontageobjekte je Sammelstelle bestimmt.

Zunächst werden die in den Sammelstellen auftretenden Demontageobjekte unter Berücksichtigung der definierten Merkmalsbasis mit Hilfe der Clusteranalyse zu Demontageobjektgruppen zusammengefasst. Aus den gebildeten homogenen Demontageobjektgruppen wird mit Hilfe des Repräsentativverfahrens, welches das mengenmäßig am stärksten vertretene Demontageobjekt eines Clusters identifiziert, ein Repräsentant für jedes Cluster ausgewählt. Durch die Repräsentation einer Demontageobjektgruppe

durch ein Demontageobjekt, kommt es zu einer Reduktion der zu berücksichtigenden Modellvariablen, was den Lösungsaufwand des Standortplanungsmodells erheblich reduziert.

Im folgenden werden die verwendeten Indexmengen (Tabelle 11), Entscheidungsvariablen (Tabelle 12) und Modellvariablen (Tabelle 13), die für die Beschreibung des gemischt-ganzzahligen Optimierungsmodells Standortwahl verwendet werden, definiert. Auf Basis der Definitionen wird das entwickelte Optimierungsmodell mit der Zielfunktion und den Nebenbedingungen vorgestellt.

Definition der Indexmengen	
B	Demontagebetriebsmittel, $B = \{1, \dots, b_n\}$
E	entstehende Demontageerzeugnisse, $E = \{1, \dots, e_n\}$
F	potenziellen Standorte der Demontagefabriken, $F = \{1, \dots, f_n\}$
K	Kunden von Demontageerzeugnissen, $K = \{1, \dots, k_n\}$
M	entstehende Materialfraktionen, $M = \{1, \dots, m_n\}$
O	Typen an Demontageobjekten, $O = \{1, \dots, o_n\}$
Q	mögliche Demontagekapazitäten der Demontagefabriken (Demontagekapazitätsniveaus), $Q = \{1, \dots, q_n\}$
R	Standorte für das Materialrecycling, $R = \{1, \dots, r_n\}$
S	Sammelstellen von Demontageobjekten, $S = \{1, \dots, s_n\}$

Tabelle 11: Indexmenge – Standortwahl-Modell

Definition der Entscheidungsvariablen	
$V_{b,f}$	Anzahl der Demontagebetriebsmittel b mit der Kapazität Kap_b die der Demontagefabrik f zugewiesen werden [Stk.].
$X_{s,f,o}$	Menge an Demontageobjekten o die von der Sammelstelle s der Demontagefabrik f zugewiesen werden [Stk./a].
$Y_{f,q}$	Binäre Variable zur Festlegung mit welcher Demontagekapazität q die Demontagefabrik f errichtet werden soll.
$Z_{f,k,o,e}$	Menge der Demontageerzeugnisse e des Demontageobjektes o die von der Demontagefabrik f dem Kunden k zugewiesen werden [Stk.].
$Z_{f,r,o,e}$	Menge der Demontageerzeugnisse e des Demontageobjektes o , die für das Materialrecycling in der Demontagefabrik f demontiert werden und dem Materialrecycling-Standortes r zugewiesen werden [Einheiten].

Tabelle 12: Entscheidungsvariablen – Standortwahl-Modell

Definition der Modellvariablen	
$AM_{s,o}$	Jährliche Anfallmenge von Demontageobjekt o an Sammelstelle s [Stk./a].
$DE_{o,e}$	Binäre Variable die beschreibt ob ein Demontageobjekt o in das Demontageerzeugnis e demontiert werden kann ($DE_{o,e} = 1$: ja; $DE_{o,e} = 0$: nein).
E_m	Erlös für den Verkauf der Materialfraktion m [€/kg].
E_o	Erlös für die Annahme des Demontageobjektes o [€/Stk.].
$E_{o,e}$	Erlös für den Verkauf des Demontageerzeugnisses e von Demontageobjekt o [€/Stk.].
$Fix_{f,q}$	Jährliche Fixkosten für die Eröffnung einer Demontagefabrik f mit dem Kapazitätsniveau q [€ /a].
Fix_b	Jährliche Fixkosten für die Zuweisung eines Demontagebetriebsmittels b [€/ a] (Diese stellen den jährlichen Abschreibungsbetrag dar).
Kap_b	Maximale Kapazität des Demontagebetriebsmittels b [h/a].
Kap_q	Maximale Demontagekapazität einer Demontagefabrik mit dem zugewiesenen Kapazitätsniveau q [Stk./a].
$Kap_{r,m}$	Maximale Kapazität des Materialrecycling-Standortes r für die Materialfraktion m [kg/a].
$K_{f,k,o,e}$	Transportkosten für das Demontageerzeugnis e des Demontageobjektes o von Demontagefabrik f zum Kunden k [€/Stk.].
$K_{f,r,m}$	Transportkosten der Materialfraktion m von der Demontagefabrik f zum Materialrecycling-Standort r [€/kg].
$K_{s,f}$	Transportkosten je Demontageobjekt von der Sammelstelle s zur Demontagefabrik f [€/Stk.].
$MF_{f,r,m}$	Menge der Materialfraktion m die von der Demontagefabrik f dem Materialrecycling-Standortes r zugewiesen werden [kg]. Abgeleitete Größe von der Entscheidungsvariable $Z_{f,r,o,e}$.
$M_{o,e,m}$	Menge der Materialfraktion m, die aus dem Demontageerzeugnis e des Demontageobjektes o gewonnen werden kann [kg].
$N_{k,o,e}$	Jährliche Nachfrage des Kunden k des Demontageerzeugnisses e des Demontageobjektes o [Stk./a].
$T_{b,o}$	Aggregierte erforderliche Bearbeitungszeit des Demontagebetriebsmittels b für Durchführung aller Demontageoperationen am Demontageobjekt o [s].
$T_{b,o,e}$	Zusätzliche Bearbeitungszeit des Demontagebetriebsmittels b die erforderlich wird, wenn das Demontageerzeugnis e des Demontageobjektes o nicht erzeugt werden soll, sondern weiter für das Materialrecycling demontiert werden soll [s].

Tabelle 13: Modellvariablen – Standortwahl-Modell

Die Zielfunktion(1) soll aus den potenziellen Demontagestandorten jene Standorte sowie deren notwendigen Demontagekapazitäten auswählen, die den Deckungsbeitrag des Demontageunternehmens für eine zuvor festgelegte Periode, in der Regel einem Jahr, maximieren. Die ersten drei Teile der Zielfunktion berechnen die Erlöse aus der Annahme von Elektroaltgeräten für die Demontage, dem Verkauf der erzeugten Demontageer-

zeugnisse und Materialfraktion. Von diesen Erlösen werden fünf Kostenblöcke abgezogen. Dies sind Kosten für die Eröffnung eines Demontagestandortes f mit der Demontagekapazität q . Diese sog. fixen Kosten können der jährlichen Abschreibung für die Gebäude- und Infrastrukturinvestitionen entsprechen. Der zweite Kostenblock berücksichtigt die Zuweisung des Demontagebetriebsmittels b zu der Demontagefabrik f . Hierbei können die Maschinenstunden- oder Abschreibungsbeträge verwendet werden. Die nächsten drei Kostenblöcke berücksichtigen die Transportkosten der Demontageobjekte von den Sammelstellen zu den Demontagefabriken sowie der Demontageerzeugnisse zu den Kunden und der Demontagefraktion zu den Materialrecyclern.

$$\text{MAX} \left[\begin{aligned} & \left(\sum_{o=1}^{a_n} \sum_{s=1}^{s_n} \sum_{f=1}^{f_n} (X_{s,f,o} \times E_o) + \sum_{o=1}^{a_n} \sum_{e=1}^{e_n} \sum_{f=1}^{f_n} \sum_{k=1}^{k_n} (Z_{f,k,o,e} \times E_{o,e}) + \sum_{m=1}^{m_n} \sum_{r=1}^{r_n} \sum_{f=1}^{f_n} (MF_{f,r,m} \times E_m) \right) - \\ & \left(\sum_{f=1}^{f_n} \sum_{q=1}^{q_n} (Fix_{f,q} \times Y_{f,q}) + \sum_{b=1}^{b_n} \sum_{f=1}^{f_n} (Fix_b \times V_{f,b}) + \right. \\ & \left. \left(\sum_{s=1}^{s_n} \sum_{f=1}^{f_n} \sum_{o=1}^{a_n} (X_{s,f,o} \times K_{s,f}) + \sum_{o=1}^{a_n} \sum_{e=1}^{e_n} \sum_{f=1}^{f_n} \sum_{k=1}^{k_n} (Z_{f,k,o,e} \times K_{f,k,o,e}) + \sum_{f=1}^{f_n} \sum_{r=1}^{r_n} \sum_{m=1}^{m_n} (MF_{f,r,m} \times K_{f,r,m}) \right) \right) \end{aligned} \right] \quad (1)$$

Massenbilanzen:

Der Output aller Sammelstellen (Quellen), d.h. aller Demontageobjekte, muss in der betrachteten Planungsperiode gleich dem Input in alle Demontagefabriken (Senken) sein. Die Bilanzgleichung (2) garantiert, dass alle anfallenden Demontageobjekte o in den Sammelstellen s einer Demontagefabrik f zugewiesen werden.

$$AN_{s,o} = \sum_{f=1}^{f_n} X_{s,f,o} \quad \forall s, \forall o \quad (2)$$

Die Aufgabe der Demontagefabriken ist die Zerlegung der Demontageobjekte o in Demontageerzeugnisse e für die weitere Verwertung oder Verwendung. Mit der Bilanzgleichung (3) wird garantiert, dass die Anzahl der Demontageerzeugnisse e des Demontageobjektes o die von der Demontagefabrik f den Kunden k zugewiesen werden sowie der Anzahl der Demontageerzeugnisse e der Demontageobjekte o , die für das Materialrecycling in der Demontagefabrik f demontiert werden und den Materialrecycling-Standorten r als Materialfraktion m zugewiesen werden, gleich der Summe aller erzeugbaren Demontageerzeugnisse e ist, die sich aufgrund der Anzahl der zugewiesenen Demontageobjekte o der Demontagefabrik f ergibt .

$$\sum_{k=1}^{k_n} Z_{f,k,o,e} + \sum_{r=1}^{r_n} Z_{f,r,o,e} = DE_{o,e} \times \sum_{s=1}^{s_n} X_{s,f,o} \quad \forall e, \forall o, \forall f \quad (3)$$

Mit Hilfe der Bilanzgleichung (4) erfolgt die Umrechnung der den Materialrecycling-Standorten r zugewiesenen Demontageerzeugnisse des Demontageobjektes o in die Materialfraktionen f . Dieses ist notwendig, weil die Kapazitäten der Materialrecycler in kg pro Materialfraktionen angegeben werden, sowie die erzielbaren Erlöse aus dem Verkauf der Demontagefraktionen in €/kg Materialfraktionen berechnet werden.

$$MF_{f,r,m} = \sum_{o=1}^{o_n} \sum_{e=1}^{e_n} (Z_{f,r,o,e} \times M_{o,e,m}) \quad \forall f, \forall r, \forall m \quad (4)$$

Kapazitäten:

Die Kapazitätsrestriktion (5) stellt sicher, dass nur so viele Demontageobjekte o einer Demontagefabrik f zugewiesen werden, wie dessen maximale Demontagekapazität es zulässt.

$$\sum_{o=1}^{o_n} \sum_{s=1}^{s_n} X_{s,f,o} \leq \sum_{q=1}^{q_n} Kap_q \times Y_{f,q} \quad \forall f \quad (5)$$

Die Restriktion (6) ist dafür verantwortlich, dass die der Demontagefabrik f zugewiesenen Kapazitäten an Demontagebetriebsmitteln b gleich oder größer den notwendigen Kapazitäten an Demontagebetriebsmitteln b ist, die für die Demontage der Demontageobjekte o in der Demontagefabrik f notwendig sind.

$$Kap_b \times V_{f,b} \geq \left[\sum_{s=1}^{s_n} \sum_{o=1}^{o_n} (X_{s,f,o} \times T_{b,o}) + \sum_{r=1}^{r_n} \sum_{o=1}^{o_n} \sum_{e=1}^{e_n} (Z_{f,r,o,e} \times T_{b,o,e}) \right] \quad \forall f, \forall b \quad (6)$$

Die Kapazitätsrestriktion (7) garantiert, dass die dem Kunden k zugewiesenen Demontageerzeugnisse e des Demontagobjekts o nicht seine periodenbezogene Nachfrage übersteigt.

$$\sum_{f=1}^{f_n} Z_{f,k,o,e} \leq N_{k,o,e} \quad \forall k, \forall o, \forall e \quad (7)$$

Die Kapazitätsrestriktion (8) gewährleistet, dass jedem Recyclingstandort r nur soviel Materialfraktionen m zugewiesen werden, die nicht seine periodenbezogenen Recyclingkapazität übersteigen.

$$\sum_{f=1}^{f_n} MF_{f,r,m} \leq Kap_{r,m} \quad \forall r, \forall m \quad (8)$$

Logische Nebenbedingungen:

Die Nebenbedingung (9) sichert, dass nur ein Kapazitätsniveau einer Demontagefabrik zugewiesen werden kann.

$$\sum_{q=1}^{q_n} Y_{f,q} \leq 1 \quad \forall f \quad (9)$$

Wertebereich der Entscheidungsvariablen:

Weiterhin gelten die folgenden Nichtnegativitätsbedingungen (10) – (13). Damit das formulierte Optimierungsmodell in einer praxisrelevanten Zeit lösbar ist, werden den Entscheidungsvariablen $X_{s,f,o}$, $V_{f,b}$, $Z_{f,k,o,e}$ und $Z_{f,r,o,e}$ positive reelle Werte zugewiesen. $Y_{f,q}$ ist eine binäre Variable, die festlegt, auf welchem Kapazitätsniveau q die Demontagefabrik f errichtet werden soll (14).

$$X_{s,f,o} \geq 0 \quad \forall s, \forall f, \forall o \quad (10)$$

$$Z_{f,k,o,e} \geq 0 \quad \forall f, \forall k, \forall o, \forall e \quad (11)$$

$$Z_{f,r,o,e} \geq 0 \quad \forall f, \forall r, \forall o, \forall e \quad (12)$$

$$V_{f,b} \geq 0 \quad \forall f, \forall b \quad (13)$$

$$Y_{f,q} \in \{0,1\} \quad \forall f, \forall q \quad (14)$$

Als Ergebnis des Standortplanungsmodells – Standortwahl werden Standorte der Demontagefabriken und deren Demontagekapazitäten bestimmt.

4.6.3 Demontagebetriebsmittel – Mathematisches Modell

In dem nun folgenden zweiten Schritt werden auf Basis der Ergebnisse des Standortplanungsmodells – Standortwahl die erforderlichen Demontagebetriebsmittel sowie deren Kapazitäten für jede Demontagefabrik ermittelt. Demontagebetriebsmittel stellen hierbei Betriebsmittel dar, die im Rahmen der Demontage unmittelbar für die Handhabung, das Trennen oder Sonderoperationen eingesetzt werden. Betriebsmittel für Lagerung und Förderung sowie Mess- und Prüfmittel zum Erkennen werden auf dieser Aggregationsebene nicht berücksichtigt.

Das zu formulierende gemischt-ganzzahlige Optimierungsmodell erfordert nur geringfügige Veränderungen des eingeführten Optimierungsmodells Standortwahl. Die binäre Entscheidungsvariable $Y_{f,q}$, die festlegt, auf welchem Kapazitätsniveau q die Demontagefabrik f errichtet werden soll, liegt als Ergebnis vor und muss somit nicht mehr berücksichtigt werden. Dadurch reduziert sich die Komplexität des folgenden Modells wesentlich, was es jetzt ermöglicht, jedes einzelne Demontageobjekt zu berücksichtigen.

Im Folgenden werden nur noch die Veränderungen zum mathematischen Modell Standortwahl dargestellt und sich dabei auf die zuvor definierten Modellkomponenten berufen.

Indexmengen

Es werden keine neuen Indexmengen definiert, damit gelten die in Tabelle 11 dargestellten Indexmengen weiter.

Modellvariablen:

Es werden die Modellvariablen Kap_f und Fix_f als Ergebnis aus der ersten Planungsphase neu eingeführt sowie die Modellvariablen Kap_q und $Fix_{f,q}$ ersetzt. Die anderen verwendeten Modellvariablen, wie in Tabelle 13 eingeführt, bleiben für das gemischt-ganzzahlige Optimierungsmodell – Demontagebetriebsmittel identisch.

Definition weiterer Modellvariablen	
Fix _f	Jährliche Fixkosten für die Eröffnung der Demontagefabrik f [€ /a].
Kap _f	Maximale Demontagekapazität der Demontagefabrik f [Stk./a]..

Tabelle 14: Modellvariablen Standortwahl-Modell / Ergänzung

Entscheidungsvariablen:

Die Entscheidungsvariablen bleiben indentisch, wie in Tabelle 12 dargestellt. Es wird lediglich die binäre Entscheidungsvariable $Y_{f,q}$ nicht mehr verwendet, weil diese als Ergebnis des vorhergehenden Schrittes (Anwendung des mathematischen Modells Standortwahl) vorliegt.

Die Zielfunktion (15) des Planungsmodells – Demontagebetriebsmittel soll den im ersten Planungsschritt ermittelten Demontagestandorten die notwendigen Demontagebetriebsmittel zuweisen, die den Deckungsbeitrag des Demontageunternehmens für eine zuvor festgelegte Periode, in der Regel von einem Jahr, maximieren. Sie besteht aus den gleichen Erlös- und Kostenkomponenten wie die Zielfunktion (1), mit Ausnahme des ersten Kostenblocks, weil in diesem Schritt durch die schon bestimmte Standortwahl die Kosten für die Eröffnung der Demontagestandorte f feststehen.

$$\text{MAX} \left[\begin{array}{l} \left(\sum_{o=1}^{o_n} \sum_{s=1}^{s_n} \sum_{f=1}^{f_n} (X_{s,f,o} \times E_o) + \sum_{o=1}^{o_n} \sum_{e=1}^{e_n} \sum_{f=1}^{f_n} \sum_{k=1}^{k_n} (Z_{f,k,o,e} \times E_{o,e}) + \sum_{m=1}^{m_n} \sum_{r=1}^{r_n} \sum_{f=1}^{f_n} (MF_{f,r,m} \times E_m) \right) - \\ \left(\sum_{f=1}^{f_n} \text{Fix}_f + \sum_{b=1}^{b_n} \sum_{f=1}^{f_n} (\text{Fix}_b \times V_{f,b}) + \right. \\ \left. \left(\sum_{s=1}^{s_n} \sum_{f=1}^{f_n} \sum_{o=1}^{o_n} (X_{s,f,o} \times K_{s,f}) + \sum_{o=1}^{o_n} \sum_{e=1}^{e_n} \sum_{f=1}^{f_n} \sum_{k=1}^{k_n} (Z_{f,k,o,e} \times K_{f,k,o,e}) + \sum_{f=1}^{f_n} \sum_{r=1}^{r_n} \sum_{m=1}^{m_n} (MF_{f,r,m} \times K_{f,r,m}) \right) \right) \end{array} \right] \quad (15)$$

Massenbilanzen:

Es werden die gleichen Massenbilanzen (2) – (4) verwendet, die für das Standortplanungsmodell – Standortwahl definiert wurden.

Kapazitäten:

Zur Begrenzung der Kapazitäten gelten die gleichen Kapazitätsrestriktionen (6)-(8), die für das Standortplanungsmodell – Standortwahl definiert wurden. Die Kapazitätsrestriktion (5) wird durch die Kapazitätsrestriktion (16) ersetzt. Die Restriktion (16) hat die gleiche Aufgabe wie die Restriktion (5). Sie stellt sicher, dass nur so viele Demontageobjekte o einer Demontagefabrik f zugewiesen werden, wie dessen maximale Demontagekapazität es zulässt. Dabei stellt die maximale Demontagekapazität der Demontagefabrik jetzt eine Modellvariable und keine Entscheidungsvariable dar.

$$\sum_{o=1}^{o_n} \sum_{s=1}^{s_n} X_{ilp} \leq \sum_{f=1}^{f_n} \text{Kap}_f \quad \forall f \quad (16)$$

Logische Nebenbedingungen:

Es werden keine logischen Nebenbedingungen benötigt. Somit fällt die Nebenbedingung (9) heraus.

Wertebereich der Entscheidungsvariablen:

Es gelten weiterhin die Nichtnegativitätsbedingungen (10) – (13). Den Entscheidungsvariablen $X_{s,f,o}$, $V_{f,b}$, und $Z_{f,k,o,e}$ werden im Gegensatz zum Optimierungsmodell – Standortwahl jetzt positive ganzzahlige Werte zugewiesen, da bei der Planung auch nur ganze Demontageobjekte, Demontageerzeugnisse und Demontagebetriebsmittel betrachtet werden. Allen anderen Entscheidungsvariablen werden positive reelle Werte zugewiesen.

4.6.4 Simulationsgestützte Analyse

Die Ergebnisse der Standortplanung legen folgendes fest: die erforderlichen Standorte für Demontagefabriken mit ihren jährlichen Demontagekapazitäten, die Anzahl der erforderlichen Demontagebetriebsmittel sowie ihrer Kapazitäten je Demontagestandort, die mengenmäßige Zuweisung der Demontageobjekte von den Sammelstellen zu den Demontagefabriken sowie die mengenmäßige Zuweisung der erzeugten Demontageerzeugnisse der Demontagefabriken zu den Kunden (Materialrecycler, Remanufacturer, Aufarbeiter, OEM's). Das mathematische Standortplanungsmodell berechnet zwar eine optimale Lösung. Jedoch ist die Abbildungsgüte des zu modellierenden Systems gering. Durch den Einsatz von Simulation können die Ergebnisse des Standortplanungsmodells unter Berücksichtigung von Unsicherheiten sowie einer detaillierten Modellierung verifiziert und bei Bedarf angepasst werden.

Kriterien	Simulation	Mathematisches Modell
Abbildung von Unsicherheiten	möglich	nur bedingt möglich
Abbildungsgüte des Modells	ermöglicht die ereignisorientierte und somit eine sehr detaillierte Abbildung des Planungsobjektes	ermöglicht nur eine sehr vereinfachte Darstellung des Planungsobjektes
Art des Ergebnisses	kein Optimum	mathematisch berechnetes Optimum
Ermittlung von Systemkennwerten	direkte Berechnung von Systemkennwerten	bedingte nachträgliche Berechnung von Systemkennwerten

Tabelle 15: Vergleich Modellierungsmethoden Simulation vs. mathematisches Modell

Die Simulation erlaubt die Berücksichtigung von:

- Mengen- und Typenschwankungen der täglich anfallenden Demontageobjekte an den Sammelstellen,
- Schwankungen der Demontageprozesszeiten an den Demontagebetriebsmitteln aufgrund von unterschiedlichen Zuständen der Demontageobjekte,
- technologisch bedingten Schwankungen der Demontageprozesszeiten,

- Vorrangbeziehungen zwischen den Demontageprozessen der Demontageobjekte und
- aktuelle Verfügbarkeiten der Demontagebetriebsmittel.

Des Weiteren ermöglicht die Simulation die Bewertung der Systemausprägung mit Hilfe von Kennzahlen. Die mathematische Modellierung findet eine optimale Lösung hinsichtlich der definierten Zielfunktion und Restriktionen. Es ist nur eine nachträgliche Berechnung von einigen wenigen Kennwerten, wie der durchschnittlichen Auslastung von Betriebsmitteln, möglich. Durchlaufzeiten und Bestände können beispielweise nicht aus den Ergebnissen der mathematischen Modellierung berechnet werden.

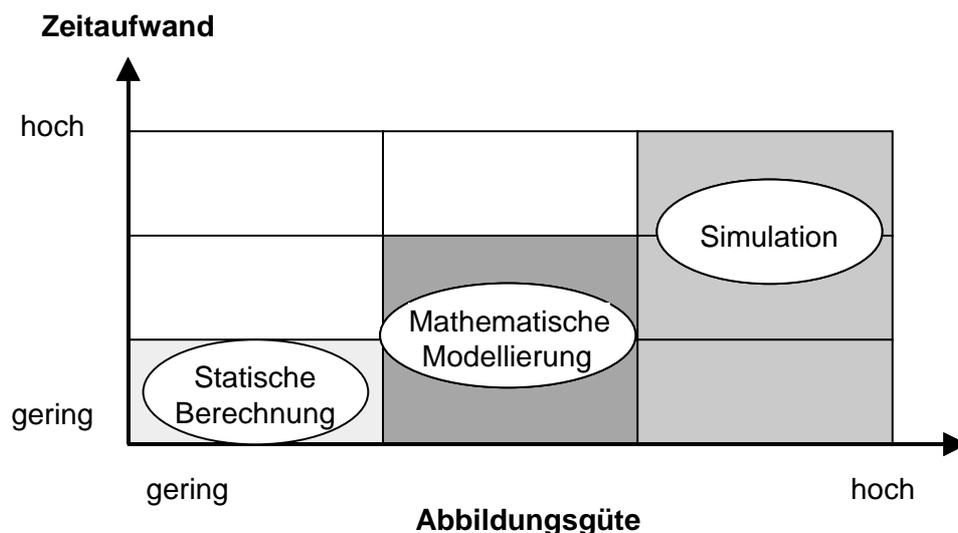


Bild 36: Zeitaufwand vs. Abbildungsgüte nach [RAL-98]

Das **Bild 36** verdeutlicht, dass die hohe Abbildungsgüte der Simulation jedoch einen hohen Zeitaufwand für die Modellerstellung und die Durchführung der Simulationsstudie erfordert.

Für die schnelle simulative Verbesserung und Verifikation der geplanten Demontagefabriken wurde ein Postprozessor für die automatische Generierung von Simulationsmodellen für das Simulationswerkzeug eM-Plant entwickelt. Ein Postprozessor besitzt die Funktionalität eines systemspezifischen Simulationsmodellgenerators, der aus spezifischen Datenbankstrukturen und Datensätzen die modellierungsrelevanten technischen Daten, Organisations- und Systemlastdaten identifiziert und daraus ein ablauffähiges Simulationsmodell für einen spezifischen Simulator generiert [SPL-96].

Somit erzeugt der Postprozessor auf Basis der Ergebnisse des mathematische Standortplanungsmodells sowie weiteren technischen, Organisations- und Systemlastdaten, die über ein Demontageinformationssystem bereitgestellt werden können, ein ablauffähiges Simulationsmodell. In **Bild 37** wird die Simulationsdatenbasis für die Modellgenerierung der Demontagefabriken mit ihren direkten vor- und nachgelagerten Akteuren des Kreislaufwirtschaftsystems dargestellt.

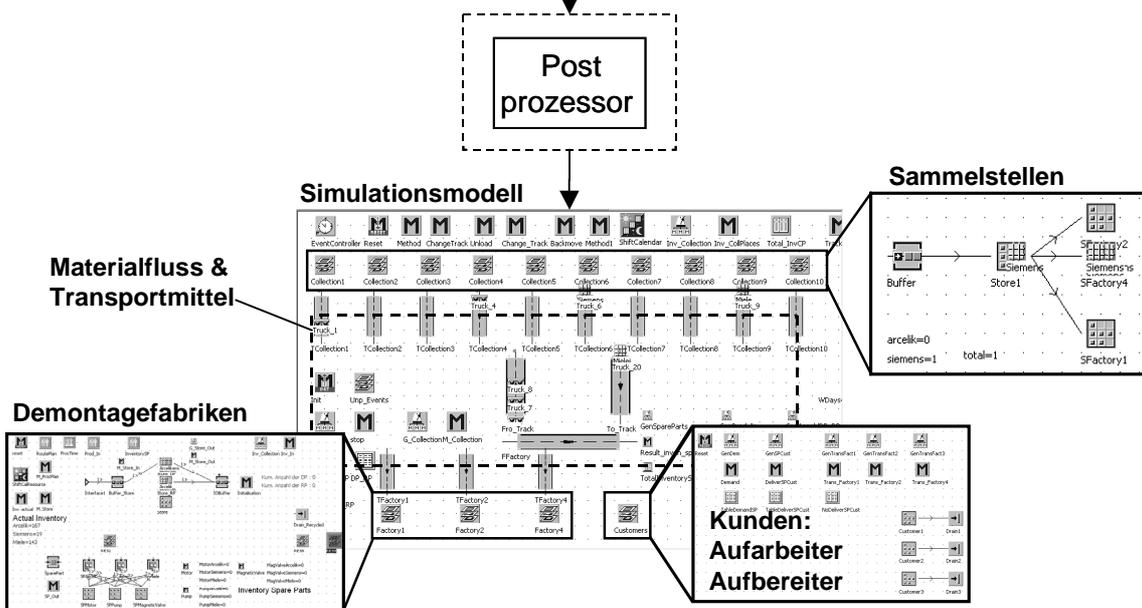
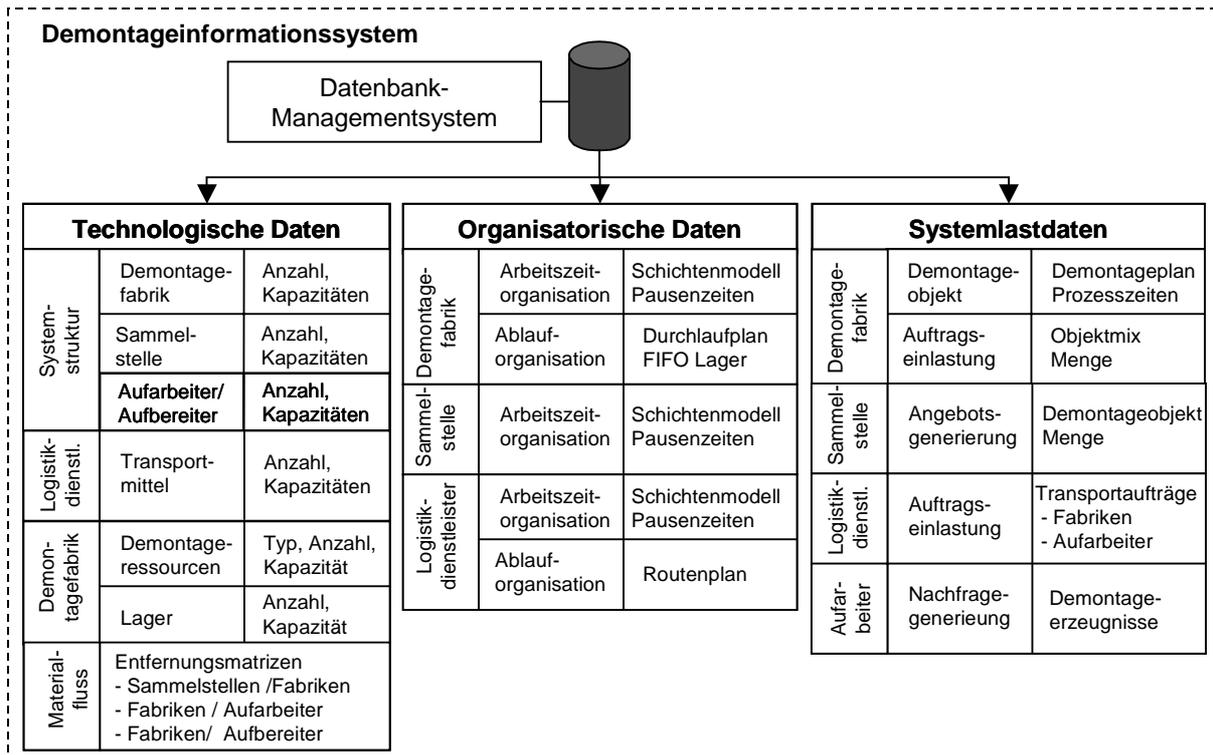


Bild 37: Datenbasis zur automatischen Modellgenerierung

Mit Hilfe des Simulationsmodells wird das dynamische Zusammenspiel der Demontagefabriken mit den Akteuren wie den Betreibern von Sammelstellen, den Logistikdienstleistern, Aufarbeitern und Aufbereitern des Kreislaufwirtschaftssystems unter Berücksichtigung der oben genannten Einflüsse untersucht. Es können erste Aussagen über Durchlaufzeiten, Bestände und Auslastung der Demontagefabriken und ihrer Demontagebetriebsmittel sowie über die Befriedigung der Kundennachfrage getroffen werden. Strukturelle und kapazitive Veränderungen im Simulationsmodell, welche die Ergebnisse des mathematischen Standortmodells verändern, werden nach Abschluss der Simulationsstudie über das Demontageinformationssystem in der entsprechenden Datenbank angepasst.

4.7 Grobplanung

4.7.1 Dimensionierung

Unter Dimensionierung ist: „die Gesamtheit der Planungsaktivitäten, die zu Aussagen über die Elementmenge eines Produktionssystems führen“ zu verstehen [SCM-95]. Sie umfasst die Elementwahl (die Betriebsmittelwahl wird nach Art, Gattung und Typ bestimmt) und deren Anzahlbestimmung (je Betriebsmittel). Ziel der Dimensionierung im Rahmen der Grobplanung von Demontagefabriken ist es, für die Art und Menge der einem Standort zugewiesenen Demontagealtgeräte unter Berücksichtigung von Prozesszeiten und Vorrangbeziehungen die für die Demontageverrichtungen notwendigen Demontagestationen sowie deren erforderlichen Demontagebetriebsmittel nach Art und Menge zu planen. Auf dem Gebiet der Montagesystemplanung sind in der Vergangenheit viele heuristische und mathematische Verfahren zur Unterstützung der Dimensionierung entwickelt und erfolgreich angewandt worden [SPU-94]. Für die Demontagesystemplanung sind nur wenige Ansätze in der wissenschaftlichen Literatur zu finden [WET-01], [ZEI-97], [GÜN-01]. Diese versuchen mit Heuristiken das Planungsproblem ausschließlich für manuelle Demontagesysteme zu lösen. Es existiert jedoch kein Planungsansatz, der bei der Dimensionierung manuelle und automatisierte Demontagestationen berücksichtigt.

Das Ergebnis der Standortplanung ist die genaue Zuweisung der zu demontierenden Demontageobjekte je Demontagefabrik, das jährliche Aufkommen dieser sowie die benötigten Demontagebetriebsmittel. In Abhängigkeit der Anzahl der verschiedenen Demontageobjekte sowie des Grades der Inhomogenität dieser hinsichtlich der Produkt- und Prozessmerkmale ist es sinnvoll, den in [Kapitel 4.6.1](#) vorgestellten Ansatz der Clusteranalyse durchzuführen. Für jede oder mehrere ermittelte homogene Gruppen an Demontageobjekten kann dann ein Demontagesystem geplant werden. Dieses zeichnet sich in der Regel durch eine gleichmäßige Auslastung der Demontagebetriebsmittel aus [CIU-03d].

4.7.1.1 Mathematisches Modell

Die Formulierung der Planungsaufgabe der Dimensionierung wurde als ganzzahliges lineares Optimierungsprogramm (ILP) umgesetzt. Neben der Beachtung der Restriktionen für Prozesszeiten, Vorrangbeziehungen und der technologischen Verträglichkeit einzelner Demontagebetriebsmittel in einer Demontagestation wird die im Rahmen der Standortplanung implizit vorgegebene Taktzeit eines Systems bei der Planung berücksichtigt. Als Kostentreiber werden hierbei die Kosten für die Eröffnung einer Demontagestation und die Kosten für die erforderlichen Betriebsmittelklassen (BMK) berücksichtigt.

Im folgenden werden die verwendeten Indexmengen (Tabelle 16), Modellvariablen (Tabelle 17) und Entscheidungsvariablen (Tabelle 18), die für die Beschreibung des Optimierungsmodells Dimensionierung verwendet werden, definiert. Auf Basis der Definitionen wird das entwickelte Optimierungsmodell mit der Zielfunktion und den Nebenbedingungen vorgestellt.

Definition der Indexmengen	
P	Demontageprozesse, $P = \{1, \dots, p_n\}$
B	Demontagebetriebsmittel, $B = \{1, \dots, b_n\}$
O	Typen an Demontageobjekten, $O = \{1, \dots, o_n\}$
D	Demontagestationen, $D = \{1, \dots, d_n\}$

Tabelle 16: Indexmengen – Dimensionierungs-Modell

Definition der Modellvariablen	
K_b	Kosten für die Zuweisung von eines Demontagebetriebsmittels b zu einer Demontagestation d [€/Einheit].
K_d	Kosten für das Öffnen einer Demontagestation d [€/Station].
TZ	Taktzeit der Demontagestation [s/Stk]
$T_{o,p}$	Erforderliche Bearbeitungszeit zur Durchführung von Demontageprozess p am Demontageobjekt o [s].
$BM_{o,p}$	Erforderliches Demontagebetriebsmittel b für die Ausführung des Demontageprozesses p am Demontageobjekt o.
$W_{b1,b2}$	Binäre Matrix zur Beschreibung, ob zwei unterschiedliche Demontagebetriebsmittel einer Demontagestationen aufgrund von technologischen oder anderen Restriktionen zugewiesen werden können; $W_{m1,m2} \in \{0=\text{konflikt}; 1=\text{kein konflikt}\}$.
BD	Anzahl an unterschiedlichen Demontagebetriebsmittel b, die einer Demontagestation d gleichzeitig zugewiesen werden können.
G	Eine sehr große natürliche Zahl.

Tabelle 17: Modellvariablen – Dimensionierungs-Modell

Definition der Entscheidungsvariablen	
$X_{d,b}$	Variable zur Beschreibung, ob ein Demontagebetriebsmittel b der Demontagestation d zugewiesen ist ($X_{d,b}=1$) oder nicht ($X_{d,b}=0$).
Y_d	Variable zur Beschreibung, ob eine Demontagestation d eröffnet ist ($Y_d=1$) oder nicht ($Y_d=0$).
$Z_{o,p,b,d}$	Variable zur Beschreibung ob das erforderliche Demontagebetriebsmittel b zur Durchführung des Demontageprozesses p für das Demontageobjekt o einer Demontagestation d zugewiesen ist ($Z_{o,p,b,d}=1$) oder nicht ($Z_{o,p,b,d}=0$)

Tabelle 18: Entscheidungsvariablen – Dimensionierungs-Modell

Zielfunktion:

Die formulierte Zielfunktion (17) minimiert die Kosten K_b , die durch die Zuweisung von Demontagebetriebsmitteln $X_{d,b}$ zu einer Arbeitsstation d zuzüglich der Kosten K_d , die durch die Eröffnung einer Demontagestation Y_d entstehen.

$$MIN \left(\sum_{d=1}^{d_n} \sum_{b=1}^{b_n} K_b \times X_{d,b} + \sum_{d=1}^{d_n} K_d \times Y_d \right) \tag{17}$$

Nebenbedingungen:

Basierend auf den die Demontagealtgeräte repräsentierenden Demontagesequenzen kann für jeden Prozess die erforderliche Bearbeitungszeit $T_{o,p}$ abgeleitet werden. Über die Art und Menge der dem Standort zugewiesenen Demontageobjekte wird die Taktzeit (TZ) des zu planenden Demontagesystems bestimmt. Bei der Zuweisung des Demontagebetriebsmittels $X_{d,b}$ zu Demontagestationen Y_b kann eine Kombination aus Kinematik und Effektor für den Trennprozess zugewiesen werden. Die Nebenbedingung (18) verhindert, dass die der Demontagestation d zur Durchführung zugewiesenen Demontageprozesse p für das Demontageobjekt o erforderlichen Bearbeitungszeiten $T_{p,o}$ die vorgegebene Taktzeit (TZ) überschreiten.

$$\sum_{p=1}^{p_n} \sum_{b=1}^{b_n} Z_{o,p,b,d} \times T_{p,o} \leq \text{TZ} \quad \forall d, \forall o \quad (18)$$

Die Nebenbedingung (19) gewährleistet, dass jedes für einen Demontageprozess p des Demonteobjektes o erforderliche Demontagebetriebsmittel b einer Demontagestation d zugewiesen wird. Über die $BM_{o,p}$ Modellvariable wird definiert, welches Demontagebetriebsmittel b für die Ausführung des Demontageprozesses p am Demontageobjekt o erforderlich ist.

$$\sum_{d=1}^{d_n} Z_{o,p,b,d} = 1 \quad \forall o, \forall p, \forall b \mid b = BM_{o,p} \quad (19)$$

Die Nebenbedingung (20) sichert, dass einer Demontagestation d maximal ein Demontagebetriebsmittel b das für die Durchführung des Demontageprozesses p am Demontageobjekt o erforderlich ist, zugewiesen wird.

$$\sum_{b=1}^{b_n} \sum_{d=1}^{d_n} Z_{o,p,b,d} \leq 1 \quad \forall o, \forall p \quad (20)$$

Nebenbedingungen (21) und (22) sichern, dass zwei einer Demontagestation d zugewiesenen Demontagebetriebsmittel b nicht miteinander in Konflikt stehen. Diese Restriktion ist erforderlich, weil sowohl aus technologischen Gründen als auch aus organisatorischen Gründen spezifische Demontagebetriebsmittel derselben Demontagestation zugewiesen werden sollten. So sollte bspw. Plasma- und Wasserstrahlschneiden nicht in derselben Demontagestation durchgeführt werden. Auch ist die Kombination von manuellen Tätigkeiten mit automatisierten Demontageressourcen in einer Demontagestation zu vermeiden.

$$X_{d,b1} + X_{d,b2} + G \times W_{b1,b2} \geq 1 \quad \forall d, \forall b1, \forall b2, G \gg 1 \quad (21)$$

$$X_{d,b1} + X_{d,b2} - G \times W_{b1,b2} \leq 1 \quad \forall d, \forall b1, \forall b2, G \gg 1 \quad (22)$$

Nebenbedingung (23) ist dafür verantwortlich, dass eine Demontagestation d eröffnet wird, wenn dieser ein Demontagebetriebsmittel b zugewiesen wird.

$$Y_d \geq Z_{o,p,b,d} \quad \forall d, \forall b, \forall o, \forall p \quad (23)$$

Nebenbedingungen (24) und (25) verhindern, dass eine Demontagestation d eröffnet wird, wenn dieser kein Demontagebetriebsmittel b zugewiesen ist.

$$Y_d + G \times \sum_{o=1}^{o_n} \sum_{p=1}^{p_n} \sum_{b=1}^{b_n} Z_{o,p,b,d} \geq 0 \quad \forall d, G \gg 1 \quad (24)$$

$$Y_d - G \times \sum_{o=1}^{o_n} \sum_{p=1}^{p_n} \sum_{b=1}^{b_n} Z_{o,p,b,d} \leq 0 \quad \forall d, G \gg 1 \quad (25)$$

Nebenbedingung (26) sichert, dass, wenn durch die binäre Entscheidungsvariable $Z_{o,p,b,d}$ festgelegt wird, dass das erforderliche Demontagebetriebsmittel b zur Durchführung des Demontageprozesses p für das Demontageobjekt o der Demontagestation d zugewiesen ist, der binären Entscheidungsvariable $X_{d,b}$ das gleiche Demontagebetriebsmittel b der gleichen Demontagestation d zugewiesen werden wie in durch die Entscheidungsvariable $Z_{o,p,b,d}$ determiniert.

$$X_{d,b} \geq Z_{o,p,b,d} \quad \forall d, \forall b, \forall o, \forall p \quad (26)$$

Durch die Nebenbedingungen (27) und (28) wird garantiert, dass, wenn einer Demontagestation d kein Demontagebetriebsmittel b durch die Entscheidungsvariable $Z_{o,p,b,d}$ zugewiesen wird, durch die Entscheidungsvariable $X_{d,b}$ dieser Demontagestation d ebenfalls kein Demontagebetriebsmittel b zugewiesen wird.

$$X_{d,b} + G \times \sum_{o=1}^{o_n} \sum_{p=1}^{p_n} Z_{o,p,b,d} \geq 0 \quad \forall d, \forall b, G \gg 1 \quad (27)$$

$$X_{d,b} - G \times \sum_{o=1}^{o_n} \sum_{p=1}^{p_n} Z_{o,p,b,d} \leq 0 \quad \forall d, \forall b, G \gg 1 \quad (28)$$

Durch Nebenbedingung (29) wird festgelegt, wie viele unterschiedliche Demontagebetriebsmittel b (eine festgelegte maximale Anzahl BD), einer Demontagestation d zugewiesen werden können.

$$\sum_{b=1}^{b_n} X_{d,b} \leq BD \quad \forall d \quad (29)$$

Damit die Vorrangbeziehungen zwischen den Demontageprozessen p je Demontageobjekt o eingehalten werden können, wurde die Nebenbedingung (30) aufgestellt.

$$\sum_{b=1}^{b_n} \sum_{d=1}^{d_n} d \times Z_{o,p+1,b,d} - d \times Z_{o,p,b,d} \geq 0 \quad \forall o, \forall p \mid p < \max(P) \quad (30)$$

Wertebereich der Entscheidungsvariablen:

Für die Entscheidungsvariablen $X_{d,b}$, Y_d und $Z_{o,p,b,d}$ gelten die Wertebereiche (31)-(33). Es sind somit binäre Variablen.

$$X_{d,b} \in \{0,1\} \quad \forall d, \forall b \quad (31)$$

$$Y_d \in \{0,1\} \quad \forall d \quad (32)$$

$$Z_{o,p,b,d} \in \{0,1\} \quad \forall o, \forall p, \forall b, \forall d \quad (33)$$

Das Ergebnis der Dimensionierung eines Demontagesystems mit Hilfe des mathematischen Modells beinhaltet die Anzahl der erforderlichen Demontagestationen, die Demontagebetriebmittel die den Demontagestationen für eine wirtschaftliche Demontage zugewiesen sind und den Durchlaufplan je Demontageobjekt.

4.7.1.2 Simulationsgestützte Analyse

Die Ergebnisse der mathematischen Dimensionierung unterliegen aufgrund des Modellierungsansatzes den gleichen Einschränkungen wie schon in Kapitel 4.6.4 erläutert und in Tabelle 15 dargestellt.

Der Ansatz der simulationsgestützten Analyse erlaubt die Untersuchung des dynamischen Verhaltens des dimensionierten Demontagesystems unter der Berücksichtigung von:

- Schwankungen des täglichen Demontageobjektmix (Mengen- und Typenvariationen),
- Schwankungen der Demontageprozesszeiten an den Demontagestationen, aufgrund von unterschiedlichen Zuständen der Demontageobjekte,
- technologisch bedingten Schwankungen der Demontageprozesszeiten,
- Vorrangbeziehungen zwischen den Demontageprozessen der Demontageobjekte,
- Verfügbarkeiten der Demontagestationen sowie
- von Puffern zur Entkopplung der Demontagestationen.

Mögliche Engpässe können somit frühzeitig identifiziert und behoben werden, erste Vorstellungen über notwendige Pufferkapazitäten zum Auffangen von unterschiedlichen Zykluszeiten in den Demontagestationen gewonnen werden sowie Abschätzungen der Demontagesystemleistung erhalten werden.

Für die einfache und effiziente simulationsgestützte Analyse ist es erforderlich, dem Planer ein Werkzeug zur Verfügung zu stellen, welches den Modellierungsaufwand reduziert sowie eine nachträgliche Anpassung der Ergebnisse der mathematischen Dimensionierung ermöglicht. In Bild 38 ist der entwickelte Ablauf der simulationsgestützten Analyse mit Art und Herkunft der notwendigen Datenbasis sowie entwickelte Algorithmen und Programme dargestellt.

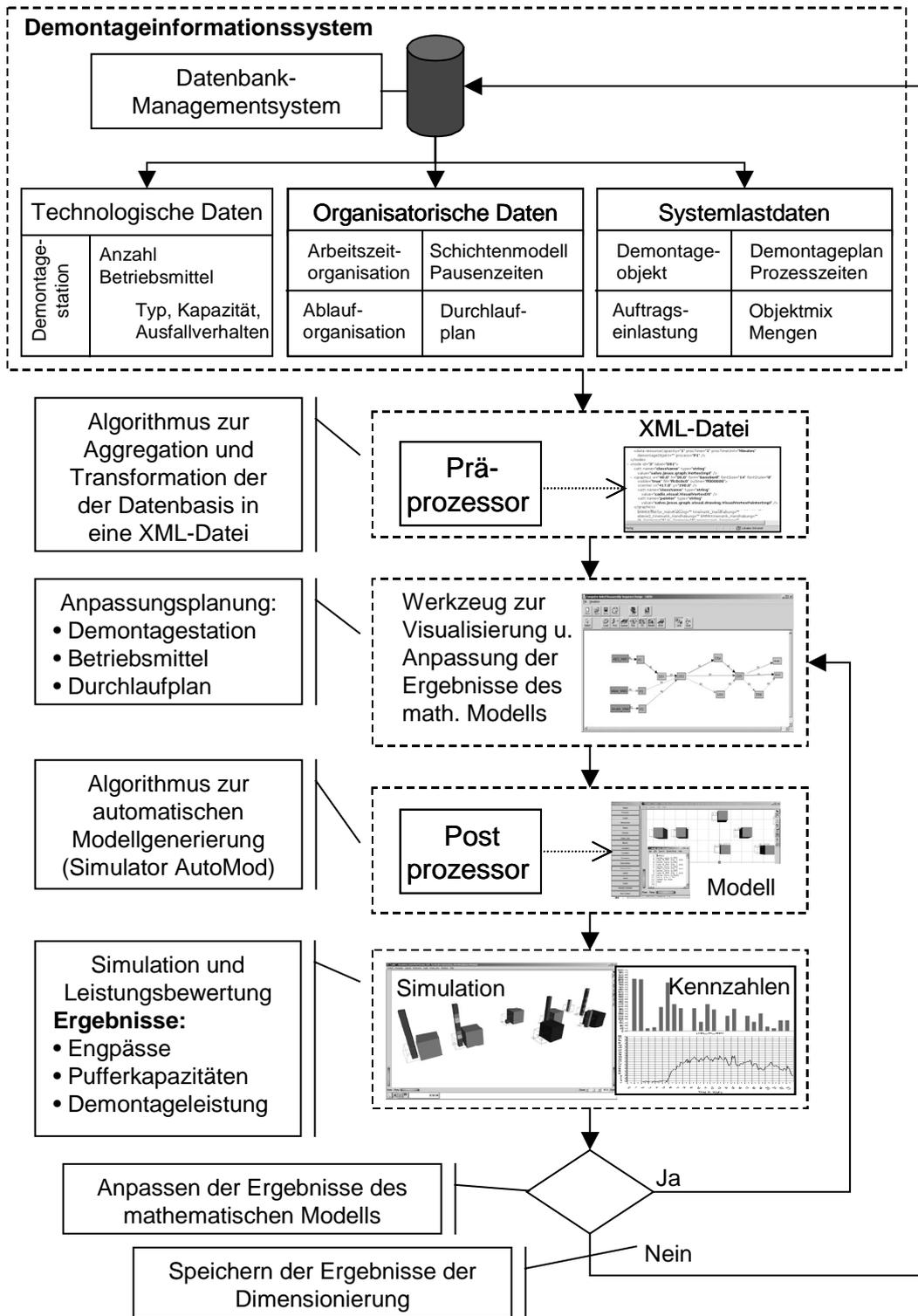


Bild 38: Ablauf der simulationsgestützten Analyse

Die Ergebnisse des Optimierungsmodells – Dimensionierung werden mit Hilfe eines Prä-Prozessors in ein XML-Datenformat überführt. Als Prä-Prozessoren werden Transformationsprogramme definiert, die spezifische Datenstrukturen in eine selbstdefinierte, neutrale Formatbeschreibungen überführen [SPL-96].

4.7.2 Strukturierung

Unter Strukturierung wird in Anlehnung an WIENDAHL [WIE-01a] die Gesamtheit der Planungsaktivitäten verstanden, die etwas über die Struktur eines Demontagesystems aussagen. Sie umfasst die räumliche Strukturierung, d.h. die Strukturtypentscheidung (Einzelplatz-, Reihen-, Netz-, Zellen-, Ring-, Sternstruktur etc.), die Objekt-Platz-Zuordnung (Zuordnung von Objekten auf bestimmte Plätze, Standortbestimmung) und die Layoutplanung eines Demontagesystems. In der Phase der Strukturierung wird ein leistungsfähiges Layout für die in der Phase der Dimensionierung determinierten Demontagestationen abgeleitet. Während der Grobplanung werden in der Strukturierung unter Berücksichtigung von Anordnungskriterien und Flächenangaben die Demontagestationen in einem Ideallayout angeordnet (räumliche Strukturierung) und miteinander materialflusstechnisch (zeitliche Strukturierung) verknüpft. Dieses Ideallayout ist ein von Restriktionen unabhängiges Ergebnis. Die Ziele, die dabei im Vordergrund stehen, sind geringe Durchlaufzeiten und eine hohe Auslastung der Demontagestationen unter Beachtung von Wirtschaftlichkeitsrahmenbedingungen.

4.7.2.1 Referenzlayouts

Die Generierung von Layoutalternativen ist gehört zu den kritischen Schritten in der Planung. Es ist wichtig, eine große Anzahl, Güte und Vielfalt von Alternativen zu berücksichtigen, da das Endlayout aus der Erstellung und Variation dieser Layouts resultiert. Die Anzahl möglicher Layouts kann selbst unter Berücksichtigung aller Restriktionen sehr groß sein. Da Restriktionen im Rahmen der Planung nicht vollständig berücksichtigt werden können, ist die Wahl eines Layout in der Regel nicht eindeutig zu treffen [ASK-93]. Die Planung eines optimalen Layouts ist unter Berücksichtigung aller Rahmenbindungen schwer zu erreichen [TOM-96]. Aus diesem Grund hat sich die Verwendung von sog. Referenzlayouts für die Planung von Demontagesystemen bewährt [CIU-03c], [KEI-00], [SEL-00c]. Die Referenzlayouts repräsentieren mögliche ideale räumliche Strukturierungen für effiziente Demontagesysteme.

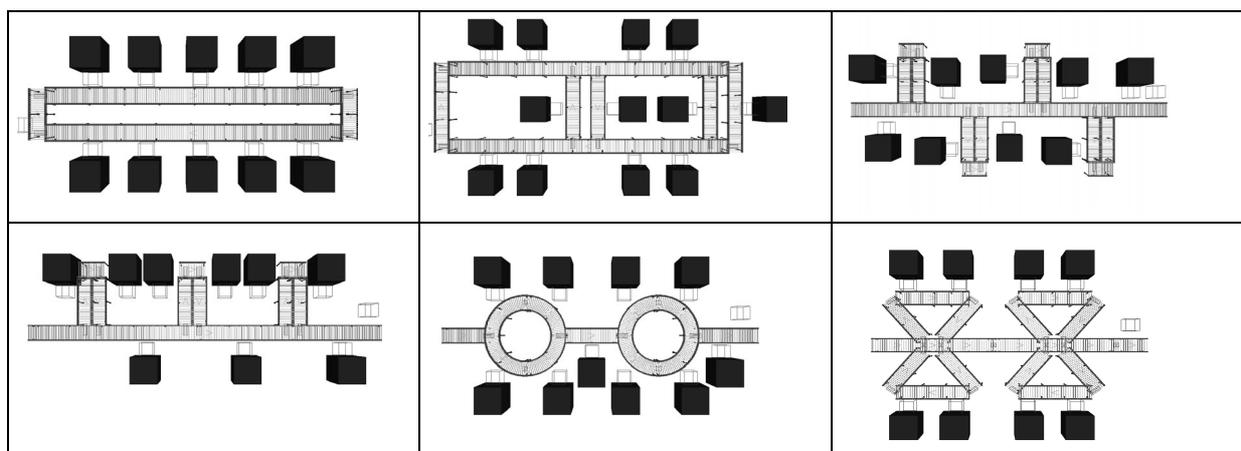


Bild 39: Beispielfähige Referenzlayouts

In Bild 39 werden Beispiele für entwickelte Referenzlayouts dargestellt. Die Verwendung von Referenzlayouts ermöglicht es dem Planer, schnell geeignete Anordnungsstrukturen zu finden.

Jedes Referenzlayout hat eine bestimmte Anzahl möglicher Plätze für die Demontagestationen. Um jedem Planungsproblem gerecht zu werden, ist es erforderlich, verschiedene Alternativen eines jeden Referenzlayouts (Grundtyp, z.B. Stern), zu generieren, in denen die Anzahl der möglichen Plätze variiert (Ausprägungen des Grundtyps). Somit ist sichergestellt, dass für die notwendigen Demontagestationen genügend Plätze in jedem Referenzlayout zur Verfügung stehen. Bild 40 stellt ein Beispiel für zwei Ausprägungen eines Referenzlayouts dar. Die Anzahl möglicher Plätze variiert zwischen 5 und 9.

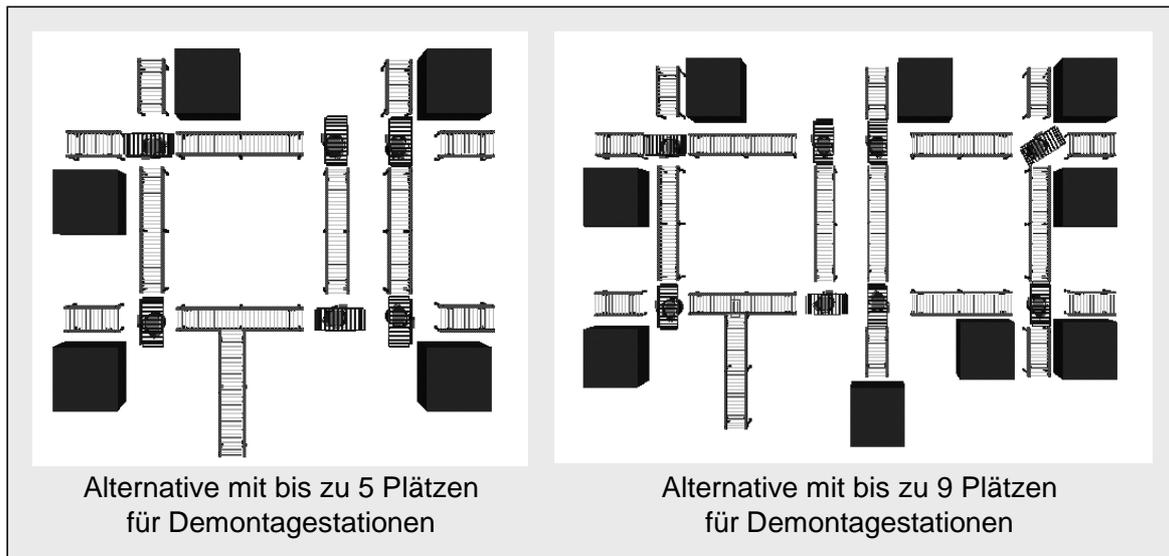


Bild 40: Zwei alternative Ausprägungsformen eines Referenzlayouts

In den Referenzlayouts werden potenzielle Plätze für Demontagestationen zur Verfügung gestellt. Es jedoch notwendig, den idealen Platz für die Demontagestation im Referenzlayout zu identifizieren. Somit gilt es, Demontagestationen (Objekte) den in den Referenzlayout verfügbaren Plätzen derart zuzuordnen (Objekt-Platz-Zuordnung), dass definierte Zielkriterien wie z.B. geringe Durchlaufzeiten der Demontageobjekte erfüllt werden. Das Objekt-Platz-Zuordnungsproblem kann auf ein symmetrisches quadratisches Zuordnungsproblem (QZOP) zurückgeführt werden [SCM-95], [DOM-97]. Das Ziel dieses QZOP ist die Minimierung des Materialflusses (Transportkostenminimierung) jedes Demontageobjektes auf Basis der jährlichen Demontageleistung der Anlage (jährliches Aufkommen der Demontageprodukte).

Im folgenden werden die verwendeten Indextmengen (Tabelle 19), Modellvariablen (Tabelle 20) und Entscheidungsvariablen (Tabelle 21), die für die Beschreibung des gemischt-ganzzahligen Optimierungsmodells Standortwahl verwendet werden, definiert.

Definition der Indextmengen	
A	Demontgearbeitsplätze in einem Referenzlayout, $A = \{1, \dots, a_n\}$
D	Demontagestationen, $D = \{1, \dots, d_n\}$

Tabelle 19: Indextmengen – Strukturierungs-Modell

Definition der Modellvariablen	
$D_{a1,a2}$	Distanz von Demontagearbeitsplatz a1 zu Demontagearbeitsplatz a2 des Referenzlayouts [mm].
$F_{d1,d2}$	Stärke des Materialflusses von Demontagestation d1 zu Demontagestation d2.

Tabelle 20: Modellvariablen – Strukturierungs-Modell

Definition Entscheidungsvariablen	
$X_{d,a}$	Binäre Variable zur Beschreibung, ob eine Demontagestation d dem Arbeitsplatz a des Referenzlayouts zugewiesen ist ($X_{d,a}=1$) oder nicht ($X_{d,a}=0$).
$Y_{d1,a1,d2,a2}$	Binäre Variable zur Beschreibung welcher Transportstrom zwischen den Demontagearbeitsplätzen a1 und a2 des Referenzlayouts durch die Zuweisung von Demontagestation d1 zum Demontagearbeitsplatz a1 und Demontagestation d2 zum Demontagearbeitsplatz a2 entsteht.

Tabelle 21: Entscheidungsvariablen – Strukturierungs-Modell

Modellannahmen:

- Es existieren a_n gleichgroße Arbeitsplätze, die zur Anordnung von Demontagestationen zur Verfügung stehen.
- Auf den a_n Arbeitsplätzen werden d_n gleichgroße Demontagestationen angeordnet mit $d_n \leq a_n$.
- Jeder Platz eignet sich zur Anordnung genau einer Demontagestation.
- Die Entfernung $D_{a1,a2}$ von Platz a1 zu Platz a2 ist für alle $a1, a2 = 1, \dots, a_n$

bekannt (Entfernungsmatrix). Ist eine Verbindung zwischen zwei Plätzen (Demontagestationen) technisch nicht möglich oder soll eine Verbindung bei der Berechnung nicht berücksichtigt werden, kann die Entfernung auf einen sehr hohen Wert gesetzt werden. In diesem Fall wird das QZOP mit dem Ziel der Transportkostenminimierung diese Verbindungen nicht berücksichtigen.

- Zwischen den Demontagestationen findet ein Materialfluss statt. Die Stärke dieses Materialflusses betrage $F_{d1,d2}$ Mengeneinheiten pro Zeiteinheit von Demontagestation d1 zu Demontagestation d2 (Transportintensitäten).
- Die Kosten für Materialtransporte von Demontagestation d1 zu Demontagestation d2 sind proportional zur zu transportierenden Menge und zur zurückgelegten Entfernung. Der Einfachheit halber kann der Proportionalitätsfaktor 1 verwendet werden, dann sind $F_{d1,d2} * D_{a1,a2}$ Geldeinheiten pro Zeiteinheit für Transporte von Demontagestation d1 zu Demontagestation d2 aufzuwenden, falls diese auf den Arbeitsplätzen a1 und a2 angeordnet werden.

Ein solches Beispiel ist schematisch für jeweils 4 Demontagestationen und einem Referenzlayout mit 4 Plätzen in [Bild 41](#) dargestellt.

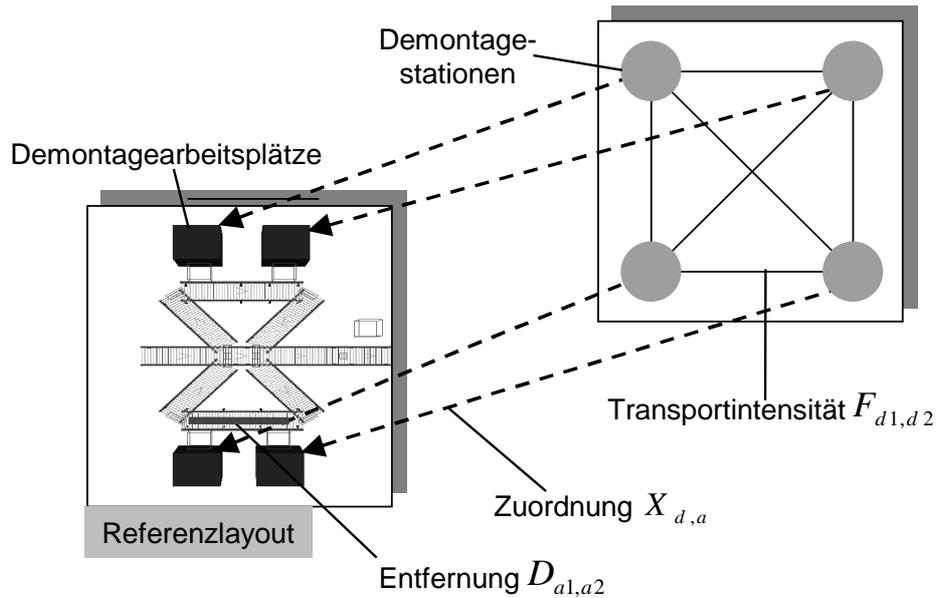


Bild 41: Objekt-Platz-Zuordnungsmodell

Zielfunktion:

Die Zielfunktion (34) des symmetrischen quadratischen Zuordnungsproblems minimiert somit die Transportaufwendungen.

$$\sum_{d1=1}^{d_n} \sum_{a1=1}^{a_n} \sum_{d2=1}^{d_n} \sum_{a2=1}^{a_n} Y_{d1,a1,d2,a2} \times (F_{d1,d2} \times D_{a1,a2} + F_{d2,d1} \times D_{a2,a1}) \rightarrow \min \tag{34}$$

Nebenbedingungen:

Nebenbedingung (35) sichert, dass jede Demontagestation zu einem Arbeitsplatz im Layout zugeordnet wird.

$$\sum_{d=1}^{d_n} X_{d,a} = 1 \quad \forall a \tag{35}$$

Nebenbedingung (36) sichert, dass nur eine Demontagestation einem Platz zugeordnet wird.

$$\sum_{a=1}^{a_n} X_{d,a} = 1 \quad \forall d \tag{36}$$

Nebenbedingung (37) stellt sicher, dass Transport nur zwischen verschiedenen Demontagestationen stattfindet.

$$Y_{d1,a1,d2,a2} \geq X_{d1,a1} + X_{d2,a2} - 1 \quad \forall a1,d1,a2,d2 \tag{37}$$

Wertebereich der Entscheidungsvariablen:

Für die Entscheidungsvariablen $x_{d,a}$ und $y_{d1,a1,d2,a2}$ gelten die Nichtnegativitätsbedingungen (38)-(39).

$$X_{d,a} \in \{0,1\} \quad \forall d, \forall a \tag{38}$$

$$Y_{d1,a1,d2,a2} \in \{0,1\} \quad \forall d1, \forall a1, \forall d2, \forall a2 \tag{39}$$

Die Phase der Strukturierung endet mit der optimalen Zuordnung von Demontagestationen zu Plätzen für die betrachteten Referenzlayouts.

4.7.2.2 Simulationsgestützte Analyse

In der Phase der simulationsgestützten Analyse gilt es, das Referenzlayout auszuwählen, welches die beste Leistungsfähigkeit, die beste Auslastung der Demontagestationen und die kürzeste Durchlaufzeit hat. Ferner gilt es zu untersuchen, wie sich die Referenzlayouts bei Störungen der Demontagebetriebsmittel und bei Schwankungen der Demontageobjekteigenschaften verhalten.

Dafür ist es notwendig die erforderlichen technischen Daten, Organisations- und Systemlastendaten aus den Datenbanken des Demontageinformationssystems für die simulationsgestützte Analyse der Referenzlayouts aufzubereiten. Mit Hilfe eines entwickelten Postprozessors werden aus den aufbereiteten Daten Konfigurationsdateien für die zu analysierenden Referenzmodelle erzeugt. Diese Konfigurationsdateien ermöglichen die Generierung ablauffähiger Simulationsmodelle von den Referenzlayouts sowie deren Leistungsbewertung nach den oben genannten Kriterien. Der allgemeine Ablauf der simulationsgestützten Analyse und insbesondere die verwendete Datenbasis wird in Bild 42 zusammenfassend dargestellt.

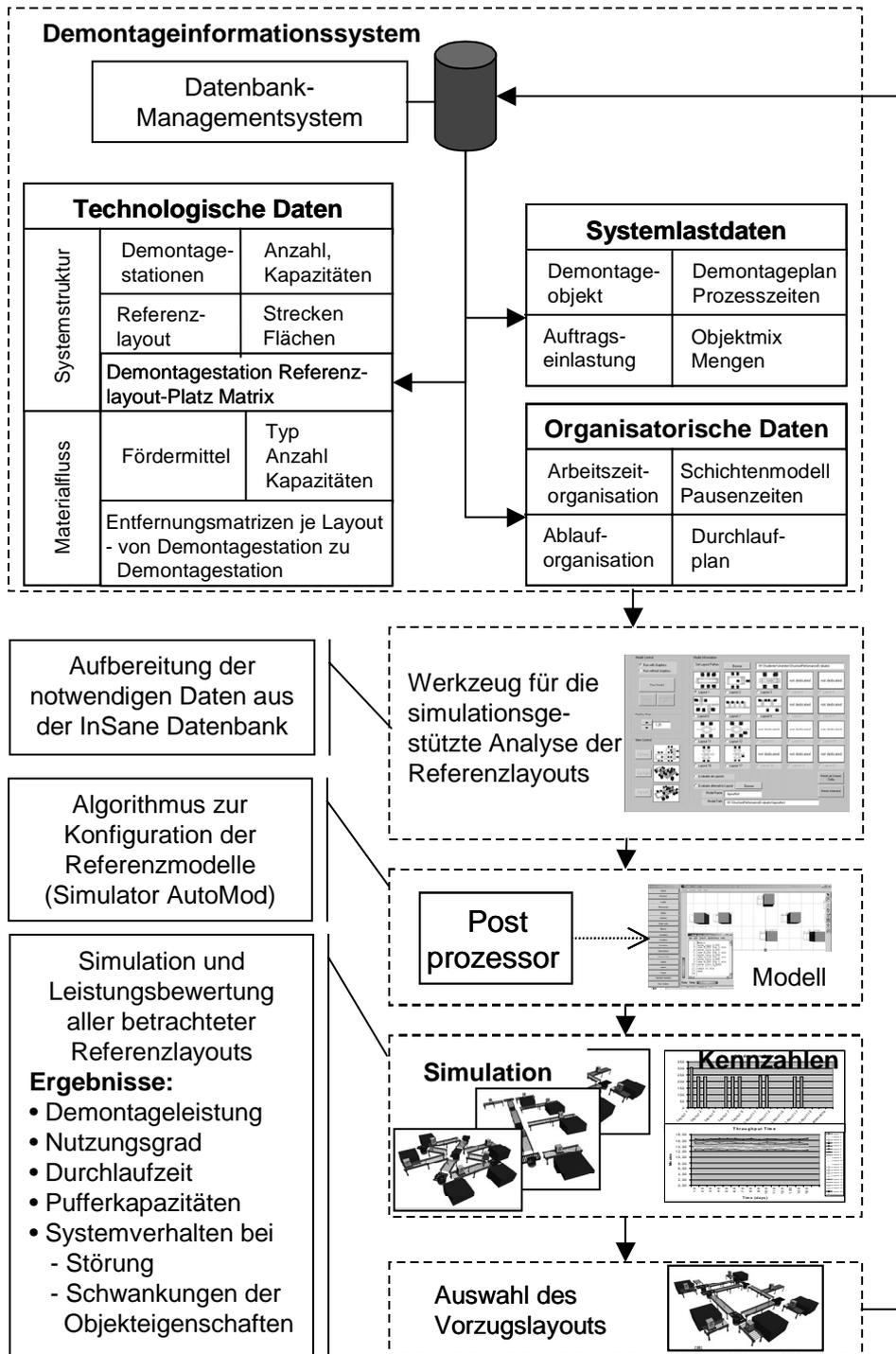


Bild 42: Simulationsgestützte Analyse der Referenzlayouts

4.8 **Feinplanung**

In der Phase der Feinplanung werden die Ergebnisse aus der Grobplanung detailliert und an das reale Planungsumfeld angepasst. Die Ergebnisse der Strukturierung werden an die Rahmenbedingungen und Restriktionen des Fabrikgebäudes, wie sie Medienversorgung, Hallenpfeiler, Sozialflächen etc. darstellen, angepasst. Des Weiteren werden die Ergebnisse der Dimensionierung konkretisiert. So werden die Demontagestationen hinsichtlich ihres Flächenbedarfs, der verwendeten Demontagebetriebsmittel sowie notwendigen Pufferkapazitäten konkretisiert.

4.8.1 **Layoutplanung**

Die Feinlayoutplanung umfasst die endgültige zeichnerische und detaillierte Beschreibung der Einrichtungen, Demontagestationen mit Ihren Demontagebetriebsmitteln und Versorgungssystemen. Je nach Wahl der Demontageorganisation ist über die Aufstellung der einzelnen Demontagestationen zu entscheiden. Des Weiteren ist die Ausrichtung der Lagerregale, die Bereitstellung und die Handhabung der Demontageobjekte, die Handhabung und die Abholung der Demontageerzeugnisse sowie die verbindende Fördertechnik und die Verkehrswege zu detaillieren.

Die Feinlayoutplanung wird in der Regel mit Hilfe von Softwarewerkzeugen umgesetzt. Marktführer sind hierbei die Werkzeuge AutoCAD der Firma Autodesk und MicroStation der Firma Bentley [CAD-04]. Diese Werkzeuge unterstützen die effiziente Layoutplanung, durch spezielle Bibliotheken von grafischen Objekten. Für das Werkzeug AutoCAD besteht beispielsweise eine Bibliothek FactoryCAD. FactoryCAD enthält vordefinierte grafische 2D und 3D Objekte für Betriebsmittel wie Regale, Paletten, Kräne, Robotern, Fördermittel oder Fertigungszellen, die durch entsprechende Parametrisierung schnell für die spezifische Planungsaufgaben angepasst werden können. Diese Layoutplanungswerkzeuge besitzen jedoch keine Schnittstellen, um die Planungsergebnisse für weitere datenbankintegrierte Planungswerkzeuge zur Verfügung zu stellen. In den letzten Jahren erfolgten Entwicklungen, die es ermöglichen, Layoutplanungsdaten aus AutoCAD in ein neutrales Beschreibungsformat, dem Simulation Data Exchange (SDX) zu exportieren (vgl. MCLEAN et al. [MCL-02], MECKLENBURG [MEC-01], MOORTHY [MOO-99] und SLY [SLY-98]). Diese Entwicklungen konzentrieren sich auf die Verwendung der Layoutdaten für die Erstellung von Simulationsmodellen mit Hilfe einer einfachen Beschreibung als American Standard Code for Information Interchange (ASCII) Datei. Die der Layoutplanung vorgelagerten Planungsergebnisse werden dabei nicht berücksichtigt und müssen somit manuell bei der Modellerstellung eingepflegt werden.

Im folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, der aus den mit Hilfe des Werkzeuges AutoCAD erzeugten Feinlayouts von Demontagesystemen, die Layoutdaten in der Form exportiert, dass diese für die weiteren Planungsschritte, wie der simulationsgestützten Feinplanung, verwendet werden können. Es wurde die Disassembly Layout Data Exchange (DLDE) Datei entwickelt, die eine systemneutrale Beschreibungsdatei von Layoutdaten ermöglicht. Für die DLDE werden sechs Klassen von grafischen Objekten, Quelle (Source) , Senke (Drain), Puffer (Buffer), Demontagestation (Disassembly Stati-

on), Nacharbeitsstation (Rework Station) und Förderstrecke (Floor Conveyor) Klasse definiert. Die Klasse *Quelle* definiert den Ort der Einlastung des Demontageobjektes im Demontagesystem. Die Klasse *Senke* definiert den Ort, an dem das Demontageobjekt bzw. die Demontageerzeugnisse das Demontagesystem wieder verlassen. Mit der *Puffer Klasse* wird der Ort und die benötigte Fläche für die Zwischenlagerung der Demontageobjekte definiert. Die Klasse *Demontagestation* legt den Ort und die benötigte Fläche fest, an dem Demontageprozesse durchgeführt werden. Mit Hilfe der Klasse *Nacharbeitsstation* können spezielle Orte definiert werden, in denen nur Demontageobjekte weiter demontiert werden, deren automatisierter Demontageprozess fehlgeschlagen ist. Die Klasse *Förderstrecke* ermöglicht die Definition von Fördersystemen, die die einzelnen Stationen miteinander logistisch verknüpft. Es wird hierbei auf die in der FactoryCAD schon entwickelten grafischen Fördermittelobjekte zurückgegriffen. In Bild 43 ist ein Feinlayout eines Demontagesystems dargestellt, welches unter zu Hilfenahme der definierten Klassen von grafischen Objekten mit dem Werkzeug AutoCAD erstellt wurde. Die definierten Klassen für die grafischen Objekte Demontage- und Nacharbeitsstationen repräsentieren jeweils nur die Hülle der Stationen. D.h. die grafischen Objekte innerhalb der Stationen, wie Arbeitstische, Roboter, Gitterboxen, Regale etc. gehören nicht dazu. Der Planer kann somit beliebige Details bei der Layoutplanung berücksichtigen.

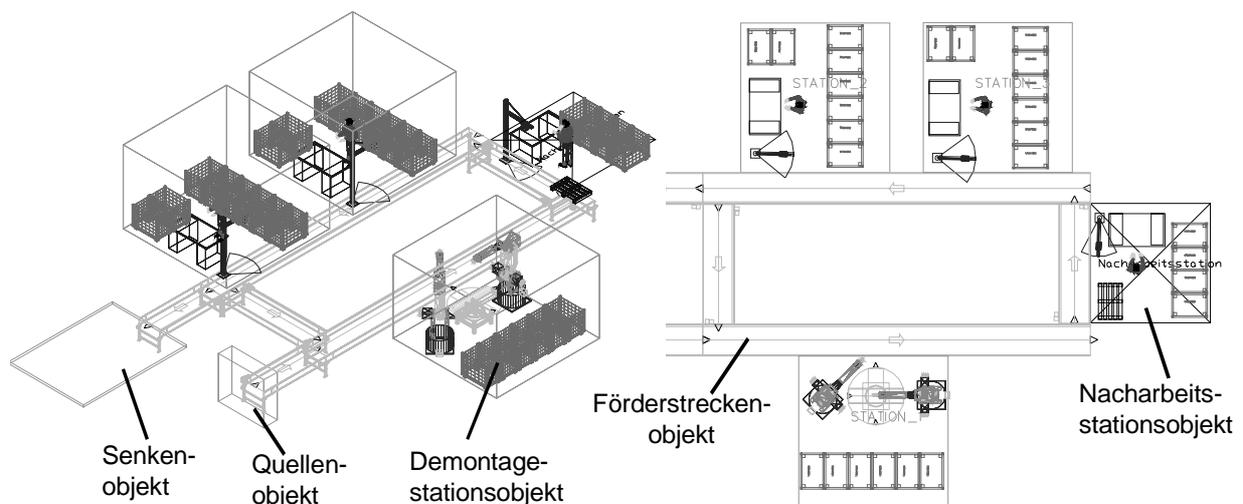


Bild 43: Layout eines Demontagesystems in 2D und 3D Darstellung

Es wurde ein Algorithmus für das Planungswerkzeug AutoCAD entwickelt, der die verwendeten grafischen Objekte eines Feinlayouts in die entwickelte Disassembly Layout Data Exchange (DLDE) Datei transformiert. Die DLDE kann auch für andere Planungswerkzeuge, wie MircoStation, als systemneutrale Layoutdatenbeschreibung dienen.

Tabelle 22 ist dargestellt, wie die grafischen Objekte Senke, Quelle, Demontagestation und Nacharbeitstation in der DLDE Datei beschrieben werden.

DLDE Aufbau	Beschreibung
[OBJECT BEGIN]	Beginn der Beschreibung eines grafischen Objektes
[NAME] DEMONTAGESTATION_1	Name des grafischen Objektes
[TYPE] DISASSEMBLY_STATION	Typ des grafischen Objektes, Disassembly_Station, Rework_Station, Buffer, Source, Drain
[CAD_ID] 7E7F	Eindeutige Identifizierungsnummer aus der CAD Zeichnung
[LOCATION] 0.000,0.000,0.000	Relative Position des Objektes im XYZ Koordinatensystem
[SEGMENT BEGIN]	Anfang der Beschreibung des ersten Segmentes. Die Größe eines grafischen Objektes wird durch vier Segmente (Linien) beschrieben.
[SEG_START] 11218.6,1000,1700	Anfangspunkt (X,Y,Z) des ersten Segmentes
[SEG_END] 16218.6,1000,1700	Endpunkt (X,Y,Z) des ersten Segmentes
[SEG_NAME] SEGMENT_1	Name des ersten Segmentes zur eindeutigen Identifizierung
[SEGMENT END]	Ende der Beschreibung des ersten Segmentes
[SEGMENT BEGIN]	Anfang der Beschreibung des zweiten Segmentes
[SEG_START] 16218.6,1000,1700	Anfangspunkt (X,Y,Z) des zweiten Segmentes
[SEG_END] 16218.6,6000,1700	Endpunkt (X,Y,Z) des zweiten Segmentes
[SEG_NAME] SEGMENT_2	Name des zweiten Segmentes zur eindeutigen Identifizierung
[SEGMENT END]	Ende der Beschreibung des zweiten Segmentes
[SEGMENT BEGIN]	Anfang der Beschreibung des dritten Segmentes
[SEG_START] 16218.6,6000,1700	Anfangspunkt (X,Y,Z) des dritten Segmentes
[SEG_END] 11218.6,6000,1700	Endpunkt (X,Y,Z) des dritten Segmentes
[SEG_NAME] SEGMENT_3	Name des dritten Segmentes zur eindeutigen Identifizierung
[SEGMENT END]	Ende der Beschreibung des dritten Segmentes
[SEGMENT BEGIN]	Anfang der Beschreibung des vierten Segmentes
[SEG_START] 11218.6,6000,1700	Anfangspunkt (X,Y,Z) des vierten Segmentes
[SEG_END] 11218.6,1000,1700	Endpunkt (X,Y,Z) des vierten Segmentes
[SEG_NAME] SEGMENT_4	Name des vierten Segmentes zur eindeutigen Identifizierung
[SEGMENT END]	Ende der Beschreibung des vierten Segmentes
[OBJECT END]	Ende der Beschreibung eines grafischen Objektes

Tabelle 22: Aufbau der DLDE Datei

Die Förderstreckenobjekte erfordern aufgrund Ihrer spezifischen grafischen Darstellung eine spezielle Beschreibung in der DLDE Datei. In Tabelle 23 wird die allgemeine Beschreibung eines Förderstreckenobjektes vorgestellt.

Der allgemeine Ablauf der Modellgenerierung eines in AutoCAD geplanten Feinlayouts wird in Bild 44 dargestellt. Mit Hilfe eines entwickelten Präprozessors wird das erstellte Feinlayout analysiert und die systemneutrale Layoutdatenbeschreibung die DLDE Datei erzeugt. Dabei ist zu beachten, dass für die eindeutige Referenzierung der im Feinlayout geplanten grafischen Objekte, wie Demontagestation und Nacharbeitsstation, mit den in den vorgelagerten Planungsstufen erzielten Ergebnissen die gleiche Namensvergabe für diese Objekte erfordert. Über die entwickelte DLDE-Schnittstelle kann das Demontageinformationssystem (DIS), die durch den Präprozessor erzeugte DLDE-Datei einlesen. Auf Basis der sich nun in dem DIS befindlichen Demontagelayoutdaten sowie weiteren technischen Daten, Organisations- und Systemlastdaten wird durch den entwickelten Postprozessor für den Simulator eM-Plant ein Simulationsmodell des Demontagelayouts erzeugt.

DLDE Aufbau	Beschreibung
[OBJECT BEGIN]	Beginn der Beschreibung eines Förderstreckenobjektes
[NAME] FOEDERSTRECKE_1	Name des Förderstreckenobjektes
[TYPE] CONVEYOR	Typ des grafischen Objektes,
[INTERNAL_TYPE] NON_ACC	Kumulierendes (ACC) oder nicht kumulierendes (NON_ACC) Förderstreckenobjekt
[CAD_ID] 7D97	Eindeutige Identifizierungsnummer aus der CAD Zeichnung
[LOCATION] 0.000,0.000,0.000	Relative Position des Objektes im XYZ Koordinatensystem
[SEGMENT BEGIN]	Anfang der Beschreibung eines Segmentes. Das Förderstreckenobjekt kann aus mehreren Segmenten bestehen.
[SEG_NAME] SEGMENT_0	Name des Segments zur eindeutigen Identifizierung
[SEG_START] 8531.38,11062.5,850	Anfangspunkt (X,Y,Z) des Segmentes
[SEG_END] 8531.38,7062.5,850	Endpunkt (X,Y,Z) des Segmentes
[SEG_TYPE] SEGMENT_STRAIGHT	Segmente können vom Typ Kurve (SEGMENT_CURVE) oder vom Typ Gerade (SEGMENT_STRAIGHT) sein.
[SEG_RADIUS] 0	Radius des Segmenttyps Kurve
[SEG_ANGLE] 0	Winkel des Segmenttyps Kurve
[TRACK_WIDTH] 50,05	Breite des Segmentes
[STATION BEGIN]	Anfang der Beschreibung einer Station (Einschleuse- oder Ausschleusepunkte der Demontageobjekte). Auf einen Segment können sich mehrere Stationen befinden
[STA_LOCATION] 8531.38,7062.5,8	Ort der Station (X,Y,Z) auf dem Segment
[STA_NAME]	Name der Station zur eindeutigen Identifizierung
[STATION END]	Ende der Beschreibung der Station
[SEGMENT END]	Ende der Beschreibung des Segmentes
[OBJECT END]	Ende der Beschreibung der Förderstreckenobjektes

Tabelle 23: Beschreibung eines Förderstreckenobjektes in der DLDE-Datei

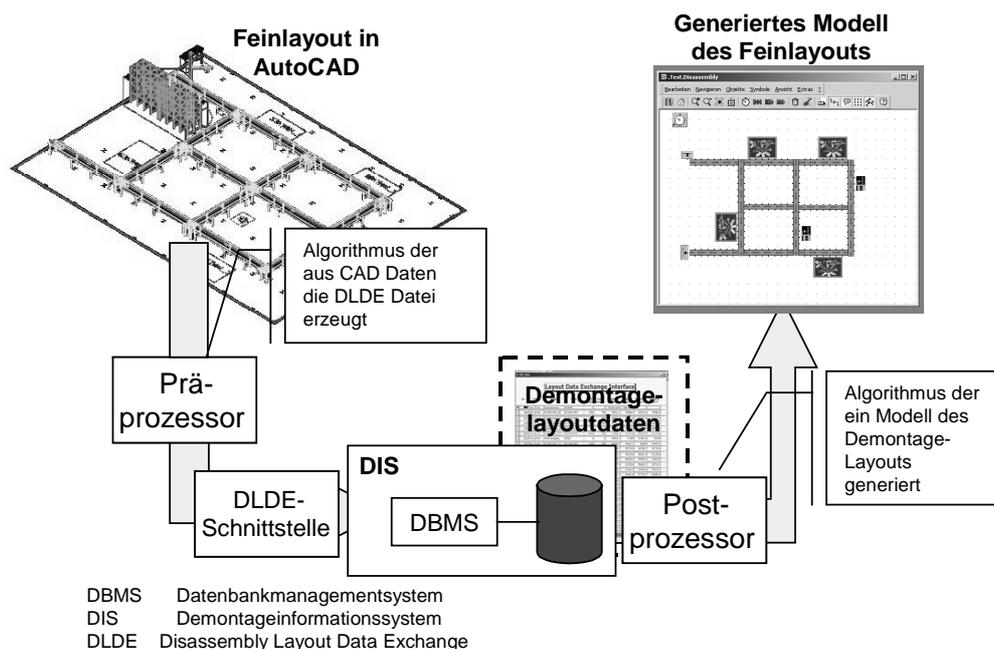


Bild 44: Ablauf der datenbasierenden Modellgenerierung des Demontagelayouts

4.8.2 Simulationsgestützte Planung

In dem Schritt der simulationsgestützten Feinplanung laufen alle Ergebnisse und Erkenntnisse der vorgelagerten Planungsschritte zusammen und ermöglichen die detaillierte simulationsgestützte Planung und Analyse von Demontagefabriken. Ferner wird es ermöglicht, die im Detail geplanten Demontagefabriken in ihrem Zusammenspiel mit den Akteuren des betrachteten Kreislaufwirtschaftssystems zu untersuchen.

Mit Hilfe des in [Kapitel 4.4](#) vorgestellten Referenzmodells soll es dem Planer ermöglicht werden, auf Basis der Ergebnisse der vorgelagerten Planungsstufen detaillierte Simulationsmodelle von Demontagefabriken zu erstellen und deren dynamisches Verhalten zu analysieren als auch das Zusammenspiel mit anderen Akteuren im Kreislaufwirtschaftssystem zu analysieren, ohne ein Simulationsexperte zu sein. In [Tabelle 24](#) wird dargestellt, welche Ergebnisse der vorgelagerten Planungsstufen in der simulationsgestützten Feinplanung Berücksichtigung finden.

Planungsschritt	Planungsergebnisse
Standortplanung	<ul style="list-style-type: none"> • Orte und Demontagekapazitäten der zu planenden Demontagefabriken (DF) • Menge der zu demontierenden Demontageobjekte je Demontagefabrik
Dimensionierung je DF	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl an Demontagestationen • Typ und Kapazitäten der Demontageressourcen je Demontagestation • Durchlauf- und Arbeitsplan je Demontageobjekt
Strukturierung/ Feinlayoutplanung je DF	<ul style="list-style-type: none"> • Layout der Demontagesysteme <ul style="list-style-type: none"> - Position und Flächenbedarf der Quellen, Senken, Demontage- und Nacharbeitstationen - Position, Flächenbedarf und Kapazität von Puffern - Anordnung der Förderstrecken • Transportwegematrix zur Ableitung eines Routingplans für die Demontageobjekte

[Tabelle 24](#): Berücksichtigte Planungsergebnisse

4.8.3 Simulationsgestützte Kostenanalyse

Hauptziel der simulationsgestützten Kostenanalyse von Demontagefabriken ist es auf der Basis eines durchgängigen Planungsansatzes die erforderlichen Kosteninformationen zu sammeln und bereitzustellen, damit sie entsprechend dem jeweiligen Bewertungszweck zielgerichtet ausgewertet werden können. Auf der Basis eines durchgehenden Kostenmodells erfolgt eine planungsbegleitende Kostenkontrolle und damit die Steigerung der Planungseffizienz. Ein weiteres Ziel ist die Erzeugung von Kostentransparenz. Durch die verursachungsgerechte Kostenzuordnung während der Simulation ist es möglich unterschiedliche technische Gestaltungsmöglichkeiten von Demontagefabriken nicht nur hinsichtlich technischer Kennzahlen sondern auch ihrer induzierten Kosten gleichzeitig zu bewerten.

Nachfolgend wird ein Referenzmodell zur simulationsbasierten Prozesskostenrechnung konzipiert, welches es ermöglicht, in einem externen Kostenmodul auf Basis von zur Leistungsverrechnung erzeugter Simulationsdaten offline Demontagestückkosten zu kalkulieren. In Anlehnung an [ROZ-99] werden zur Entwicklung des Prozesskostenmodells relevante Kosten kategorisiert, welche zunächst auf die zu charakterisierenden Ressourcen verteilt werden. Anschließend sind die Hauptaktivitäten bzw. -prozesse zu identifizieren, die zur Demontage der Demontageobjekte benötigt werden. Zur Verrechnung der durch die Demontageobjekte in Anspruch genommenen Ressourcenleistungen sind im Kostenmodell Bezugsgrößen zu definieren.

4.8.3.1 Integration Activity-Based-Costing und Ablaufsimulation

Activity-Based-Costing (ABC) oder Prozesskostenrechnung ist eine prozessorientierte Methode zur Zuordnung aller Kostenarten (direkte und indirekte) unter der Berücksichtigung, dass jeder Prozessschritt („Activity“) Ressourcen verbraucht. Damit können die Kostenanteile der fixen Kosten eindeutig identifiziert werden. Die aktuellen Produktionskosten werden realistisch wiedergegeben, da der tatsächliche Verbrauch an Ressourcen und Dienstleistungen berücksichtigt wird [TUR-91]. Activity-Based-Costing (ABC) wurde von KAPLAN und COOPER entwickelt, um in den fertigungsunterstützenden Leistungsbereichen (fixkostenintensive Gemeinkostenbereiche wie Lager, Verwaltung) die Kostentransparenz zu erhöhen und eine verursachungsgerechtere Kostenzuordnung zu erreichen [COO-90a]. Das ABC-Konzept ist in dem deutschsprachigen Raum von HORVATH aufgegriffen und hat sich unter der Bezeichnung Prozesskostenrechnung etabliert. Für das Grundverständnis des Konzeptes wird auf [COO-90b] und [HOR-01] verwiesen.

In der Ablaufsimulation durchlaufen Demontageobjekte eine Aktivitätensequenz und werden zu Demontageerzeugnissen transformiert. Im ABC-Modell werden die Kosten für die aktivitätengetriebene Inanspruchnahme von Demontagebetriebsmittel mittels Kostentreibern den Demontageobjekten zugewiesen, welche die Aktivitäten verursachen. Ein ABC-Modell enthält die Kosten und Aktivitäten eines Systems. Das Simulationsmodell kann die stochastischen Einflüsse dieser Aktivitäten bestimmen. Die gemeinsame Verbindung beider Modelle ist die Aktivität (Bild 45)

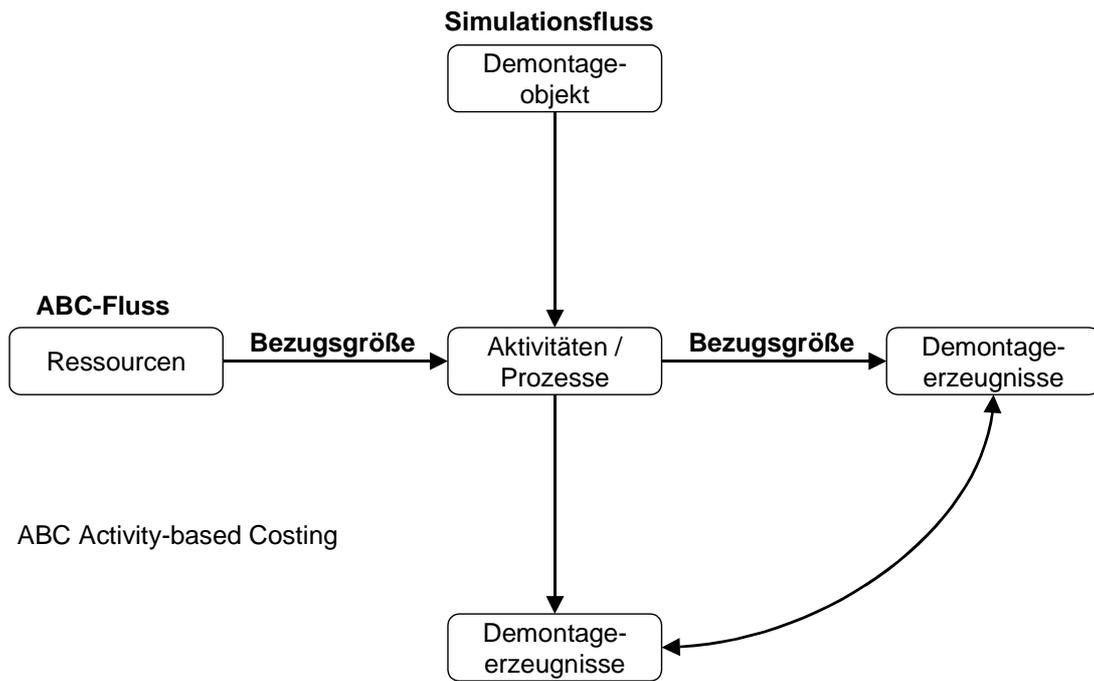


Bild 45: Integration von diskreter Simulation und Activity-Based Costing nach [BEC-00]

Da die Ablaufsimulation diskrete Ereignisse bzw. Aktivitäten abbildet und sich Prozessvariabilität, Materialfluss sowie Ressourcenwettbewerb darstellen lassen, ist sie hervorragend geeignet, um das Konzept der Prozesskostenrechnung umzusetzen.

4.8.3.2 Kosten, Ressourcen und Aktivitäten

Kosten entstehen sowohl bei der Inanspruchnahme von Ressourcen als auch im Fall der mangelnden Verwertung von Leistungspotenzialen [WÖH-93]. Beide Größen können in einem Demontageprozess bzw. während seiner Simulation in der Regel zeit- und mengenmäßig erfasst werden. Als direkte betriebswirtschaftliche Folgen entstehen Kosten, (entgangene) Deckungsbeiträge oder indirekte Ausbringungsverluste. Die im Prozesskostenmodell abgebildeten direkten oder indirekten Kosten sind zu Ressourcenkosten umzurechnen, welche als Basis für die aktivitätengetriebene Prozesskostenrechnung verwendet werden (Bild 46). Nicht alle Kosten können erfasst werden, wenn sie sich nicht einer bestimmten Ressource oder Aktivität zuordnen lassen (z.B. einige Verwaltungskosten, Arbeitsvorbereitung). Als Lösung wird die Kombination des Activity-Based-Costing mit der traditionellen Kostenrechnung vorgeschlagen.

Bei der Ressourcendefinition sind zwei Parameter entscheidend: Ressourcentyp und Ressourcenstatus. In Anlehnung an die Objekte, die in Demontagesystemen Prozessschritte ausführen können, sollen drei Arten von Ressourcen unterschieden werden: das Personal, Betriebsmittel und Hilfsmittel. Betriebsmitteln und Hilfsmitteln (alle altprodukt- oder altproduktgruppenspezifischen Demontagehilfsmittel wie z.B. Sonderwerkzeuge, Vorrichtungen, Greifer etc.) liegt eine demontagearbeitsplatzbezogene Betrachtung zugrunde. Die Ressource Personal beschreibt alle Mitarbeiter, die im betrachteten Demontagesystem tätig sind oder zur Ausführung vorbereitender Funktionen benötigt werden.

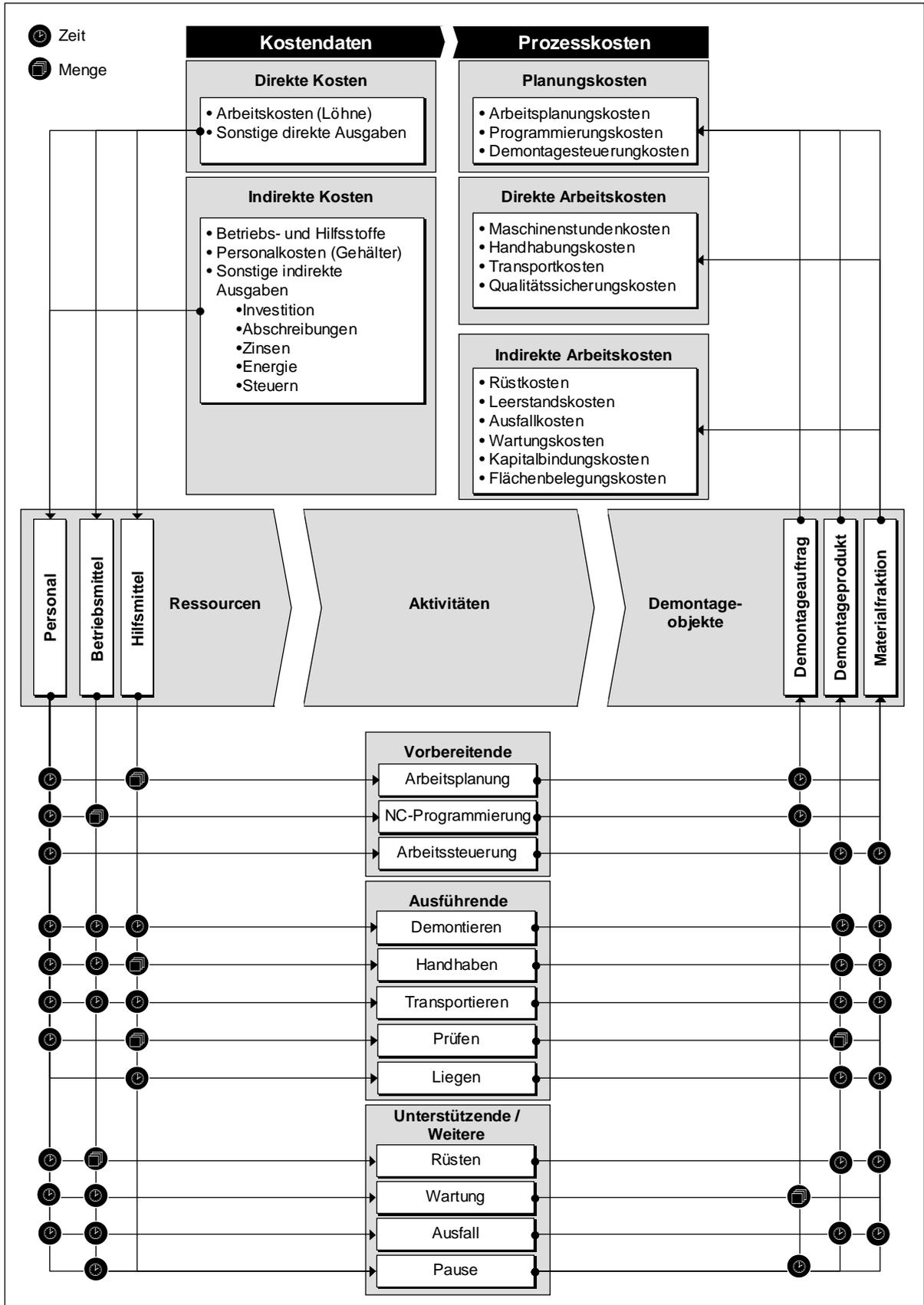


Bild 46: Kostenmodell der simulationsbasierten Prozesskostenrechnung

Um Art und Intensität der Nutzung der Betriebs- und Hilfsmittel sowie des Personals detailliert darzustellen, sind verschiedene Zustände zu unterscheiden. Somit können Aktivitäten identifiziert werden, die für eine Zeit- und/oder Kostenbetrachtung relevant sind. Diese Unterscheidung ermöglicht eine neue Betrachtung der Entscheidungsunterstützung, welche Fragen nach der echten Kostenreduzierung durch Zeitersparnisse in den Prozessen beantworten kann [FEL-00]. Aktivitäten sollten zur Vereinfachung für Gruppen von Aktionen mit logischen Verbindungen definiert [COO-98] werden, so dass nicht für jeden Prozessschritt Kostentreiber und Nutzungsraten zu entwickeln sind.

Es wird eine Aufteilung in vorbereitende, unterstützende und ausführende Prozessschritte vorgeschlagen. In Anlehnung an [REF-92], [HAR-91], [VDI-3633] werden als ausführende Prozessschritte festgelegt: Demontieren, Handhaben, Transportieren, Messen und Prüfen sowie Liegen. Rüst- und Instandhaltungsvorgänge sollen als unterstützende Prozessschritte ebenfalls über die Ressourcenzustände abgebildet werden, weshalb die Zustände Rüsten, Pause, Ausfall und Service einzuführen sind. Als vorbereitende Tätigkeiten werden die Arbeitsplanung, NC-Programmierung und Arbeitssteuerung differenziert. Die Zustände werden jeweils für die entsprechenden Ressourcen im Simulationsmodell geführt.

4.8.3.3 Bezugsgrößen der Leistungsverrechnung

Während der Kostensimulation kann die Kostenverrechnung durch mengenbezogenen und zeitbezogene Kostentreiber erfolgen [BRA-95]. Mengenbezogene Kostentreiber basieren auf der Annahme, dass bei jeder Ausführung einer bestimmten Aktivität die gleiche Menge der Ressource gebraucht wird (z.B. WE-Scheine, Bestellungen). Zeitbezogene Kostentreiber werden verwendet, wenn eine signifikante Variation zwischen der benötigten Menge von Zeiteinheiten für verschiedene Kostenobjekte existiert (z.B. Rüstvorgänge).

In dieser Arbeit sollen soweit als möglich als Bezugsgröße die zeitliche Dauer der Inanspruchnahme von Ressourcen verwendet werden. Damit wird einerseits der Tatsache Rechnung getragen, dass die Zeit einen wesentlichen Maßstab für die Beurteilung von Auftragsabwicklungsprozessen darstellt. Darüber hinaus kann die verbrauchte Zeit immer mit einer feststehenden Kostengröße verknüpft werden. Andererseits werden bei Simulationen die einzelnen Prozesse über den Zeitablauf gesteuert, der unmittelbar entnommen werden kann. Es müssen somit keine Kostenfunktionen gebildet und gepflegt werden.

Mit der Zeit als Messgröße für den Ressourcenverbrauch von Betriebs- und Hilfsmitteln erfolgt die Bewertung zur Ausführung eines Prozessschrittes über die zeitliche Inanspruchnahme, welche mit einem dynamischen Maschinenstundensatz verrechnet wird. Dynamische Maschinenstundensätze können bestimmt werden, indem zunächst nicht die Nutzzeit der Maschine sondern die aus der Simulation resultierende Auslastung die Bezugsgröße darstellt. So können Maschinenstundensätze bestimmt werden, die den Auslastungsgrad einer Maschine berücksichtigen und folglich die Transparenz der Kostenentstehung erhöhen. Z.B. wird für die Leistungsverrechnung bezüglich eines Trans-

portbandes über die Anzahl der Werkstückträger eine mittlere Auslastung des gesamten Bandes ermittelt, die dann mit der Transportzeit des betrachteten Werkstückträgers verrechnet wird.

Die Differenzierung des Personals entsprechend der Qualifikation spiegelt sich im Bewertungsmodell in der Berücksichtigung unterschiedlicher Gehaltsgruppen wider. Entsprechend wird bei der Inanspruchnahme von Personalkapazität die zeitliche Dauer mit dem entsprechenden Gehaltssatz verrechnet.

Oft liegen für indirekte Bereiche keine Zeitangaben für die Inanspruchnahme einzelner Ressourcen vor. Es wird auf geeignete Prozesskostensätze zurückgegriffen, wobei diese mit Hilfe des jeweiligen Betrachtungszeitraums auf eine Zeitgröße für die Ausführung des Prozessschrittes umgerechnet werden. Durch die Festlegung einer gesonderten Ressource für den vorbereitenden Prozessschritt kann dann mit dem entsprechenden Prozesskostensatz die zeitliche Ausführung des Prozessschrittes bewertet werden.

5 Softwaretechnische Implementierung

5.1 Architektur des Planungswerkzeuges

Für die einfache Durchführung der verschiedenen Planungsschritte des in [Kapitel 4](#) dargestellten Vorgehens zur simulationsgestützten Planung von Demontagefabriken wurde das Planungswerkzeug InSane (**I**ntegrated **S**imulation-based **D**isassembly **P**lant **D**esign) entwickelt. Aufbau und Module des Werkzeuges InSane werden nachfolgend vorgestellt.

Ziel der softwaretechnischen Implementierung ist der Einsatz von Standardkomponenten, um einerseits den Entwicklungsaufwand so gering wie möglich zu halten und andererseits die Akzeptanz bei den Nutzern aufgrund der Verwendung bekannter Komponenten zu erhöhen. In [Bild 47](#) wird die entwickelte Architektur für das Planungswerkzeug dargestellt. Kernstück des Planungswerkzeuges bildet eine Microsoft Access Datenbank mit der dazugehörigen Datenstruktur für die technischen Daten, Organisations- und Systemlastdaten (Stammdaten). Die Stammdaten enthalten die entwickelten Optimierungsmodelle sowie vordefinierte (default) festgelegte technische Daten wie Kapazitäten von Demontagebetriebsmitteln, Organisationsdaten, wie Schichtenmodelle und Systemlastdaten sowie Demontagepläne und Prozesszeiten, die während des Planungsprojekts angepasst werden und somit zu Projektdaten werden.

Für die direkte Interaktion des Planers mit dem Planungswerkzeug sind für jede Planungsphase Benutzungsschnittstellen-Module (BSM) in der Programmiersprache Visual Basic (VB), VB for Application und JAVA entwickelt worden. Die BSM ermöglichen die Eingabe und Konfiguration von Planungsdaten, die Darstellung der aktuellen Stamm- und Projektdaten sowie die Visualisierung der Planungsergebnisse. Der reibungslose bidirektionale Datenaustausch zwischen den BSM und der Datenbank wird über das entwickelte Algorithmus-Modul Datenaufbereiter, welches für die Datenaggregation und/oder -transformation zuständig ist, realisiert. Durch die Verwendung von standardisierten Schnittstellen Extensible Markup Language (XML) und Open DataBase Connectivity (ODBC) sowie der entwickelten Disassembly Data Layout Exchange (DDLE) Schnittstelle können kommerzielle Softwarewerkzeuge zur Gruppenbildung, mathematischen Optimierung, Ablaufsimulation und Layoutgestaltung in das Werkzeug zur integrierten simulationsbasierten Demontagefabrikplanung eingegliedert werden. Die Auswahl der kommerziellen Softwarewerkzeuge erfolgte hierbei nach folgenden Kriterien: Bereitstellung der erforderlichen Funktionalität, Anschaffungskosten und Marktanteil.

Für die Gruppenbildung von Demontageobjekten in den Planungsphasen, Standort- und Grobplanung wird die Standard-Statistiksoftware SPSS verwendet. SPSS stellt die erforderlichen Transformationsalgorithmen, wie die Extermwertnormalisierung und die Z-Transformation, die Ähnlichkeitsfunktionen, wie die Euklidische Distanz und quadrierte Euklidische Distanz und die Clusteralgorithmen, wie das Single-Linkage und Average-Linkage Verfahren sowie das Ward-Verfahren zur Verfügung. Dadurch ist die entwickelte Vorgehensweise zur Gruppenbildung von Demontageobjekten auf Basis der definierten

Produkt- und Prozessmerkmalsbasis mit SPSS sehr gut umsetzbar. Über eine XML Schnittstelle zur Datenbank werden die erforderlichen Daten zur Gruppenbildung der Statistiksoftware SPSS bereitgestellt sowie die Ergebnisse in die Datenbank zurückgeschrieben. Für die erfolgreiche Bestimmung der Approximationsmaße und Anwendung der Clusteralgorithmen ist die SPSS Software um das Algorithmusmodul zur Erzeugung der produkt- und prozessorientierten Merkmalsbasis, die in [Kapitel 4.6.1](#) beschrieben wurde, erweitert worden. Das Algorithmusmodul stellt eine funktionale Erweiterung der Statistiksoftware dar.

Die Lösung der mathematischen Modelle für die Standortplanung, Dimensionierung und Strukturierung erfolgt mit der Optimierungssoftware LINGO. Dazu wurden auf Basis der entwickelten mathematischen Modelle mit der Hilfe der Script-Sprache der Optimierungssoftware LINGO Optimierungsmodelle entwickelt. Über die ODBC Schnittstelle wird je nach Planungsschritt, das erforderliche Optimierungsmodell geöffnet. Mit Hilfe des entwickelten Algorithmus-Moduls Konfigurator werden die Modellvariablen der geladenen Optimierungsmodells aus den Projektdaten konfiguriert. Die Ergebnisse werden über die ODBC Schnittstelle in die Datenbank zurückgeschrieben.

Die Layoutgestaltung erfolgt in der Phase der Feinplanung auf Basis der Ergebnisse der Dimensionierung und der ausgewählten Referenzlayouts (Ideallayout) mit Hilfe der Software AutoCAD. Es wird das Demontagefabrik- und –systemlayout entsprechend der realen Rahmenbedingungen detailliert erstellt. Aus der erstellten CAD-Zeichnung werden die für den nächsten Planungsschritt, der simulationsgestützten Feinplanung, erforderlichen Layoutdaten wie die Lage der Demontagestationen und Förderbänder durch ein entwickeltes Algorithmus-Modul generiert. Das Algorithmus-Modul wurde in die AutoCAD Software integriert und unterstützt die entwickelte Disassembly Data Layout Exchange (DDLE) Schnittstelle, über welche die Layoutdaten an die Datenbank transferiert werden.

Die simulationsgestützte Planung steht im Mittelpunkt der einzelnen Planungsphasen. Die Ergebnisse der Gruppenbildung, mathematischen Optimierung und Layoutplanung bilden das Datengerüst für die automatische Simulationsmodellgenerierung. In Abhängigkeit der eingesetzten Simulationssoftware kann das Algorithmus-Modul zur Generierung von lauffähigen Simulationsmodellen Bestandteil des Simulators werden (offene Simulatoren), wie bei eM-Plant und Taylor ED, oder es ist als eigenständiges Software-Modul bei sog. geschlossenen Simulatoren, wie bei AutoMod und Quest zu realisieren [CIU-03c]. Bei der Implementierung des Planungswerkzeuges wurde jeweils ein Repräsentant für offene und geschlossene Simulatoren ausgewählt. Der Simulator eM-Plant wurde durch ein Algorithmus-Modul zur Generierung von Simulationsmodellen erweitert. Der Datenaustausch mit der Datenbank wird über die ODBC Schnittstelle realisiert. Für die Integration des Simulators AutoMod in das Planungswerkzeug war es erforderlich, ein eigenständiges Algorithmus-Modul für den Generator zu entwickeln. Der Generator verwendet die XML-Schnittstelle, um die Daten, welche für die Modellgenerierung notwendig sind, aus der Datenbank zu bekommen.

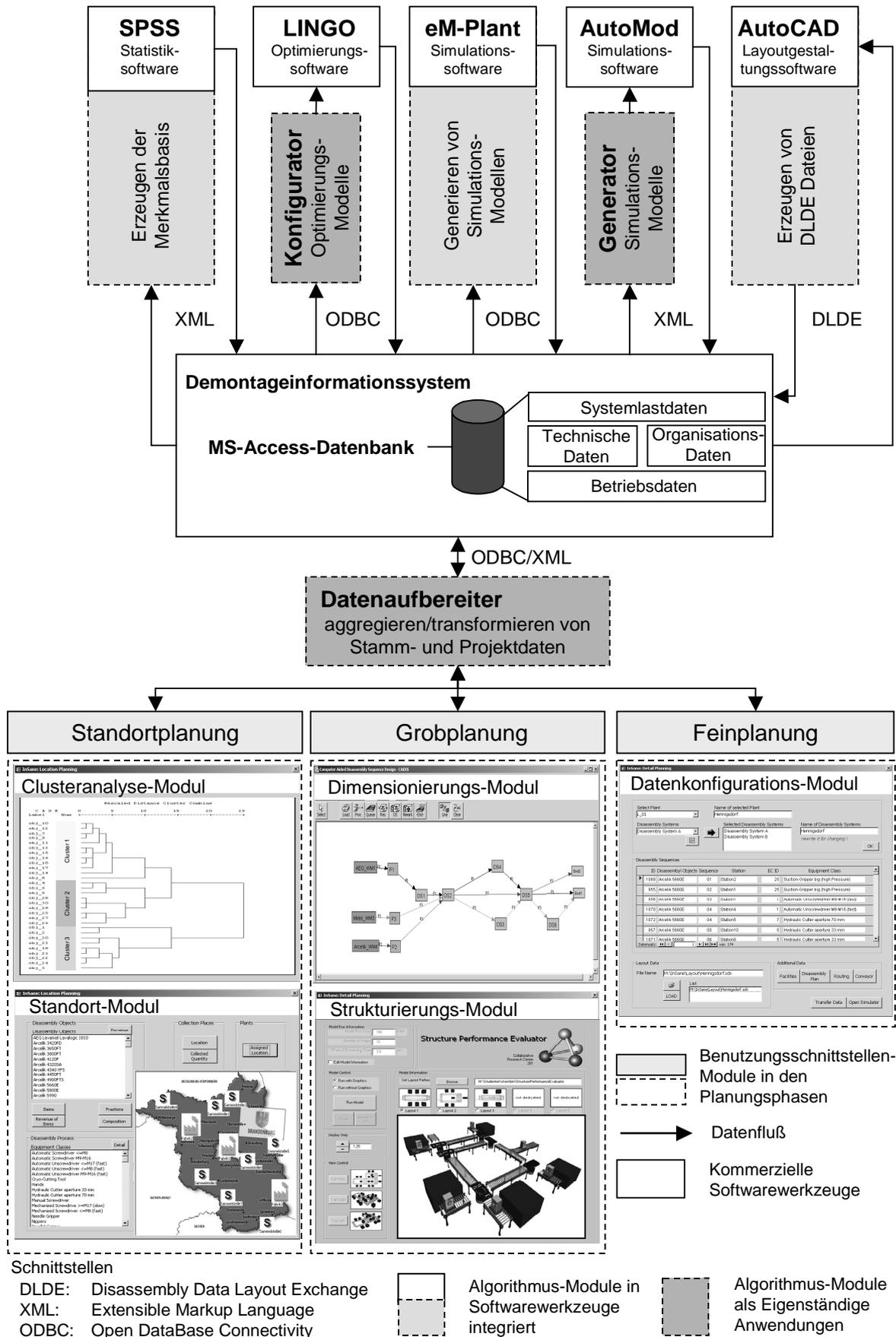


Bild 47: Architektur der Planungswerkzeuges InSane

5.2 Benutzungsschnittstellen-Module

Die einfache Bedienung des Planungswerkzeuges in den jeweiligen Planungsphasen wird durch ein Hauptmenü unterstützt (Bild 48). Das Hauptmenü ermöglicht den direkten Zugriff auf die entsprechenden Benutzungsschnittstellen-Module oder öffnet das notwendige Softwarewerkzeug in den einzelnen Planungsschritten der Standortplanung, Grob- und Feinplanung, wie z.B. AutoCAD im Planungsschritt Layout Design.

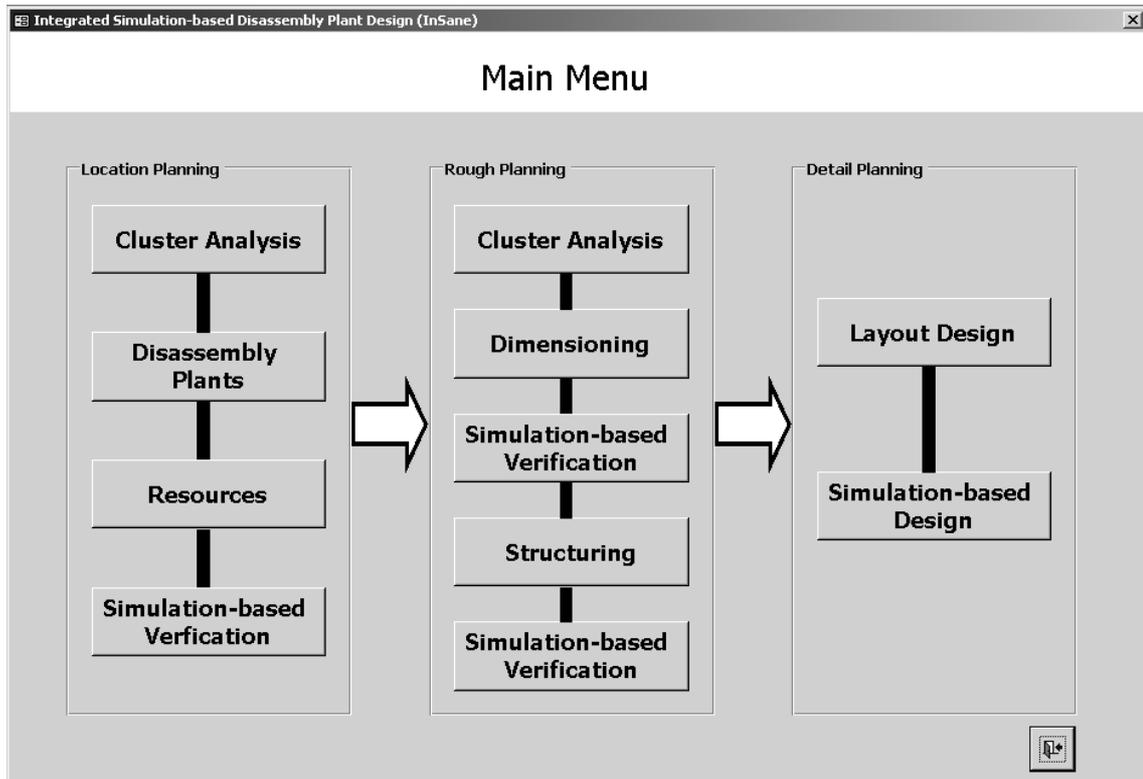


Bild 48: Hauptmenü des Planungswerkzeuges InSane

Im folgenden werden die Funktionsweise sowie die anwendergerechte Nutzung der entwickelten Benutzungsschnittstellen-Module für die einzelnen Planungsphasen beschrieben.

5.2.1 Standortplanung

Die Planungsphase der Standortplanung wird durch die Benutzungsschnittstellen-Module *Clusteranalyse*, *Standortwahl* und *Demontagebetriebmittel* unterstützt. Das BSM-Clusteranalyse greift auf die Daten der Datenbank zu und steuert die Clusteranalyse in der Statistiksoftware SPSS. SPSS bietet mit seiner Befehlssprache die Voraussetzung für den automatisierten Betrieb. Es steht eine umfangreiche Bibliothek an Befehlen für die Clusteranalyse, sowie zum Datenhandling und zur Ergebnisdarstellung zur Verfügung. Das entwickelte BSM-Clusteranalyse ist in Bild 49 dargestellt. Der Anwender hat die Möglichkeit, zwischen den in der Datenbank abgelegten Demontageobjekten (Disassembly Objects), die zu einer Clusterung herangezogen werden sollen, zu wählen. Zudem können die objektbeschreibenden Merkmale (Object Attributes), die spezifischen Transformations- und Ähnlichkeitsfunktionen sowie Clusteralgorithmen (Setting for Cluster Analysis) und die gewünschten Ergebnisdarstellungen (Output Statistic Settings)

ausgewählt werden. SPSS erstellt neben den Dendogrammen auch Zugehörigkeitstabellen. Diese Tabellen enthalten die Zuordnungen der einzelnen Demontageobjekte zu den Clustern in unterschiedlichen Clusterlösungen. Diese Zugehörigkeitstabellen werden an die Datenbank als Ergebnisse für die weiteren Planungsschritte übertragen.

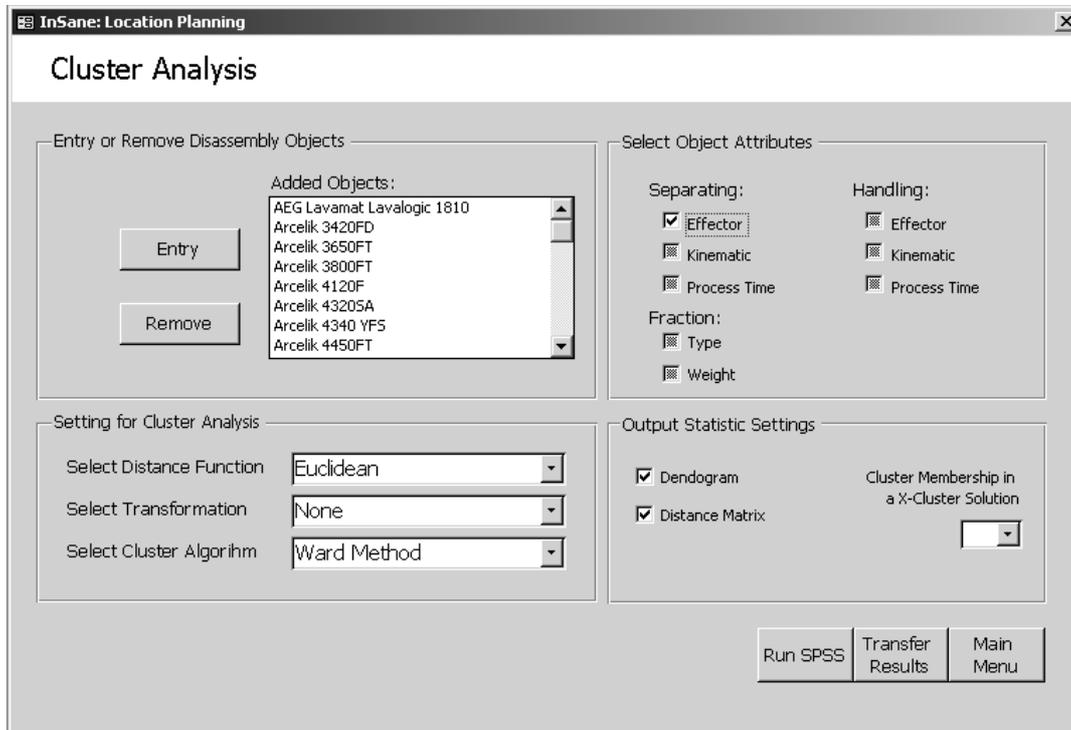


Bild 49: BSM – Clusteranalyse

Das entwickelte Algorithmus-Modul für die Clusteranalyse arbeitet in vier Schritten und wurde mit dem SPSS-Befehlsskript umgesetzt (Bild 50). Im ersten Schritt werden die vom dem BSM-Clusteranalyse konfigurierten Daten transformiert. Dabei ist eine Zuordnung von Demontageobjekten zu sog. Cases und Merkmalen zu Variablen notwendig. Anschließend werden die Daten mit dem vom Anwender spezifizierten Transformationsalgorithmus normiert. Die daraufhin mit dem gewählten Proximitätsmaß berechnete Distanzmatrix wird zwischengespeichert, um eine Clusterung durchführen zu können. Im dritten Schritt wird die zwischengespeicherte Distanzmatrix eingelesen und mit dem gewählten Clusteralgorithmus angewendet. Im vierten Schritt wird aus den gebildeten homogenen Demontageobjektklassen mit Hilfe des Repräsentativverfahren, welches das mengenmäßig am stärksten vertretene Demontageobjekt eines Clusters identifiziert, ein Repräsentant, ein sog. Referenzdemontageobjekt (RDO), für jedes Cluster ausgewählt.

```

GET DATA /TYPE = TXT
/FILE = 'C:\temp\spssinputdata.dat'
/FIXCASE = 1
/ARRANGEMENT = FIXED
/FIRSTCASE = 2
/IMPORTCASE = ALL
/VARIABLES =
/1 obj 0-7 A8
effeff1 9-16 F8.0
effeff2 18-25 F8.0
effeff3 27-34 F8.0
effeff4 36-43 F8.0
etime1 252-259 F8.2
etime2 261-268 F8.2
etime3 270-277 F8.2
effkin1 495-502 F8.0
maneff1 558-565 F8.0
maneff2 567-574 F8.0
matime1 657-664 F8.2
matime2 666-673 F8.2
mankin1 756-763 F8.0
mankin2 765-772 F8.0
.
CACHE.
EXECUTE.
PROXIMITIES effeff1 effeff2 effeff3 effeff4 etime1 etime2 etime3
effkin1 maneff1 maneff2 matime1 matime2 mankin1 mankin2
/MATRIX OUT ('C:\Temp\spssclus.tmp')
/MEASURE= SEUCLID
/ID=obj
/PRINT NONE
/STANDARDIZE= VARIABLE RESCALE .
CLUSTER
/MATRIX IN ('C:\Temp\spssclus.tmp')
/METHOD SINGLE
/ID=obj
/SAVE=CLUSTERS(2,20)
/PRINT SCHEDULE CLUSTER(2,20)
/PRINT DISTANCE
/PLOT DENDROGRAM VICICLE.
ERASE FILE= 'C:\Temp\spssclus.tmp'.
SAVE TRANSLATE
/CONNECT = 'DSN=SPSSDaten;,'
/TABLE='Date9_6_2003Time9_0'
/TYPE = ODBC
/REPLACE
/DROP effeff1 effeff2 effeff3 effeff4 etime1 etime2 etime3
effkin1 maneff1 maneff2 matime1 matime2 mankin1 mankin2

```

Einlesen und Transformation der Merkmalsbasis

- Einlesen und Transformation der Merkmalsbasis
- Zuordnung der Merkmale zu Variablennamen

Distanzmaß

Transformationsalgorithmus

Clusteralgorithmus

- Datentransformation mit gewähltem Algorithmus
- Distanzberechnungen mit gewähltem Algorithmus
- Ergebnisse in externer Datei zwischenspeichern

- Zwischengespeicherte Daten einlesen
- Clustering mit gewähltem Algorithmus durchführen
- Ergebnisse grafisch ausgeben (Dendrogramm)

- Ergebnisse via ODBC an MS-Access Datenbank zurückgeben

Bild 50: Auszug aus dem Algorithmus-Modul *Erzeugen der Merkmalsbasis*

Auf Basis der Gruppierungsergebnisse kann der nächste Planungsschritt mit dem BSM-*Standortwahl* erfolgen. Das BSM-*Standortwahl* ermöglicht dem Planer, mit Hilfe der vorhandenen Stammdaten die notwendigen Projektdaten für die Anwendung des in der Optimierungssoftware LINGO modellierten mathematischen Modells *Standortwahl* zu konfigurieren (Bild 51). Für die fehlerfreie Anwendung des mathematischen Modells müssen über das BSM-*Standortwahl* allen Modellvariablen, die in Kapitel 4.6 definiert wurden (vgl. Tabelle 13), entsprechende Werte zugewiesen werden.

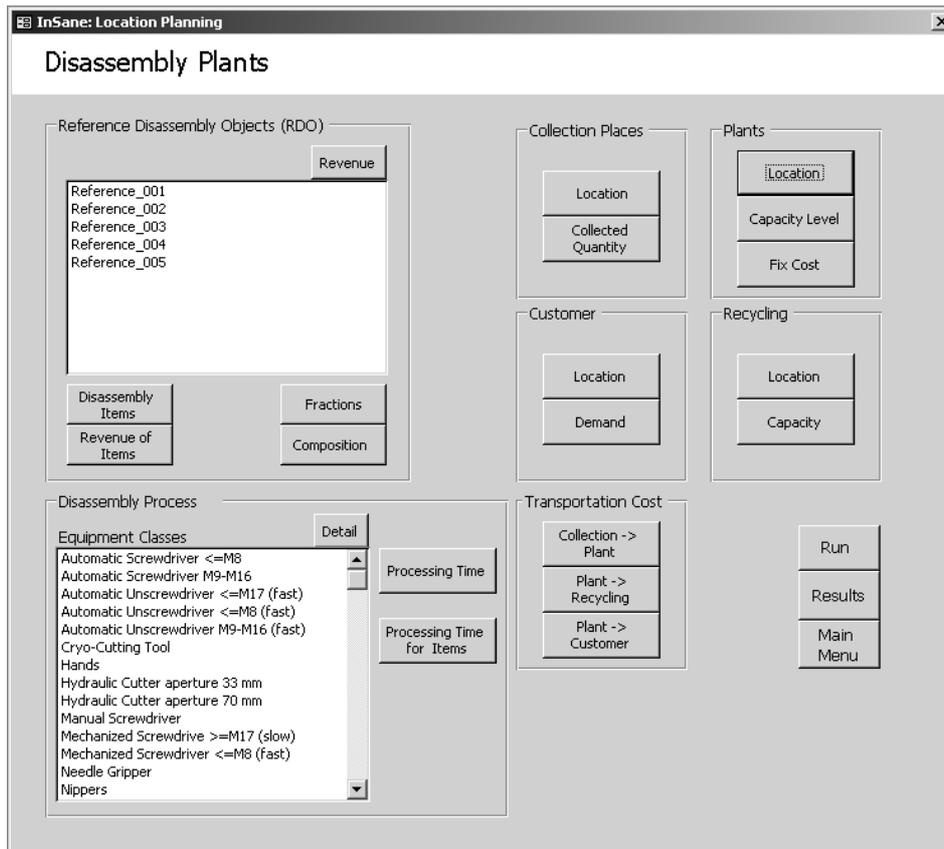


Bild 51: BSM – Standortwahl

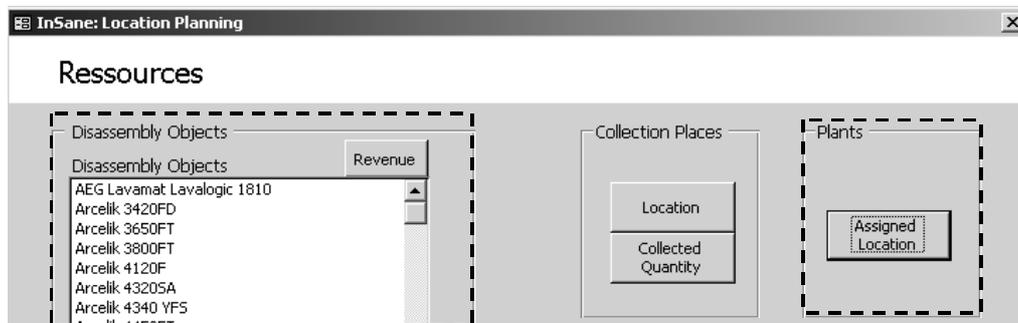
In der Tabelle 25 wird zusammenfassend dargestellt, mit welchen Eingabefeldern welche Modellvariablen konfiguriert werden können. Nach abgeschlossener Konfiguration wird die Berechnung des mathematisches Modells in der Optimierungssoftware LINGO durch das BSM – Standortwahl gestartet sowie die Ergebnisse in die Datenbank abgelegt.

Eingabefeld-Bezeichnung	Erläuterung	Modellvariablen
Reference Disassembly Objects	Referenzdemontageobjekte (RDO)	$E_o; E_{o,e,s}; E_m$
Disassembly Process	Demontageprozesse	$Fix_b; T_{b,o}; T_{b,o,e}; Kap_b$
Collection Places	Sammelstellen	$AM_{s,o}$
Plants	Demontagefabriken	$Fix_{f,q}; Kap_q$
Customer	Nachfrage des Kunden anr Demontageerzeugnissen	$N_{k,o,e}$
Recycling	Recycling-Standorte	$Kap_{r,m}$
Transportation Costs	Transportkosten	$K_{s,f}; K_{f,k,o,e}; K_{f,r,m}$

Tabelle 25: Konfiguration der Modellvariablen

Das BSM-Demontagebetriebsmittel unterstützt den Benutzer bei der Bestimmung der notwendigen Demontagebetriebsmittel und ihrer Kapazitäten für die zuvor festgelegten Standorte durch die Konfiguration der Modellvariablen des mathematischen Modells Demontagebetriebsmittel. Der Aufbau und die Funktionsweise des BSM-

Demontagekapazitäten entspricht weitestgehend dem des BSM-Standortwahl. Der in [Bild 52](#) dargestellte Ausschnitt des BSM- Demontagekapazitäten stellt die Unterschiede dar. Es werden bei der Planung der Demontagebetriebsmittel die Demontageobjekte und nicht deren Referenzdemontageobjekte berücksichtigt. Ferner stellt das Eingabefeld Plants (Demontagefabriken) nur die Ergebnisse aus dem Planungsschritt Standortwahl zur Verfügung.



[Bild 52](#): Ausschnitt – BSM- Demontagebetriebsmittel

5.2.2 Grobplanung

Die Planungsphase der Grobplanung konzentriert sich auf die Gestaltung der Standorte, die für die Demontagefabriken (DF) bestimmt sind, und wird durch die Benutzungsschnittstellen-Module *Clusteranalyse Dimensionierung*, *Strukturierung* und *simulationsgestützte Analyse der Strukturierung* unterstützt.

Das BSM-Clusteranalyse für die Grobplanung soll den Nutzer bei der Entscheidungsfindung über die Anzahl der zu planenden Demontagesysteme innerhalb einer DF unterstützen. Der Aufbau und die Funktionsweise des BSM-Clusteranalyse der Grobplanung entspricht dem des BSM-Clusteranalyse der Standortplanung und wird nicht weiter beschrieben.

5.2.2.1 Dimensionierung

Das BSM-Dimensionierung besteht aus den zwei Eingabemasken ([Bild 53](#) und [Bild 54](#)) und soll den Nutzer bei der Konfiguration der Modellparameter des mathematischen Modells Dimensionierung unterstützen. Im ersten Schritt wird festgelegt, für welche Demontagefabrik und somit Demontageobjektgruppen ein Demontagesystem dimensioniert werden soll ([Bild 53](#)). Der Planungsschritt erfordert die Festlegung der Parameter maximale Anzahl an Demontagestationen, maximale Anzahl an zugewiesenen unterschiedlichen Betriebsmittel je Demontagestation sowie die gewünschte Zykluszeit ([Bild 54](#)). Über die Einstellungsmöglichkeiten des Aktionsfeldes „Select Layout Type“ kann während der Dimensionierung die allgemeine Organisationsform des zu planenden Demontagesystems festgelegt werden.

Nach abgeschlossener Konfiguration der Modellparameter wird über das BSM-Dimensionierung das entsprechende mathematische Modell gestartet und bei erfolgreicher Berechnung die Ergebnisse in die Datenbank geschrieben.

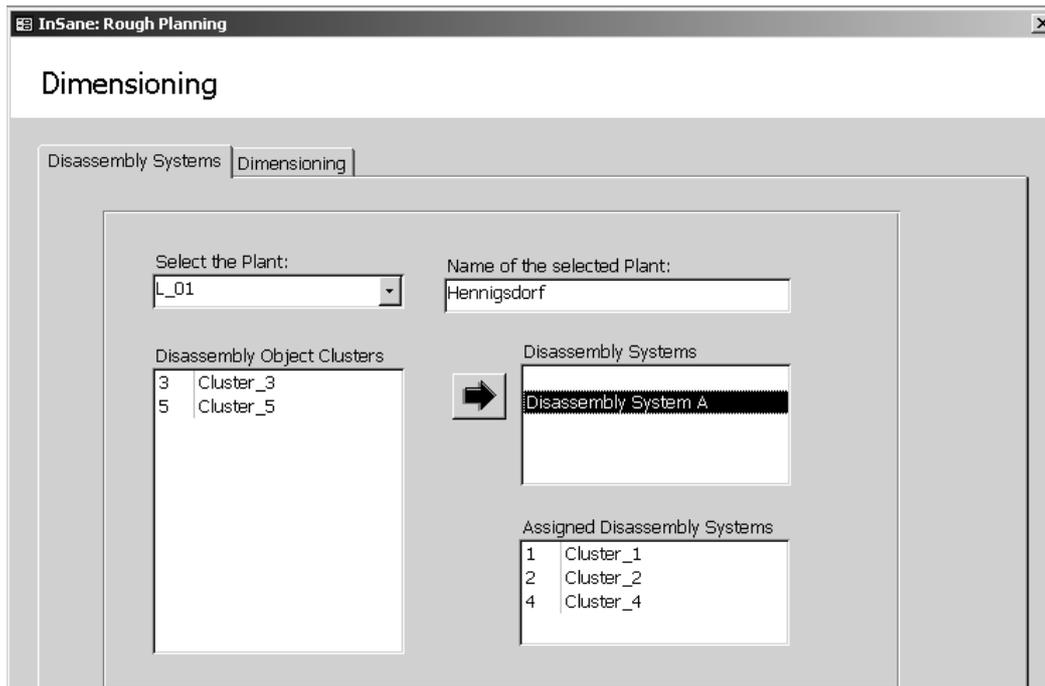


Bild 53: BSM – Dimensionierung I

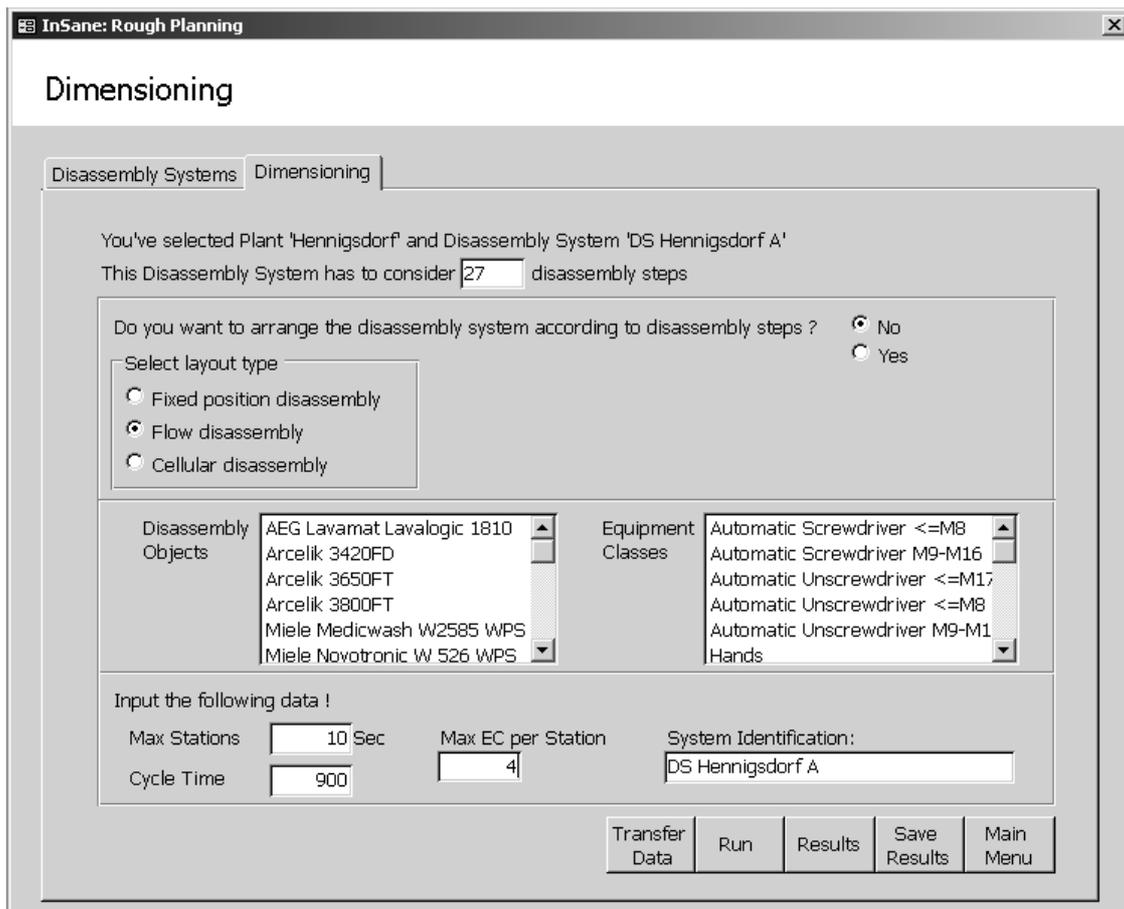


Bild 54: BSM – Dimensionierung II

Mit Hilfe des BSM- Ergebnisvisualisierung ([Bild 55](#)) werden die Ergebnisse der Dimensionierung grafisch aufbereitet. Sie können manuell nachgebessert werden.

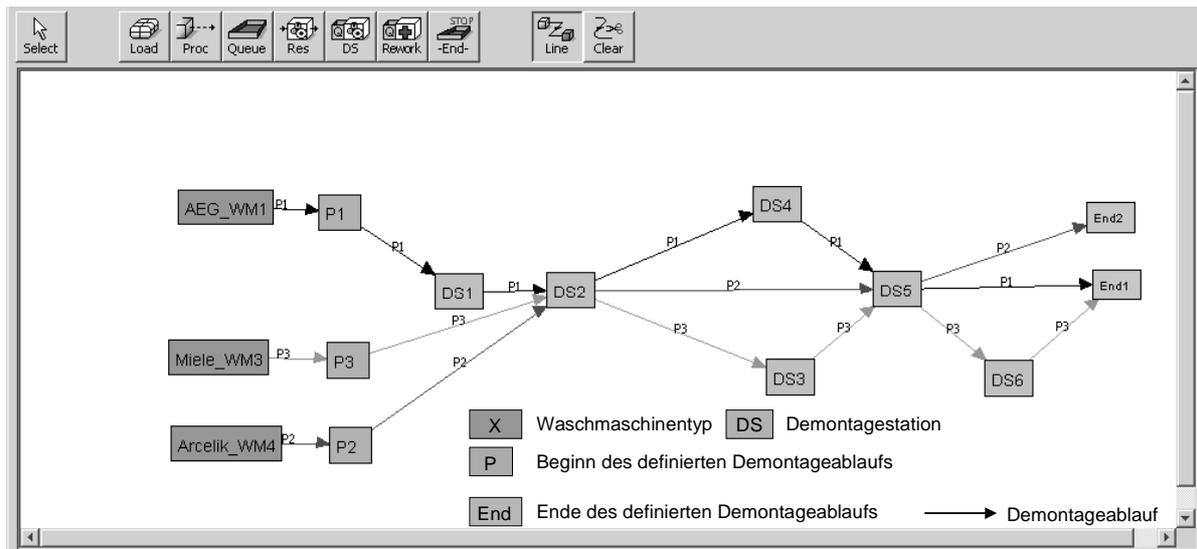


Bild 55: Ausschnitt – BSM - Ergebnisvisualisierung

5.2.2.2 Strukturierung

Das BSM-Strukturierung unterstützt den Nutzer bei der Konfiguration der erforderlichen Modellparameter für die fehlerfreie Berechnung des mathematischen Modells zur Strukturierung von Fließdemontagesystemen. Bei zu planenden Zellen- oder Inselfemontagesystemen werden die Ergebnisse aus der Dimensionierung direkt für die Feinplanung übernommen.

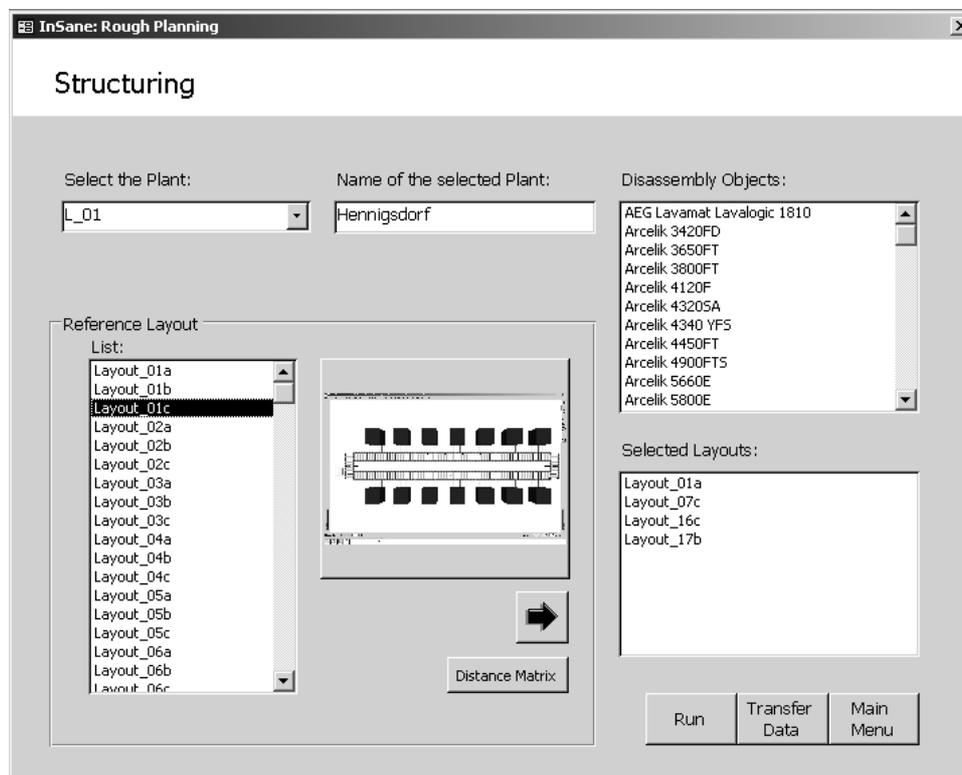


Bild 56: BSM – Strukturierung

Bei der Strukturierung von Fließdemontagesystemen werden die zu berücksichtigenden Referenzlayouts mit den entsprechenden Entfernungsmatrizen festgelegt. Das erforderliche Demontagevolumen je Demontageobjekt wird aus den vorherigen Planungsschritten übernommen. Über das BSM-Strukturierung wird das mathematische Modell zur Berechnung der kostenminimalen Zuordnung der Demontagestationen innerhalb der Referenzlayouts gestartet. Die Ergebnisse der Demontagestation-Layoutplatz-Zuordnung je Referenzlayout werden in der Datenbank gespeichert.

Mit Hilfe des BSM – Simulationsgestützte Analyse werden die Demontagestation-Layoutplatz-Zuordnungen je Referenzlayout unter Berücksichtigung dynamischer Einflussgrößen durch den Simulator AutoMod bewertet. Der Simulator AutoMod verfügt über eine ActiveX Schnittstelle. ActiveX ist eine Entwicklung von Microsoft™, welche die Freigabe von Informationen zwischen Anwendungen erleichtert und die Einbettung beliebiger Objekte (Video, Sound,...) in fremden Dokumenten wie z.B. Web-Seiten erlaubt [ARC-03]. Es ist somit möglich, Informationen direkt zwischen dem entwickelten BSM – Simulationsgestützte Analyse und dem Simulationsmodell auszutauschen, d.h. es kann während der Simulation steuernd auf das Modell eingegriffen werden.

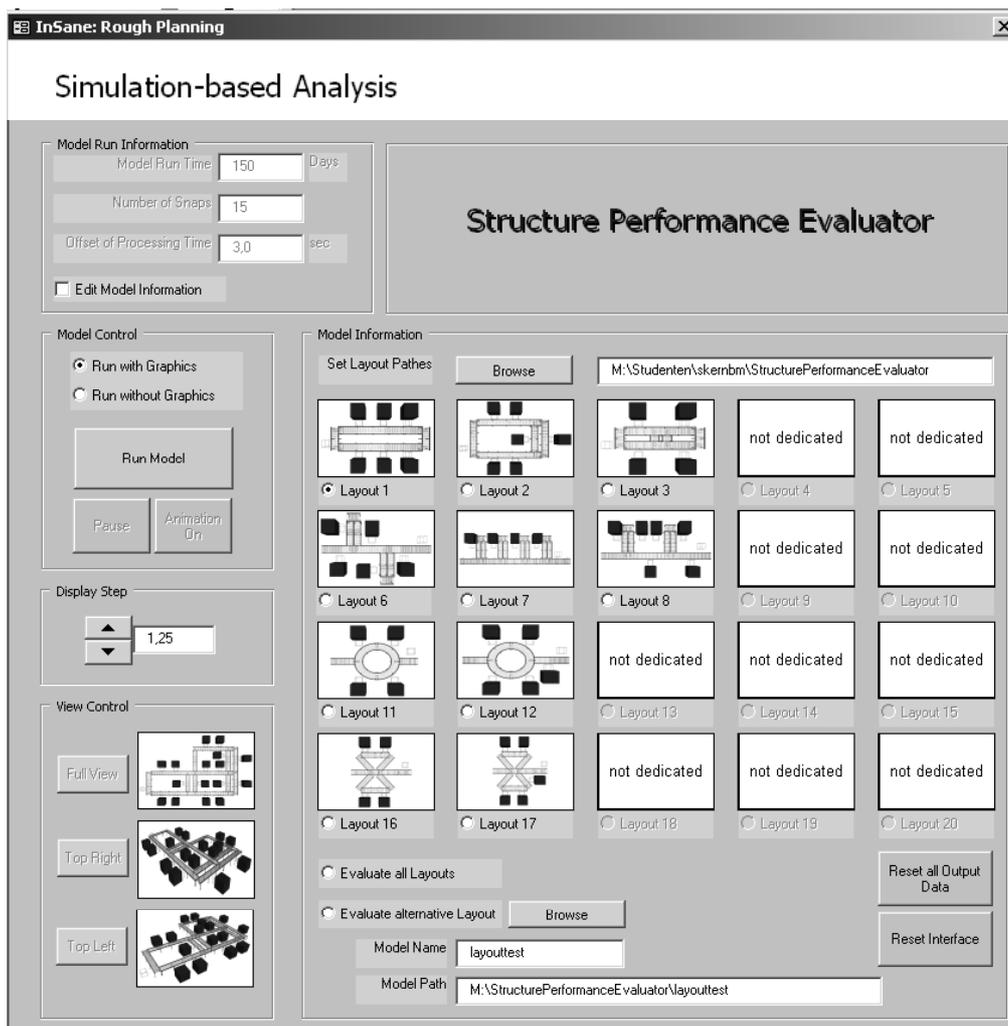


Bild 57: BSM – Simulationsgestützte Analyse

Das BSM – Simulationsgestützte Analyse ermöglicht, zwischen unterschiedlichen Referenzlayouts zu wählen, sie zu starten und über eine definierte Simulationszeit auszuführen. Jedem wählbaren Referenzlayout (Grundtyp) liegen mehrere Simulationsmodelle (Ausprägungen) mit unterschiedlicher Anzahl Arbeitsstationen zugrunde. Während der Simulationsläufe werden die Ergebnisdaten über die ODBC-Schnittstelle in die Datenbank zurückgeschrieben. Die grafisch aufbereiteten Ergebnisse über die durchschnittliche Durchlaufzeit, Produktionsrate und Auslastung des Systems unterstützen den Nutzer, sich für eine Layoutvariante zu entscheiden.

5.2.3 Feinplanung

In der Phase der Feinplanung erfolgen die Planungsschritte Layoutplanung und simulationgestützte Feinplanung. Die Layoutplanung wird direkt über das Hauptmenü des Planungswerkzeuges durch das Aktionsfeld *Layout-Design* gestartet. (Bild 48).

Data Configuration

Select Plant: L_01
Name of selected Plant: Hennigsdorf

Disassembly Systems: Disassembly System A
Selected Disassembly Systems: Disassembly System A, Disassembly System B
Name of Disassembly Systems: Hennigsdorf
rewrite it for changing !

Disassembly Sequences

ID	Disassembly Objects	Sequence	Station	EC ID	Equipment Class
1069	Arcelik 5660E	01	Station2	25	Suction-Gripper big (high Pressure)
955	Arcelik 5660E	02	Station1	25	Suction-Gripper big (high Pressure)
956	Arcelik 5660E	03	Station1	1	Automatic Unscrewdriver M9-M16 (fast)
1070	Arcelik 5660E	04	Station4	1	Automatic Unscrewdriver M9-M16 (fast)
1072	Arcelik 5660E	04	Station5	7	Hydraulic Cutter aperture 70 mm
957	Arcelik 5660E	05	Station10	5	Hydraulic Cutter aperture 33 mm
1071	Arcelik 5660E	06	Station8	5	Hvdraulic Cutter aperture 33 mm

Datensatz: 1 von 174

Layout Data

File Name: M:\InSane\Layout\Hennigsdorf.sdx
LOAD

List: M:\InSane\Layout\Hennigsdorf.sdx

Additional Data

Facilities | Disassembly Plan | Routing | Conveyor

Transfer Data | Open Simulator

Bild 58: BSM – Datenkonfiguration

Dabei wird das Softwarewerkzeug AutoCAD über die ActiveX-Schnittstelle geöffnet sowie das Algorithmus-Modul zur Erzeugung der DLDE-Datei aktiviert. Um mit dem letzten Planungsschritt die simulationsgestützte Feinplanung einzuleiten, ist es erforderlich, die Planungsdaten für automatische Simulationsmodellerstellung auszuwählen und teilweise zu konfigurieren. Dazu wurde das BSM-Datenkonfiguration entwickelt, welches über das Aktionsfeld *Simulation-based Design* gestartet wird. Der Anwender wählt die zu planende Demontagefabrik, die Demontagesysteme und die dazu korrespondierenden Feinlay-outdaten aus. Falls es erforderlich ist, können die Daten bezüglich der Demontagepläne je Demontageobjekt sowie des Transportsystems und –steuerung noch konfiguriert werden. Zum Schluss wird über das Aktionsfeld *Open Simulator* über die ActiveX-Schnittstelle der Simulator eM-Plant geöffnet. Gleichzeitig wird ein ablauffähiges Simulationsmodell für die weitere Feinplanung über das in den Simulator integrierte Algorithmusmodul generiert.

6 Anwendungsszenario

6.1 Randbedingungen

Nach Berechnungen von BRÜNING [BRÜ-03] und FREY [FRE-03] werden Haushaltsgroßgeräte mit 72% den größten Posten des jährlichen Abfallaufkommens innerhalb der Elektro- und Elektronikaltgeräte in Deutschland einnehmen. Waschmaschinen stellen hierbei mit 30% neben Kühlgeräten, Geschirrspülern, Wäschetrocknern und Herden den Löwenanteil dar, welches einem Abfallaufkommen von ca. 210.000 t/Jahr entspricht. Somit sollten Haushaltsgroßgeräte und im speziellen Waschmaschinen eine besondere Rolle in den kreislaufwirtschaftlichen Betrachtungen einnehmen. Deshalb wird der entwickelte Ansatz für die Planung von Demontagefabriken für das Produktbeispiel Waschmaschine verifiziert. Als regionale Abgrenzung für das zu betrachtende Kreislaufwirtschaftssystem werden die Bundesländer Berlin und Brandenburg gewählt. Für Berlin werden vier zentrale Sammelstellen für Altgeräte angenommen (Tabelle 26). Im Land Brandenburg werden die Kreisstädte sowie die kreisfreien Städte als potenzielle Sammelstellen identifiziert (Bild 59a).

Sammelstelle	zugeordnete Bezirke
Berlin Nord 1	Mitte, Spandau, Reinickendorf
Berlin Nord 2	Friedrichshain-Kreuzberg, Pankow, Marzahn-Hellersdorf
Berlin Süd 1	Charlottenburg-Wilmersdorf, Steglitz-Zehlendorf, Tempelhof-Schöneberg
Berlin Süd 2	Neukölln, Treptow-Köpenick, Lichtenberg

Tabelle 26: Sammelstellen für die Bezirke von Berlin

Auf Basis der Daten der statistischen Landesämter Berlin und Brandenburg [LDB-04], [SLB-04] über die Anzahl der Haushalte (ca. 2,9 Mio.), deren Ausstattungsgrad mit Waschmaschinen (89-92%) und der Annahme einer Nutzungsdauer von 10-15 Jahren, beträgt das Anfallpotenzial von Waschmaschinen zwischen 170.000 und 240.000 Stk./Jahr für die Region Berlin-Brandenburg. Die getroffenen Annahmen über die Verteilung der Haushalte und des Anfallpotentials von Waschmaschinen auf die Landkreise und kreisfreien Städte Brandenburgs sowie die definierten Sammelstellen für Berlin werden in Bild 59b und Bild 59c dargestellt.

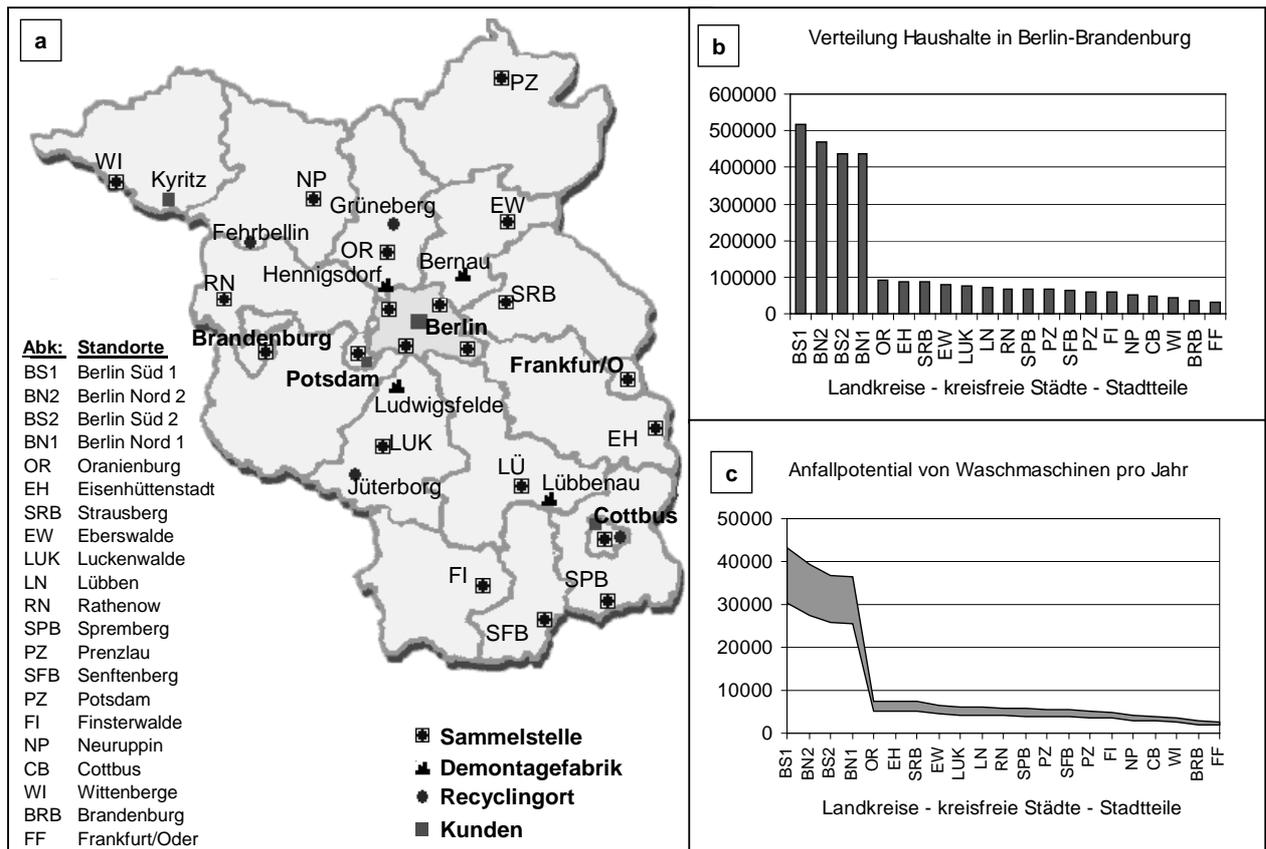


Bild 59: Datengrundlage für das Anwendungsszenario

Die Marktanteile der Waschmaschinenhersteller in Deutschland im Jahre 1994 wurden als Basis für die Differenzierung des Anfallpotentials von Waschmaschinen je Sammelstelle zugrundegelegt (**Bild 60**).

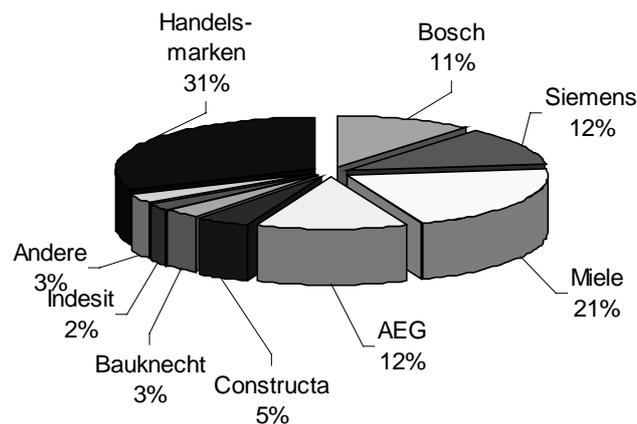


Bild 60: Marktanteile von Waschmaschinenherstellern in Deutschland 1994 [ZVEI-95]

In **Tabelle 27** sind die betrachteten potentiellen Recyclingstandorte für die entsprechenden Fraktionen dargestellt. Als potentielle Standorte für die zu planenden Demontagefabriken unter Berücksichtigung der erforderlichen Flächen für die durchschnittliche jähr-

liche Demontage von ca. 200.000 Waschmaschinen wurden Gewerbegebiete in Bernau, Hennigsdorf, Ludwigsfelde und Lübbenau identifiziert.

Standort	Firma	Recycling
Cottbus	EMV Eisen- u. Metallverwertung GmbH	Metallfraktionen
Fehrbellin	CABLO Metall-Recycling & Handel GmbH	Metallfraktionen
Grüneberg	Umwelt- und Recycling-Dienstleistungs-GmbH	Kunststofffraktionen
Jüterborg	Recycling-Zentren Brandenburg GmbH	Kunststofffraktionen

Tabelle 27: Potenzielle Recyclingstandorte

6.2 Voruntersuchungen

Zur Abschätzung der entstehenden Demontagestückkosten wurden für unterschiedliche Organisations- und Materialflussausprägungen in Abhängigkeit des zu realisierenden jährlichen Demontagevolumens Demontagesysteme für die Haushaltsgroßgeräte konzipiert und bewertet. In Bild 61 sind die entstehenden Demontagestückkosten bei der Zelldemontage, Fließdemontage und Inseldemontage dargestellt. Die Unterscheidung in zentral und dezentral bezieht sich auf die Art der Sortierung der Materialfraktionen nach dem Demontageprozess. Die Demontagesysteme sind für einen Zwei-Schichtbetrieb dimensioniert. Es werden keine automatisierten Demontageprozesse durchgeführt. Das Demontageobjekt wird vollständig für das weitere Materialrecycling demontiert. Für detaillierte Angaben über getroffene Annahmen sowie die Berechnungsgrundlagen sei auf die Veröffentlichungen von CIUPEK et al. [CIU-03d], [CIU-03e] verwiesen.

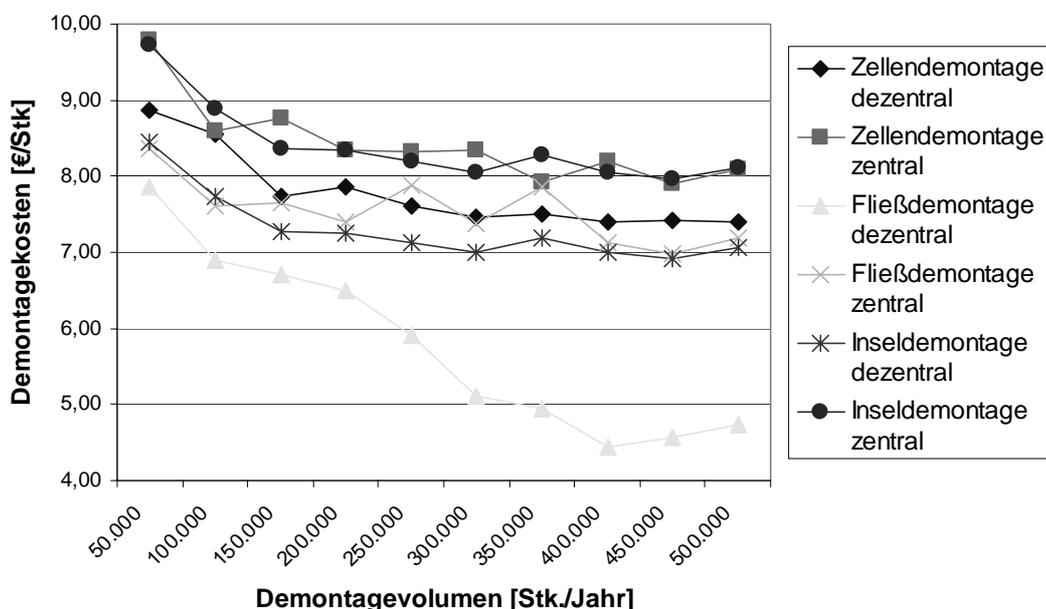


Bild 61: Demontagestückkosten unterschiedlicher Organisationsausprägungen

Die dezentrale Fließdemontage ist für jedes untersuchte Demontagevolumen die günstigste Alternative. Je größer das Demontagevolumen, desto geringer werden die theoretischen Demontagestückkosten. Es ist zu berücksichtigen, dass bei der Kostenberechnung

nung die unzureichende Flexibilität der Fließdemontage, insbesondere die Produktzustands- und Produktvariantenflexibilität, nur bedingt bewertet werden konnten. Somit erscheint die dezentrale Inseldemontage bei einem Demontagevolumen von bis zu 200.000 Stück als eine gute Alternative. Die Stückkosten dieser Organisationsausprägung sind nur zwischen 8-10% höher als die der Fließdemontage. Dafür kann die Demontageinsel sehr flexibel auf unterschiedliche Produktzustände reagieren.

Aufgrund der in Bild 61 dargestellten Ergebnisse können die folgenden Tendenzaussagen bezüglich der entstehenden Demontagekosten abgeleitet werden:

- dezentrale Sortierung ist kostengünstiger gegenüber zentraler Sortierung,
- Inseldemontage ist bei Demontagevolumen bis 200.000 Stk./Jahr aufgrund der sehr guten Flexibilität wirtschaftlich und
- Fließdemontage erzielt bei hohen Demontagevolumen einen sehr guten Economics of Scale, es sind jedoch die schlechten Flexibilitätseigenschaften zu berücksichtigen.

6.3 Planungsdurchführung

6.3.1 Standortplanung

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 281 „Demontagefabriken“ wurden Probemontagen mit 30 unterschiedlichen Waschmaschinentypen der Hersteller Acelik, AEG, Bauknecht, Bosch, Constructa, Miele und Siemens durchgeführt. Mit Hilfe des Werkzeuges Computer Aided Disassembly Sequenz Design (CADIS) wurden Demontagepläne, notwendige Demontagewerkzeuge und Demontagezeiten definiert und eine Datenbank mit Prozess- und Produktmerkmalen aufgebaut [CIU-03a], [FRA-03a] und in das Demontageinformationssystem integriert [KEI-04]. Diese Informationen bilden die Grundlage für die Anwendung der entwickelten Methode der Gruppenbildung. Die offene Architektur des Demontageinformationssystems ermöglicht es, über die XML-Schnittstelle die Datenbasis zur Gruppenbildung dem statistischen Werkzeug SPSS bereitzustellen. Mit der Datenbasis werden ca. 65% des relevanten Marktanteils an Waschmaschinenherstellern berücksichtigt.

Mit Hilfe des entwickelten BSM-Clusteranalyse werden die vorhandenen Demontageobjekte ausgewählt. Unter Berücksichtigung der Prozessmerkmale wie Betriebsmittelklassen und Demontagezeiten für Trenn- und Handhabungsprozesse und der Produktmerkmale wie Art, Menge und Gewicht entstehender Materialfraktion wird die Gruppenbildung durchgeführt. Da die gewählte Merkmalsbasis verschiedene Maßeinheiten aufweist, ist die Durchführung einer z-Transformation zwingend erforderlich. Unter Anwendung der Euklidischen Distanz für die Berechnung des Proximitätsmaßes sowie des Ward-Verfahrens als Clusteralgorithmus werden die betrachteten Waschmaschinen drei Clustern zugewiesen (Bild 62)

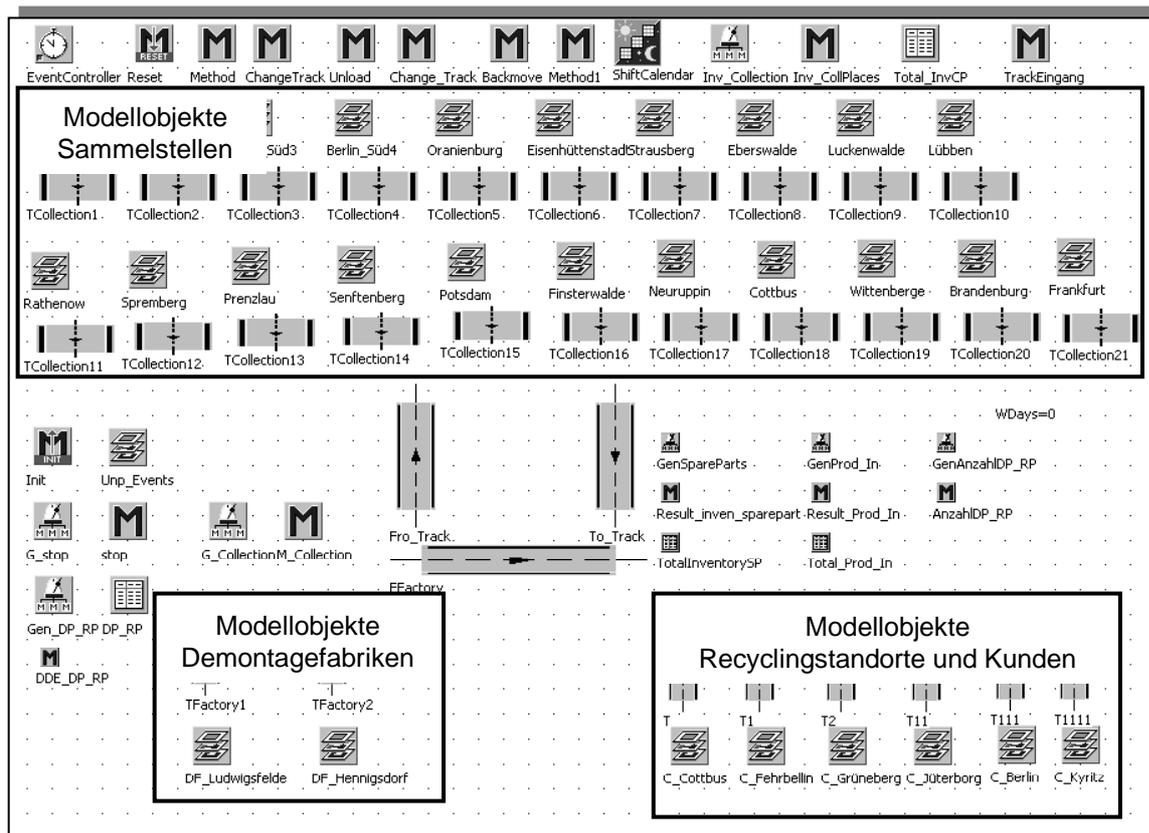


Bild 63: Generiertes Modell Kreislaufwirtschaftssystem Berlin-Brandenburg

6.3.2 Grobplanung

In der Phase der Grobplanung gilt es, für die Standorte Hennigsdorf und Ludwigsfelde die Dimensionierung und Strukturierung auf Basis der zugewiesenen Waschmaschinentypen und ihrer jährlichen Demontagevolumina durchzuführen. Über das BSM-Dimensionierung werden die Daten für die entsprechenden Standorte konfiguriert und das Optimierungsmodell Dimensionierung für die Fabrikkonzepte Zellen-, Fließ- und In-seldemontage angewandt. Es wird im Folgenden nur auf die Ergebnisse bei der Planung des Fabrikkonzeptes der Fließdemontage eingegangen. [Bild 64](#) zeigt das Ergebnis der Dimensionierung für das Fabrikkonzept Fließdemontage. Für die Demontage von 30 Waschmaschinentypen mit einer Gesamtkapazität von 100.000 Waschmaschinen im Jahr werden 8 Demotagestationen benötigt. Als weiteres Ergebnis wird jeder Waschmaschine ihr spezifischer Demontageablauf zugewiesen.

Die nachfolgende simulationsgestützte Analyse auf Basis der Ergebnisse des Optimierungsmodells Dimensionierung mit Hilfe des automatisch generierten Simulationsmodells kommt zum Ergebnis, dass die Demotagestationen durchschnittlich zu 82% ausgelastet sind, die Durchlaufzeit in Abhängigkeit des Waschmaschinentyps zwischen 13 und 17 Minuten liegen sowie eine jährliche Demotageleistung von 118.000 WM erreichbar ist ([Bild 65](#)).

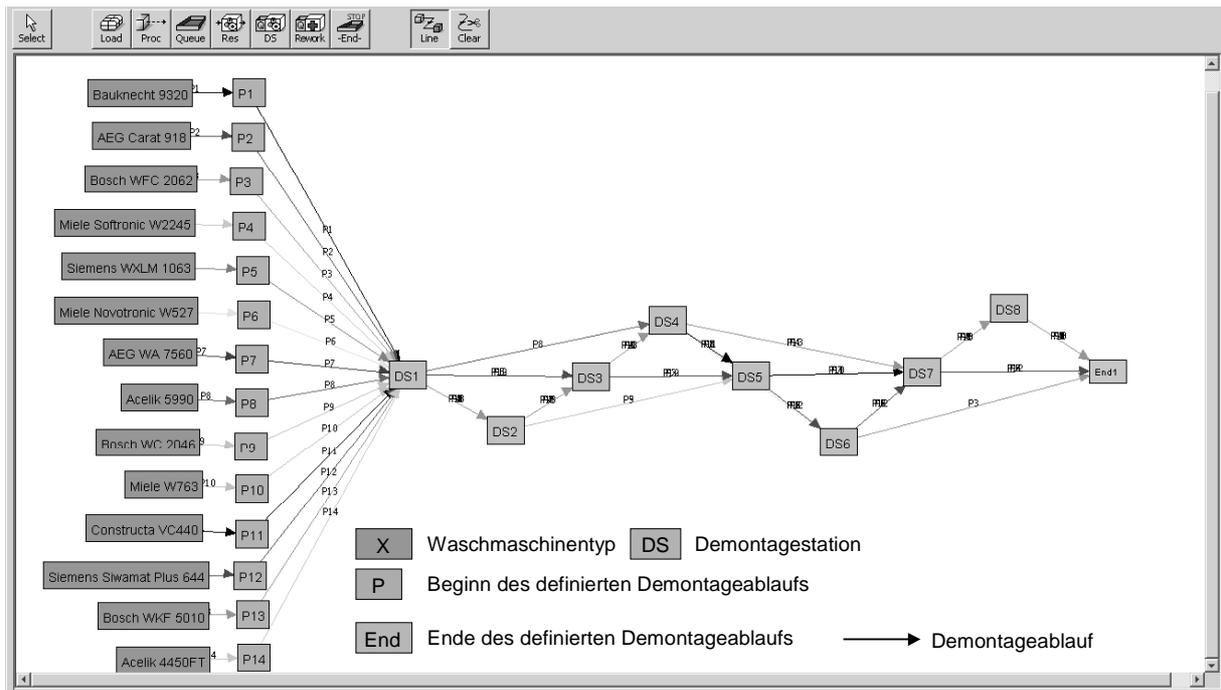


Bild 64: Visualisierung des Ergebnisses des mathematischen Modells Dimensionierung für das Fabrikkonzept Fließdemontage

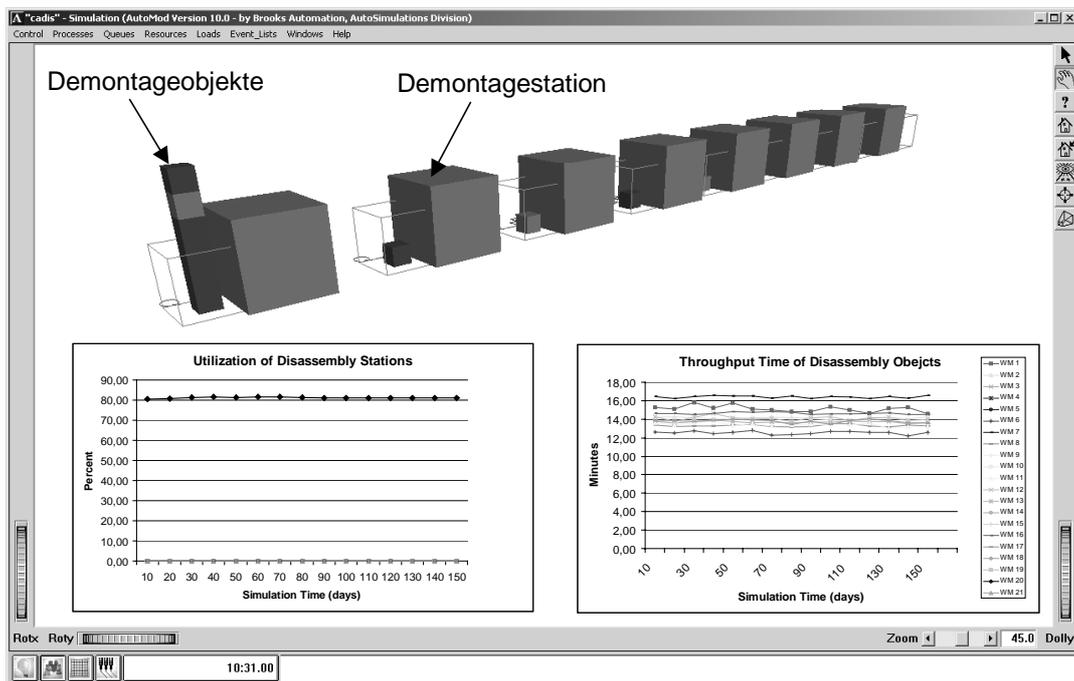


Bild 65: Automatisch generiertes Simulationsmodell des dimensionierten Fabrikkonzeptes - Fließdemontage

Abschließend wird über das BSM-Strukturierung das mathematische Modell zur Strukturierung konfiguriert und die zuvor determinierten Demontagestationen innerhalb der Referenzlayouts zugeordnet. Durch die sich anschließende simulationsgestützte Analyse der Demontagestation-Layoutplatz-Zuordnung je Referenzlayout, wurde das in **Bild 66**

dargestellte Modell eines Referenzlayouts, unter Berücksichtigung der Kennzahlen, Auslastung der Demontagestationen und DLZ der WM, als Vorzugsalternative identifiziert.

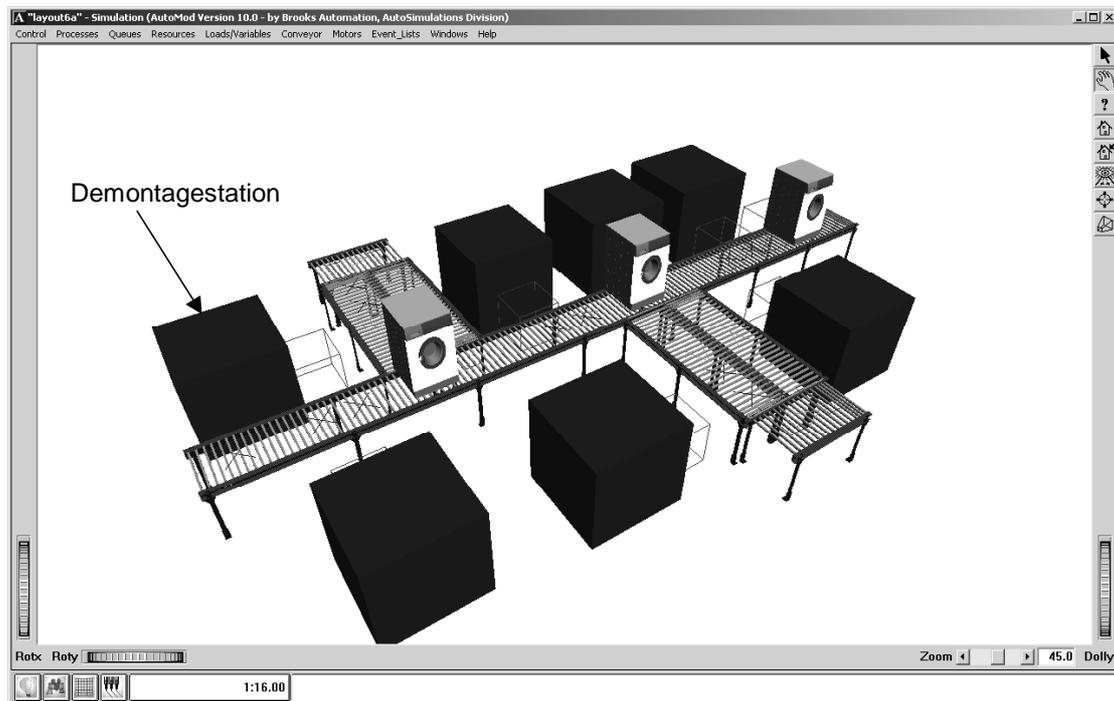


Bild 66: Modell der Vorzugsreferenzlayouts für das Fabrikkonzept Fließdemontage

6.3.3 Feinplanung

In Bild 67 bis Bild 72 werden die geplanten Fabrikkonzepte unter zu Hilfenahme des umgesetzten Planungswerkzeuges für die Zellen-, Fließ- und Inseldemontage mit zentraler und dezentraler Sortierung dargestellt. Bild 67a bis Bild 72a stellen das auf Basis der Ergebnisse aus der Dimensionierung und Strukturierung erstellte 2D-CAD-Layout dar. Ein entsprechender Ausschnitt des geplanten Fabrikkonzeptes als 3D-Darstellung werden in den Bildausschnitten Bild 67b bis Bild 72b gezeigt. Das in der Feinplanung für jedes Fabrikkonzept generierte Simulationsmodell ist den Bildausschnitten Bild 67c bis Bild 72c zu entnehmen.

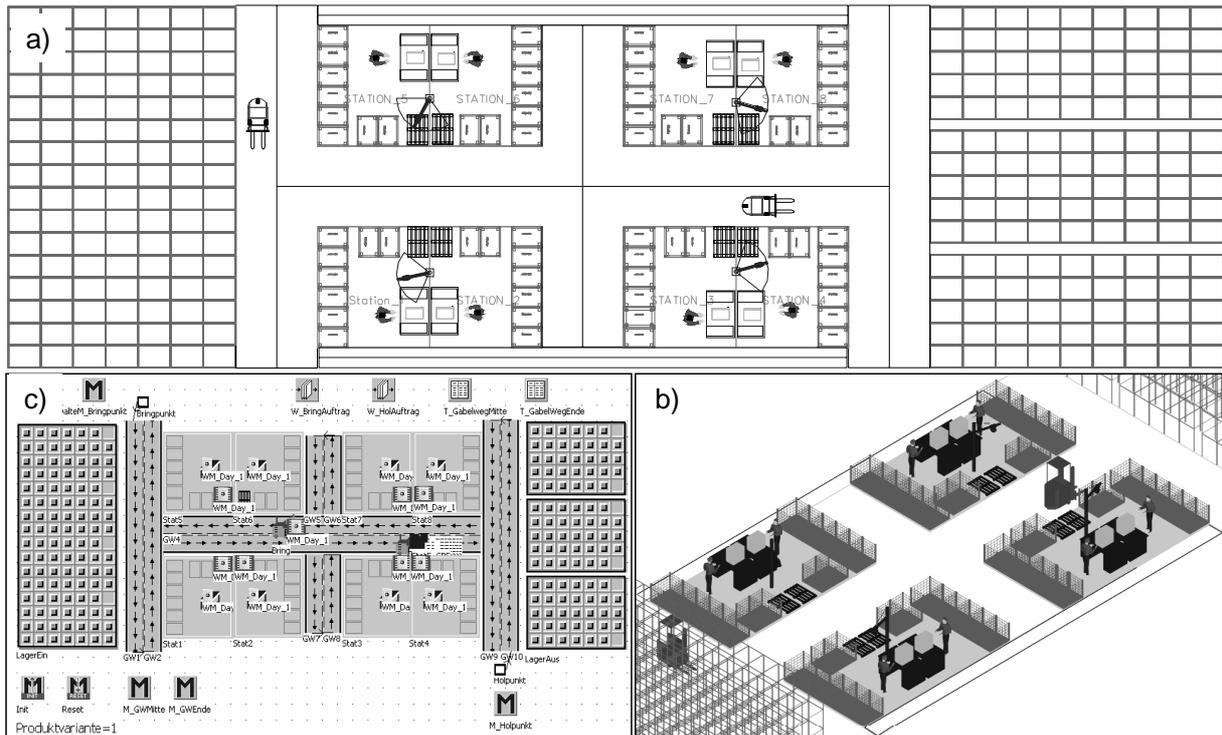


Bild 67: Zellendemontage mit dezentraler Sortierung – Fabrikkonzept und Modell

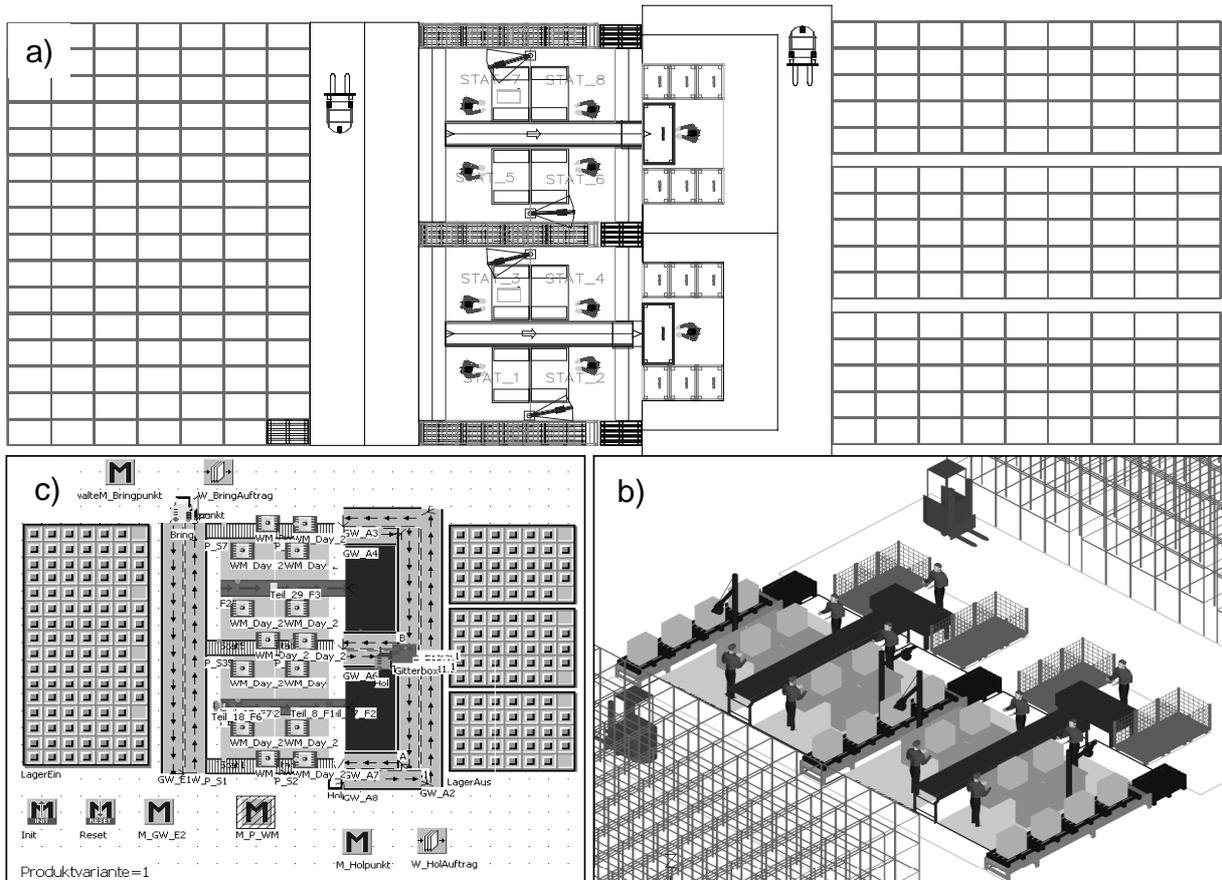


Bild 68: Zellendemontage mit zentraler Sortierung – Fabrikkonzept und Modell

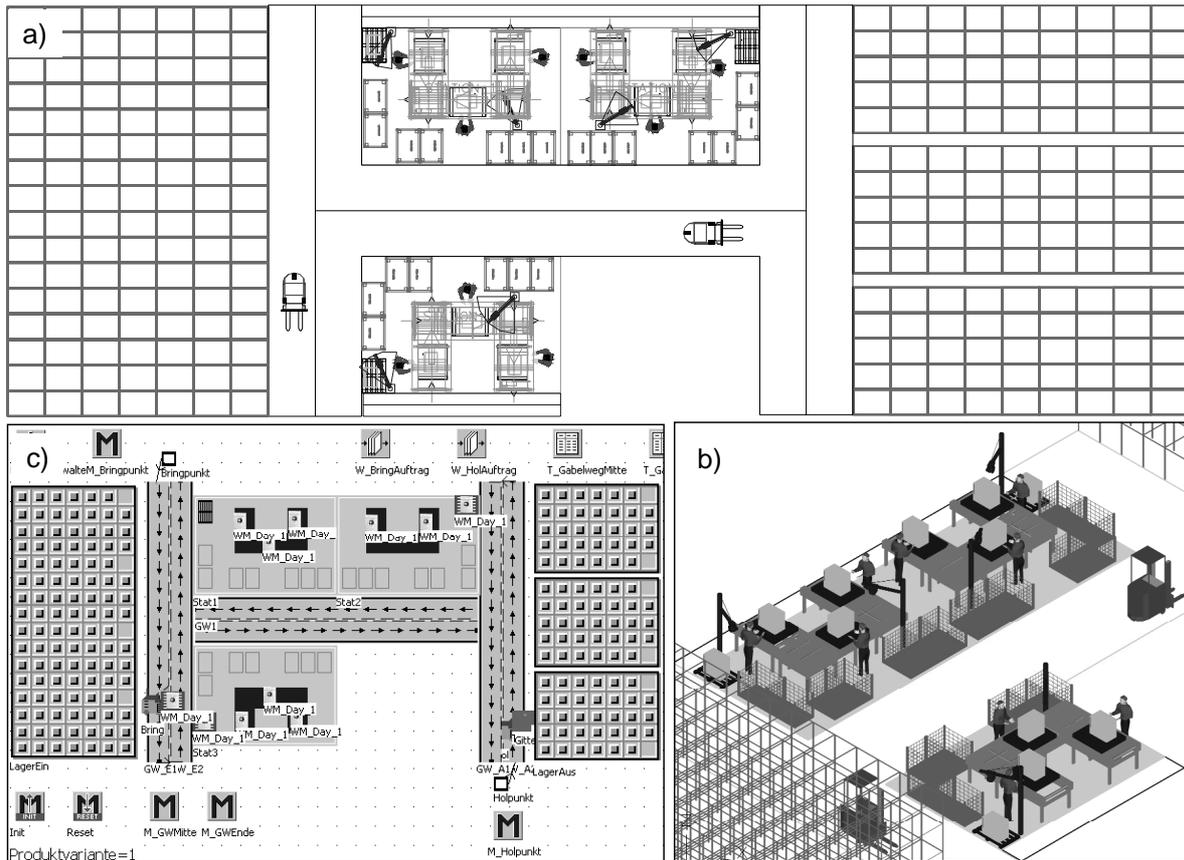


Bild 71: Inselfabrikation mit dezentraler Sortierung – Fabrikkonzept und Modell

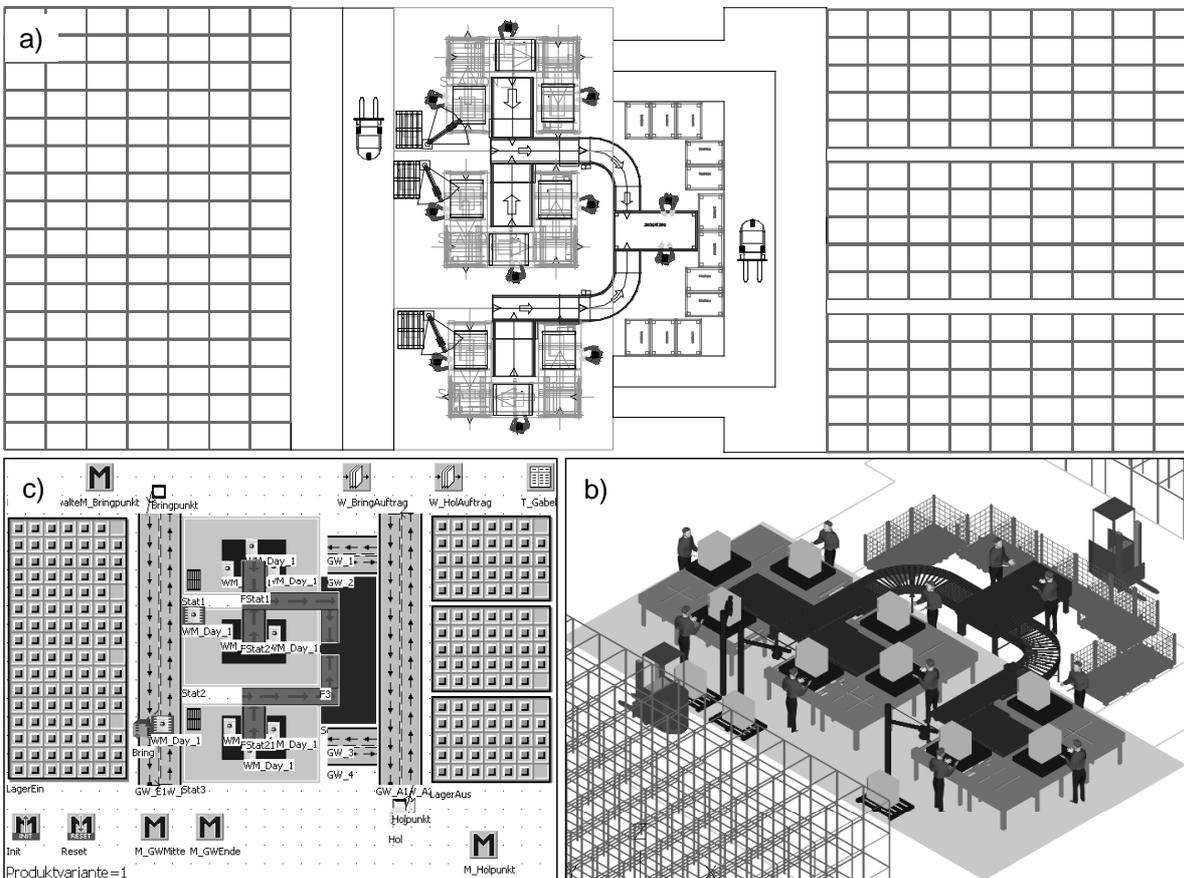
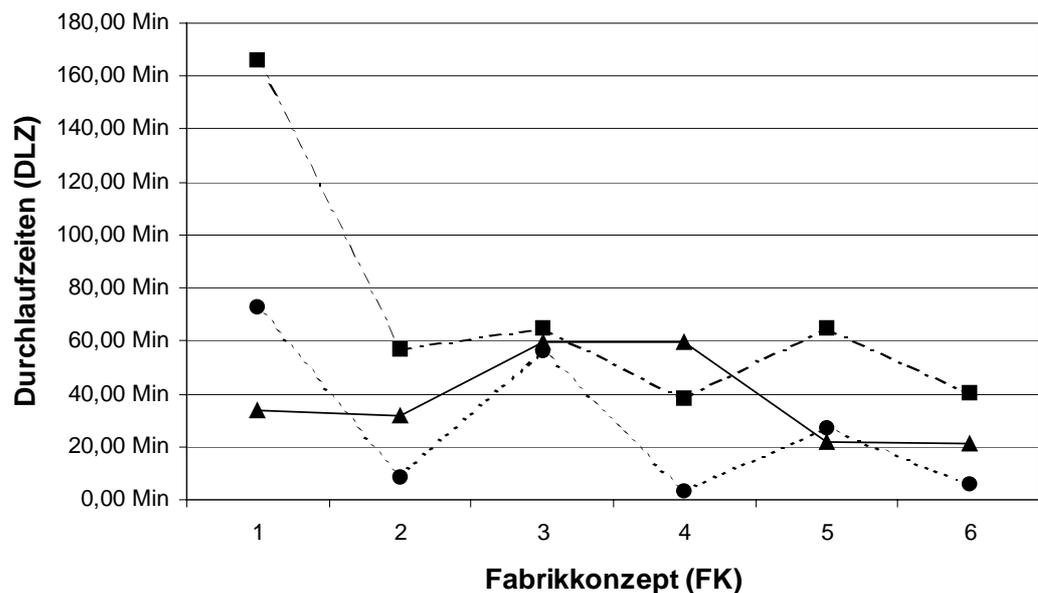


Bild 72: Inselfabrikation mit zentraler Sortierung – Fabrikkonzept und Modell

Die automatisch generierten Simulationsmodelle für die sechs Fabrikkonzepte wurden hinsichtlich der Kennzahlen durchschnittliche Durchlaufzeiten (DLZ) der Demontageobjekte (DO), der entstehenden Materialfraktionen (MF) und Demontageerzeugnisse (DE) untersucht (Bild 73). Die DLZ DO entspricht hierbei der Zeitspanne, die ein DO von der Einlastung bis zur letzten Demontageoperation im Demontagesystem verbringt. Die DLZ MF und DLZ DE stellt die durchschnittliche Zeit dar, die Materialfraktionen oder Demontageerzeugnisse benötigen, bis sie nach Ihrer Entstehung im Warenausgangslager eingelagert werden. Die kürzesten Durchlaufzeiten für die Demontageobjekte werden durch das Fabrikkonzept der Inseldemontage erreicht. Wie zu erwarten war, sind die Durchlaufzeiten für MF und DE für die Fabrikkonzepte mit zentraler Sortierung erheblich schneller als die mit dezentraler Sortierung.



---●--- DLZ - Materialfraktion - -■- - DLZ - Demontageerzeugnisse —▲— DLZ - Demontageobjekt

FK1: Zellendemontage dezentrale Sortierung

FK 4: Fließdemontage zentrale Sortierung

FK 2: Zellendemontage zentrale Sortierung

FK 5: Inseldemontage dezentrale Sortierung

FK 3: Fließdemontage dezentrale Sortierung

FK 6: Inseldemontage zentrale Sortierung

Bild 73: Simulationsgestützte Analyse – Durchlaufzeiten

In Tabelle 28 sind weitere Kennzahlen der geplanten Fabrikkonzepte zusammengefasst. Die simulierte durchschnittliche Demontagekapazität liegt bei allen Fabrikkonzepten auf ähnlichem Niveau zwischen 110.000 bis 120.000 Waschmaschinen im Jahr. Es kommt jedoch zu erheblichen Differenzen was die benötigte Anzahl von Werkern angeht. Insbesondere wirkt sich die Art der Sortierung auf die Mitarbeiterzahl aus. Bei den Konzepten der zentralen Sortierung erhöht sich zwar leicht die Demontagekapazität, jedoch werden vier weitere Mitarbeiter für den zentralen Sortierungsprozess benötigt. Die Systemauslastung von 94% bis 98% für die Fabrikkonzepte Zellen- und Inseldemontage entsprechen den Erwartungen. Das Fabrikkonzept der Fließdemontage ist mit einer von 79% bis 82% unzufriedenstellend. Die niedrige Auslastung ist mit der geringen Produktvarianten- und Produktzustandsflexibilität zu erklären. D.h. eine gleichmäßige Austaktung der De-

montagestationen ist bei aufgrund vorher- und unvorhergesehenen Prozesszeitschwankungen nicht möglich, was zu wechselnden Engpässen im System führt.

Die auf Basis des in Kapitel 4.8 vorgestellten simulationsgestützten Prozesskostenmodells sind die in Tabelle 28 dargestellten durchschnittlichen Demontagestückkosten je Waschmaschine ermittelt worden. Die wirtschaftlichste Demontage in Höhe von 7,10 €/Stk. wird mit der Fließdemontage mit dezentraler Sortierung erreicht. Die Zellendemontage ist am teuersten, weil unter anderen für jede Demontagezelle alle Demontagebetriebsmittel vorgehalten werden müssen.

Fabrikkonzept	Ø Demontagekapazität [Stk. P.a.]	Anzahl Werker (2-Schichtbetrieb)	Ø Demontagesystemauslastung [%]	Ø Demontagestückkosten [€/Stk.]
Zellendemontage dezentrale Sortierung	110.000	20	97	8,60
Zellendemontage zentrale Sortierung	114.000	24	98	9,50
Fließdemontage dezentrale Sortierung	108.000	22	79	7,10
Fließdemontage zentrale Sortierung	110.000	26	82	7,90
Inseldemontage dezentrale Sortierung	115.000	22	94	7,70
Inseldemontage zentrale Sortierung	118.000	26	95	8,90

Tabelle 28: Simulationsgestützte Analyse – weitere Kennzahlen

Die Analyse der simulationsgestützten Kennzahlen lässt die Schlussfolgerung zu, dass im Falle einer Demontagefabrik mit einer Kapazität von ca. 110.000 Waschmaschinen pro Jahr das Fabrikkonzept Inseldemontage mit dezentraler Sortierung das Vorzugskonzept darstellt. Es werden zwar Demontagestückkosten in Höhe von 7,70 € induziert, die damit um 60 Cent höher als bei der Fließdemontage mit dezentraler Sortierung sind. Allerdings können die Mitarbeiter und Demontagebetriebsmittel viel besser ausgelastet werden. Ferner stellt die Inseldemontage eine viel größere Flexibilität zur Verfügung bei gleichzeitig guten Kennzahlen für die Durchlaufzeiten der Demontageobjekte und Demontageerzeugnisse (Bild 73) .

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Kreislaufwirtschaftliche Zielsetzung ist die Vermeidung von Schadstoffen und die Rückgewinnung von Ressourcen in Produkt- und Materialkreisläufen. Die Nutzenproduktivität von Ressourcen steigt. Wirtschaftliche Gesichtspunkte müssen hierbei im Vordergrund stehen. Hiefür sind Kreislaufwirtschaftssysteme zu etablieren die eine effiziente Zusammenarbeit verschiedener Akteure, wie Zulieferer, Produzent, Distributor, Händler, Re-Distributor, Aufarbeiter, Demonteur, Anpasser und Beseitiger erfordern.

Ausgangspunkt dieser Arbeit ist die Erkenntnis, dass die Demontage von Elektro- und Elektronikgeräten ein wesentlicher Bestandteil einer Kreislaufwirtschaft ist. Es wurde eine Vorgehensweise mit den Planungsphasen Standort-, Grob- und Feinplanung für die Planung von Demontagefabriken unter Berücksichtigung der wesentlichen Akteure eines Kreislaufwirtschaftssystems konzipiert. Die vorgestellte Vorgehensweise ermöglicht durch systematische sowie marktorientierte Planung die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von Demontageprozessen und trägt mittelbar zu einer Steigerung der Effizienz von Kreislaufwirtschaft bei.

Ziel dieser Arbeit war es, das Potenzial der Ablaufsimulation bei der Gestaltung von wirtschaftlichen Demontagefabriken in den einzelnen Planungsphasen zu erschließen. Dazu wurden die relevanten Planungsmerkmale identifiziert und in einem morphologischen Kasten systematisiert. Eine durchgängige Modellierungs- und Simulationsdatenstruktur konnte entwickelt werden. Sie bildet die Grundlage für die entwickelten Algorithmen zur automatischen Simulationsmodellgenerierung. Die simulationsgestützte Entscheidungsfindung in der Feinplanung wird unter Berücksichtigung von Kosten unterstützt. Ein Referenzkostenmodell für die Demontage auf Basis der Activity-Based-Costing-Verrechnung wurde entwickelt, welches auf Basis kommerzieller Simulationssysteme die Durchführung einer betriebswirtschaftlichen Bewertung der Simulationsergebnisse ermöglicht.

Der Entwurf von Systemalternativen ist eine besonders zeitintensive und mit vielen Risiken verbundene Planungsphase. Eine Vielzahl von Planungsparametern sowie deren möglichen Ausprägungen und Restriktionen müssen berücksichtigt werden. Mathematische Modelle können den Entwurf von Systemalternativen unterstützen. Es wurden Modelle für die Standortplanung, Dimensionierung und Strukturierung entwickelt, die auf Basis der Modellierungsdaten eine Systemalternative finden. Diese wird für die weitere simulationsgestützte Planung verwendet.

Bei der Planung von Demontagefabriken und ihrer Systeme ist eine große Anzahl unterschiedlicher Demontageobjekte mit ihren produkt- und prozessspezifischen Anforderungen zu berücksichtigen. Für jeden Planungsschritt werden die notwendigen Informationen in aggregierter Form dem Planer zur Verfügung gestellt. Eine Methode zur Grup-

penbildung wurde entwickelt, mit der Demontageobjekte nach ihren Merkmalen zusammengefasst werden können.

Für die Anwendung der entwickelten Vorgehensweise wurde das Planungswerkzeug **Integrated Simulation-based Disassembly Plant Design** (InSane) prototypisch implementiert. InSane ermöglicht die direkte Kopplung der kommerziellen Softwarewerkzeuge, SPSS, Lingo, eM-Plant, AutoMod und AutoCAD über die ODBC, XML und DDLE Schnittstellen. Ferner wurden Benutzungsschnittstellen-Module für die Dateneingabe, Ergebnisvisualisierung sowie der direkten Interaktion mit den kommerziellen Softwarewerkzeugen entwickelt. In einer MS-Access Datenbank wurde die konzipierte Datenstruktur zur Modellierung und Simulation umgesetzt. InSane berücksichtigt die offene Architektur des von KEIL [KEI-04] entwickelten Demontageinformationssystems (DIS). Die MS-Access Datenbank ist über die ODBC-Schnittstelle mit dem Datenbankmanagementsystem des DIS verbunden.

Die exemplarische Anwendung erfolgte am Produktbeispiel Waschmaschine. Mit dem Werkzeug InSane wurden Demontagefabriken für ein Kreislaufwirtschaftssystem für die Region Berlin-Brandenburg geplant. Es wurden Gewerbegebiete in Hennigsdorf und Ludwigsfelde als Demontagestandorte identifiziert. Für diese Standorte sind die Fabrikkonzepte Zellendemontage, Fließdemontage und Inselfdemontage mit zentraler und dezentraler Materialfraktion- und Demontageerzeugnissortierung geplant worden. Nach der simulationsgestützten Analyse der Feinplanungen ist das Fabrikkonzept der Inselfdemontage mit dezentraler Sortierung als Vorzugslösung ermittelt worden.

7.2 Ausblick

Der entwickelte Planungsansatz sowie dessen prototypische Umsetzung im InSane Werkzeug bieten die Grundlage für weitere Forschungsarbeiten. Diese sollten im wesentlichen drei Bereiche berücksichtigen:

- Erweiterung des Planungsansatzes um die Demontage vor- und nachgelagerter Recyclingprozesse,
- Untersuchung und Berücksichtigung weiterer Referenzstrukturen,
- verteilte Planung, Modellierung und Simulation und
- Erweiterung der Modellstrukturen und -komponenten für die Simulation von Ablaufsteuerungen.

Der Planungsansatz wurde primär für die Planung von Demontagefabriken entwickelt. Die der Demontage vorgelagerten Prozesse wie Reinigen und Prüfen sowie nachgelagerten Prozesse wie Re-Montage und Shreddern waren nicht Betrachtungsgegenstand. Die in letzter Zeit zu verzeichnende zunehmende Konzentration von Recyclingprozesse in sog. Recyclingzentren [BSVE-03] sowie die vermehrte Erschließung des Re-Manufacturing als Geschäftsfeld [BAS-04] führt zu einem steigenden Planungsbedarf. Das entwickelte InSane Werkzeug bietet Potenziale für die Erschließung der sich aufzeichnenden Handlungsfelder.

Bei der Gestaltung von wirtschaftlichen Produktionssystemen werden vermehrt die Methoden und Techniken des Lean Manufacturing angewandt [KOC-03b]. Es gibt erste Ansätze diese bei der Planung von Demontage- und Remontagesystemen zu adaptieren [KAG-04]. Das Planungswerkzeug könnte um weitere Referenzstrukturen, die unter Berücksichtigung der Lean Manufacturing Methoden entwickelt wurden, erweitert werden.

Das Planungswerkzeug InSane sowie die während der Planung generierten Simulationsmodelle können nur an einem Rechnerarbeitsplatz bedient werden. Aufgrund der Vielzahl an Akteuren, die während der Planung von Demontagefabriken oder sogar eines Kreislaufwirtschaftssystems beachtet werden müssen, sollte ein Konzept für die verteilte, internetbasierte Planung entwickelt werden. Eine wesentliche Herausforderung besteht hier in der verteilten Simulation, da mit zunehmender der Größe des modellierten Kreislaufwirtschaftssystems (Anzahl der Akteure sowie deren abgebildeter Detaillierungsgrad) die Rechenzeiten für ein Simulationsmodell länger werden können. Erfahrung aus der Simulation großer Wertschöpfungsketten zeigen welche Potenziale bei der verteilten Simulation erschlossen werden können [SEL-02b], [SEL-02c].

Zur Unterstützung der wirtschaftlichen Planung von Demontagefabriken und -systemen sollten die erstellten Simulationsmodelle für unterschiedliche Planungsaufgaben eingesetzt werden können [KIM-04b]. Das in der Phase der Feinplanung generierte Simulationsmodell einer Demontagefabrik könnte somit um Modellstrukturen und -komponenten zum Planen und Testen von Ablaufsteuerungen erweitert werden. Das Simulationsmodell könnte somit zu einem Emulationsmodell für die Ablaufsteuerung werden [CIU-02].

8 Literatur

- [ADU-03] Adunka, R.: Rechnergestützte Bewertungsprozesse im Umfeld methodischer Produktentwicklung. Fortschritts-Berichte VDI Reihe 16 Nr. 134, Düsseldorf: VDI Verlag, 2003.
- [AGG-90] Aggteleky, B.: Fabrikplanung: Werksentwicklung und Betriebs-rationalisierung., Ausführungsplanung und Pro-jektmanagement - Planungstechnik in der Realisierungphase, Band 3. München: Hanser Verlag, 1990.
- [ARC-03] N.N.: ARCHmatic Glossar und -Lexikon: <http://www.glossar.de>, Stand: 05.06.2003.
- [ASK-93] Askin, R.G.; Standridge, C.R.: Modeling and Analysis of Manufacturing Systems. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [BAK-00] Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.: Multivariate Analysemethoden. Berlin, New York: Springer Verlag, 2000.
- [BAC-96] Bacher, J.: Clusteranalyse - Anwendungsorientierte Einführung. München, Wien: Oldenbourg Verlag, 1996.
- [BAS-04] Basdere, B.; Ciupek, M.; Franke, C.; Seliger, G.: Remanufacturing of Mobile Phones - Capacity, Program and Facility Adaptation Planning. International Journal of Management Science -Special issue on "Reverse Production Systems: Disassembly and other Reverse Manufacturing related practices", (2004) Jg. 32, S. 35 – 41.
- [BAU-01] Baumgraten, H.; Wiendahl, H.P.; Zentes, J.: Logistik-Management: Strategien, Konzepte, Praxisbeispiele. Berlin, New York: Springer-Verlag, 2001.
- [BEC-00] Beck, v.U.; Nowak, J.W.: The merger of discrete event simulation with activity-based costing for cost estimation in manufacturing environments. In: Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference, Dezember, Orlando, USA, 2000, S. 2048 - 2054.

- [BER-97] Berger, T.
Debaillie, B.: Location of disassembly centres for re-use to extend an existing distribution network. Working Paper, University of Leuven, Belgium, 1997.
- [BET-99] Bettac, E.;
Maas, K.;
Beullens, P.;
Bopp, R: RELOOP: reverse logistics chain optimisation in a multi-user trading environment. In: Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, Mai, Danvers, USA, 1999, S. 42 - 47.
- [BLE-03] Bley, H.;
Franke, C. Integration von Produkt- und Prozessmodell mit Hilfe der Digitalen Fabrik. wt Werkstattstechnik online (2003) Jg. 3, H.4.
- [BLE-99], Bley, H.;
Braun, P.;
Wuttke, C.C.: Simulation als Hilfsmittel zur Optimierung inner- und zwischenbetrieblicher Logistik in der Blechverarbeitung: In: Tagungsband zum EFB-Kolloquium'99, März, Fellbach, Deutschland, 1999.
- [BRA-95] Bras, B.;
Emblemsvag, J. : The use of activity-based costing, uncertainty, and disassembly action charts in demanufacture cost assessments. In: Proceedings of ASME Advances in Design Automation Conference, Juni, Boston, USA, 1999, S. 285 - 293.
- [BRA-98] Bracht, U.;
Hagmann, M.: Die ganze Fabrik im Simulationsmodell. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZwF) (1998) Jg. 93, H. 6, S. 395 - 399.
- [BRÖ-98] Bröte, S.: Disassembly Systems – Process Analysis and Strategic Considerations. Dissertation, Linköping, 1998.
- [BRU-01] Bruns, M.: Systemtechnik – Methoden zur interdisziplinären Systementwicklung. Berlin, New York: Springer Verlag, 2001.
- [BRÜ-03] Brüning, R.: Möglichkeiten und Grenzen der erneuten Verwendung elektr(on)ischer Geräte und Komponenten, In: Perspektiven für das Recycling von Elektro- und Elektronik-Altgeräten, VDI-Berichte 1775, Düsseldorf: VDI Verlag, 2003, S 51 - 84.

- [BSH-04] N.N.: Verantwortung für Umwelt und Gesellschaft 2003/2004, BSH Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH, 2004.
- [BUC-03] Buchholz, A.;
Ciupek, M.;
Kim, H.-J.;
Seliger, G.: Product Driven Control Sequence Generation for Disassembly. In: Proceedings of the CIRP 2nd International Conference on Reconfigurable Manufacturing, August, Ann Arbor, USA, 2003.
- [BUL-00] Bullinger, H.-J.;
Menrad, W.;
Dietrich, J.: Schwerpunkte zukünftiger Forschungsaktivitäten in der Kreislaufwirtschaft – Ergebnisse einer Unternehmensbefragung. Industriemanagement (2000) Jg. 12, H. 16, S 43-47.
- [BUL-01] Bullinger, H.-J.;
Westkämper, E.;
Horvath, P.;
Zahn, E.: Montageplanung – effizient und marktgerecht, Bullinger, H.-J.; Westkämper, E.; Horvath, P.; Zahn, E. (Hrsg.) Berlin, New York: Springer Verlag, 2001.
- [BUL-93] Bullinger, H.-J.;
Rieth, D.;
Euler, H.-P.: Planung entkoppelter Montagesysteme – Puffer der Montage. Stuttgart : Teubner Verlag, 1993.
- [BVSE-02] N.N.: Durch Mittelstandskooperationen Synergieeffekte nutzen. Pressemitteilung zum 1. Europäischen Elektronikschrottreycling-Tag des bvse, <http://www.bvse.de/home.html>, Stand: 09.07.2002.
- [BVSE-03] N.N.: Die WEEE-Umsetzung in Deutschland - Wettbewerb eröffnet Chancen und Wachstum, bvse-Entsorgungsgemeinschaft e.V., Bonn, 2003.
- [CAD-04] N.N.: <http://www.cad.de/de.shtml>, Stand: 20.03.04.
- [CHA-00] Chaudhri, N. : System Simulation and Modelling of Electronics Demanufacturing Facilities, Multi-Lifecycle Engineering Research Center. New Jersey Institute of Technology, <http://web.njit.edu/~nic3474>, Stand: 09.09.03.

- [CHR-03] Chryssos, G.: Erfassungssysteme für Elektroaltgeräte - ein WEEE Umsetzungsvorschlag. In: Tagungsband zu 8. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, Januar, Münster, Deutschland, 2003.
- [CIU-02] Ciupek, M.; Lümke, M.; Seliger, G.: Enhancing Planning Quality of Disassembly Control Systems by Emulation. In: Proceedings of the 35th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems "Manufacturing Technology in the Information Age", May, Seoul, Korea, 2002, S. 266 -270.
- [CIU-03a] Ciupek, M.; Franke, C.; Seliger, G.: Computer Aided Rough Disassembly Sequence Design (CARDIS). In: Proceedings of the International Precision Assembly Seminar IPAS' 2003, März, Bad Hofgastein, Österreich, 2003, S.23 – 30.
- [CIU-03b] Ciupek, M.; Franke, C.; Vanegas, M.: Assignment of Disassembly Orders in a Disassembly Network using Linear Programming. In: Proceedings of the Colloquium e-ecological Manufacturing, März, Berlin, 2003, S.63 – 66.
- [CIU-03c] Ciupek, M.; Franke, C.; Keil, T.; Seliger, G.: Automatische Modellgenerierung für die simulationgestützte Leistungsbewertung von Demontagesystemen. In: Tagungsband Simulation und Visualisierung 2003, März, Magdeburg , 2003, S. 35 - 47.
- [CIU-03d] Ciupek, M.; Franke, C.: An Integrated Approach for Dimensioning and Structuring of Disassembly Systems. In: Proceedings of the Colloquium e-ecological Manufacturing, März, Berlin, 2003, S.43 – 47.
- [CIU-03e] Ciupek, M.; Franke, C.; Seliger, G.: Simultaneous Design of a Disassembly Network and its Facilities. In: Proceedings of COMPUTER INTEGRATED MANUFACTURING – Advanced Design and Management, Mai, Wisla, Polen, 2003, S. 116-122.

- [COL-02] Collisi, T.: Ein Informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten. Dissertation Erlangen-Nürnberg, Bamberg: Meisenbach Verlag, 2002.
- [COO-90a] Cooper, R.: Five Steps to ABC System Design. In: Accountancy (1990) Jg. 15, H. 11, S. 78 – 81.
- [COO-90b] Cooper, R.: Activity-Based-Costing, Teil 1-3. In: Kostenrechnungspraxis (1990) Jg. 34 H. 4-6, S. 210-220; 271-279; 345-351.
- [COO-98] Cooper, R.; Kaplan, R.S. How cost accounting distorts product cost. In: Management Accounting (1998) Jg. 25, H. 6, S. 22- 25.
- [DAE-99] Daenzer, F.; Huber, F.: Systems Engineering – Methodik in der Praxis. 10. Aufl., Zürich: Verlag Industrielle Organisation, 1999.
- [DIE-95] Dieterle, A.: Recyclingintegrierte Produktentwicklung. Dissertation TU München, München: Springer-Verlag, 1995.
- [DIL-91] Dilling, U.: Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftlichkeitssimulation. Dissertation TU München, München: Springer-Verlag, 1991.
- [DIN-1319] N.N.: Grundbegriffe der Messtechnik. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth Verlag, 1985.
- [DOL-81] Dolezalek, C.M.; Warnecke, H.-J.; Dangelmeier, W.: Planung von Fabrikanlagen. Berlin, New York: Springer Verlag, 1981.
- [DOM-02] Dombrowski, U.; Tiedemann, H.: Modellfabriken – Klassifizierung und Nutzung im Rahmen von Fabrikplanungen. wt Werkstattstechnik online, (2002) Jg. 2, H.4.
- [DOM-97] Domschke, W.; Scholl, A.; Voß, S.: Produktionsplanung – Ablauforganisatorische Aspekte. 2. Aufl., Berlin, New York: Springer Verlag, 1997.

- [ECK-01] Eckerth, G.: Systemplanung flexibler automatisierter Demontageanlagen Dortmund: Verlag Praxiswissen, 2001.
- [EEE-01] N.N.: Working Paper for a Directive of the European Parliament and the Council on the Impact on the Environment of Electrical and Electronic Equipment (EEE). Kommission der Europäischen Gemeinschaft, Brüssel, Februar, 2001.
- [EU-03a] Kommission der Europäischen Gemeinschaft : Richtlinie 2002/96/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates über Elektro- und Elektronik-Altgeräte vom 27.01.2003.
- [EU-03b] Kommission der Europäischen Gemeinschaft : Richtlinie 2002/95/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten vom 27.01.2003.
- [EVE-03] Eversheim, W.;
Abels, I.: Simulationsgestützte Personaleinsatzplanung in der Pkw-Endmontage. In: Simulation in der Automobilproduktion (Hrg.) Bayer, Collisi, Wenzel, Berlin, New York: Springer Verlag, 2003, S. 61-70.
- [EVE-94] Eversheim, W.;
Fuhlbrügge, M.: Entscheidungsorientierte Bewertung mit Hilfe der Kostensimulation. In: CIM-Management (1994), Jg. 6 H. 3, S. 36-39.
- [EVE-96] Eversheim, W.;
Scherkinau, J.;
Goeman, D.: Module und Systeme - Die Kunst liegt in der Strukturierung. In: VDI-Z, (1996) Jg. 38, H. 11/12, S. 44-43.
- [FAR-99] Farrington, P.A;
Nembhard, H.B.;
Sturrock, D.T.;
Evans, G.W.: A four step methodology for using simulation and optimization technologies in strategic supply chain planning. In: Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, Dezember, Phoenix, USA, 1999, S.1215 - 1217.
- [FAS-02] Fasano, J.P. ;
Hale, R. ;
Jacques, M. ; Veera-
kamolmal, P. : Optimizing reverse logistics scenarios: a cost-benefit study using IBM's WIT tool. In: Proceedings of the International Symposium on Electronics and the Environment, May, Boston, USA, 2002, S. 306 -311.

- [FEL-00] Feldmann, K.;
Wunderlich, J.: Referenzbausteine für die Erfassung ablaufabhängiger Kostentreiber in Simulationsmodellen. In: Tagungsband der 9. ASIM-Fachtagung -The New Simulation in Production and Logistics, März, Berlin, 2000, S. 107-116.
- [FIE-04] Fiebig, Ch.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 16 Nr. 165, Düsseldorf: VDI Verlag, 2004.
- [FLE-01a] Fleischmann, M.: Quantitative Models for Reverse Logistics. Berlin: Springer-Verlag, 2001.
- [FLE-01b] Fleischmann, M.: REVERSE LOGISTICS NETWORK STRUCTURES AND DESIGN. Discussion Paper from Erasmus Research Institute of Management (ERIM) Nr. 109, Erasmus University Rotterdam, 2001.
- [FLE-03] Fleischer, J.;
Spath, D.;
Lanza, G.: Qualitätssimulation im Serienanlauf. In: wt Werkstattstechnik online, (2003), Jg. 3, H.1.
- [FLO-02] Floel, J.: Entwicklung einer Kostenrechnung für moderne Altauto-Demontagebetriebe – Ein prozessorientierter Ansatz unter besonderer Berücksichtigung eines Qualitätscontrolling. Aachen:Shaker Verlag, 2002.
- [FÖR-03] Förster, A.;
Wirth, S.: Integrative modulare Produktionssystemplanung. Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, TU-Chemnitz, 2003.
- [FRA-03a] Franke, C.;
Ciupek, C.;
Seliger, G.: Rechnerunterstützte Demontageplanung und –steuerung. In: Technische Universität Berlin (Hrsg.): Sonderforschungsbereich 281, Arbeits- und Ergebnisbericht 2001-2003, Berlin, 2003, S. 395-438.

- [FRA-03b] Franke, C.;
Ciupek, M.;
Seliger, G.:
Rough Disassembly System Design. In: Proceedings of the 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems- Progress in Virtual Manufacturing, Juni, Saarbrücken, 2003, S. 91-98.
- [FRE-03] Frey, O.:
Rechtliche Rahmenbedingungen – Erwartungen der Industrie an die Umsetzung der EU-Richtlinie in nationales Recht. In: Perspektiven für das Recycling von Elektro- und Elektronik-Altgeräten, VDI-Berichte 1775, Düsseldorf: VDI Verlag, 2003, S. 5 -22.
- [FRI-97] Fritsche, B.:
Ergänzung technischer Effizienzkriterien durch Kostensimulation. In: Tagungsband der 6. ASIM-Fachtagung, März, Berlin, 1997, S. 48-56
- [FRN-03] Franke, C.:
Feature-basierte Prozesskettenplanung in der Montage als Basis für die Integration von Simulationswerkzeugen in der Digitalen Fabrik. Dissertation, Universität des Saarlandes, 2003.
- [GAU-99] Gausemeier, J. ;
Kuhle, J.-P.:
Entwicklung strategiekonformer Fertigungsstrukturen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZwF), (1999) Jg. 94, H. 7/8, S. 403-408.
- [GAU-00] Gausemeier, J.;
Grafe, M.;
Ebbesmeyer, P.:
Nutzenpotenziale von Virtual Reality in der Fabrik- und Anlagenplanung. In: wt Werkstattstechnik online, (2000) Jg. 3, H. 7.
- [GIP-01] N.N.:
Grünbuch zur Integrierten Produktpolitik. Kommission der Europäischen Gemeinschaft, KOM Brüssel, 7. Februar, 2001.
- [GRI-99] Griffel, N.:
Prozesskette Ablaufsimulation – Voraussetzung zur systematischen Planung komplexer Produktionssysteme mit hohem Nutzungsgrad. Dissertation, TU München, Berlin: Springer Verlag, 1999.
- [GÜH-91] Günther, R.:
Untersuchung von Clusteralgorithmen und ihre Parallelisierung. Bericht des Forschungszentrums Jülich GmbH, 1991.

- [GUI-03] Guide, V.D.R.;
Van Wassenhove, L.N.: Closed-loop Supply Chains. In: Quantitative Approaches to Distribution Logistics and Supply Chain Management, Klose, A.; Speranza, M.G.; van Wassenhove, L.G. (Hrsg.):, Berlin, New York: Springer Verlag, 2003, S. 47-60.
- [GÜN-99] Güngör, A.: Algorithmic Models for Analysis of Disassembly Processes and Systems. Dissertation, Northeastern University, Boston, 1999.
- [GÜN-01] Güngör, A.;
Gupta, S.M.: A solution to approach to the disassembly line balancing problem in the presence of task failures. In: International Journal of Production Research, (2001) Jg. 39, H. 7, S. 1427-1467.
- [GUT-83] Gutenberg, E: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre - Die Produktion. 24 Aufl., Berlin: Springer-Verlag, 1983.
- [GÜT-98] Günther, W.A.;
Stegherr, F.;
Haller, M.: Simulation projektbegleitend nutzen. In: fördern und heben f+h, (1998), H.6, S. 46-49.
- [HAA-02] Haasis, H.-D.;
Blume, V.;
Schlumbohm; S.: Konfiguration und Bewertung logistischer Prozesse in Kreislaufwirtschaftssystemen. In: Tagungsband Wissenschaftssymposium Logistik der BVL, Mai, Bremen, 2002, S. 99-112.
- [HAG-98] Hagemann, M.;
Schäfer, G.: Das integrierte Ebenenkonzept als neuer Ansatz in der Fabrik- und Anlagenplanung. In: Tagungsband Simulationstechnik 12. Symposium September, Zürich, 1998.
- [HAL-01] Halstrick-Schwenk, M.: Umfang und Struktur der Entsorgungswirtschaft im Bereich Elektroaltgeräte/ Elektronikschrott in Deutschland – Ergebnisse einer Unternehmensbefragung. RWI-Papiere Nr. 65, Essen, 2001.
- [HAN-00a] Hansen, U.: Reverse logistics is the key for remanufacturing and a sustainable development. In: Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, Mai, Boston, USA, 2000, S. 238 – 242.

- [HAN-00b] Hansen, U Industrial Remanufacturing of WEEE requires an effective Reverse Logistics. In: Electronics Goes Green 2000+ A challenge for the Next Millennium, September, Berlin, 2000, S. 445- 452.
- [HAN-02] Hanschke, T.: Integrierte Simulation, <http://www.integrierte-simulation.de>, Stand:12.11.2003.
- [HAR-91] Hartberger, H.: Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme. Berlin: Springer Verlag, 1991.
- [HAR-99] Harmonosky, C.M.; Miller, J.L.; Rosen, S.L.; Traband, M.T.; Tillotson, R.; Robbie, D.: Interfacing Simulation with Costing Software to Drive the Transformation from Prototype Manufacturing to High Volume Manufacturing. In: Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, Dezember, Phoenix, USA, 1999, S. 1359-1364.
- [HAU-00] Hauser, H.: Simulation of material flow as a tool for optimisation on recycling plants. In: Electronics Goes Green 2000+ A challenge for the Next Millennium, September, Berlin, 2000, S. 435-441.
- [HEI-23] Heidebroeck, E.: Industriebetriebslehre. Berlin: Springer-Verlag, , 1923.
- [HEI-99] Heilala, J.: Use of simulation in manufacturing and logistics system planning. VTT Report, Manufacturing Technology, Finland, 1999.
- [HEN-96] Hentschel, C.: Beitrag zur Organisation von Demontagesystemen. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin, Dissertation TU Berlin, 1996.
- [HER-03a] Hermann, Ch.: Unterstützung der Entwicklung recyclinggerechter Produkte. Vulkan Verlag Essen, Dissertation, Braunschweig, 2003.
- [HER-03b] Herrmann, J.W.; Lin, E.; Pundoor, G.: Supply chain simulation modeling using the Supply Chain Operations Reference model. In: Proceedings of the ASME 2003 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Oktober, Chicago, USA, 2003.

- [HER-03c] Hermann, C., Ohlendorf, M.: Planning WEEE Disassembly – State of the Art and Research Perspectives. In: Proceedings of CIRP Seminar on Life Cycle Engineering – Engineering for Sustainable Development, Mai, Kopenhagen, 2003.
- [HES-01a] Hesselbach, J.; Ohlendorf, M.; Herrmann C.: Configuration of Recycling Networks for Enhanced WEEE Recycling. In: Proceedings of the 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Januar, Tokio, Japan, 2001, S. 516-519.
- [HES-01b] Hesselbach, J.; Herrmann C.; Ohlendorf, M.; Graf, R.: Approach of substance flow oriented closed loop supply chain management in the electrical and electronic equipment industry. In: 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokio, 2001, S. 725-728.
- [HES-02a] Hesselbach, J.; Mansour, M.; Graf, R.: Erweitertes Supply Chain Management durch ganzheitliches Ersatzteilmanagement. In: Schenk et al. (Hrsg.): 8. Magdeburger Logistiktagung – Logistikplanung und –management, September, Magdeburg, 2002, S.225-246.
- [HES-02b] Hesselbach J.; Ohlendorf, M.: Optimization of Comprehensive Disassembly Systems based on Simulation Experiments. In: Going Green – CARE INNOVATION 2002, Wien, Österreich 2002.
- [HES-03a] Hesselbach, J.; Graf, R.; Spengler, Th.; Stölting, W.: Substance Flow Oriented Closed-Loop Supply Chain Management in the Electrical and Electronic Equipment Industry (StreamM) In: Proceedings of the Colloquium e-ecological Manufacturing, März, Berlin, 2003, S.71-73.
- [HIC-99] Hicks, D.A.: A four step methodology for using simulation and optimisation technologies in strategic supply chain planning. In: Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, Dezember, Phoenix, 1999, S. 1215-1220.

- [HIE-02a] Hieber M.: Modellierung und Generierung produkttypenspezifischer Rückführlogistik-Netzwerke. IPA-IAO Forschung und Praxis, Berichtnr. 357, Heimsheim: Jost Jetter Verlag, 2002.
- [HIE-02b] Hieber, M.: Planning Efficient Reverse Logistic Networks for Product Take Back Systems. In: Going Green – CARE INNOVATION 2002, Wien, Österreich, 2002.
- [HIR-00] Hirsch, B.; Klußmann, J.; Thoben, K.-D.; Weber, F.: Ein Simulationssystem für die Produktionsfeinplanung von kundenspezifischen Printprodukten in der Druckindustrie, In: Tagungsband Simulationstechnik 14. Symposium der ASIM, Oktober, Hamburg, 2000.
- [HOR-01] Horvath, P.; Schimpf, T.: Effizientes Prozesskostenmanagement in montageunterstützenden Bereichen – Konzept und Instrumente. In: Montageplanung – effizient und marktgerecht, Bullinger, H.-J.; Westkämper, E.; Horvath, P.; Zahn, E. (Hrsg.), Berlin, New York: Springer Verlag, 2001. S. 158-192.
- [HOR-03] Hornberger, M.: Modell zur Ermittlung der Verwertungsquoten zur WEEE. In: Perspektiven für das Recycling von Elektro- und Elektronik-Altgeräten, VDI-Berichte 1775, Düsseldorf: VDI Verlag, 2003, S. 23-42.
- [HUB-00] Huber, A.: On-demand orientierte Demontageplanung auf Basis konventioneller PPS-Systeme. PPS-Management, (2000) Jg. 5, H. 2, S. 24-28.
- [HUB-01] Huber, A.: Demontageplanung- und Steuerung – Planung und Steuerung industrieller Demontageprozesse mit PPS-Systemen, Aschen: Shaker Verlag, 2001.
- [IREAK-99] N.N.: Industrieller Rückbau von Elektronik-Altgeräten on Kreisläufen (IREAK). Projektergebnisse, <http://www.dlr.de/PT/Umwelt/Vorhaben-01RK/RK9702.htm>, Stand: 11.08.04.
- [JAI-01] Jain, S.; Workman, R.W.; Collins, L.M.; Ervin, E.C.: Development of a high-level Supply Chain Simulation Model. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, Dezember, Arlington, USA, 2001.

- [JAY-97] Jayarman, V.;
Guide, V.D.R., Jr.;
Srivastava, R.:
A reverse logistics supply chain model within a remanufacturing environment. In: Proceedings of the International Conference on Management and Technology in Innovation in Technology Management – The Key to Global Leadership, PICMET '97, Juli, Portland, 1997, S. 701.
- [JAY-99] Jayaraman, V.;
Guide, V.D.R.
Srivastava, R.:
A Closed-loop Logistics Model for Remanufacturing. In: Journal of the Operational Research Society, (1999) Jg. 50, S. 497-508.
- [KAG-04] Kagan, R.;
Ciupek, M.;
Koch, T.;
Seliger, G.:
Design of virtual remanufacturing facility for mobile phones by applying the lean approach. In: Proceedings of the Global Conference on Sustainable Product Development and Life Cycle Engineering, September, Berlin, 2004.
- [KAH-95] Kahmeyer, M.:
Flexible Demontage mit dem Industrieroboter am Beispiel von Fernsprech-Endgeräten. Berichte aus dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, Band 215, Berlin Springer-Verlag, 1995.
- [KAP-03] Kapp, R.;
Löffler, B.;
Wiendahl, H.-H.;
Westkämper, E.:
Der Logistik-Prüfstand – Skalierbare Logistiksimulation von der Lieferkette bis zum Arbeitsgang. In: wt Werkstattstechnik online, (2003) Jg. 3, H. 2.
- [KAR-03] Kara, S.;
Kaebernick, H.;
Magnussion P.:
Modelling of product collection networks for reuse and recycling: A simulation approach. In: Proceedings of CIRP Seminar on Life Cycle Engineering – Engineering for Sustainable Development, Mai, Kopenhagen, 2003, S. 212 –212 .
- [KEI-00] Keil, T.;
Seliger, G.;
Härtwig, J.-P.;
Uhlmann, E.:
Realisierung eines Pilot-Demontagesystems. In: Technische Universität Berlin (Hrsg.): Sonderforschungsbereich 281, Arbeits- und Ergebnisbericht 1998-2000, Berlin, 2000, S. 201-234.
- [KEI-04] Keil, T.:
Informationstechnische Integration hybrider Demontagesysteme. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin, Dissertation TU Berlin, 2004

- [KET-84] Kettner, H.,
Schmidt, J.
Greim H.-R.:
Leitfaden der systematischen Fabrikplanung.
Wien: Hanser Verlag, 1984.
- [KIM-04a] Kim. H.-J.:
Beitrag zur dynamischen Prozessplanung und
Generierung von Steuerungssequenzen für flexib-
le Demontagesysteme. Berichte aus dem Produk-
tionstechnischen Zentrum Berlin, Dissertation TU
Berlin, 2004.
- [KIM-04b] Kim, H.-J.;
Ciupek, M.;
Hwang, W.-J.;
Seliger, G.:
Verification of Control Codes by a Virtual Disas-
sembly System Environment. In: Proceedings of
the 33rd International Conference on Computers &
Industrial Engineering, März, Jeju, Korea, 2004.
- [KLA-01] Klatt, S.:
Elektronikschrottreycling in Deutschland. In:
Wasser und Abfall, (2001) Jg. 18, H. 5.
- [KLI-00] Klinger, A.;
Wenzel, S.:
Referenzmodelle – Begriffsbestimmung und Klas-
sifikation. In: Referenzmodelle für die Simulation
in Produktion und Logistik. Frontiers in Simulation,
FS 5,SCS-Europe BVBA, Ghent, 2000, S. 13-29.
- [KLO-01] Klose, A.:
Standortplanung in distributiven Systemen – Mo-
delle, Methoden, Anwendungen. Heidelberg: Phy-
sica Verlag, 2001.
- [KLU-94] Klug, F.:
Kostenintegrierte Fertigungssimulation. In: Simu-
lation in Passau SIP, Heft 1, 1994, S. 24.
- [KLU-95] Klug, F.:
Simulation-Aided Investment Analysis for Manu-
facturing. In: Proceedings of the EUROSIM '95,
September, Wien, 1995.
- [KOC-02] Koch T.,
Izykowski S.,
Gorski P.,
Surminski P.:
Simulationsuntersuchungen für den Aufbau von
virtuellen Werkzeugmaschinen. In Tagungsband
Dresdner WZM-Fachseminar - Was kann die vir-
tuelle Werkzeugmaschine?, Juni, Dresden, 2002.
- [KOC-03a] Koch T.,
Kagan R.:
Implementation of Lean Manufacturing approach
into assembly systems design and reconfigura-
tion. In: Proceedings of the Second International
CAMT Conference, Februar, Wroclaw, Poland,
2003.

- [KOC-03b] Koch T.,
Kagan R.: Lean Manufacturing Techniques in Assembly Systems Design. In: Proceedings of International Precision Assembly Seminar, März, Bad Hofgastein, Österreich, 2003.
- [KOE-01] Koether, R.;
Kurz, B.;
Seidel, U.;
Weber, F.: Betriebsstättenplanung und -ergonomie, Planung von Arbeitssystemen. München Carl Hanser: Verlag, 2001.
- [KOR-03] Korfmacher, H.: Die Europäische Recycling Plattform – Eine Strategie der zur Umsetzung der individuellen Herstellerverantwortung. In: Perspektiven für das Recycling von Elektro- und Elektronik-Altgeräten, VDI-Berichte 1775, Düsseldorf: VDI Verlag, 2003, S. 1-3.
- [KRI-99a] Krikke, H.R.;
Van Harten, A.;
Schur, P.C.: Business case Oce: reverse logistics network redesign for copiers. In: OR-Spektrum, (1999) Jg. 21, H. 3, S. 381-409.
- [KRI-99b] Krikke, H.R.;
Kooi, E.J.;
Schoor, P.C.: Network Design in Reverse Logistics: A Quantitative Model. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Berlin: Springer-Verlag, 1999.
- [KRI-01] Krikke, H.R.;
Bloemhof-Ruwaard, J.;
Van Wassenhove, L.: Dataset of the Refrigerator Case Design of closed loop supply chains. Discussion Paper 105, Erasmus Research Institute of Management (ERIM), Erasmus University Rotterdam, 2001.
- [KRT-94] Kriwet, A.: Bewertungsmethodik für die recyclinggerechte Produktgestaltung. Dissertation TU Berlin, München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1994.
- [KRU-01] Krug, W.: Modellierung, Simulation und Optimierung für Prozesse der Fertigung, Organisation und Logistik. SCS Europe BVBA, Ghent, Belgien, 2001.
- [KRW-94] N.N.: Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und Entsorgung von Abfällen – Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-AbfG), Bonn, Juli, 1994.

- [KUH-93] Kuhn, A.: Handbuch Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik, Braunschweig: Vieweg Verlag, 1993.
- [KUR-98] Kurbel, K.; Kurmann, O.: Ähnlichkeiten zwischen Altprodukten als Ausgangszustand für die Demontageplanung. In: uwf, (1998) 6 Jg., H. 4, S. 55-59.
- [KUR-99] Kurbel, K.; Schoof, B.; Schöne, S.; Szulim, D.: Informationsbeschaffung und –bereitstellung in einem EUS für Entsorgungsunternehmen über das World Wide Web. In: Tagungsband Management von Umweltinformationen in vernetzten Umgebungen, Mai, Marburg, 1999, S. 176-183.
- [LAN-03] Lange-Stalinski, T.: Methodik zur Gestaltung und Bewertung Mobiler Produktionssysteme, Dissertation, RWTH Aachen, Aachen:Shaker Verlag, 2003.
- [LCE-03] N.N: www.RecyclingPass.net, Stand: 01.01.04.
- [LDB-04] N.N.: Landesbetrieb für Datenverarbeitung und Statistik Land Brandenburg, <http://www.statistik-berlin-brandenburg.de>, Stand: 01.02.04.
- [LIE-02] Lieckens, K.; Vandaele, N.: On the Design of Networks in Reverse Logistics. In: Proceedings of the 12th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Mai, Dresden, 2002, S. 138-147.
- [LIM-99] Limaye, K.; Caudill, R.J.: System simulation and Modelling of electronics demanufacturing facilities. In: Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, Oktober, Boston, USA, 1999, S. 238-243.
- [LIM-03] Limaye, K.: Virtual Disassembly In: Proceedings of the Demanufacturing of Electronic Equipment for Reuse and Recycling Stakeholder Meeting, January, Washington, USA, 2003 .
http://www.deer2.com/post_stakemeeting.html,
Stand: 30.09.03.

- [LOR-97] Lorenzen, J.: Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen. Berlin, Heidelberg Springer-Verlag, 1997.
- [LOU-02] Lourenco, H.R. ; Soto, J. P. : Reverse Logistics Models and Applications : A recoverable Production Planning Model. Working Paper 3, INSTITUT D'ESTUDIS TERRITORIALS, Unversitat Pampeu Fabra, 2002.
- [MAS-02] Mascle, C. : A System Life Cycle Model for Disassembly-Assembly Line Design. In: Proceedings of the 15th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control, Juli, Barcelona, Spanien, 2002, S. 26 – 31.
- [MEC-01] Mecklenburg, K.: Seamless integration of layout and simulation. In: Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, Dezember, Arlington, USA, 2001, S. 1487-1491.
- [MEC-02] McLean, C.; Jones, A. ; Lee, T. ; Riddick, F.: An architecture for a generic data driven machine shop simulator. In: Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, Dezember, San Diego, USA, 2002, S. 1108- 1116.
- [MEE-98] Meedt, O.: Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechologien und optimierte Produktgestaltung, Dissertation Technische Universität Erlangen, Bamberg: Meisenbach Verlag, 1998.
- [MEL-68] Mellerowicz, K.: Betriebswirtschaftslehre der Industrie, Bd. 1, Freiburg, 1968.
- [MIL-01] Miller, F.: Simulation - Zukunft rechenbar? In: Fraunhofer Magazin, 2001.
- [MOO-99] Moorthy, S.: Integrating the CAD model with dynamic simulation: Simulation Data Exchange. In: Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, Dezember, Phoenix, USA, S. 276-280.
- [MOR-03] Morales, R. H.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 16 Nr. 149, Düsseldorf: VDI Verlag, 2003.

- [MÜL-01] Müller, K.: Wege zur Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen, Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin, Diss. TU Berlin, 2001.
- [MÜL-03] Müller, E.; Gäse, T.; Riegel, J.: Layoutplanung partizipativ und vernetzt. In: wt Werkstattstechnik online, (2003) Jg. 3, H. 4.
- [NEU-75] Neumann, K.: Operations Research Verfahren. Bd. 1, München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1975.
- [NOC-97] Noche, B: Simulation von Standardmodellen in der Logistik, Vortrag aus SimulationsDienstleistungsZentrum (SDZ), Dortmund, 1997.
- [OHL-03] Ohlendorf, M., Herrmann, C., Hesselbach, J.: Simulation based disassembly systems design. In: electronic Proceedings of the Environmentally Conscious Manufacturing III, October, Providence, Rhode Island, USA, 2003.
- [PAG-91] Page, B. : Diskrete Simulation - Eine Einführung mit Modula-2. Berlin, New York: Springer Verlag, 1991.
- [PAT-82] Patzak, G. : Systemtechnik-Planung komplexer innovativer Systeme. Berlin, New York: Springer Verlag, 1982.
- [PDD-04] N.N.: Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, World Population Prospects: The 2002 Revision and World Urbanization Prospects: <http://esa.un.org/unpp>, Stand: 8.07. 2004.
- [PEN-96] Penev, K.: Design of disassembly systems: a systematic approach. Dissertation Technische Universität Eindhoven, 1996.
- [PER-00] Perlewitz, H.: Planung und marktorientierter Betrieb von Demontagefabriken. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin, Dissertation, TU Berlin, 2000.
- [PFO-96] Pfohl, H.C.: Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen, 5. Aufl., Berlin: Springer Verlag, 1996.

- [POC-03] Pochampally, K.; Gupta, S.: A Multi-Phase Mathematical Programming Approach to Strategic Planning of an Efficient Reverse Supply Chain Network. In: Proceedings of the 2003 IEEE International Symposium on Electronics & the Environment, Mai, Boston, USA, 2003, S. 72– 78.
- [RAB-01] Rabe, M.; Hellingrath, B.: Handlungsanleitung Simulation in Produktion und Logistik, SCS-Interational, San Diego, 2001.
- [RAB-03] Rabe, M.: Modellierung von Layout und Steuerungsregeln für die Materialfluss-Simulation, Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin, Dissertation, TU-Berlin, 2003.
- [RAD-02] Rademacher, F. J.: Balance oder Zerstörung – Ökosoziale Marktwirtschaft als Schlüsse zu einer weltweiten Nachhaltigkeit, Wien: Ökosoziales Forum Europa, 2002.
- [RAL-98] Rall, B., Analyse und Dimensionierung von Materialflusssystemen mittels geschlossener Warteschlangennetze. Wissenschaftliche Berichte des Institutes für Fördertechnik und Logistiksysteme, Karlsruhe, 1998.
- [RAU-97] Rautenstrauch, C.: Fachkonzept für ein integriertes Produktions-, Recyclingplanungs- und Steuerungssystem (PRPS-System), Berlin, New York: Springer-Verlag, 1997.
- [RAU-98] Rau, E.: Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe, Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, Bamberg: Meisenbach Verlag, 1998.
- [REB-03] Rebafka, U.: Beitrag zur Entwicklung modularer Demontagewerkzeuge . Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin, Dissertation, TU Berlin, 2004.
- [REF-92] N.N.: Methodenlehre des Arbeitsstudiums. Teil 2, Datenermittlung, München: Hanser Verlag, 1992.

- [REI-02] Reinhart, G.;
Effert, C.;
Reiter, R.: Planungsbegleitende Ablaufsimulation in der Endmontage. In: Simulation in der Automobilproduktion (Hrg. Bayer, Collisi, Wenzel), Berlin, New York: Springer Verlag, 2002, S. 165-180.
- [ROG-98] Rogers, D.S.;
Tibben-Lembke, R.S.: Going backwards: reverse logistics trends and practices. The University of Nevada, Reno, Center for Logistics Management. Reverse Logistics Council, 1998.
- [ROP-75] Ropohl, G. : Systemtechnik- Grundlagen und Anwendungen. München: Hanser Verlag, 1975.
- [ROP-99] Ropohl, G. : Allgemeine Technologie – Eine Systemtheorie der Technik. München: Hanser Verlag, 1999.
- [SAD-99] Sadowski, D.A.;
Grabai, M.R.: Tips for successful practice of simulation. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, 1999, Dezember, Phoenix, USA, 1999.
- [SAR-03] Sarkis, J.: A strategic decision framework for green supply chain management. Journal of Cleaner Production, (2003) Jg. 4, H. 11, S. 397-410.
- [SCH-00] Schlögl, M.: Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten in Bayern – Grundlagen, Konzepte und Ziele. In: Fachtagung des Bayerischen Landesamts für Umweltschutz, November, Augsburg, 2000.
- [SCI-98] Schiller, E. F.: Ein Beitrag zur adaptiv-dynamischen Arbeitsplanung in der Demontage. Dissertation, Karlsruhe, Aachen:Shaker Verlag, 1998.
- [SCM-95] Schmigalla, H.: Fabrikplanung – Begriffe und Zusammenhänge. München: Hanser Verlag, 1995.
- [SCO-99] Scholz-Reiter, B.;
Scharke, H.;
Hucht, A.: Flexible robot-based disassembly cell for obsolete TV-sets and monitors. Special Remanufacturing Issue of International Journal of Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 1999.
- [SCU-03] Schultmann, F.: Stoffstrombasiertes Produktionsmanagement Betriebswirtschaftliche Planung und Steuerung industrieller Kreislaufwirtschaftssysteme. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2003.

- [SEL-93] Seliger, G.;
Kriwet, A.: Demontage im Rahmen des Recyclings. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (1993), Jg. 88, H.11, S. 529-532.
- [SEL-99] Seliger, G.;
Müller, K.;
Perlewitz, H.: Product and Process Planning for Recycling. In: Proceedings of the IEEE EcoDesign '99, 1st International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Februar, Tokio, Japan, 1999, S. 989-994.
- [SEL-00a] Seliger, G.;
Uhlmann, E.;
Keil, T.;
Härtwig, J.-P.: Realisierung eines Pilot-Demontagesystems. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZwF), Sonderbeilage Demontage, (2000) Jg. 95, H. 7, S. 20-24.
- [SEL-00b] Seliger, G.;
Ciupek, M.: Performance Evaluation of an Agent-Based Assembly Control by Simulation. In: K. Mertins, M. Rabe (Hrsg.): The New Simulation in Production and Logistics – Prospects, Views and Attitudes, 9. ASIM-Fachtagung, Mai, Berlin, 2000, S. 309-318.
- [SEL-00c] Seliger, G.;
Uhlmann, E.;
Härtwig, J.-P.;
Keil, T.: Realisierung eines Pilot-Demontagesystems. In: Tagungsband zum Kolloquium Kreislaufwirtschaft und Demontage, Januar; Berlin, 2000, S. 32-35.
- [SEL-02a] Seliger, G.: Nachhaltige Technologien. In: J. Milberg, G. Schuh (Hrsg.): Erfolg in Netzwerken. Berlin, New York: Springer Verlag, 2002, S. 235-243.
- [SEL-02b] Seliger, G.;
Ciupek, M.: Verteilte Simulation logistischer Prozesse in Produktionsverbänden. In: 10. ASIM Fachtagung, Simulation in Produktion und Logistik, März, Duisburg, 2002.
- [SEL-02c] Seliger, G.;
Ciupek, M.;
Lee, W.: Distributed Simulation an Efficient Approach for Modelling Complex Manufacturing Systems. In: Proceedings of the 12th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Juli, Dresden, 2002, S. 360-370.

- [SEL-03a] Seliger, G.;
Basdere, B.;
Ciupek, M.;
Franke, C.:
Contribution to Efficient Cellular Phone Remanufacturing. In: Proceedings of CIRP Seminar on Life Cycle Engineering – Engineering for Sustainable Development, Mai, Kopenhagen, 2003, S.162 – 176.
- [SEL-03b] Seliger, G.;
Basdere, B.;
Ciupek, M.;
Franke, C.:
Anpassung von Mobiltelefonen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, (2003) Jg. 98, H.10, S. 514-517.
- [SEL-04a] Seliger, G.;
Consiglio, S.;
Zettl, M.:
Selling Use instead of Selling Products – Technological and Educational Enablers for Business in Ecological Product Life Cycles. In: Proceedings of the 11th International CIRP Life Cycle Engineering Seminar “Product Life Cycle – Quality Management Issues” , Juni, Belgrad, Serbien, 2004, S. 17-22.
- [SEL-04b] Seliger, G.;
Franke, C.;
Ciupek, M.;
Basdere, B.:
Process and Facility Planning for Mobile Phone Remanufacturing. In: Annals of the CIRP Vol. 53/1/2004 S. 9- 12.
- [SIE-00] Siemers, W.;
Vest, H.:
Umwelt-Handbuch -Arbeitsmaterialien zur Erfassung und Bewertung von Umweltwirkungen, Umweltkatalog – Verwertung und Beseitigung von Elektronikschrott. Bundesministerium für Wirtschaftliche Zusammenarbeit (Hrsg.): Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH, Eschborn, 2000.
- [SLB-04] N.N.:
Statistisches Landesamt Berlin,
<http://www.statistik-berlin.de>, Stand:01.02.04.
- [SLY-98] Sly, D.:
Object-oriented factory layout in AutoCAD. In: Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, Dezember, Washington DC, USA, 1998, S. 275-277.

- [SOM-03b] Soma, M.;
Kondoh, S.;
Umeda, Y.:
Simulation of Closed-Loop Manufacturing Systems focused on Material Balances. In: Proceedings of the IEEE EcoDesign '03, 3rd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, December, Tokio, Japan, 2003, S. 96-101.
- [SPÄ-77] Späth, H.:
Cluster-Analyse-Algorithmen zur Objektklassifizierung und Datenreduktion. München, Wien: R. Oldenbourg Verlag, 1977.
- [SPE-02a] Spengler, Th.;
Walther, G.;
Hesselbach, J.;
Ohlendorf, M.:
Product Assessment and Recycling Data Analysis as Precondition for Efficient WEEE Recycling. In: Going Green – CARE INNOVATION 2002, Proceedings of the Fourth International Symposium November, Wien, 2002.
- [SPE-02b] Spengler, T.,
Walter, G.:
Stoffstrom-Netzwerke zur ökonomisch effizienten Umsetzung der EU-Richtlinien zur Rücknahme und Verwertung von Elektro(nik)-Altgeräten. In: M. Schenk et. Al. (Hrsg.): 8. Magdeburger Logistiktagung – Logistikplanung und Management, November, Magdeburg, 2002, S. 209- 224.
- [SPE-02c] Spengler, T.;
Ploog, M.;
Schröter, M.;
Stötling, W.:
Stoffstrombasiertes Supply Chain Management zur kosteneffizienten Schließung von Kreisläufen am Beispiel der Elektronikindustrie. In: Bullinger (Hrsg.): Stoffstrommanagement- Effizient produzieren nach Umwelt- und Kostenzielen, Tagungsband zum 4. Managementsymposium Produktion und Umwelt des IAO, Februar, Stuttgart, 2002.
- [SPE-94] Spengler, T.:
Industrielle Demontage- und Recyclingkonzepte: betriebswirtschaftliche Planungsmodelle zur ökonomisch effizienten Umsetzung abfallrechtlicher Rücknahme- und Verwertungspflichten, Berlin: Erich Schmidt Verlag, 1994.
- [SPE-98] Spedding, T.A.;
Sun, G.Q.:
Application of discrete event simulation to the activity based costing of manufacturing systems. In: Int. J. of Production Economics, (1999), H. 58; S. 289-301.

- [SPL-96] Splanemann, R.: Teilautomatische Genierung von Simulationsmodellen aus systemneutral definierten Unternehmensdaten am Beispiel der Integration der Materialflusssimulation in die Planung von Fertigungsanlagen, Aachen: Mainz, 1996.
- [SPU-94] Spur, G.: Fabrikbetrieb - Das System Planung, Steuerung, Organisation, Information, Qualität, Die Menschen. München: Hanser Verlag, 1994.
- [SPU-97] Spur, G.; Axmann, B.; Elbing, F.; Seibt, M.: Fertigungsverfahren in der Demontage. Normungsvorschlag zur Begriffsklärung in der Demontage. Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, TU Berlin, 1997.
- [SPU-98] Spur, G. : Technologie und Management: zum Selbstverständnis der Technikwissenschaft. München: Hanser Verlag, 1998.
- [STA-85] Stahl, H.: Clusteranalyse großer Objektmengen mit problemorientierten Distanzmengen. Frankfurt am Main: Verlag Harry Deutsch, 1985.
- [STE-77] Steinhausen, D.; Langer, K.: Clusteranalyse – Einführung in Methoden und Verfahren der automatischen Klassifikation. Berlin: Walter de Gruyter, 1977.
- [STR-94] Strugalla, R.: Prozesskostensimulation. Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung, (1994) Jg. 91 H. 12, S. 616-617.
- [SUT-02] Sutherland, J.W. ; Gunter, K. L.: A Model für Improving Economic Performance of a Demanufacturing System for Reduced Product End-of-Life Environmental Impact. In: Annals of CIRP Vol. 51/1/2002. S. 45-48.
- [TAK-97] Takakuwa, S.: The Use of Simulation in Activity-Based Costing for Flexible Manufacturing Systems. In: Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference, Dezember, Atlanta, USA, 1997, S. 793 – 800.
- [THI-97] Thierry, M.: An Analysis of the impact of product recovery management on manufacturing companies. Thesis, Erasmus University Rotterdam, 1997.

- [TOM-96] Tompkins, J. A.;
White, J.;
Bozer, Y. A.;
Frazelle, E. H.:
Facilities Planning, New York: John Wiley& Sons,
Inc.,1996.
- [TRI-96] Tritsch, C.:
Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter-
Ansatz zur Planung und (tei-) automatisierten
Durchführung industrieller Demontageprozesse.
Forschungsberichte aus dem Institut für Werk-
zeugmaschinen und Betriebstechnik der Universi-
tät Karlsruhe, Band 66., Karlsruhe, 1996.
- [TUR-91] Turney, P.B.:
How Activity-Based Costing Helps Reduce Cost.
In: Journal of Cost Management for the Manufac-
turing Industry (1991), Jg. 4, H. 4, S. 29-35.
- [UTH-01]. Uthmann, v. C.:
Geschäftsprozesssimulation von Supply Chains.
ASIM Forschungsberichte, SCS-Europe BVBA
Gehnt, 2001.
- [VAL-02] Vallone, J.:
Demufacturing of Electronic Equipment for Re-
Use and Recycling (DEER2) Technology. Final
Information Report CDRL C006, National Defense
Center for Environmental Excellence, USA, 2002.
- [VDI-2243] N.N.:
Konstruieren recyclinggerechter technischer Pro-
dukte. VDI-Richtlinie 2243, Düsseldorf, 1993.
- [VDI-2343] N.N.:
Recycling elektrischer und elektronischer Geräte,
VDI Richtlinie 2343, Düsseldorf, 2000.
- [VDI-2815] N.N.:
Begriffe für die Produktionsplanung und –
steuerung- Einführung, Grundlagen, Blatt 1 Düs-
seldorf: VDI Verlag, 1978.
- [VDI-3633] N.N.:
Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Pro-
duktions-systemen. VDI-Richtlinie 3633,VDI Düs-
seldorf, 1992.
- [WAL-03] Walther, G.;
Spengler, Th.;
Ohlendorf, M.;
Hesselbach, J.:
Enhanced Recycling of Waste Electrical and Elec-
tronic Equipment (WEEE) – A Two Level Ap-
proach In: Proceedings of Colloquium e-ecological
Manufacturing, März, Berlin, 2003, S.179-182.

- [WAN-03] Wang, S.; Zheng, R.; Liu, Z.; Liu, G.: Construction of Dynamic Green Supply Based on Agents. In: Proceedings of the 2003 IEEE International Symposium on Electronics & the Environment, Mai, Boston, USA, 2003, S. 30 – 35.
- [WAR-96] Warnecke, H.-J.: Die Montage im flexiblen Produktionsbetrieb – Technik, Organisation, Betriebswirtschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1996.
- [WAT-02] Walter, T.: Einsatz von Methoden der Digitalen Fabrik bei der Planung von Produktionssystemen für die Automobilindustrie, Aachen: Shaker Verlag, Dissertation TU Clausthal, 2002.
- [WBR-04] N.N.: The World Bank Annual Report 2003: Volume 1, World Bank, New York, 2004.
- [WCE-87] N.N.: Our Common Future. The World Commission on Environment and Development. New York, Oxford: University Press, 1987.
- [WEI-97] von Weizsäcker, E.U.; Lovins, A.; Lovins, H.: Faktor Vier. Doppelter Wohlstand – halbiertes Verbrauch. München: Doermersche Verlagsanstalt, 1997.
- [WEN-00] Wenzel, S.: Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik. Frontiers in Simulation, FS 5,SCS-Europe BVBA, Ghent, 2000.
- [WER-01] Werner, M.: Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen, Dissertation TU München, Herbert Utz Verlag, München, 2001.
- [WER-96] v. Werder, H.-K.: Planung der Demontage elektrischer und elektronischer Altgeräte. Dissertation, Braunschweig, VDI-Verlag, 1996.
- [WES-99a] Westkämper, E.: Zukunftsweisende Fabrikstrukturen. In: wt Werkstattstechnik (1999) Jg. 89, H.1/2, S. 10-13.
- [WES-99b] Westkämper, E.; Wiendahl, H.-H.; März, L.: Fabrikplanung und Auftragsmanagement in wandlungsfähigen Unternehmensstrukturen – Ergänzung oder Konkurrenz?. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF (1999) Jg. 94 H. 10, S. 610-613.

- [WES-00] Westkämper, E.: Kontinuierliche und partizipative Fabrikplanung. In: wt Werkstattstechnik online, (2000) Jg. 2, H.3.
- [WES-02] Westkämper, E.; Winkler, R.: Praxisbeispiel und Nutzen der objektorientierten Konzeption für die Fabriksimulation. In: wt Werkstattstechnik online, (2002), Jg. 3, H.3.
- [WES-03] Westkämper, E.: Assembly and Disassembly Processes in Product Life Cycle Perspectives. In: Annals of CIRP Vol. 52/2, 2003, S. 579-588,.
- [WES-03] Westkämper, E.; Bierschenk, S.; Kuhlmann, T., Digitale Fabrik – nur was für die Großen? In: wt Werkstattstechnik online, (2003) Jg. 4, H.1.
- [WET-01] von Westernhagen, K.: Planung und Steuerung der Retro-Produktion, Vulkan Verlag Essen, Dissertation, Braunschweig, 2001.
- [WIE-96] Wiendahl, H.-P.: Grundlagen der Fabrikplanung. In: Betriebshütte Produktion und Management, (Hrsg.) Schuh, G. und Eversheim, W., 7. Auflage, Berlin New York: Springer Verlag, 1996.
- [WIE-97] Wiendahl, H.-P. Ahrens, V.: Agent-based control of self-organized production systems. In: Annals of CIRP Vol. 45/1/1997, S. 45-48.
- [WIE-98] Wiendahl, H.-P.; Bürkner, S.: Online Planning and Control of Disassembly. In: Proceedings of the International CIRP Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Capri, 1998, S. 78-83.
- [WIE-99] Wiendahl, H.-P.; Bürkner, S.: Planning and Control in Disassembly: The Key to an Increased Profitability. In: Proceedings of the 2nd International Working-Seminar on Re-Use, Eindhoven, 1999.
- [WIE-01a] Wiendahl, H.-P., Harms, Th.: Maßgeschneiderte Fabriken im Dienste der Kunden. In: 3. Deutsche Fachkonferenz Fabrikplanung – Fabrik 2005+, Verlag moderne industrie, April, Stuttgart, 2001.

- [WIE-01b] Wiendahl, H.-P.;
Evers, K.;
Frackenpohl, D.;
Wolf, M., O.:
Simulationsgestützte Fabrikentwicklung. In: wt Werkstattstechnik online, (2001) Jg. 2, H.4.
- [WIE-01c] Wiendahl H.-P.;
Scholz-Reiter, B.;
Bürkner, S.;
Scharke, H.:
Flexible disassembly systems – layouts and modules for processing obsolete products. In: Proceedings of the I MECH E Part B Journal of Engineering Manufacture, Vol. 215, 2001, S. 723-732.
- [WIE-02a] Wiendahl, H.-P.;
Hernandez, R.;
Grienitz, V.:
Planung wandlungsfähiger Fabriken – Erschließung von Potenzialen mit Hilfe des Szenario-Managements. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, (2002) Jg. 97, H. ½, S. 12-16.
- [WIE-02a] Wiendahl, H.-P.;
Hegenscheidt, M.:
Engpassanalyse von Produktionssystemen mit Kennlinien. wt Werkstattstechnik online, (2002) Jg. 2, H.9.
- [WIE-02b] Wiendahl, H.-P.;
Fiebig, C.;
Heger, C.L.;
Worbs, J.:
Freiflug durch die Fabrik. In: wt Werkstattstechnik online, (2002) Jg. 2, H.4
- [WIE-03] Wiendahl, H.-P.;
Hegenscheidt, M.:
Flexible Transferstraße :Hochdynamisches Störverhalten reduziert Effekte von Maßnahmen zur Leistungssteigerung. In: Simulation in der Automobilproduktion (Hrg. Bayer, Collisi, Wenzel), Berlin, New York: Springer Verlag, 2003, S. 71-80.
- [WIL-97] Wildemann, H.:
Entsorgungslogistik - Leitfaden zur wirtschaftlichen Gestaltung von Entsorgungskreisläufen in Unternehmen. 2 Aufl., München: TCW Transfer-Centrum Verlag, 1997.
- [WIR-99] Wirth, S.;
Enderlein, H.;
Förster, A.;
Petermann, J.:
Zukunftsweisende Unternehmens- und Fabrikkonzepte für KMU. In: Tagungsband der 10. Tage des System- und Betriebsingenieurs , September, Chemnitz, 1999.
- [WIR-00] Wirth, S.;
Enderlein, H.;
Hildebrandt, T.:
Visionen zur wandlungsfähigen Fabrik. In: Zwf (2000), Jg. 95, H. 10, S.456-462.

- [WIR-01] Wirth, S.;
Gäse, T.;
Günther, U.: Partizipative simulationsgestützte Layoutplanung – Ein neuer integrierter Ansatz zur Layoutplanung von Produktionssystemen. In: wt Werkstattstechnik online, (2001) Jg. 2, H.6.
- [WIR-02] Wirth, S.;
Gäse, T.;
Günther, U.;
Hubrig, M., Mit Simulation dimensionieren und visualisieren. wt Werkstattstechnik online, (2002), Jg. 3 H.4.
- [WÖH-93] Wöhe, G.: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. München: Vahlen Verlag, 1993.
- [WOR-02] Wortmann, D.: Aktueller Stand und Perspektiven der Logistiksimulation. Praxishandbuch Logistik, 2002.
- [WÖR-99] Wörle, G.;
Braunmiller, U.: Materialrecycling - Ökologisch und ökonomisch sinnvolle Kreisläufe. Stuttgart: Fraunhofer-IRB Verlag, 1999.
- [WUT-00] Wuttke, C.C.: Mehrfachnutzung von Simulationsmodellen in der Produktionslogistik, Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2000.
- [ZÄP-96] Zäpfel, G.: Grundzüge des Produktions- und Logistikmanagements. Berlin, New York: Springer-Verlag, 1996.
- [ZEI-97] Zeid, I;
Gupta, S.M.;
Bardasz, T A Case-Based Reasoning Approach to Planning for Disassembly. Journal of Intelligent Manufacturing, (1997) Jg. 8. H. 2, S.97-106.
- [ZÜL-96] Zülch, G.;
Brinkmeier, B.: Simulation of activity costs for the reengineering of production systems. In: Int. J. Production Economics (1998) H. 56-57, S. 711-722.
- [ZUN-98] Zundel, B.;
Bunke, E.;
Schramm, F.;
Steinfeldt, C.: Stoffstrommanagement- Zwischenbilanz einer Diskussion. Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht, (1998) 3 Jg., S. 317-340.
- [ZUS-00] Zussman, E.;
Zhou, M.C.: Design and implementation of an adaptive process planner for disassembly processes. In: Proceedings of the IEEE Transactions on Robotics and Automation (2000) Jg. 16, H 2, S. 171-179.

- [ZVEI-02] N.N.: Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie (ZVEI) e.V., Tätigkeitsbericht 2002, <http://www.zvei.org>, Stand: 24.08.03.
- [ZVEI-95] N.N.: Zahlenspiegel des Deutschen Hausgerätemarktes 1994. Zentralverband der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI), GfK Marketing Service GmbH, 1995.