Folien als transparente Elemente in der Fassade

mechanische und bauphysikalische Eigenschaften

vorgelegt von
Roland Lippke
aus Berlin

von der Fakultät VI
Planen Bauen Umwelt
der Technischen Universität Berlin

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
-Dr.-Ing.-

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:
Vorsitzender: Prof. Dr. Schäfer
Berichter: Prof. Dr. Rückert
Berichter: Prof. Dr. Geißler

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 28. Oktober 2009

Berlin 2009

D 83

1 Einleitung..... 9
1.1 Vorwort.....9
1.2 Kurzfassung..... 11
1.3 Abstract..... 13
1.4 Formelzeichen.....14
1.5 Folienmaterial.....18
1.5.1 Molekulare Struktur von Kunststoffen.....18
1.5.2 Geeignete Kunststoffe für Folien..... 20
1.5.3 Folienherstellung.....21
1.5.4 Mechanische Eigenschaften.....21
1.5.5 Optische Eigenschaften..... 22
1.5.6 Dauerhaftigkeit..... 22
1.5.7 Brandverhalten..... 23
2 Fassadenkonstruktion..... 24
2.1 Anforderungsprofil von modernen Fassaden.....24
2.1.1 Energiebilanz..... 24
2.1.2 Nutzerkomfort.....25
2.2 Fassadentypen..... 26
2.2.1 Abluftsysteme.....26
2.2.2 Puffersysteme.....28
2.2.3 Zweite-Haut-Systeme.....28
2.2.4 Kombinationen.....30
2.3 Probleme von Doppelfassaden.....30
2.4 Folienfassaden..... 32
2.4.1 Aufgeklebte Folien..... 32
2.4.2 Reine Folienkonstruktionen.....33
2.4.3 Folie-Glas Kombinationen.....51
2.5 Folienmanipulatoren..... 55
2.5.1 Optische Manipulation.....55
2.5.2 Thermische Manipulation..... 57
3 Bauphysik.....60
3.1 U-Wert.....61
3.1.1 Wärmetransport innerhalb der Fassade..... 63
3.1.2 Rechnerische U-Wertermittlung.....66
3.1.3 Experimentelle U-Wertermittlung an der TU-Berlin..... 70
3.2 Tauwasserschutz..... 92
3.2.1 Dampfdichtigkeit von ETFE Folie..... 94
3.2.2 Tauwasserschutz von Folienfenstern nach DIN 4108-3.....95
4 Mechanische Eigenschaften..... 98
4.1 Materialprüfung.....99

4.1.1 Prüfverfahren nach DIN 99
4.1.2 Zugprüfung nach DIN EN ISO 527-1 : 1996..... 99
4.1.3 Zugprüfung nach DIN 53 354 : 1981.....100
4.1.4 Weiterreißversuch nach DIN 53356.....100
4.1.5 Weiterreißversuch nach DIN 53363.....100
4.1.6 Kriechversuche nach DIN EN ISO 899-1.....101
4.1.7 Prüfung allgemein..... 101
4.2 Molekulare Struktur von ETFE.....102
4.3 Einaxiale Zugversuche.....103
4.3.1 Vergleichsmessung unterschiedlicher Hersteller, Modifikationen und Folienstärken an der TU-Berlin.....104
4.3.2 Analyse unterschiedlicher Zuggeschwindigkeiten..... 117
4.4 Zeitabhängiges Verformungsverhalten..... 118
4.4.1 Kriechen.....119
4.4.2 Relaxation.....124
4.4.3 Bolzmannsche Superpositionsprinzip..... 129
4.5 Biaxiale Zugversuche.....130
4.5.1 Prüfverfahren..... 130
4.5.2 Prüfmaschinen..... 133
4.5.3 Bau einer biaxialen Prüfmaschine an der TU-Berlin.....140
4.5.4 Materialwertberechnung mit Hilfe von Biaxialversuchen..... 146
4.5.5 Biaxiale Zugversuche an der TU-Berlin.....148
5 Bemessung..... 158
5.1 Bemessungsgrundlagen..... 158
5.1.1 Rechtliche Grundlagen.....158
5.1.2 Normative Vorgaben.....158
5.1.3 Sicherheit und Versagenswahrscheinlichkeit.....159
5.2 Sicherheitskonzept für ETFE Folien..... 161
5.2.1 Bemessung von PVC beschichteten PES Membran.....162
5.2.2 Bewertung und Übertragbarkeit der E-DIN 18204-1.....164
5.2.3 Nachweis der Tragfähigkeit.....166
5.2.4 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit.....168
5.2.5 Zusammenfassung des Sicherheitskonzepts für ETFE.....171
5.2.6 Materialwerte für Bemessungsprogramme..... 173
5.3 Bemessung von Beispielfassadenmodulen.....174
5.3.1 Mechanisch vorgespannte Module.....175
5.3.2 Pneumatisch vorgespannte Module.....182
5.3.3 Vergleich pneumatischer und mechanischer Vorspannung.....187
5.3.4 Ergebnisbewertung der Beispielfassadenmodule.....188
6 Praxisprojekt „New Technology“ Bürogebäude in Teheran.....190

6.1 Entwurfsgrundlagen.....190
6.2 Entwurf.....190
6.3 Konstruktion.....194
6.4 Nord- Südfassade..... 195
6.4.1 ETFE Folie..... 199
6.4.2 Folienrollo im FZR.....199
6.4.3 Pfosten-Riegel-Fassade.....200
6.4.4 Folienrollo im Innenraum..... 200
6.5 Konstruktiver Sonnenschutz.....200
6.6 Detailzeichnungen der Fassade.....201
6.7 Bemessung „New Technology“ Folienmodul.....206
6.7.1 Windlasten..... 207
6.7.2 Temperatur und Vorspannung.....210
6.7.3 Bemessungsergebnisse.....211
6.7.4 Modulbewertung.....212
7 Zusammenfassung und Ausblick.....213

Danksagung

Diese Arbeit wurde während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der TU-Berlin an der Fakultät VI Planen, Bauen, Umwelt im Institut für Architektur am Fachgebiet Tragwerksentwurf und –konstruktion unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. K. Rückert erstellt, der mir stets als wissenschaftlicher Diskussionspartner und Ratgeber hilfreich zur Seite stand. Als Mitarbeiter standen meine Tutoren Dipl. Ing. D. Weinhold und cand. Ing. S. Gerlach immer einsatzbereit und hoch motiviert zur Verfügung. Unser ehemaliger Oberingenieur Dr.-Ing. Eddy Widjaja hat mich auch stets hilfsbereit unterstützt.
Alle Versuche, die in dieser Arbeit veröffentlicht sind, wurden an der TU-Berlin durchgeführt. Namentlich seien hier erwähnt:

- Fachgebiet Polymertechnik/Polymerphysik von Prof. Dr.-Ing. M. Wagner, dessen Mitarbeiter Herr Dr.-Ing. L. Rautenberg und Dipl. Ing. C. Wyrwich mir die Versuchsmaschinen für die einaxialen Zugversuche und die Relaxationsversuche zur Verfügung gestellt haben und stets für alle Fragen zu Polymeren und deren Struktur ansprechbar waren.
- Hermann-Rietschel-Institut unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. D-. Müller, dessen Fassadenprüfstand (Hotbox) ich für die U-Wert Versuche benutzen durfte und dessen Mitarbeiter Dipl. Ing. A. Hoh und Dipl. Ing. T. Tschirner mich bei der Versuchsdurchführung unterstützt haben.
- Fachgebiet Baustoffe und Baustoffprüfung von Prof. Dr.-Ing. B. Hillemeier, der mir die biaxiale Zugmaschine unter der Betreuung von Dipl. Ing. B. Westphal-Kay zur Verfügung gestellt hat.
- Die Zentralwerkstatt der TU-Berlin unter Leitung von Herrn A. Witt und sein Mitarbeiter Herrn P. Gerlach, die mir beim Bau der Klemmvorrichtungen für die biaxiale Zugmaschine behilflich waren.

Das Folienmaterial wurde mir von der Firma KfM GmbH und der Firma Nowofol GmbH & Co. KG überlassen.

Mein Dank gilt allen, die mich bei meiner Arbeit unterstützt haben.

1 Einleitung

1.1 Vorwort

Die Fassade wird häufig als Markenzeichen des Gebäudes bezeichnet. Sie ergibt zusammen mit dem Dach den eigentlichen Sinn von Gebäuden, nämlich den Schutz vor Umwelteinflüssen. Gleichzeitig muss sie Nutzern einen Kontakt mit der Außenwelt gewähren. Diese Balance zwischen Schutz und Kontakt muss die Fassade herstellen. Diese Aufgabe wurde abhängig von technischen Möglichkeiten und Energiepreisen zur jeweiligen Zeit individuell gelöst.
In alten Bauernhäusern wurde schon mit Zwei-Scheiben-Systemen gearbeitet, um den U-Wert zu verbessern, was zur damaligen Zeit nicht auf hohe Energiepreise, sondern auf die schlechten technischen Mittel einer effektiven Beheizung der Gebäude zurückzuführen war. Die Ofenheizung war nur durch körperliche Anstrengung, mit Brennmaterial zu bestücken. Das Holzhacken hat Zeit gekostet, die für den landwirtschaftlichen Betrieb fehlte. Daher musste die Fassade optimiert werden, um den Heizwärmebedarf zu reduzieren. Als dann Heizsysteme auf Knopfdruck zur Verfügung standen, die ausreichende Mengen an Wärme abgaben, wurden die aufwendigeren Fenster mit zwei Scheiben wieder von Einfachverglasung abgelöst. Zunächst war also die Qualität der Fassade vom Arbeitsaufwand, die Heizenergie aufzubringen abhängig.
Mit dem Aufkommen der ersten Ölkrise 1973 kam ein neuer Einfluss auf die Fassadengestaltung zu. Der Energiepreis stieg schlagartig an und die in den 70er Jahren entwickelte Isolierverglasung und thermisch getrennte Rahmenkonstruktionen waren im Vormarsch. Seit dieser Zeit wurden die Verglasungen immer weiter optimiert. Hatte die Isolierverglasung aus den 70ern noch einen U-Wert von 3,0 W/m^2K, kommt eine Dreifach-Wärmeschutzverglasung mit Gasfüllung auf einen U-Wert von 0,6 W/m^2K.
Die Ölkrise 1973 bedeutete einen sprunghaften Anstieg der Ölpreise um 70% von 3 $ pro Barrel Öl auf über 5 $. Ende 2007 erreichte der Ölpreis inzwischen die Marke von 100 $ pro Barrel Öl. Diese Entwicklung wird sich bis zum endgültigen Versiegen unserer fossilen Brennstoffreserven so fortsetzen und die Entwicklung im Fassadenbereich weiter antreiben.
Zu keiner Zeit hat eine nennenswerte Menge Bauherren ihre Entscheidung für ein Fassaden- oder Fenstersystem aufgrund von Umweltbewusstsein getroffen. Die wesentlichen Entscheidungsfaktoren sind Geld und an zweiter Stelle der Komfort. Industrielle Bauwerke müssen kosteneffektiv erstellt werden, um möglichst schnell das Unternehmen wieder in die Gewinnzone zu bringen, private Bauherren verausgaben sich finanziell häufig so stark, dass jede Entscheidung auch finanzielle Vorteile erbringen muss, lediglich der Staat hat die Möglichkeit als Vorbild energetisch optimierte Gebäude zu erstellen, bei denen die Amortisation der Erstinvestition nicht sicher gestellt ist.
Da wir mittlerweile an einem Punkt angekommen sind, an dem die Energie so teuer ist und

immer teurer werden wird, dass sich hohe Erstinvestitionen amortisieren werden und die Amortisationszeiten bei steigenden Energiepreisen immer kürzer werden, können auch neue Wege des Fassadenbaus gewagt werden, die bisher unrentabel erschienen.
Die Arbeit soll dazu dienen, die Einsatzmöglichkeiten von Folien als transparente Fassadenelemente zu klären. Welche Vorteile können sich aus ihrem Einsatz ergeben und wo sind ihrem Einsatz Grenzen gesetzt. Folien werden schon heute in transparenten Fassadenelementen eingesetzt, z.B. in Isolierverglasungen mit einer Folie als zusätzliche Mittelschicht oder als Rollos. Die Entwicklung von Kunststoffen geht aber immer weiter und es ergeben sich immer neue Möglichkeiten, die auf ihre Sinnhaftigkeit zu überprüfen sind.
Die Entstehung dieser Arbeit war vor allem geprägt von dem Forschungsprojekt „New Cities – Young Towns in Iran“. Dieses vom BMBF geförderte Projekt ermöglichte es, an einem realen Projekt eine innovative Fassade mit dem Einsatz von Folien innerhalb einer Doppelfassade zu planen. Die Planung deckte Schwierigkeiten beim Bauen mit innovativen Werkstoffen auf, die bei rein theoretischer Betrachtung nicht so deutlich sichtbar geworden wären. Allen voran die Skepsis von Bauherren gegenüber Folien als transparente Fassadenelemente. Auf Grund dieser Skepsis war es nicht möglich, obwohl unser iranischer Partner ein Forschungsinstitut war, eine reine Folienfassade zu bauen. Ich musste leider den Kompromiss eingehen, eine Glasebene einzubauen. Das innovative Potential von Folien im Fassadenbereich steht für mich trotzdem außer Frage.

1.2 Kurzfassung

Der Folienbau und insbesondere der konstruktive Folienbau ist mittlerweile seit über 20 Jahren als Bauweise für Gebäudehüllen erprobt. Die Erfahrung dieser Zeit zeigt, dass die Folie als Konstruktionsmaterial dauerhaft einsetzbar ist. Die mechanischen Eigenschaften von geeigneten Folien ändern sich über diese Zeiträume kaum, somit ist ihr Einsatz als transparente Fläche, für dauerhafte Bauwerke als Alternative zu Glas oder biegesteifen Kunststoffen wie PMMA oder PC im Konstruktionsprozess zu untersuchen.
Die Arbeit beschäftigt sich mit der Folie als Werkstoff für den Fassadenbau. Es wird im Wesentlichen auf den konstruktiven Folienbau eingegangen, aber auch auf Folien, die mechanisch nur schwach oder gar nicht belastbar sind und im Rahmen des Fassadenbaus optische, thermische oder mechanische Optimierungen ermöglichen.
Zunächst werden die möglichen Konstruktionsformen von transparenten Fassaden, die auch schon aus dem Glasbau bekannt sind, in ihre Funktionsweise analysiert. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf Doppelfassaden. Aus den Erkenntnissen über die jeweiligen Funktionen der unterschiedlichen Fassadenschichten werden Möglichkeiten aufgezeigt, unterschiedliche Schichten durch Folien zu ersetzen oder die gesamte Fassade aus Folien herzustellen.
Um die Funktionsweise von Folien als thermisch isolierende Schicht zu untersuchen, wurden an zweilagigen Folienfenstern Versuche durchgeführt. Die Fenster wurden in einen Versuchsstand eingebaut, der den Energiedurchlass misst, bei einer Temperaturdifferenz der beiden angrenzenden Räume von 20°C. Die Ergebnisse wurden mit gängigen Glaskonstruktionen verglichen und Optimierungsvorschläge für die Folienkonstruktion dargelegt.
Folienkonstruktionen gehören aus statischer Sicht zum Membranbau. Es sind vorgespannte Konstruktionen, die äußere Lasten in der Ebene als Normalkräfte abtragen. Die möglichen Formen, die sich aus der Vorspannung ergeben, werden dargestellt und nach Art der Vorspannung differenziert. Die mechanischen Eigenschaften werden im Anschluss dargestellt.
Zur genauen Beschreibung des Werkstoffs wurden verschiedene Versuche durchgeführt.
Die Versuchsreihe beginnt mit einaxialen Zugversuchen, um die Schwankungen der mechanischen Eigenschaften zwischen unterschiedlichen Herstellern, Materialchargen, Folienstärken und Modifikationen zu analysieren.
Ein zweiter Versuchsaufbau ermittelt das Langzeitverhalten unter Last, bei einaxialer Belastung. Eine Folienprobe wird gedehnt und über einen bestimmten Zeitraum bei dieser Ausgangsdehnung gehalten, während die Spannungsänderung gemessen wird. Als Versuchsauswertung entsteht ein Diagramm, in dem jeder Ausgangsdehnung direkt eine Spannung nach unendlich langer Zeit zugeordnet wird.
Als dritte Versuchsreihe wurden biaxiale Zugversuche durchgeführt. Hierfür wurde eine Versuchseinrichtung an der TU-Berlin gebaut. Die Versuche dienen der Bestimmung des E-Moduls und der Ermittlung der Querdehnzahl.
Im Anschluss an diese Untersuchungen wird anhand von vier unterschiedlichen Folienelementen und eines Praxisprojektes die Konstruktion und Bemessung einer Folienfassade gezeigt.

Hierfür wird zunächst das derzeit gültige Regelwerk gesichtet und anhand der bekannten Regeln ein Bemessungskonzept für die Fassade dargestellt. Mit diesem Konzept werden die vier Standardfolienelemente und das 6,00 m hohe und 2,50 m breite Modul aus dem Praxisprojekt, bemessen.

1.3 Abstract

Foil structures and especially load bearing foil structures have been build now for more than 20 years and have proved their quality as façade and roofing material. The gained experiences of the last two decades have shown that it is a long lasting material. The mechanical properties of suitable foil materials, which have been installed in different buildings, haven't changed during their lifetime. This proofs that foils can be used on permanent buildings as an alternative to glass or bending resistant polymers such as PMMA or PC.

This thesis is about foil materials, which are suitable for façade construction. The main part deals with load bearing foil constructions. Included is also information on non load bearing foils such as PE or THV, which are good for optimizing optical or thermal properties of the façade.

There are a lot of construction types for transparent facades which already known as glass façade constructions. These are analysed for their functionality. The focus is on double facades. After the analysis of the function of the different façade types and their layers, a recommendation is made to which part of the facades could be substituted by foils.

The next step is to examine the building physic properties of insulating foil constructions. Tests were held at the TU-Berlin to measure the heat transmission of two layer foil windows. The test setup measured the energy transmission of the window between two rooms with a temperature difference of 20°C. The test results are compared to standard glass windows and suggestions for the optimization of the foil windows are given.

Foil constructions are membrane structures. They are prestressed and carry external loads only by axial forces without bending moments. This behaviour leads to typical forms in membrane architecture which are shown and differentiated between mechanically and pneumatically prestessed forms. Subsequently the mechanical properties of foils are analysed, with the help of several tests performed at the TU-Berlin.

The first mechanical test is the uniaxial tensile test. This test shows the variation of properties between different manufacturers, batches, thicknesses and optical modifications.

The second test is also a uniaxial tensile test. This experiment gathered information on the long-term behaviour. A test strip is elongated and held in position for up to 40 days. During this time the stress in the foil strip is measured. With these tests a diagram has been developed which shows for every initial elongation the stresses after infinite long term.

The third test is the biaxial tensile test. A test machine has been constructed at the TU-Berlin. This test provided information on the E-Moduli of the material and the Poisson ratio.

Finally all results are applied on four standard foil elements and a practical project. In this practical project a foil façade is designed and a structural analysis is made. The standards and construction regulations are examined and a concept for the structural analysis of the foil is shown. With this concept the four standard elements and the 6,00m high and 2,50m wide foil element of the practical project, is analyzed.

1.4 Formelzeichen

Kräfte:

F	allgemeine Einwirkung
G	Eigengewicht
P	Vorspannung (Prestress)
W	Windlast
S	Schneelast

Materialwerte:

f_u	Zugfestigkeit
f_y	Streckgrenze
E	E-Modul
α_T	Temperaturdehnungskoeffizient
G	Schubmodul
K	Kompressionsmodul
G	Relaxationsmodul
ε	Dehnung
ν	Querdehnzahl

Sicherheitskonzept:

γ_F	Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkung
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert für Widerstandsgrößen
ψ	Kombinationsbeiwert
A	Abminderungsfaktor in Abhängigkeit von der Art der Einwirkung [DIN18204]

Indizes:

u	Bruch (ultimate)
el	obere Grenze des elastischen Bereiches
k	ohne Sicherheitsbeiwerte (charakteristisch)
d	mit Sicherheitsbeiwerten (design)
F	Kraft (Force)
G	Eigengewicht
P	Vorspannung (Prestress)
temp	Temperatur
M	Material
l	Langzeit
0	Ausgangszustand

Indizierung von Spannungen und Dehnungen:
Spannungen und Dehnungen sind Tensoren 2. Grades und werden mit zwei Indizes versehen. Der erste beschreibt den Angriffspunkt und der zweite die Angriffsrichtung.

Indizierung von Moduln:
Moduln sind Tensoren 4. Grades und werden mit 4 Indizes versehen. Der ersten zwei beschreiben den Angriffspunkt und die Angriffsrichtung der Ursache. Die zweiten beiden beschreiben Ort und Richtung der Wirkung.

E_{1111}	E-Modul in 1-Richtung
E_{2222}	E-Modul in 2-Richtung
E_{1122}	E-Modul in 2-Richtung infolge der Belastung in 1-Richtung
E_{2211}	E-Modul in 1-Richtung infolge der Belastung in 2-Richtung
E_{1212}	Schubmodul

Bauphysikalische Größen:
Wärmeschutz:

U	Wärmedurchgangskoeffizient
G	Gesamtenergiedurchlassgrad
λ	Wärmeleitfähigkeit
h	Wärmeübergangskoeffizient
R	Wärmeübergangswiderstand
d	Dicke der Materialschichten
r	spezifischer Wärmedurchgangswiderstand des Verglasungsmaterials
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante
T	absolute Temperatur
ΔT	Temperaturdifferenz
ε	effektives Emissionsvermögen
Nu	Nusselt-Zahl
Gr	Grashof-Zahl
Pr	Prandtl-Zahl
s	Luftschichtdicke
ρ	Dichte des Gases
μ	dynamische Viskosität des Gases
c	spezifische Wärme des Gases
n	Exponent
A	Konstante
E	Strahlungsaustauschgrad

Indizes:

e	außen
t	Gesamt-, total
i	innen
s	Abstand
r	Strahlung
g	Gas
m	mittlere(r, s)
ro	Strahlung eines schwarzen Körpers
si	innen
se	außen
a	Leitung / Konvektion

Feuchteschutz:

I_D	Wasserdampf-Diffusionsstrom
i_D	Wasserdampf-Diffusionsstromdichte
δ	Wasserdampf – Diffusionsleitkoeffizient
μ	Wasserdampf - Diffusionswiderstandszahl
A	Fläche
P_{D1}	Wasserdampfdruck an der Probe
s	Dicke einer Schicht
φ	Relative Luftfeuchte
s_D	diffusionsäquivalente Luftschichtdicke
Θ	Lufttemperatur
t_T	Tauperiodendauer

Indizes:

e	außen
i	innen
L	Luft

1.5 Folienmaterial

Folien sind Produkte, die aus Kunststoffen bestehen, welche auf verschiedene Arten in Folienform gebracht werden können. Zunächst muss man sich also damit auseinandersetzen, um was es sich bei Kunststoffen eigentlich handelt.
Kunststoffe sind eine Teilmenge der makromulekularen Stoffe. Sie bestehen aus sehr langen Molekülketten, die ganz oder teilweise organisch aufgebaut sind. Die verschiedenen Polymere können auf drei unterschiedliche Arten unterschieden werden.

- Einteilung nach ihrer Entstehung
    - Natürliche molekulare Stoffe
    - Modifizierte Naturstoffe
    - Vollsynthetische molekulare Stoffe
- Einteilung nach ihrem Verwendungszweck
    - Kunststoffe als Pressmassen oder Spritzgussmassen
    - Kunststoffe als Halbzeuge
    - Elastomere
    - Folien
    - Fasern
    - Schaumstoffe
    - Klebstoffe
    - Lacke
    - Sonderkunststoffe
- Einteilung nach ihrer molekularen Struktur
    - Thermoplaste
        - Amorph, unvernetzt
        - Teilkristallin, unvernetzt
    - Elastomere amorph
    - Duroplaste amorph

Zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaften sowie der Möglichkeiten des Fügens und der thermischen Belastbarkeit ist die dritte Unterteilungsweise nach der molekularen Struktur die aussagekräftigste. Deswegen wird im Folgenden diese Unterteilung etwas detaillierter beschrieben.

1.5.1 Molekulare Struktur von Kunststoffen

1.5.1.1 Thermoplaste

Thermoplaste kennzeichnen sich dadurch, dass ihre Molekülketten unvernetzt sind. Das heißt die Molekülketten sind ineinander verknäuelt, aber nicht aneinander angeschlossen. Sie können amorph, also völlig unregelmäßig sein, aber auch teilkristallin, was bedeutet, dass sie kleine Bereiche haben, in denen die Molekülketten eine regelmäßige Struktur

aufweisen.
Thermoplaste sind schmelzbar, das heißt sie können im flüssigen oder zähflüssigen Zustand in eine beliebige Form gebracht werden. Diese Eigenschaft ermöglicht es, Thermoplaste zu verschweißen. Thermoplaste haben einen Schmelzbereich und eine Zersetzungstemperatur, die oberhalb des Schmelzbereiches liegt.
Es gibt keine Schmelztemperatur, sondern einen Schmelzbereich, in dem der Kunststoff extrem an Festigkeit verliert.

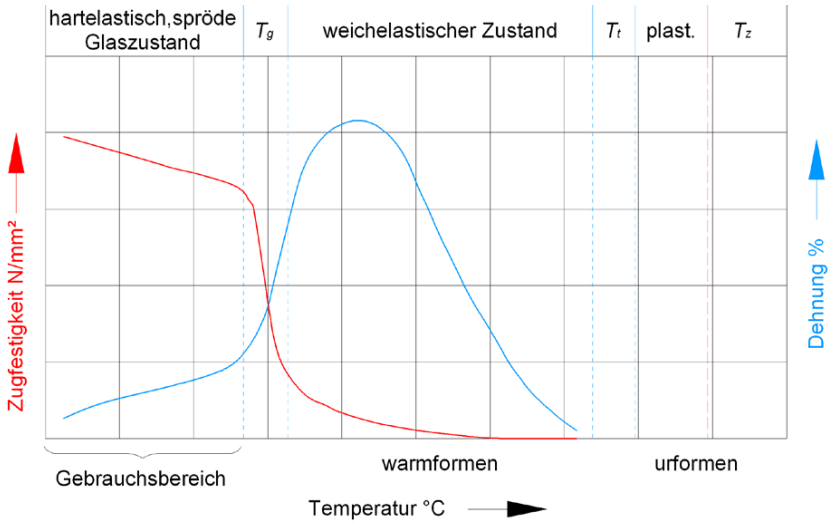


Bild 1: Temperaturabhängiger Zustand amorpher Thermoplaste [Bie77]

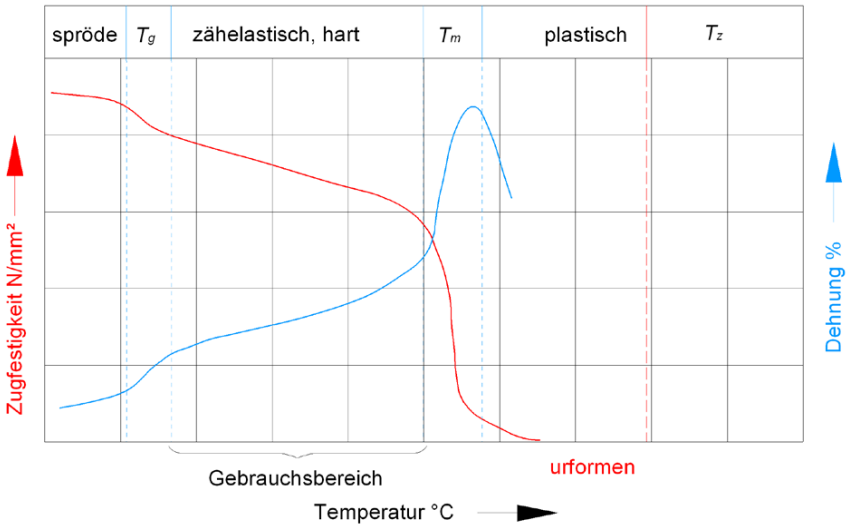


Bild 2: Temperaturabhängiger Zustand teilkristalliner Thermoplaste [Bie77]

1.5.1.2 Elastomere

Elastomere sind leicht vernetzte Kunststoffe. Das heißt, dass die Moleküle auch verknäuelt sind, aber zusätzlich an einigen Stellen auch chemisch miteinander verbunden sind. Die Formgebung dieser Kunststoffe erfolgt vor der Vernetzung. Der Kunststoff wird also zunächst in die gewünschte Form gebracht und dann durch den Prozess der Vulkanisation vernetzt. Danach ist er kaum noch plastisch verformbar. Elastomere sind nach der Vulkanisation nicht mehr schmelzbar.

1.5.1.3 Duroplaste

Duroplaste sind sehr engmaschig vernetzte Polymere. Das Harz wird vor der Härtung in die gewünschte Form gebracht und dann ausgehärtet. Nach dem Aushärten sind Duroplaste weder plastisch verformbar noch schmelzbar.

1.5.2 Geeignete Kunststoffe für Folien

Es gibt mehrere Kunststoffe, die im Fassadenbereich in Folienform verwendet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften sind die Kunststoffe oft nur für bestimmte Zwecke einsetzbar. Die Einsetzbarkeit ermittelt sich aus:

- Mechanische Eigenschaften
- Optische Eigenschaften
- Resistenz gegenüber Umwelteinflüssen

Die Folienwerkstoffe, die im Fassadenbereich eingesetzt werden, die Windlasten abtragen können und deren Lebenserwartung bei sachgemäßem Einbau voraussichtlich 10 Jahre übersteigt, sind bisher noch selten. Bei dieser Anforderungsbeschreibung reduziert sich die große Auswahl an Kunststoffen auf die Materialien:

- ETFE (Ethylen – Tetraflourethylen)
- EFEP (Ethylen – Tetraflourethylen – Hexaflourpropylen Flourterpolymer)

Da im Kunststoffbereich sehr schnelle Entwicklungen zu beobachten sind, ist nicht auszuschließen, dass sich diese Auswahl in naher Zukunft noch vergrößern wird.

Bei Folien handelt es sich prinzipiell um Thermoplaste mit den schon erwähnten Eigenschaften.

Für Folien, die im Innenraum eingesetzt werden, z.B. hinter Glasscheiben oder auch im Scheibenzwischenraum, gibt es weit mehr Materialien, die in Frage kommen. Man findet hier beispielsweise PE, PET oder THV Folien. Bei diesen mechanisch gering beanspruchten Folien ist die Materialvielfalt groß und wird hier nicht vollständig angegeben. Berücksichtigt man dann auch noch die Folien, die aufgeklebt werden oder in Verbundgläsern eingesetzt werden, wird die Liste der Kunststoffe noch länger. Hier alle zur Anwendung kommenden Kunststoffe anzugeben, ist schwer, da Hersteller oft gar nicht das verwendete Material näher spezifizieren, sondern lediglich seine Eigenschaften beschreiben.

1.5.3 Folienherstellung

Die Folienherstellung kann man in drei Schritte unterteilen:

- Polymerisation
- Granulierung
- Extrusion

Bei der Polymerisation werden einzelne Moleküle zu Molekülketten zusammengefügt. Der Polymerisationsgrad ist die Anzahl von Monomeren, die im Polymer zusammengefügt werden. ETFE ist ein Copolymer, was bedeutet, dass unterschiedliche Monomere zusammengefügt werden. Bei ETFE werden Ethen- und Tetraflourethen-Monomere zusammengefügt, wobei das Copolymer zu 25% aus Ethen- und zu 75% aus Tetraflourethen-Monomeren besteht.
Nach der Polymerisation wird das gewonnene Kunststoffpulver zu Granulat verarbeitet. Dieses Granulat wird dann vom Folienhersteller wieder geschmolzen und im Breitschlitz-Extrusionsverfahren in die Folienform gebracht. Lieferbare Rollenbreiten hängen von der Extrusionsmaschine ab und sind häufig auf 1,55 m begrenzt. Die Folienstärke liegt zwischen 12 und 250 µm. Asahi Glas bietet inzwischen auch Rollenbreiten bis 2,10 m an, allerdings nur bis zu einer Materialstärke von 160 µm.

1.5.4 Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften der Folien hängen stark von der Temperatur ab. Zwar haben die Folien eine sehr hohe Schmelztemperatur, trotzdem ändern sich auch schon bei Gebrauchstemperaturen die mechanischen Kennwerte. Ein anderer wichtiger Faktor ist die Tatsache, dass es sich bei den Folien um ein Material handelt, was sich bei keiner Belastung elastisch verhält. Es gibt einen Belastungsbereich bei kleinen Spannungen und kleinen Dehnungen in dem man von einem visko-elastischen Verhalten spricht. Danach folgt ein sehr großer plastischer Bereich, in dem sich die Spannungen bis zum Bruch noch etwa verdoppeln, aber die Dehnungen drastisch zunehmen. Die Längenänderung im plastischen Bereich kann bis zur drei- bis vierfachen Ausgangslänge führen. Dieser Bereich ist für bautechnische Zwecke kaum nutzbar, ist aber im Überlastungsfall sehr positiv, da eine weit durchhängende Folie auf Grund ihrer Geometrie besser Lasten aufnehmen kann und der Versagensfall deutlich vorher erkennbar ist.
In einigen Kunststoffen kommt es durch das Extrusionsverfahren zu einer Ausrichtung der Moleküle in Extrusionsrichtung. Eine Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften in Extrusionsrichtung und quer dazu konnte aber bei ETFE und EFEP nicht festgestellt werden.

1.5.5 Optische Eigenschaften

Die Folien haben eine bessere Lichtdurchlässigkeit als Glas, was nicht unbedingt bedeutet, dass die vom Nutzer wahrgenommene Transparenz besser ist. ETFE hat die Eigenschaft etwas milchig zu sein, was darauf hindeutet, dass es im Herstellungsprozess beim Erkalten zur Teilkristallisation kommt. EFEP hat dieses Problem nicht.
Die bessere Lichtdurchlässigkeit der Folien, vor allem im UV-Bereich, hat in erster Linie seine Vorteile in Bereichen, in denen es um Pflanzenwachstum geht und in zoologischen Bereichen. Geringere Lichtdurchlässigkeiten sind durch entsprechende Beschichtungen oder Pigmentierung zu erreichen.

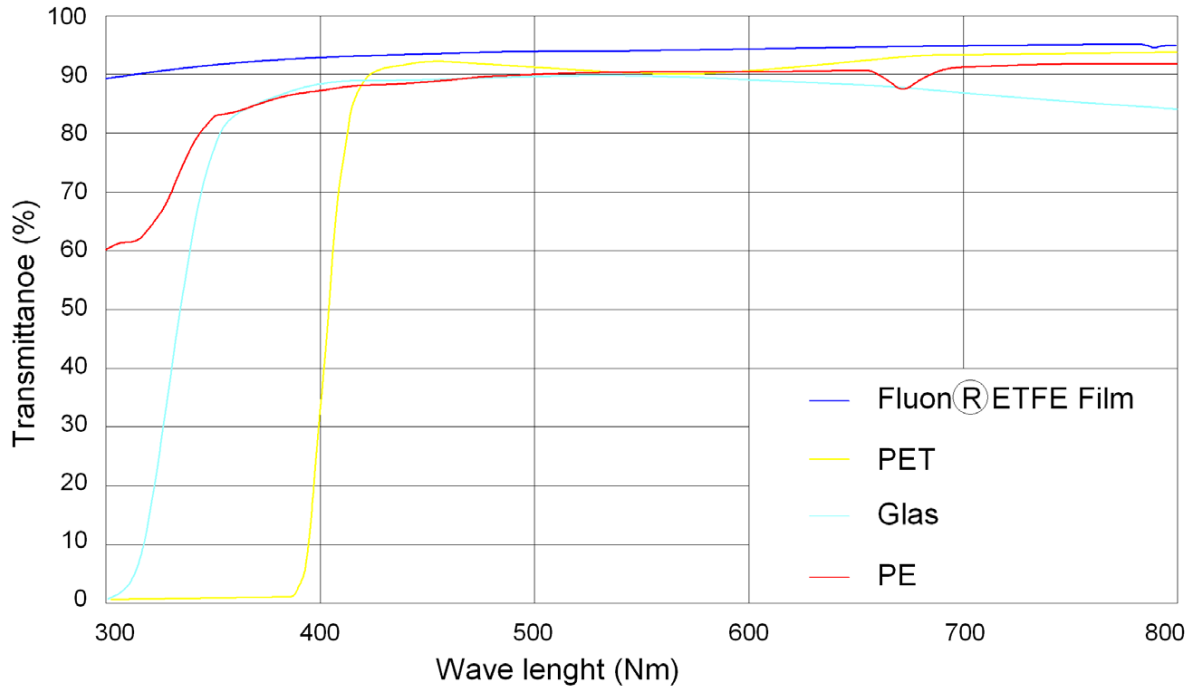


Bild 3: Lichtdurchlässigkeit von ETFE im Vergleich [Flu07]

1.5.6 Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit von Kunststoffen wird wesentlich von der UV-Resistenz beeinflusst. ETFE hat diese Resistenz bereits im Langzeiteinsatz an Gebäuden unter Beweis gestellt. Kunststoffen, die nicht strukturbedingt UV-resistent sind, müssen UV-Stabilisatoren beigemischt werden, die dem Kunststoff für einen gewissen Zeitraum Schutz bieten. Da die Entwicklung von immer neuen Kunststoffen aber schnell voran geht, kann man nicht jeden Kunststoff erst 20 Jahre testen, bis er zum Einsatz kommt. Für diesen Zweck gibt es Versuchsapparaturen mit UV-Lampen, die durch eine hohe Konzentration an UV-Strahlen gewisse Zeiträume quasi im Zeitraffer ablaufen lassen können. Die Kunststoffe können anschließend auf mechanische und optische Veränderungen untersucht werden. Somit kann auch die UV-Beständigkeit für den noch relativ neuen Folienwerkstoff EFEP bestätigt werden.

Kunststoffe, die UV-empfindlich sind, können trotzdem im Fassadenbereich eingesetzt werden, müssen aber durch eine Glasscheibe vor dem UV-Licht geschützt werden. Für viele Kunststoffe ist dieser Schutz ausreichend. Beispielsweise können Folienrollos aus PE-Folie nur auf diesem Weg eingesetzt werden. Im Gewächshausbau wird bewusst in Kauf genommen, dass die Folien nach ein bis fünf Jahren wieder erneuert werden müssen. Die hierbei häufig verwendete LDPE-Folie wird mit einer UV-Beständigkeit von maximal vier Jahren angeboten und muss dann wieder erneuert werden.

1.5.7 Brandverhalten

Eine pauschale Aussage über Kunststoffe lässt sich hier nicht treffen. Die speziell für den konstruktiven Folienbau relevanten Werkstoffe ETFE und EFEP gehören beide zu den Thermoplasten. Das heißt, dass es bei Temperaturerhöhung zunächst zum Schmelzen des Werkstoffs kommt und im Brandfall, also sehr hohen Temperaturen, auch zur Zersetzung des Werkstoffs. ETFE hat für die Brandsicherheit eine Bauaufsichtliche Zulassung der Materialprüfanstalt Universität Stuttgart: „Transparente oder weiße oder bedruckte ETFE-Folie „NOWOFOL ET-Folie 6235“ als schwer entflammbarer Baustoff (Baustoffklasse DIN 4102-B1)“, beantragt von der Firma NOWOFOL. Diese bescheinigt dem Werkstoff eine Baustoffklasse DIN 4102-B1. Der Werkstoff ist selbstlöschend, das bedeutet, sobald die Feuerquelle beseitigt ist, hört auch die Folie sofort auf zu brennen. Die Folie tropft nicht brennend ab.
Bei EFEP besteht das wesentliche Problem darin, dass bei Temperaturen oberhalb von 280°C toxische Gase entstehen, was die Verwendung für das Bauwesen stark einschränkt oder sogar ausschließt.

2 Fassadenkonstruktion

2.1 Anforderungsprofil von modernen Fassaden

2.1.1 Energiebilanz

Der Gesetzgeber gibt vor, dass Energie einzusparen ist. Dies ist in der Energiesparverordnung EnEV geregelt. Die DIN 4108 regelt den Wärmeschutz im Hochbau. Nach DIN 4108 ist eine Gesamtbilanzierung des Energiehaushalts eines Gebäudes möglich, inklusive solarer Wärmegewinne und interner Wärmequellen.
Die Einflussgrößen für den Energiehaushalt eines Gebäudes sind:
• Transmissionswärmeverluste infolge Wärmeleitung in den Bauteilen und Wärmeübergang an den Bauteiloberflächen.
• Lüftungswärmeverlust infolge Luftaustausch warmer Raumluft durch kalte Außenluft.
• Solare Wärmegewinne infolge direkter Strahlungstransmission durch transparente Bauteile bzw. durch Strahlungsabsorption an den Oberflächen nicht transparenter Bauteile.
• Interne Wärmegewinne infolge Betrieb elektrischer Geräte, künstlicher Beleuchtung, Körperwärme von Mensch und Tier.
• Die für Heizzwecke nutzbaren solaren und internen Wärmegewinne hängen vom Ausnutzungsgrad ab, in den die wirksame Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes eingeht.
(DIN V 4108-6 Seite 11)
Bei der Fassade geht es also in energetischer Hinsicht um:
• U-Wert
• Fensterflächenanteil und g-Wert
• Tageslichtnutzung
• Natürliche Lüftung
Die Optimierung einer Fassade ist offensichtlich weit mehr als die klassische Optimierung des U-Wertes. Das Problem der Fassade ist komplexer geworden und hat sich auch aufgrund der Optimierung von Bauteilkennwerten verlagert. So ist z.B. die Nachtauskühlung im Sommer immer komplizierter geworden, weil die optimierten U-Werte der Fassade die Wärme nicht mehr so schnell aus dem Gebäude entweichen lassen. Computer sind mittlerweile zu einem echten Wärmeproblem geworden. Lüftung von Wohnbereichen ist seit den immer besser abgedichteten, teilweise mit „Blowtest“ überprüften, Fassaden immer wichtiger geworden. Dies alles führt zu neuen Anforderungsprofilen, bei denen nicht nur die physikalischen Fakten, sondern auch das subjektive Empfinden des Nutzers befriedigt werden muss und architektonischen Ansprüchen an die Ästhetik genüge getan werden soll.

2.1.2 Nutzerkomfort

Die Anforderungen, die an eine Fassade gestellt werden, sind sehr vielfältig und hängen stark von der Nutzung und der Umgebung des Gebäudes ab.
Sofern es sich um ein Gebäude handelt, in dem gearbeitet wird, ist die Arbeitsstättenverordnung einzuhalten. Hierin wird festgelegt, dass „…während der Arbeitszeit unter Berücksichtigung des Arbeitsverfahrens, der körperlichen Beanspruchung der Beschäftigten und des spezifischen Nutzungszwecks des Raumes eine gesundheitlich zuträgliche Raumtemperatur bestehen…“ muss [VüA04].
Das Landgericht Bielefeld hat in einem Urteil von 2003 festgelegt, dass bei einer maximalen Außentemperatur von 32°C die Temperatur in einem Büro nicht über 26°C steigen darf. Sollte die Außentemperatur über 32°C liegen, muss das Büro mindestens 6°C kälter sein. [Wdr03]
Auch der Lärmpegel muss so niedrig wie betriebsbedingt möglich gehalten werden.
Außerdem „…muss in umschlossenen Arbeitsräumen unter Berücksichtigung der Arbeitsverfahren, der körperlichen Beanspruchung und der Anzahl der Beschäftigten sowie der sonstigen anwesenden Personen ausreichend gesundheitlich zuträglich Atemluft vorhanden sein.“ [VüA04]
All diese Punkte sind Faktoren, die direkt oder indirekt Einfluss auf die Konstruktion der Fassade nehmen.
Abgesehen von den oben erwähnten Anforderungen gibt es noch eine Reihe anderer Anforderungen, die hier noch einmal zusammengestellt sind.

- Schutz vor Wind
- Schutz vor Regen
- Schutz vor Kälte
- Schutz vor Wärme
- Schutz vor Sonnenstrahlung
- Schutz vor Pollen
- Schutz vor Geruch
- Schutz vor Staub
- Schutz der Privatsphäre
- Schutz vor Tieren
- Schutz vor Einbruch
- Schutz vor Lärm
- Natürliche Beleuchtung
- Natürliche Belüftung
- Optischer Kontakt zur Umwelt

Nicht alle diese Punkte können in maximaler Qualität in einer Fassade realisiert werden, da sie sich teilweise direkt widersprechen oder zumindest ungünstig gegenseitig beeinflussen.

Es ist also leicht einzusehen, dass es nicht die perfekte Fassade für alle Anwendungen gibt, nur eine bestmögliche Kombination von Möglichkeiten zu einer individuellen Problemstellung. Aus diesem Grund ist eine große Vielfalt von Konstruktionen entstanden, die alle auf verschiedene Weise mit den Themen Wärme, Licht, Lärm und Luft umgehen.
Die im Folgenden betrachteten Konstruktionen sind mehrschichtige Fassadenkonstruktionen. Diese Konstruktionen entstanden als Weiterentwicklung der einschichtigen Fassade mit Isolierverglasung und haben gegenüber der einschichtigen Fassaden die folgenden Vorteile:
- Sonnenschutz ist vor Witterungseinflüssen und Verschmutzung geschützt
- Natürliche Belüftung auch bei widrigen Außenbedingungen und auch zur Nachtauskühlung möglich
- Optimierung des Schallschutzes
- Reduzierung des Wärmeverlustes im Winter

2.2 Fassadentypen

Fassaden können auf unterschiedliche Arten systematisiert werden. Zunächst wird unterschieden zwischen ein- und zweischaligen Fassaden. Die einschaligen Fassaden können nach der Anordnung der Fenster in Lochfassaden, Fensterbandfassaden oder Glasfassaden unterschieden werden. Bei den zweischaligen Fassaden ist die konstruktiv-lüftungstechnische Differenzierung am gebräuchlichsten.
Es wird unterschieden zwischen:
- Abluftsystemen
- Puffersystemen
- Zweite-Haut-Systeme

Bei den Abluftsystemen wird die verbrauchte Luft des Innenraumes durch den Fassadenzwischenraum (FZR) geführt, um diesen im Winterfall zu wärmen und im Sommerfall mit der etwas kühleren Innenraumluft zu kühlen. Je nachdem wie groß die Einheiten sind, über die die Abluft geführt wird, kann dieser Typ weiter unterteilt werden.
Die Puffersysteme haben die Funktion die Fassadentiefe und somit auch den U-Wert der Fassade zu erhöhen. Der Zwischenraum wird nicht für die Belüftung verwendet.
In Zweite-Haut-Systemen wird die äußerste Fassadenschicht mit Frischluft hinterlüftet. Somit ist bei geöffnetem Fenster in der inneren Fassadenschicht eine natürliche Belüftung möglich. Es gibt unterschiedliche Arten der Luftführung nach denen man diesen Fassadentyp weiter unterteilen kann.

2.2.1 Abluftsysteme

Die kleinste mögliche transparente Einheit ist das Fenster in einer Lochfassade. Bei dem so genannten Abluftfenster wird zusätzlich zur Isolierverglasung eine Einfachverglasung eingebaut. Diese Einfachverglasung kann auf der Außen- oder Innenseite liegen. Am oberen oder unteren Rand des Zwischenraumes wird die verbrauchte Luft aus dem Innenraum

angesaugt und auf der gegenüberliegenden Seite vom Innenraum in den Zwischenraum geführt. Diese Systeme sind nicht zu öffnen.
Im Zwischenraum kann ein Sonnenschutz installiert werden, der durch die stetig vorbei strömende Luft effektiv gekühlt werden kann und nicht der Witterung ausgesetzt ist.
Bei einer vollflächigen Verglasung spricht man nicht mehr vom Abluftfenster, sondern von einer Abluftfassade, bei der die Luft an der Decke oder im Fußboden angesaugt wird und an der gegenüberliegenden Seite über Öffnungen von Innenraum in den Fassadenzwischenraum eingelassen wird.
Eine dritte Möglichkeit ist die mehrgeschossige Abluftfassade, bei der mehrere Geschosse zusammen in einer Ebene entlüftet werden. Jedes Geschoss hat somit eine Entlüftung zum Fassadenzwischenraum, aber nicht in jedem Geschoss wird die Luft abgesaugt.
Ziel von Abluftsystemen ist es, die innere Verglasung mit der Raumtemperatur so abzukühlen oder aufzuheizen, dass die Temperaturdifferenz von Glasoberfläche und Raumluft minimiert wird.

Positive Eigenschaften:
- Geschützter Sonnenschutz
- Energetisch sinnvolle Nutzung der Abluft
- Optimierung des Schallschutzes

Negative Eigenschaften:
- Keine natürliche Lüftung möglich

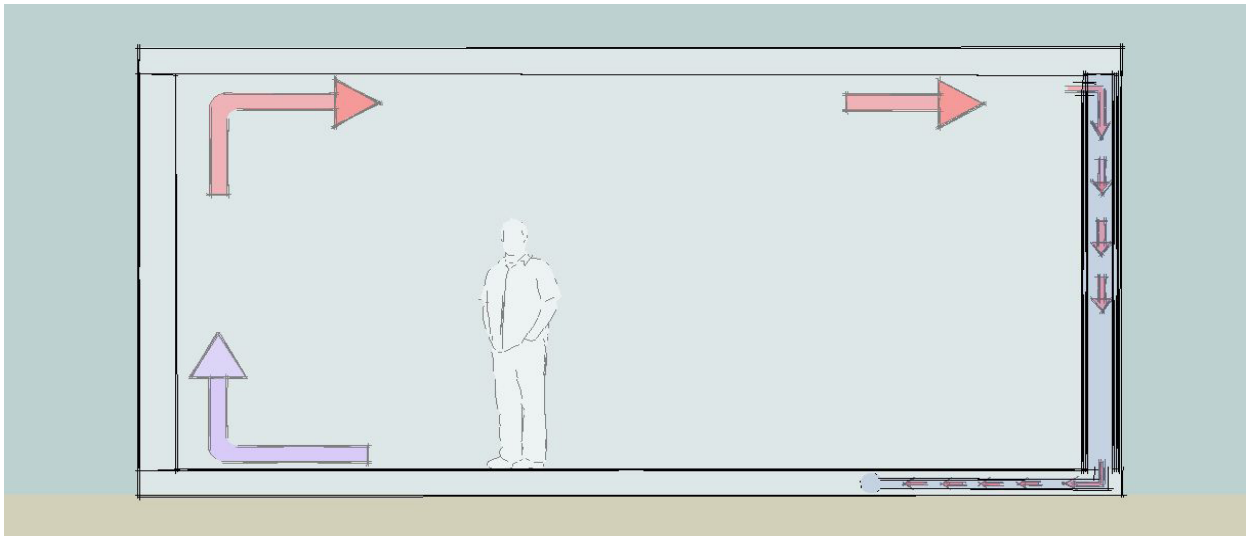


Bild 4: Abluftfassade

2.2.2 Puffersysteme

In Puffersystemen wird der Fassadenzwischenraum als zusätzlich isolierende Schicht genutzt. Es wird weder aus dem Innen- noch aus dem Außenbereich Luft zugeführt oder entnommen. Die Verglasung auf der Innenseite ist eine Isolierverglasung, die äußere Schicht ist meist eine Einfachverglasung, kann aber auch als zweite Isolierverglasung ausgeführt werden. Denkbar ist in solchen Systemen eine mechanische Umwälzung der Luft innerhalb des Fassadenzwischenraumes, um die stärker erwärmte Luft auf der Südseite auf die Nordseite zu transportieren sofern der FZR nicht unterteilt ist.

Positive Eigenschaften:
- Geschützter Sonnenschutz
- Optimierung des winterlichen Wärmeschutzes
- Optimierung des Schallschutzes

Negative Eigenschaften:
- Aufheizung des FZR
- Keine natürliche Belüftung möglich

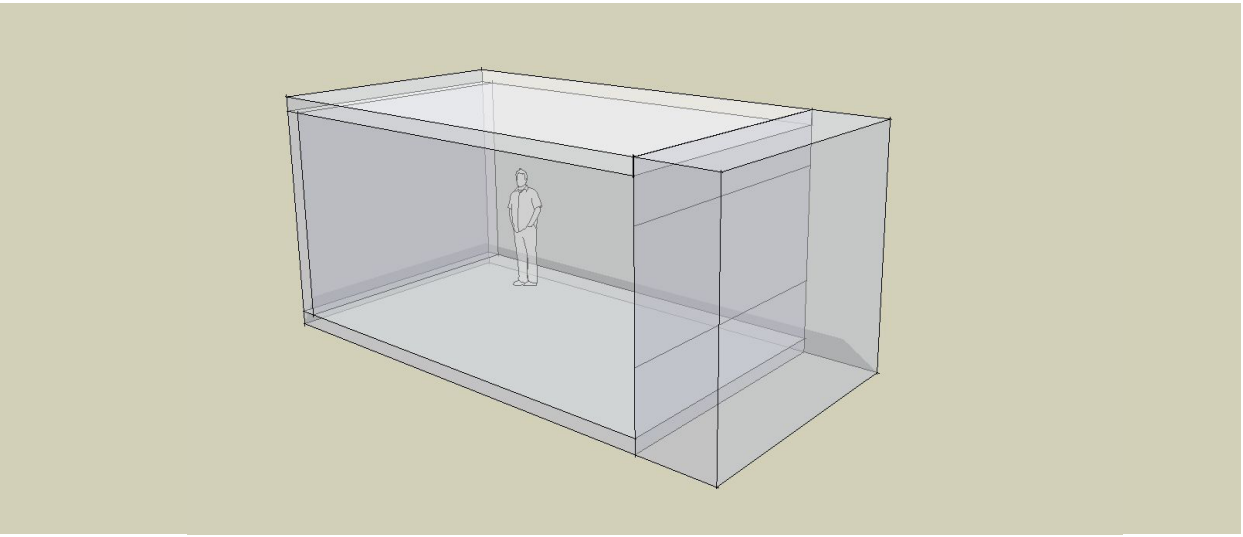


Bild 5: Pufferfassade

2.2.3 Zweite-Haut-Systeme

Zweite-Haut-Systeme haben in ihrer äußeren Schicht Lüftungsöffnungen, die regelbar sein können, aber nicht müssen. So wird der Fassadenzwischenraum mit Frischluft versorgt und es kann Wärme aus dem FZR abgeführt werden. Ist die innere Fassadenebene mit Fensteröffnungen versehen, ist auch die Abführung verbrauchter Luft über den FZR möglich. Dieser Fassadentyp wird anhand der Art der zusammengeschalteten Module unterteilt. Sind mehrere Fassadenmodule übereinander zu einem gemeinsamen FZR zusammengeschaltet, spricht man von einer Schachtfassade. Sind hingegen mehrere Module nebeneinander

zusammengefasst, handelt es sich um eine Korridorfassade. Die Fassadenlüftung funktioniert auf natürliche Weise: Die wärmere Luft steigt auf und zieht kühle Luft aus dem Außenbereich nach. Dieser natürliche Lüftungsprozess funktioniert umso besser, je größer die Temperaturdifferenz innerhalb des FZR ist. Schachtfassaden haben hier einen Vorteil gegenüber der Korridorfassade, da durch die wesentlich größere Höhe des FZR der sogenannte Kamineffekt sich viel besser ausbilden kann. Das Problem, das dieses Prinzip mit sich bringt, ist offensichtlich. Am oberen Ende des Schachts ist die Luft im FZR wärmer als im unteren, wo die frische Außenluft nachströmt. Hier ist ein sinnvoller Kompromiss zu finden zwischen der wünschenswerten Höhe des Schachts für den Kamineffekt und der größer werdenden Hitze im oberen Bereich, je höher er wird.
Liegen mehrere voneinander getrennte FZRs übereinander, ist darauf zu achten, dass die Abluft des unteren FZRs nicht in die Zuluftöffnungen des oberen einströmt. Die Öffnungen müssen also möglichst weit voneinander entfernt sein. Es ist bei übereinanderliegenden getrennten FZRs nicht möglich Zu- und Abluftöffnungen über die gesamte Fassadenbreite zu führen, da in diesem Fall die gesamte Abluft des unteren FZRs in den oberen einströmen würde und eine Frischluftzufuhr nicht stattfinden würde.

Positive Eigenschaften:
- Geschützter Sonnenschutz
- Optimierung des Schallschutzes
- Natürliche Belüftung ist witterungs- und tageszeitunabhängig möglich

Negative Eigenschaften:
- Schallübertragung von Nachbarräumen über den FZR möglich
- Lüftungsöffnungen in der Außenhaut setzen den Schallschutz etwas herab.

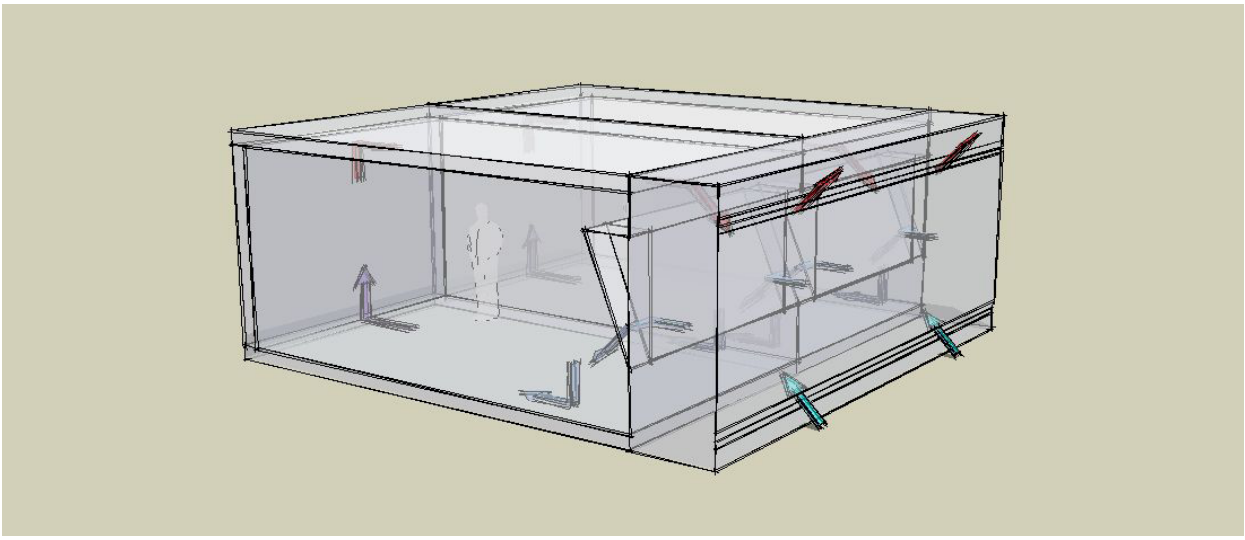


Bild 6: Korridorfassade

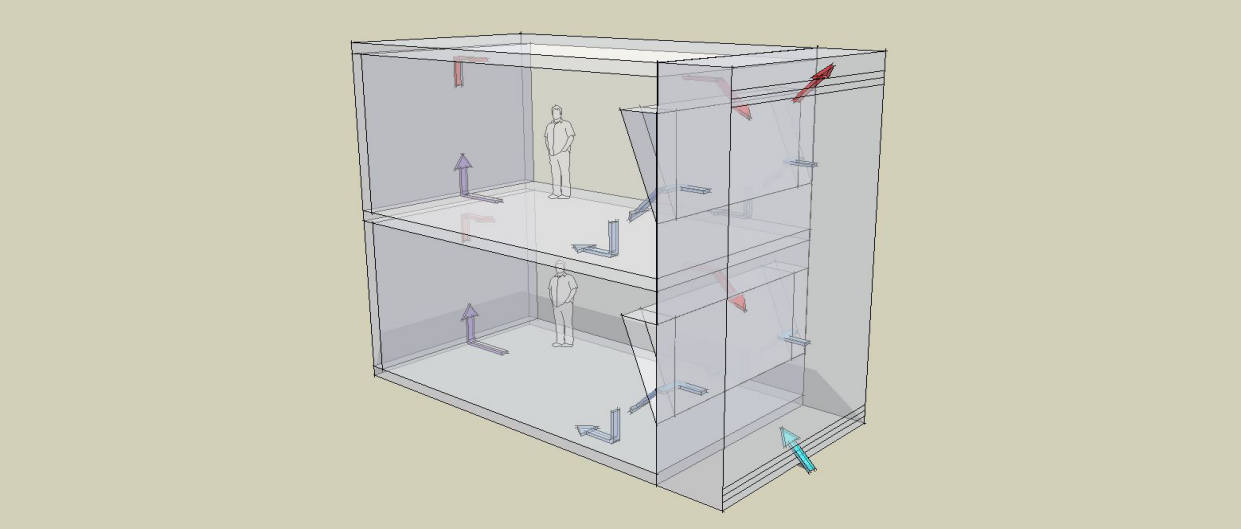


Bild 7: Schachtfassade

2.2.4 Kombinationen

Auch eine Kombination der Pufferfassade und der Zweite-Haut-Fassade ist möglich. Die Zweite-Haut-Fassade kann mit verschließbaren Lüftungsöffnungen ausgestattet werden, sodass im geschlossenen Zustand eine Pufferfassade entsteht, mit allen Vor- und Nachteilen dieses Fassadentyps. Die natürliche Belüftung wäre hierbei im Pufferfassadezustand nicht sinnvoll, was entweder eine automatische Verriegelung der inneren Fenster notwendig macht oder aber, wenn dies nicht automatisch geschieht, einen geschulten Benutzer, der weiß, dass die Lüftung im Pufferbetrieb nachteilig ist.

2.3 Probleme von Doppelfassaden

Aufgrund der Vielfalt von Fassadensystemen ist es nicht ganz einfach diesen Punkt prinzipiell zu beantworten. Es soll in diesem Abschnitt nur auf Risiken aufmerksam gemacht werden.

Temperatur:
Generell ist die Aufheizung des FZRs ein Problem von Doppelfassaden. Im FZR wird meist der Sonnenschutz installiert, der sich unter Sonneneinstrahlung stark aufheizen kann. Ein aufgeheizter Körper emittiert langwellige Strahlung oberhalb von 3000nm. Für diese Strahlung ist das Glas nahezu undurchsichtig. Es kommt also zum so genannten Treibhauseffekt, weil die Wärmestrahlung im FZR eingeschlossen ist.
Die Abluftfassade und Zweite-Haut-Fassade führen diese Wärme auf unterschiedliche Weise ab. In hohen zusammenhängenden FZRs bewirkt die Erwärmung eine sehr gute thermische Luftbewegung, die für einen hohen Luftwechsel im FZR sorgt. Auf der anderen Seite bedingt diese Thermik natürlich auch, dass der FZR im oberen Bereich deutlich wärmer ist als unten, was sich dann wiederum auf den thermischen Komfort der angrenzenden Räume niederschlägt.

Schallschutz:
Ein weiteres Problem, was bei der Zweite-Haut-Fassade schon angesprochen wurde, ist die Schallübertragung über den FZR. Der FZR ist auf der Gebäudeseite und der Außenseite durch Glas begrenzt. Glas ist ein sehr hartes und glattes Material, das hervorragend Schall reflektiert. Bei der natürlichen Fensterlüftung in einer Korridor- oder Schachtfassade gibt es zwischen den zusammengefassten Elementen keine Bauteile, die den Schall absorbieren können. Lediglich die Begrenzungen zu den angrenzenden FZRs können schallabsorbierend ausgeführt werden. Geräusche aus dem Nebenzimmer werden also mit sehr geringer Dämpfung zu den Nachbarräumen übertragen. Die Lärmquellen in einem Büro sind meist eindeutig identifizierbare Geräusche wie z.B. Gespräche oder Tastaturtippgeräusche. Diese Geräusche werden als viel störender empfunden als undefinierbare Geräusche. Der Schall aus dem Nachbarzimmer ist also störender als der Schall von der Straße (bei gleicher Lautstärke).

Natürliche Lüftung:
Fassadentypen, die diese Möglichkeit nicht bieten, werden vom Nutzer nicht gut angenommen. Der Nutzer eines Büros möchte sein Raumklima beeinflussen können. Außerdem bringt die natürliche Lüftung auch mit sich, dass man Umwelteinflüsse, wie Geräusche und Gerüche wahrnimmt, die einem das Gefühl geben am Außenleben teilzuhaben.

2.4 Folienfassaden

Die hier unter dem Begriff der Folienfassade gemeinten Konstruktionen sind solche, bei denen die Folie sichtbar in die Fassade eingefügt wird. Konstruktionen, bei denen die Folie nur als Dampfsperre oder –bremse in einem opaken Bauteil Verwendung findet, sind von den folgenden Betrachtungen ausgeschlossen. Man kann den Einsatz von Folien in drei Kategorien unterteilen, die hier in der Reihenfolge der mechanischen Belastung aufgeführt sind:

- Aufgeklebte Folien
- Folien in windgeschützten Bereichen (Fassadenzwischenraum (FZR), Scheibenzwischenraum (SZR) oder Innenraum)
- Folien für Windlastabtrag

Die Folie kann innerhalb einer Fassade unterschiedliche Funktionen übernehmen, die von ihrer Position innerhalb der Fassade, von ihrer Befestigung und von der mechanischen Beanspruchbarkeit der Folie abhängen.

Sie kann den Gesamtenergiedurchlassgrad (G-Wert) und den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) beeinflussen, kann Lasten aufnehmen, aber keinen akustischen Schutz vor der Umwelt darstellen.

Durch ihre geringe Dicke hat die Folie nahezu keine wärmedämmenden Eigenschaften und somit keinen nennenswerten Einfluss auf den U-Wert. Die dämmende Wirkung einer Folienkonstruktion wird durch das Einschließen von Luft erreicht, die wiederum, wenn sie als ruhend angenommen werden kann, eine wärmedämmende Wirkung hat, die einem PUR Hartschaum der WLGr 020 entspricht. Es ist also möglich mit Hilfe von zwei oder mehreren Folien eine wärmegedämmte Fassade herzustellen.

Folie ist außerdem in der Lage, mechanische Beanspruchungen aus Wind, Schnee, Regen und sogar Hagel aufzunehmen, ohne dauerhaft Schaden zu nehmen. Im Fall eines Hagelsturms ist einschränkend zu sagen, dass es hier zu dauerhaften Verformungen nicht ausgeschlossen werden kann.

Folie kann keinen Schall abzuweisen. Schall der auf die Folie trifft, regt die Folie zu Schwingungen an, sodass der Schall nahezu ungedämpft übertragen wird. Es wird allerdings auch nahezu kein Schall an der nachgiebigen Oberfläche reflektiert, was der Schallübertragung innerhalb eines Fassadenzwischenraums günstig entgegenwirkt.

2.4.1 Aufgeklebte Folien

Folien, die direkt auf das Glas aufgebracht werden, können mehreren Zwecken dienen:

- Beeinflussung der Durchsicht (Sichtschutz für den Nutzer)
- Beeinflussung der solaren Wärmeeinstrahlung (G-Wert)
- Schutz vor UV-Strahlung
- Schutz des Glases vor Kratzern und Graffiti (Verschleißschicht)
- Optimierung der einbruch- und durchwurfhemmenden Wirkung des Glases
- Bei einem Zersplittern der Scheibe werden die Splitter von der Folie zusammengehalten (Explosionsschutz)

Diese Folien können nachträglich zur Fassadenoptimierung aufgebracht werden, können aber auch bei Neubauten eingesetzt werden.
Die Durchsichtigkeit kann mit Folien ganz oder auch nur teilweise behindert werden. Die Folie kann mit einem entsprechenden Muster versehen werden. Das Ergebnis sind vollständig oder partiell transluzente Flächen. Der optische Eindruck entspricht dann dem von Ornamentgläsern oder bedruckten Gläsern.
Die Beeinflussung des G-Werts wird über die Reflexion von sichtbarem und unsichtbarem (UV und IR) Licht gesteuert. Ziel ist es, einen möglichst großen Teil des unsichtbaren Lichts zu reflektieren, da das die Durchsichtigkeit nicht beeinflusst. Die Reflexion von sichtbarem Licht wird als Spiegelung wahrgenommen und ist bei effektivem Sonnenschutz nicht ganz vermeidbar.
Der Schutz vor UV-Strahlung ist, vor allem im Einzelhandel, ein wichtiger Punkt, um Schaufensterauslagen vor Ausbleichung zu schützen, aber auch Verfärbungen an Kunststoffteilen in Büroräumen sind auf UV-Strahlung zurückzuführen. Letzteres stellt allerdings kein nennenswertes wirtschaftliches Risiko für den Betreiber dar, im Gegensatz zu ausgeblichenen Schaufensterauslagen im Einzelhandel.
Der Schutz vor Kratzern (Scratching) und Graffiti durch Folien stellt vor allem in öffentlichen Bereichen wie Bahnhöfen, Bushaltestellen, verglasten Werbetafeln usw. ein großes Einsparpotential dar, da aufwendige Reparaturen vermieden werden. In öffentlichen Verkehrsmitteln in Berlin ist es schon nicht mehr wegzudenken.
Die Funktion einer Folie als Schutz gegen die Folgen von Explosionen ist sicherlich bei Neubauten besser durch eine entsprechende Glaswahl zu gewährleisten, bei Bestandsbauten ist aber die Folie eine sinnvolle Alternative. Die Glasflächen der Waterloo Station in London konnten im laufenden Betrieb mit Folien beklebt werden und somit weitgehend gegen die Folgen von Glasbruch durch Explosion, Vandalismus und Hagelschlag geschützt werden.[Orp05]

2.4.2 Reine Folienkonstruktionen

Als reine Folienkonstruktionen sind solche Fassaden gemeint, die aus einer Unterkonstruktion bestehen, zwischen der Folien gespannt sind. Sie verzichtet also vollkommen auf Glaselemente als transparente Füllung der Fassade. Manipulatoren, wie Raffstores, Markisen, Gitterroste sind aber auch aus anderen Materialien denkbar. Es ist offensichtlich, dass solche Fassaden nicht universell einsetzbar sind. Das trifft aber auch bei sinnvollem Einsatz von Fassaden auf alle anderen Konstruktionsformen zu.
Die größte Hemmschwelle für den Bauherrn und den Nutzer stellt sicherlich der Schutz von unbefugtem Zutritt und Vandalismus dar. Um dieses Argument zu entkräften, ist ein Einsatz solcher Fassaden entweder erst ab einer Höhe zu empfehlen, die nicht mehr ohne technischen Aufwand vom Erdboden erreichbar ist, bei Gebäuden, die auf überwachtem Gelände gebaut werden oder Schutz der unteren Stockwerke durch zusätzliche Konstruktionen innerhalb

oder vor der Fassade.
Die Bedenken gegenüber außergewöhnlichen Fassadenlösungen sind im eher konservativen Baugewerbe normal, sind allerdings bei näherer Betrachtung fragwürdig, da auch eine normale Glasscheibe mit geeignetem Werkzeug relativ geräuscharm zerstört werden kann. Auch der Vandalismus ist, wie schon im Kapitel „Aufgeklebte Folien“ beschrieben, kein Problem, das Folienkonstruktionen vorbehalten ist. Auch oder gerade Glasscheiben sind oft Ziel von Vandalismus.
Die zweite vermeintliche Schwäche liegt in der Wärmedämmung. Die Versuchsreihe, die in dieser Arbeit beschrieben wird, zeigt dass ein zweilagiges Kissen nicht den heutigen Anforderungen an Wärmedämmstandards gewachsen ist. Mehrlagige Systeme und Oberflächenbeschichtungen könnten aber Werte erreichen, die die Folie für den normalen Gebäudeeinsatz qualifizieren.
Zur Formenvielfalt im Membranbau ist schon viel geschrieben worden. Die Formen, die sich im konstruktiven Folienbau ergeben, entstehen aus der Art der Vorspannung. Deshalb soll hier zunächst ganz allgemein beschrieben werden, welche Arten der Vorspannung existieren, um im Anschluss einige Möglichkeiten von Fassadenmodulkonstruktionen zu zeigen.

2.4.2.1 Vorspannung

Folien haben prinzipiell keinerlei Biegesteifigkeit. Es müssen also alle Lasten über Normalkräfte in der Ebene der Folie abgetragen werden. Eine eben gespannte Folie muss sich bei normal zur Fläche einwirkender Last zunächst verformen, damit die inneren Kräfte der äußeren Last entgegen wirken. In der zweidimensionalen Darstellung ist die Notwendigkeit der Verformung leicht zu erkennen.

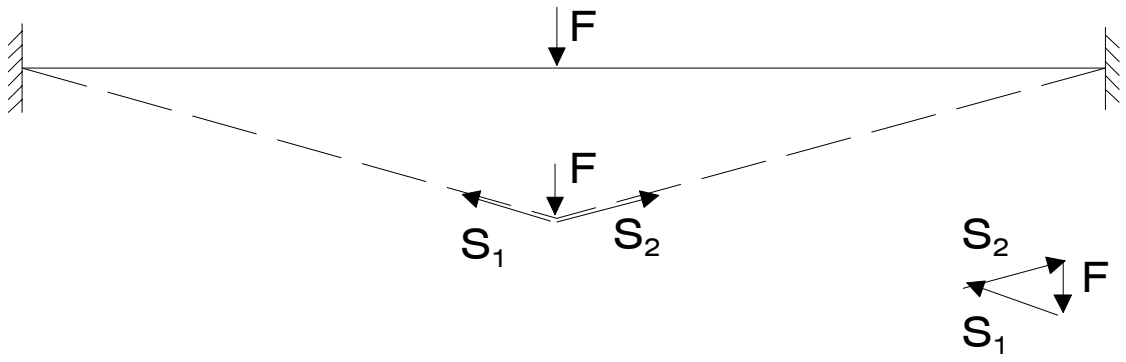


Bild 8: Seilverformung unter Auflast

Spannt man nun die Folie vor, ist die innere Kraft größer und die notwendige Verformung, um die äußere Last aufnehmen zu können, geringer.

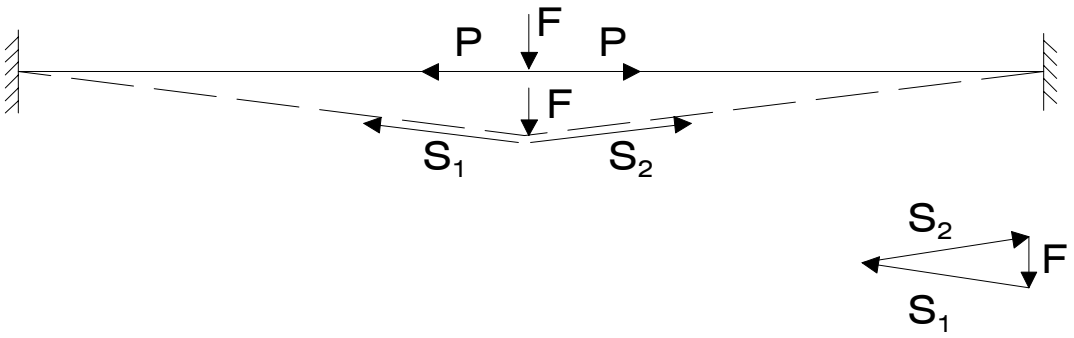


Bild 9: Verformung eines vorgespannten Seils unter Auflast

Noch geringer wird die Verformung, wenn die Folie gegensinnig gekrümmt (antiklastisch gekrümmt) eingebaut wird. Bei dieser Form kann man, in Abhängigkeit von der Richtung des Lastangriffs, in eine Trag- und eine Spannrichtung unterteilen. Die Tragrichtung bildet für die angreifende Last eine Seillinie, die von der Spannrichtung nach unten gezogen wird. Die Spannrichtung spannt also die Tragrichtung vor.

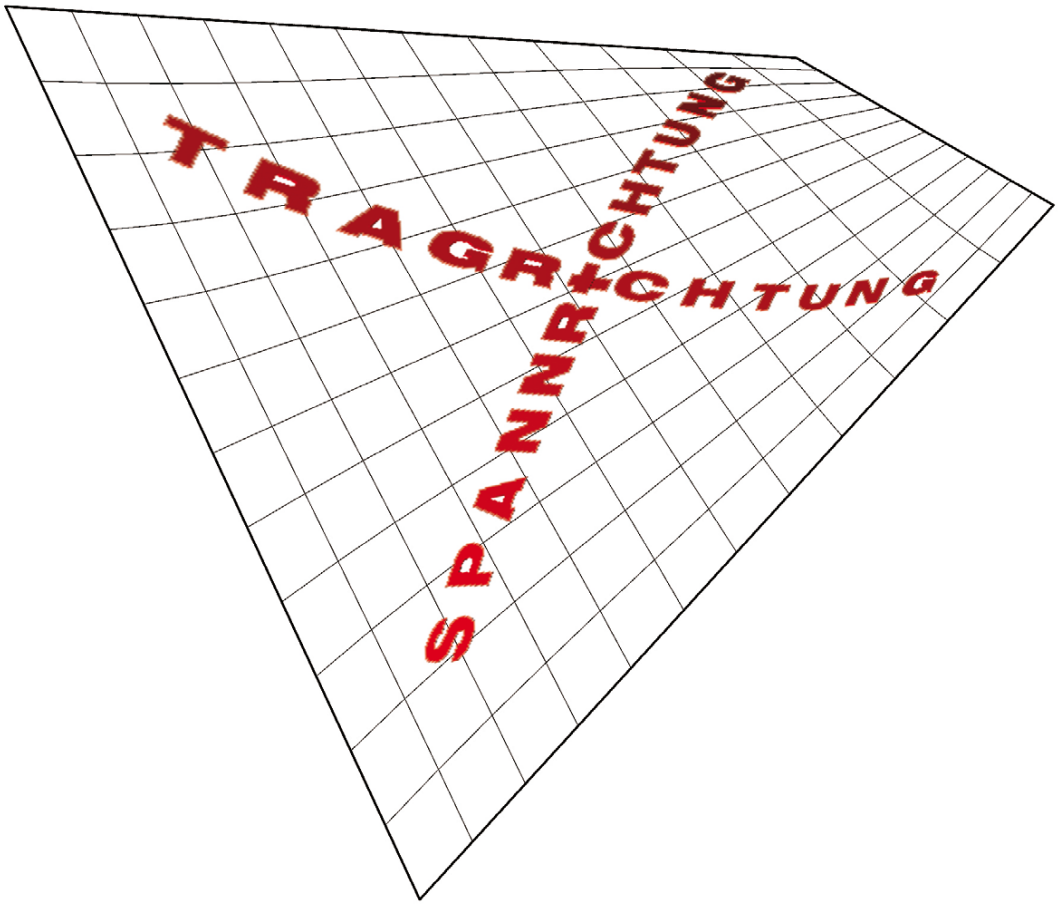


Bild 10: Trag- und Spannrichtung bei mechanisch vorgespannten Membranen [Ott54]

Wenn eine Last die Tragrichtung nach unten drückt, entspannt sich die Spannrichtung. Das bedeutet, dass die Spannungsdifferenz in Tragrichtung kleiner ist, als ohne Vorspannung, und somit ist auch die Verformung geringer.
Eine andere Möglichkeit Lasten aufzunehmen, besteht darin, ihnen direkt eine Kraft entgegenzusetzen. Wird zwischen zwei Folien ein Luftüberdruck erzeugt, wirkt dieser Druck als Kraft normal zur Fläche und spannt sie vor. Bei einem Lastangriff, der auf das Luftkissen drückt, steht der Luftdruck genau dem Lastangriff entgegen.

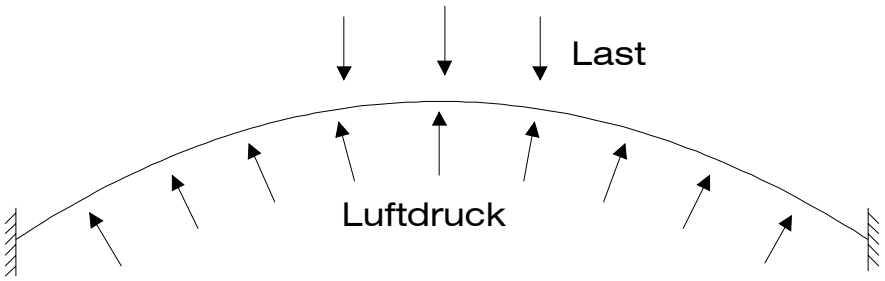


Bild 11: Belastung auf einen Pneu

Somit führt der Lastangriff zu einer Entlastung der Folie. Greift die Last in der gleichen Richtung an, wie der Luftdruck, erhöht sich die Last in der Folie.
Die Formen, die durch den Überdruck entstehen, sind sogenannte synklastische Formen, also gleichsinnig gekrümmte Formen, die im einfachsten Fall die Form von Seifenblasen haben können. Seifenblasen haben außerdem die Eigenschaft das eingeschlossene Luftvolumen mit einer minimalen Oberfläche zu umschließen. Man spricht hierbei von der Minimalfläche. Bei Pneus, die allseitig an eine Unterkonstruktion angeschlossen sind, ist die Unterscheidung in Trag- und Spannrichtung nicht mehr sinnvoll. Der Lastabtrag kann in alle Richtungen stattfinden.
Durch die Randgeometrie kann die Größe der Spannungen in unterschiedlichen Richtungen variieren. Längliche Kissengeometrien verursachen eine Hauptlastabtrag über die kürzere Seite, weil hier die Krümmung kleiner ist und somit die Steifigkeit höher.
Durch Verbinden gegenüberliegender Flächen können Punkte oder Linien nach innen gezogen werden, wie man es von Luftmatratzen kennt.

Bild 12: Luftmatratzen

Außerdem können durch entsprechenden Zuschnitt des Materials Einschnürungen entstehen, die mit Spannungskonzentration an diesen Stellen einhergehen. Um diese Spannungskonzentrationen aufnehmen zu können, ist es möglich, Materialverstärkungen an diesen Stellen einzuarbeiten. Beispielsweise könnte ein Seil eingearbeitet sein oder die Folie könnte mehrlagig ausgeführt werden.
Die pneumatische Vorspannung kann ebenfalls durch einen Unterdruck hergestellt werden. Die dadurch entstehenden Formen sind auch synklastisch. Während bei einem Überdruck konvexe Formen entstehen, sind die Unterdrucksysteme nach innen gezogen, also konkav.

Mechanische Vorspannung

Die mechanische Vorspannung wird von Folien durch Relaxation reduziert. Die Folien verlieren also zumindest einen Teil ihrer Vorspannung. Eine gute Konstruktion muss dies berücksichtigen und sollte Nachspannmöglichkeiten vorsehen. In dieser Hinsicht stellt der Folienbau kein Novum dar, da auch im Membranbau die Möglichkeit des Nachspannens vorgesehen werden muss. Der wesentliche Unterschied besteht in der Größe des Dehnweges. Die Bruchdehnung einer Folie ist 10 – 20 Mal größer als die einer Membran. Dieser Tatsache muss bei der Konstruktion der Spannvorrichtungen Rechnung getragen werden.
Die Möglichkeiten eine Vorspannung aufzubringen, können unterteilt werden in Elemente, die in der Fläche angreifen und Elemente, die am Rand der Fläche angreifen. In der Fläche können Hoch- und Tiefpunkte oder Bögen die Folie auslenken. Am Rand der Fläche kann zwischen Seilen und biegesteifen Elementen unterschieden werden, wie z.B. Träger, Geschossdecken oder Wände.

Hoch- und Tiefpunkte

Hoch- und Tiefpunkte greifen in der Fläche an und lenken die Membran oder Folie aus der Ebene aus. An diesen Punkten kommt es zu Spannungskonzentrationen. Je kleiner der Punkt ist, desto größer ist diese. Eine Nadel kann keine Folie stützen, sondern würde sie sofort durchstechen. Je größer der Rand (je stumpfer die Nadel) des Punktes wird, umso geringer die Spannungsspitzen. Deshalb werden solche Punkte beispielsweise als biegesteife Stahlringe ausgeführt, an denen die Membran fixiert wird. Die Aufgabe der Spannungsverteilung kann aber auch von Seilen übernommen werden.

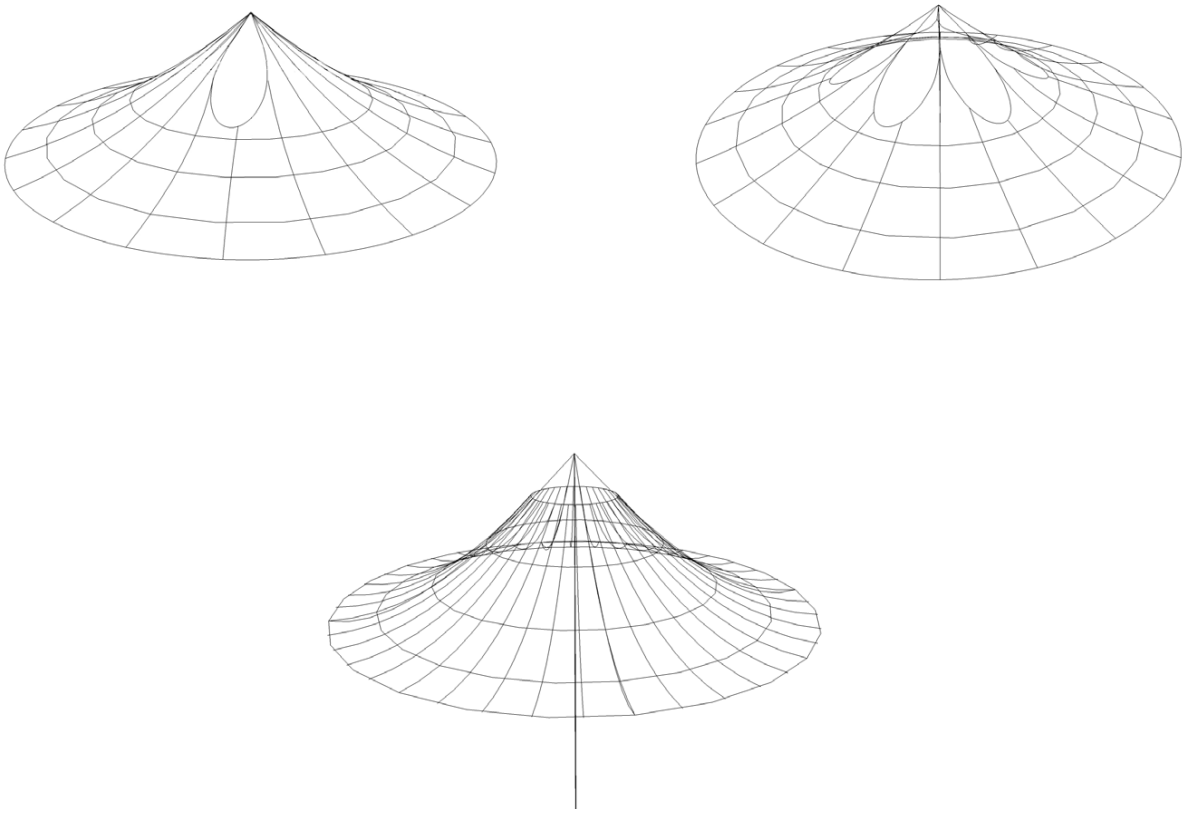


Bild 13: Beispiele für Hochpunktkonstruktionen

Die Nachspannmöglichkeit an einem Hoch- oder Tiefpunkt kann dadurch erreicht werden, dass der Punkt in seiner Höhe verstellbar ist. Im Fall einer Aufhängung müsste also das Seil die Möglichkeit bieten es zu verkürzen, bzw. eine Stütze müsste verlängerbar sein.

Bögen

Bögen können entweder unter der Folie liegen und sie nach außen drücken oder oberhalb der Folie, wobei die Folie dann mit Hilfe einer Kederschiene oder einem Randseil an den Bogen angehängt ist. Liegt der Bogen unter der Folie und drückt diese nach außen, muss man entscheiden, ob die Folie an dem Bogen eingespannt wird oder einfach darüber läuft. Wenn die Folien nicht fixiert werden, besteht bei Verformung die Gefahr der Reibung, was zunächst zum Verkratzen der Folien führt. Das ist einerseits ein optisches Problem, andererseits vermindert es die Lebenserwartung der Folie. Bei solchen Konstruktionen ist es empfehlenswert, die Teile, die in Kontakt mit der Folie kommen, mit sehr glatten Oberflächen, beispielsweise Kunststoffbeschichtungen, zu versehen.

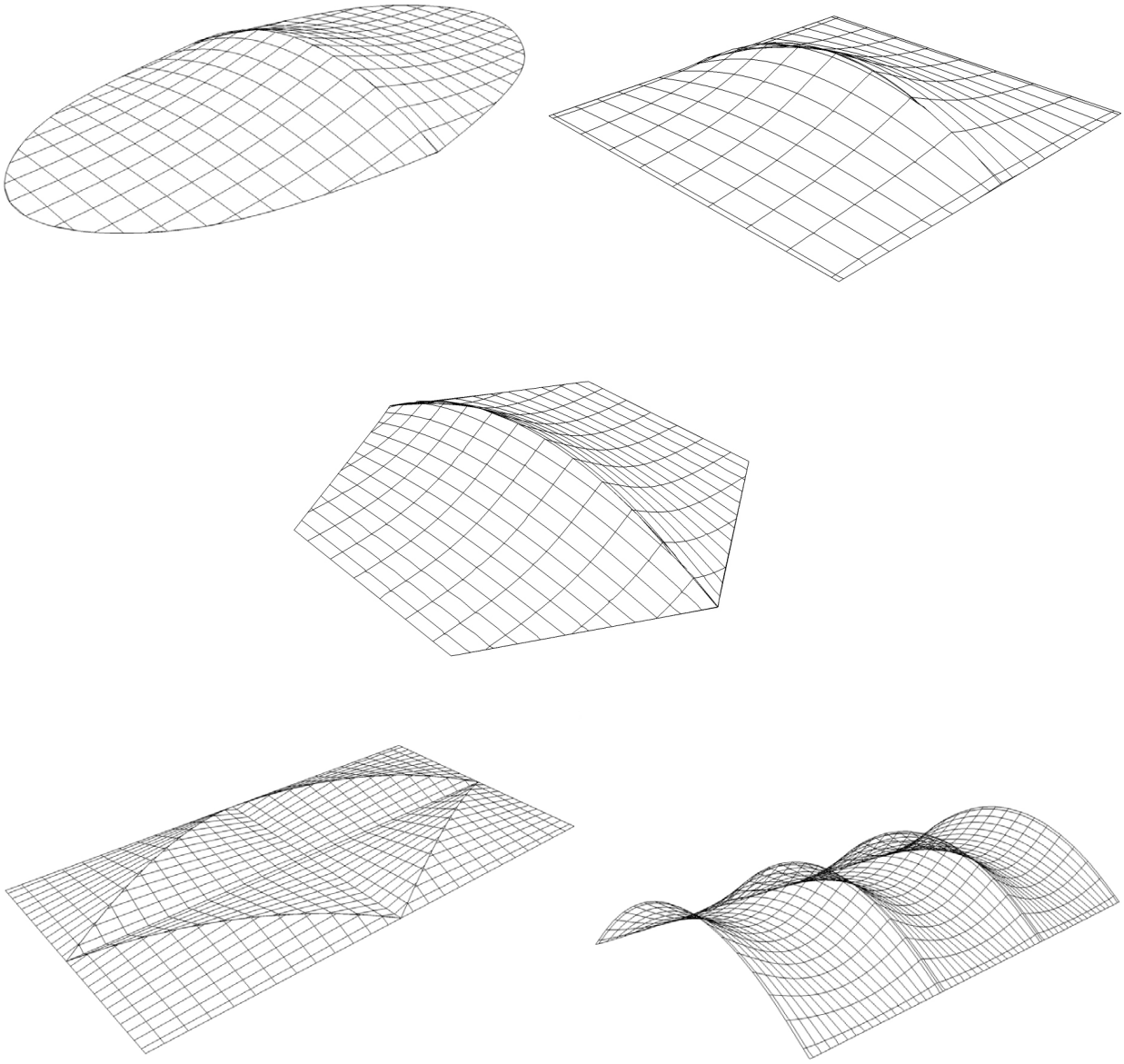


Bild 14: Beispiele für Bogengestützte Membranformen

Die Möglichkeit des Nachspannens kann bei Bögen darin bestehen, den Stich zu vergrößern, in dem der Bogen verlängerbar ist oder nach außen gedrückt werden kann. Aufgrund der Biegesteifigkeit des Bogens sind diesen Möglichkeiten allerdings Grenzen gesetzt, da mit der Verlängerung des Bogens auch eine Radiusänderung und somit eine Biegebeanspruchung des Bogens einhergeht.

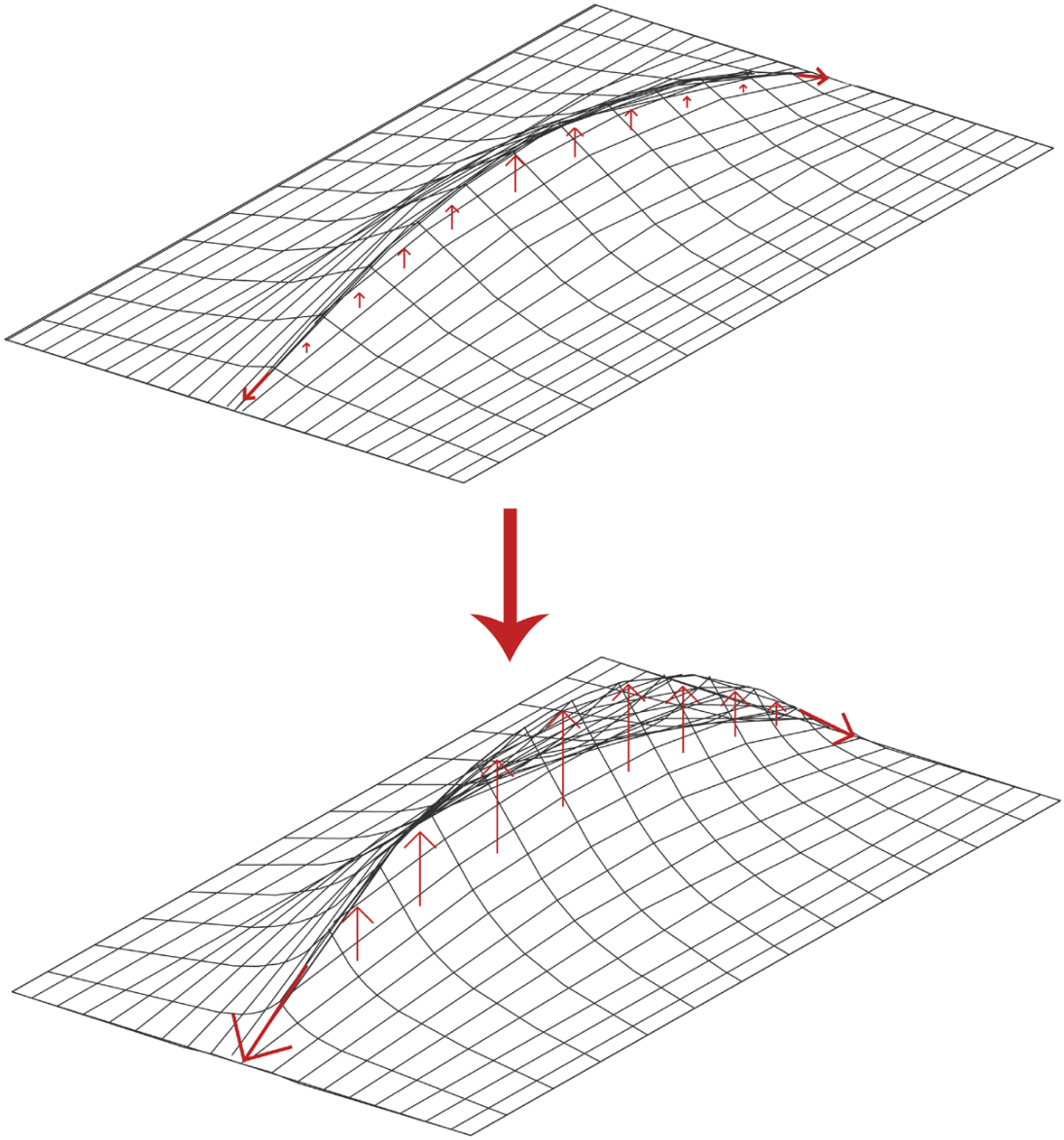


Bild 15: Membranvorspannung durch Bogenverlängerung

Randseile

Randseile stellen im Membranbau eine sehr häufig verwendete Form der Randausbildung dar. Im Folienbau ist diese Form eher ungewöhnlich. Das Seil verläuft immer im Bogen, sodass die Spannung in der Folie durch das Anspannen des Seils realisiert wird. Außerdem muss die Folie senkrecht zum Seil mit sogenannten Tangentialspannern zu den Ecken hin gespannt werden, da das Seil nur eine Vorspannung normal zur Seilrichtung herstellen kann.
Im Folienbau ist die Größe der Elemente durch die geringeren aufnehmbaren Spannungen als im Membranbau begrenzt. Dadurch entsteht für größere Flächen die Notwendigkeit der Aneinanderreihung von Elementen. Mit einem Randseil als gekrümmtes Element ist das schwerer zu realisieren, als mit einem biegesteifen, geraden Element. Aus diesem Grund ist diese Bauform im Folienbau selten anzutreffen.
Das Nachspannen der Folie wird über das Nachspannen des Seils und das Ziehen der Folie in die Ecken mit den Tangentialspannern realisiert.

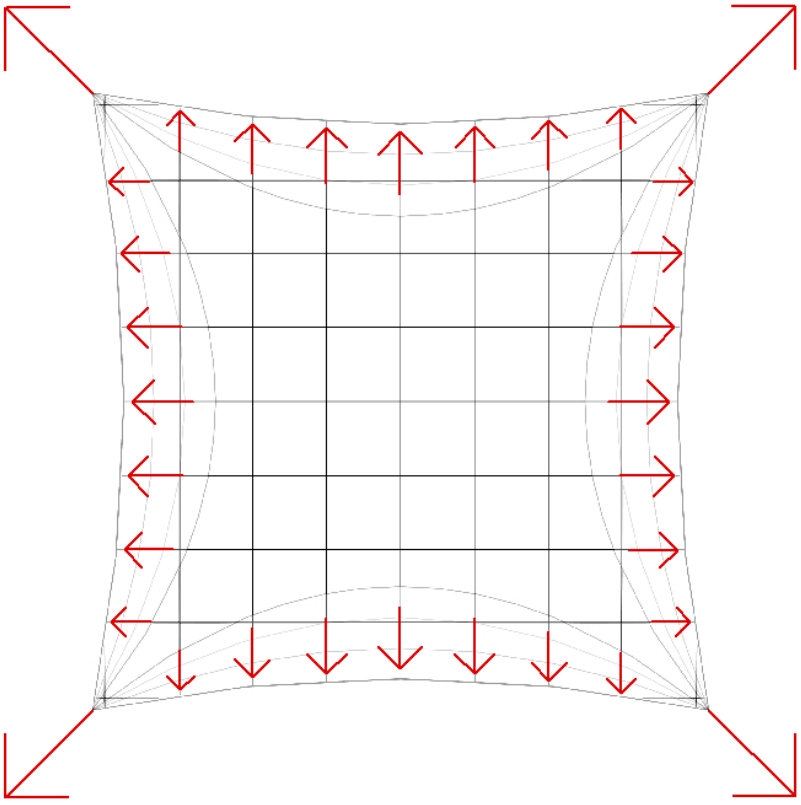


Bild 16: Membranvorspannung mit Randseilen

Randträger

Randträger sind im klassischen Membranbau selten zu finden, da die großen Spannweiten und relativ große Vorspannungen aus der Membran große Trägerquerschnitte zur Folge haben. Im Folienbau sind Spannweiten und Lasten aus Vorspannung kleiner und somit beherrschbarer. Der Vorteil der Aneinanderreihung führt bei den mittleren Elementen dazu, dass die Träger durch die Vorspannung nicht belastet werden, da sich die Lasten aus den angrenzenden Feldern aufheben. Nur am Randelement wird der Träger auf Biegung infolge Vorspannung belastet. Die Schwierigkeit bei den Randträgern liegt im Aufbringen der Vorspannung. Eine Möglichkeit ist das Verschieben des Trägers, also die Vergrößerung der Distanz zwischen zwei Randträgern. Wenn aber der Träger Teil eines größeren Zusammenhangs ist, also ein anderes Folienelement angrenzt, ist die Randgeometrie der einzelnen Elemente nicht mehr variabel. Die Folie muss also innerhalb des Trägerquerschnitts ein- und vorgespannt werden. Dies kann aufgrund des konstruktiven Platzbedarfs zu einer Überdimensionierung des Trägers führen. Gerade wenn im Fassadenbereich mehrlagige, mechanisch vorgespannte Systeme Verwendung finden, wird die Konstruktion der Einspannung sehr aufwendig.

Pneumatische Vorspannung

Die pneumatische Vorspannung wird durch einen Über- oder Unterdruck innerhalb eines von Folien umschlossenen Volumens realisiert. Man kann bei der pneumatischen Vorspannung zwischen zwei Arten unterscheiden. Es gibt Konstruktionsformen bei denen der Nutzer sich in dem unter Überdruck stehenden Raum befindet (Bild 17) und solche, bei denen sich der Nutzer außerhalb des Druckbereichs aufhält (Bild 18).

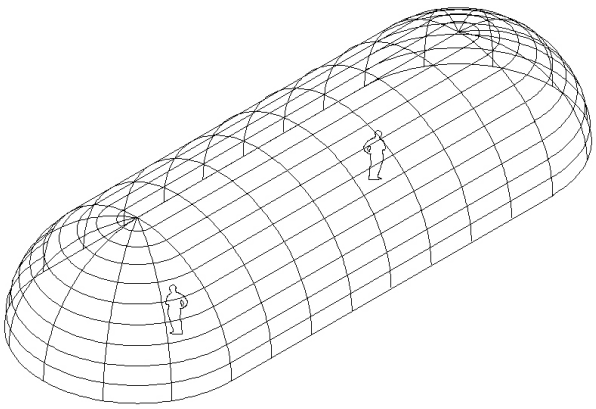


Bild 17: Traglufthalle (Nutzer im Überdruckbereich)

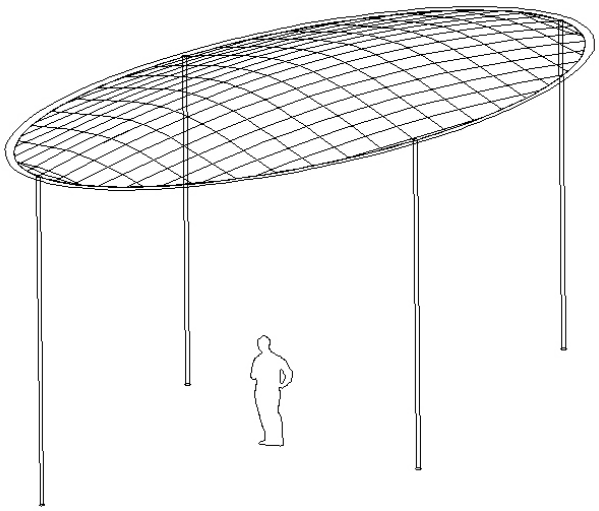


Bild 18: Pneu als Dach (Nutzer außerhalb des Überdruck-bereiches)

Traglufthalle

Die erst genannte Form wird als Traglufthalle bezeichnet, wie man sie von temporären Überdachungen von Tennisplätzen oder Schwimmbecken kennt. Es sind aber auch andere Formen denkbar, bei denen ein Überdruck in einem Gebäude hergestellt wird und nur Teile aus Folien, wie z.B. die Fassade oder Dachbereiche, durch diesen Überdruck stabilisiert werden.

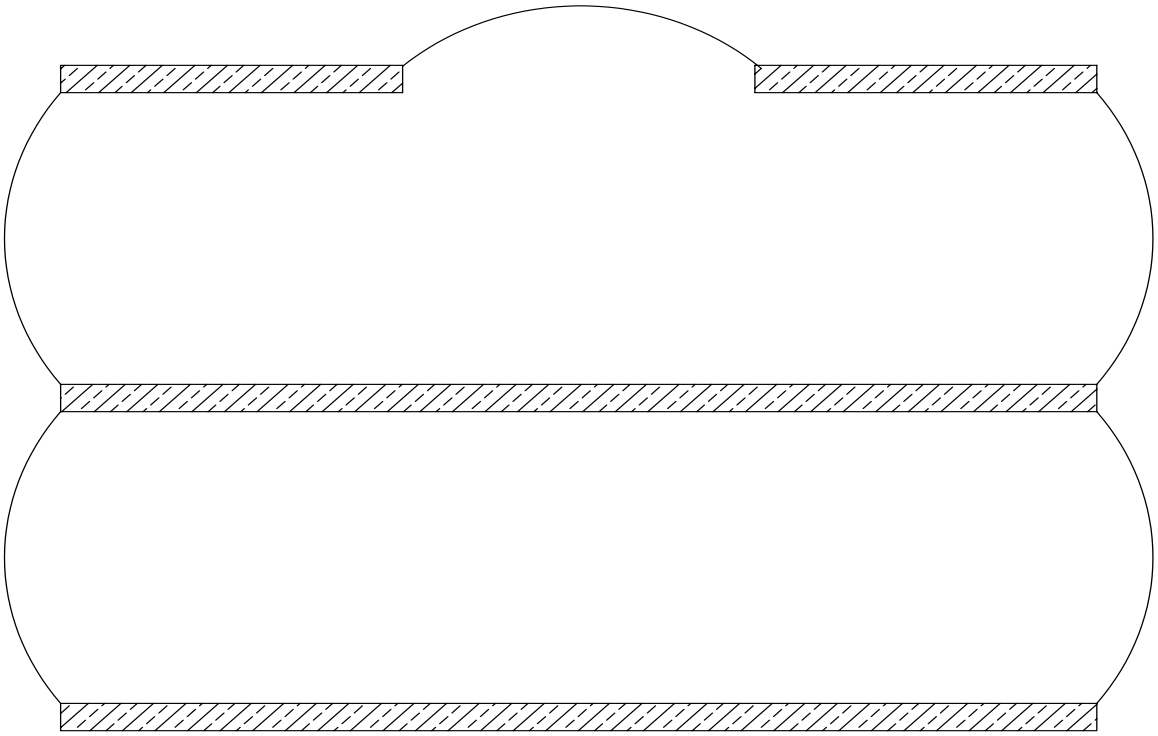


Bild 19: Gebäude mit pneumatisch vorgespannten Elementen

In solchen Gebäuden beträgt der Überdruck zwischen 300 und 500 Pascal. Zum Vergleich: 1m Höhendifferenz in der freien Natur entspricht einer Druckdifferenz von 12 Pascal. 500 Pascal entsprechen also einer Höhendifferenz von 42 m.
Für das Herstellen des Überdrucks benötigt man ein Gebläse, das gleichzeitig auch Heizung und Frischluftzufuhr gewährleisten kann. Das Gebläse ist mit einer Steuerung versehen, sodass es nicht permanent in Betrieb sein muss, sondern nur beim Abfall des Druckes unter einen bestimmten Wert anspringt.
Der Zugang zu solchen Gebäudetypen muss so gestaltet werden, dass beim Zutritt möglichst wenig Luft entweicht. Hierfür ist eine Schleuse notwendig, die so konstruiert sein sollte, dass sie nicht vollständig geöffnet werden kann. Unwissende Nutzer dürfen nicht die Möglichkeit haben, zu Lüftungszwecken die Türen zu blockieren, was zum Versagen der Hülle führen würde. Drehtüren könnten beispielsweise dieses Problem beheben.
Dieser Gebäudetyp wird gerne für temporäre Hallen, wie z.B. Tennishallen verwendet. Diese Hallen werden bisher nur aus Membrangeweben hergestellt. Die Herstellung aus ETFE ist

bei Gebäuden, die häufig auf- und abgebaut werden, schwierig, wegen des Verkratzens der Oberfläche und des Knickens, was zu weißen Streifen im ETFE führt. Das Traglufthallenprinzip wird aber auch für Stadienüberdachungen angewandt. Hierbei wird ein massiver Baukörper erstellt. Nur das Dach besteht aus einer Membran und wird von Luft gestützt. Das Bauwerk mit der größten Spannweite ist der Pontiac Silverdome in Detroit, mit einer Spannweite des Daches von 216m [Wag96]. Große Überdachungen könnten mit ETFE nur im Zusammenhang mit einem Seilnetz zur Unterstützung realisiert werden.

Kissen
Die zweite Konstruktionsart, bei der der Nutzer sich außerhalb des Druckbereichs aufhält, ist die Folienkissenkonstruktion, die an Randträgern befestigt wird. Durch den Innendruck werden die Folien nach außen gewölbt und auf Zug beansprucht. Die Randträger werden durch die Zugbelastung aus der Folie auf Biegung beansprucht. Ist ein Kissen mit der gleichen Geometrie und dem gleichen Innendruck an der gegenüberliegenden Seite des Trägers angeschlossen, heben sich die Kräfte aus Vorspannung auf. Da ein System aber so bemessen werden muss, dass auch ein Kissen ausfallen kann, ist die Dimensionierung von Rand und Mittelträgern ähnlich. Die Ränder von Kissen können nahezu beliebige Geometrien aufweisen. Sie werden lediglich von der möglichen Spannweite der Folie beschränkt.
Folienkissen haben im Allgemeinen einen Innendruck zwischen 200 und 1000 Pascal [SGM03]. Die äußere Folie kann aus einer dickeren Folie hergestellt werden, da nur sie den Windlasten ausgesetzt ist.
Bei Folienkissen sind die Gebläse ständig in Betrieb, da die im Vergleich zur Traglufthalle kleinen Volumen bei Undichtigkeiten sehr schnell ihren Druck verlieren würden. Um Kondenswasserbildung im Kissen zu vermeiden, wird die eingeblasene Luft getrocknet. Die prominentesten Beispiele für Kissenkonstruktionen sind derzeit die Allianzarena in München und das Eden Project in Cornwall (England).

2.4.2.2 Fassadenmodule

Es werden hier einige Beispiele gezeigt, wie ein Fassadenelement mit Folien aussehen könnte. Wobei die Auswahl auf rechteckige Modulformen begrenzt ist, da diese Form sich am besten für die Reihung in der Fassade eignet. Es kann hier nur eine kleine Auswahl an Prinzipien dargestellt werden. Die mechanische Vorspannung wird hier immer als eben gespannte Folie dargestellt, es ist aber auch, sofern das Modul es geometrisch zulässt, jede andere Form der mechanischen Vorspannung denkbar. Dasselbe gilt auch für die pneumatisch vorgespannten Formen, die durch die Verbindung der beiden Folien nach dem Luftmatratzenprinzip auch in beliebige andere Formen gebracht werden können, die hier aber nicht dargestellt werden. Es geht hier vielmehr darum einfache Folienformen miteinander zu kombinieren und schon anhand dieser einfachen Beispiele die Vielfalt erkennbar werden zu lassen.

Zweilagige Systeme:

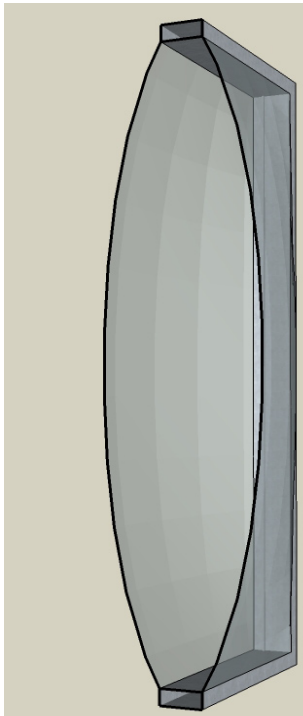


Bild 20: Überdruckpneu

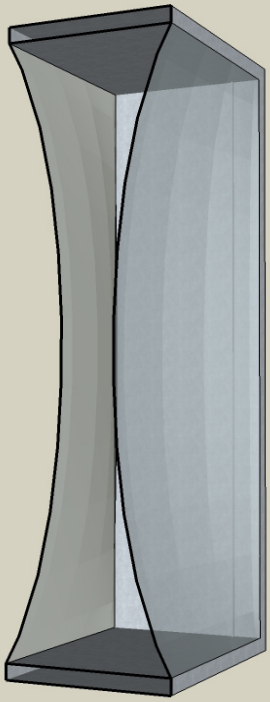


Bild 21: Unterdruckpneu

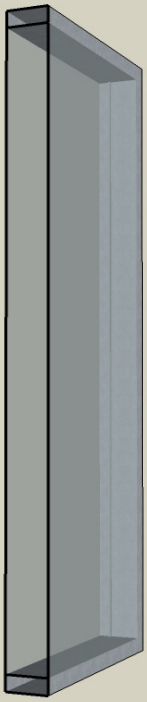


Bild 22: 2-lagig mechanisch vorgespanntes Modul

Dreilagige Systeme:

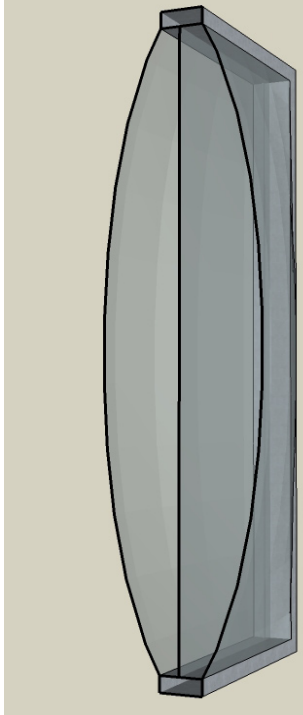


Bild 23: Überdruckpneu + mechanisch vorgespannte Folie innenliegend

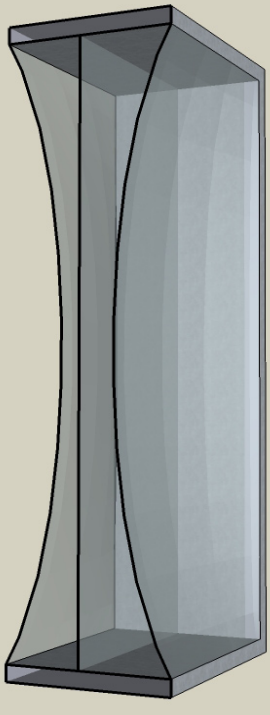


Bild 24: Unterdruckpneu + mechanisch vorgespannte Folie innenliegend

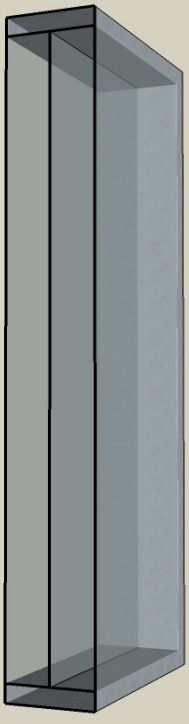


Bild 25: 3-lagig mechanisch vorgespanntes Modul

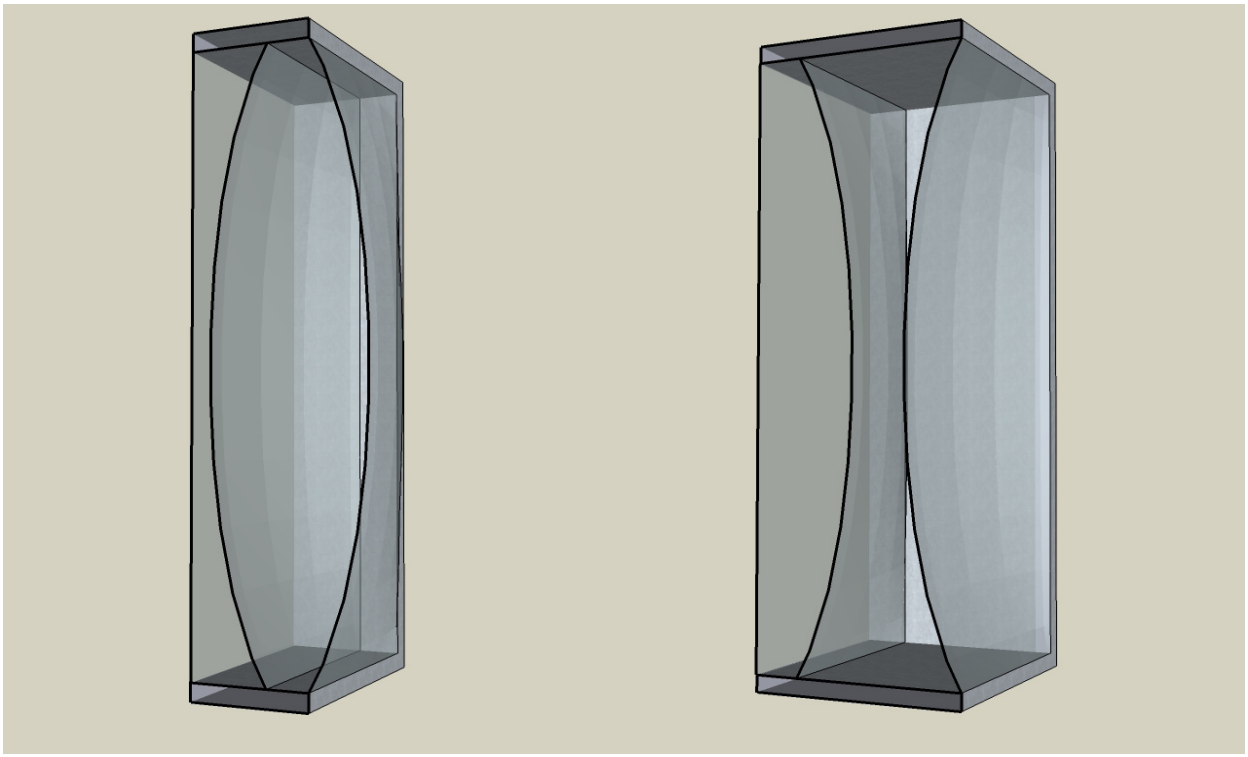


Bild 26: Überdruckpneu + mechanisch vorgespannte Folie außenliegend

Bild 27: Unterdruckpneu + mechanisch vorgespannte Folie außenliegend

Vierlagige Systeme:

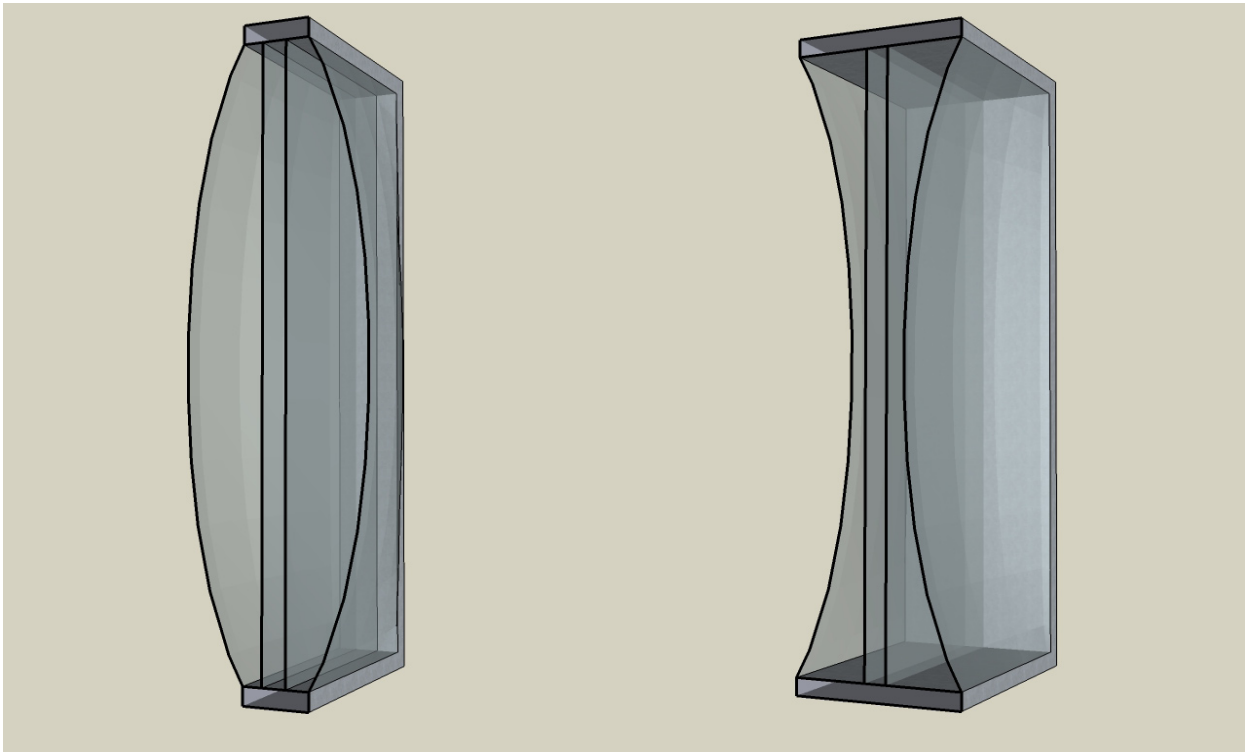


Bild 28: Überdruckpneu + 2 mechanisch vorgespannte Folien innenliegend

Bild 29: Unterdruckpneu + 2 mechanisch vorgespannte Folien innenliegend

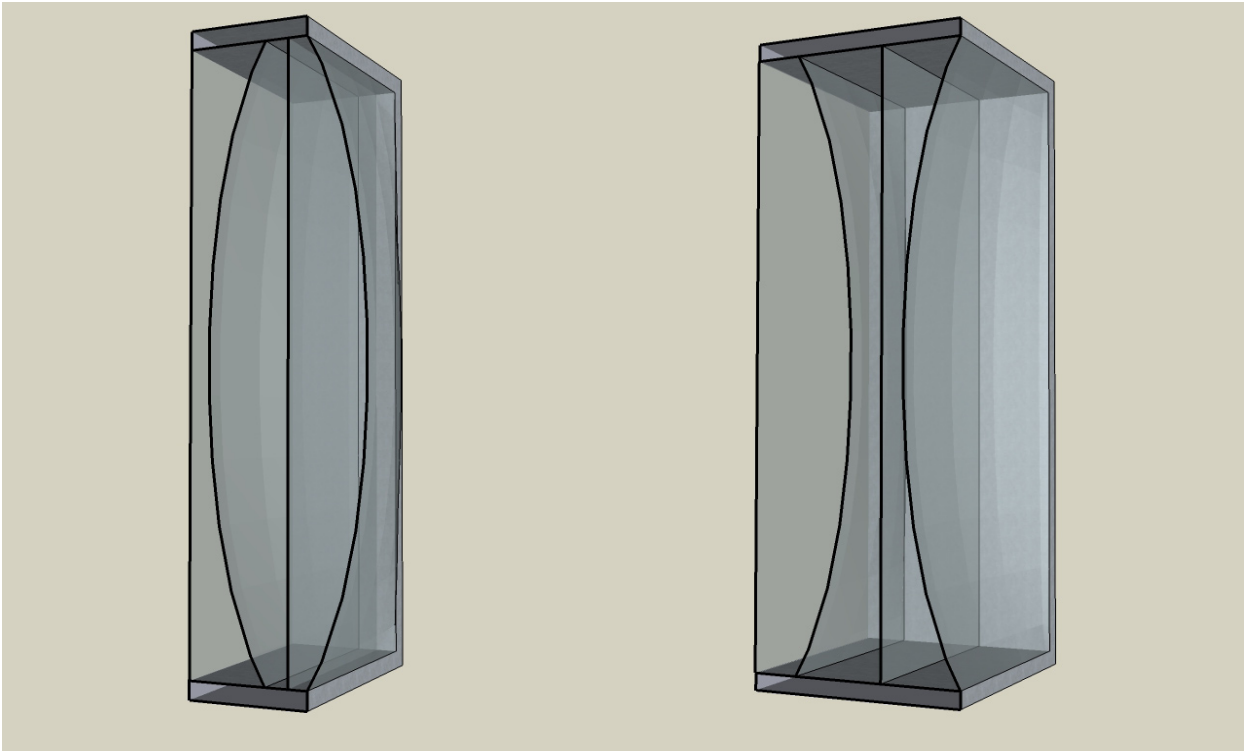


Bild 30: Überdruckpneu + mechanisch vorgespannte Folie innen- und außenliegend

Bild 31: Unterdruckpneu + mechanisch vorgespannte Folie innen- und außenliegend

Für die statisch unbelasteten Mittellagen ist es denkbar, optisch höherwertige Folien zu verwenden, um die Durchsichtigkeit des Moduls zu verbessern. Diese mittleren beiden Folien könnten, da sie statisch irrelevant sind, bauphysikalisch optimal zueinander positioniert werden. Aus dem Glasbau hat sich ein optimaler Scheibenabstand von 16mm herausgestellt [Gre03]. Es ist wichtig, dass die Mittellagen an einigen Stellen perforiert sind, damit ein Druckausgleich zwischen den Kammern stattfinden kann. Nur so ist gewährleistet, dass hier wirklich keine Belastungen einwirken.

2.4.2.3 Sicherheit

Der Schutz vor unbefugtem Zutritt ist eine sehr wichtige Aufgabe einer Fassade und kann von der Folie alleine nicht ausreichend gewährleistet werden. Es sind also zusätzliche Materialien zur Folie unerlässlich. Denkbar ist hier eine Vielzahl von Konstruktionen und Materialien, die teilweise den Anspruch an Transparenz maximal unterstützen oder aber ein starken Kontrast zum extrem leichten Material darstellen z.B.:

- Metallgewebe
- Seilnetze
- Gitterroste
- Metalllamellen
- Eng stehende Stahl- oder Aluminiumpfosten
- Natursteinlamellen
- Eng stehende Stahlbetonpfosten
- Holzlamellen
- Kunststoffroste
- Kunststofflamellen
- Eng stehende Kunststoffpfosten
- Photovoltaiklamellen
- Solarthermielamellen

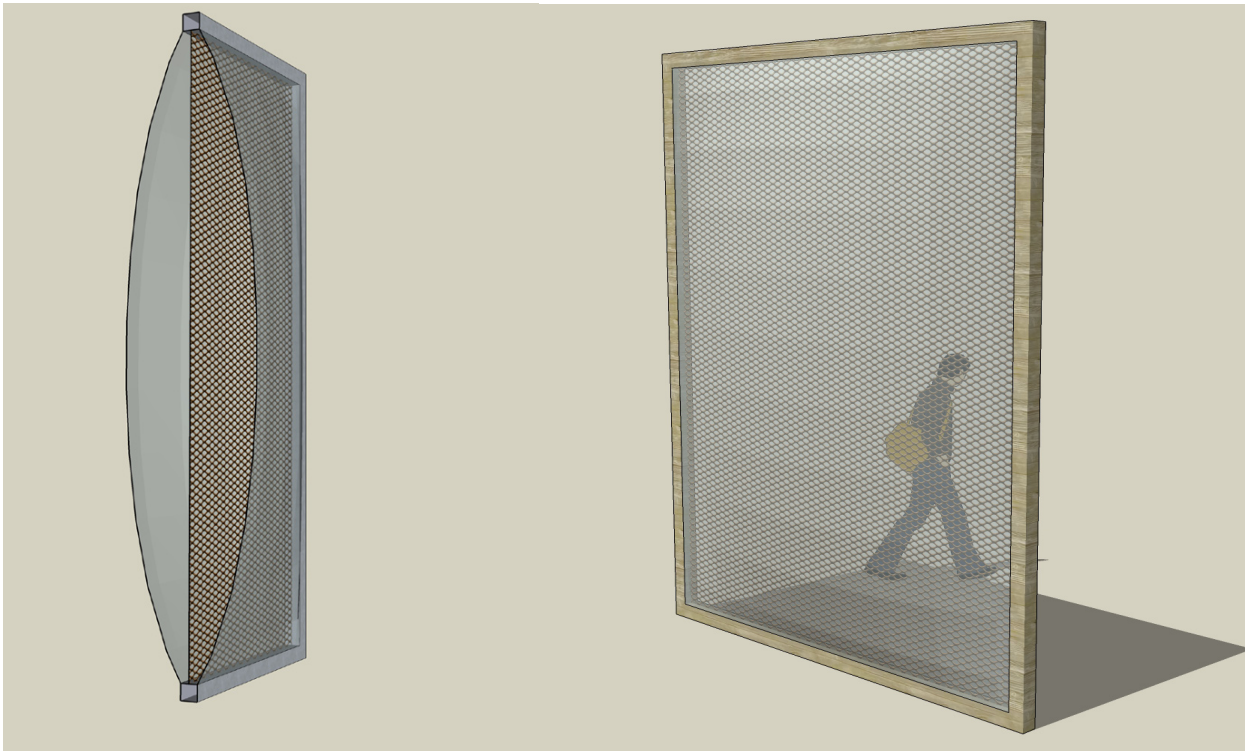


Bild 32: Streckmetall als Schutzmaßnahme (Schnitt)

Bild 33: Streckmetall als Schutzmaßnahme (Ansicht)

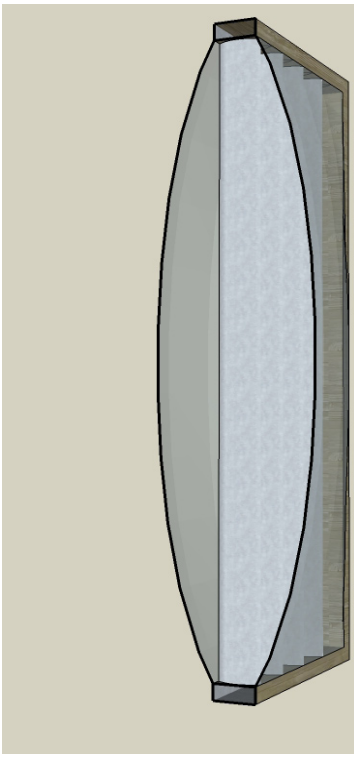


Bild 34: Senkrechte Aluminiumlamellen als Schutzmaßnahme (Schnitt)

Bild 35: Senkrechte Aluminiumlamellen als Schutzmaßnahme (Ansicht)

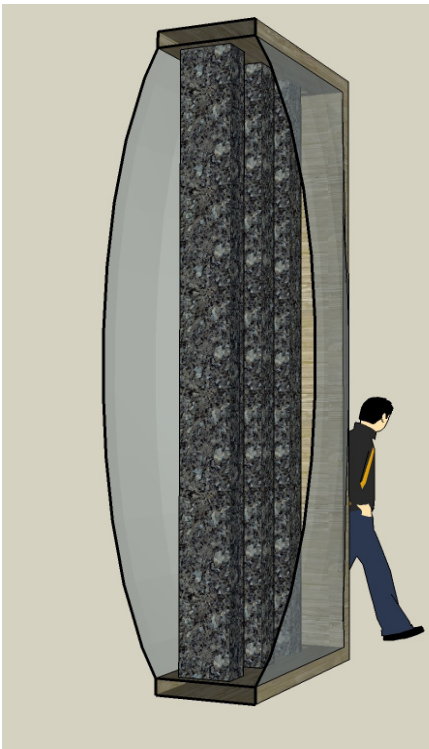


Bild 36: Senkrechte Natursteinlamellen als Schutzmaßnahme (Schnitt)

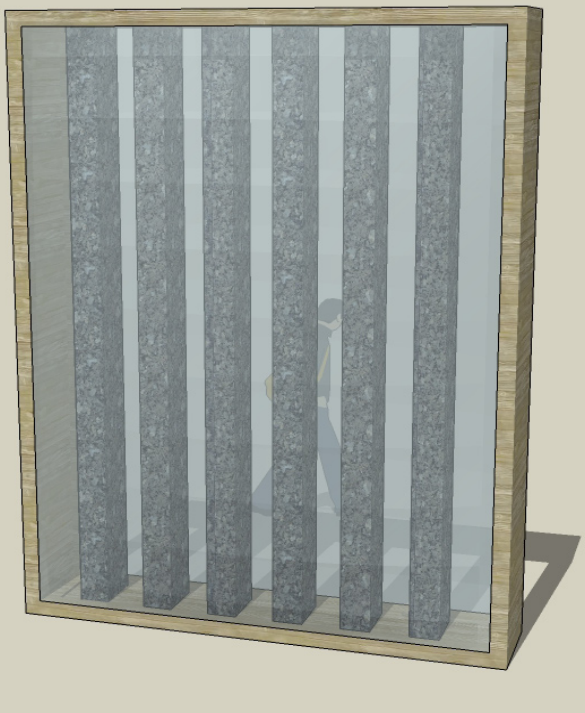


Bild 37: Senkrechte Natursteinlamellen als Schutzmaßnahme (Ansicht)

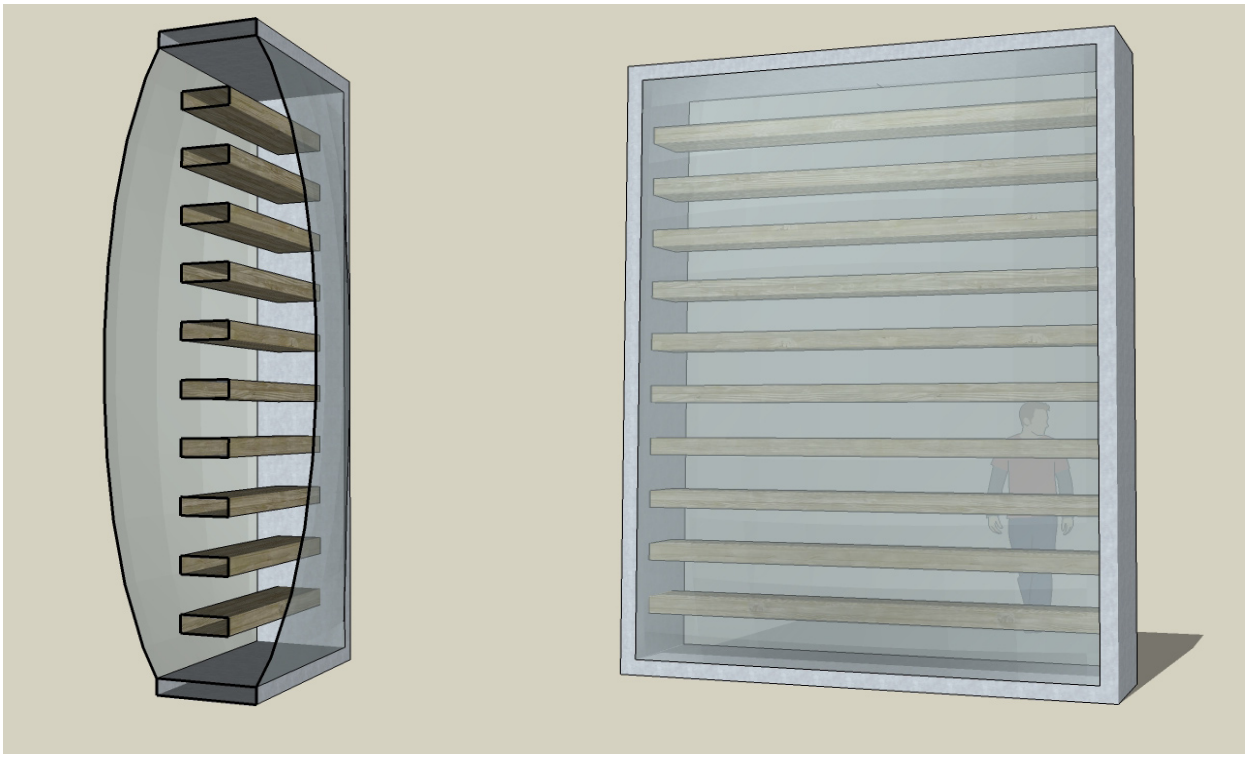


Bild 38: Holzlamellen als Schutzmaßnahme (Schnitt)

Bild 39: Holzlamellen als Schutzmaßnahme (Ansicht)

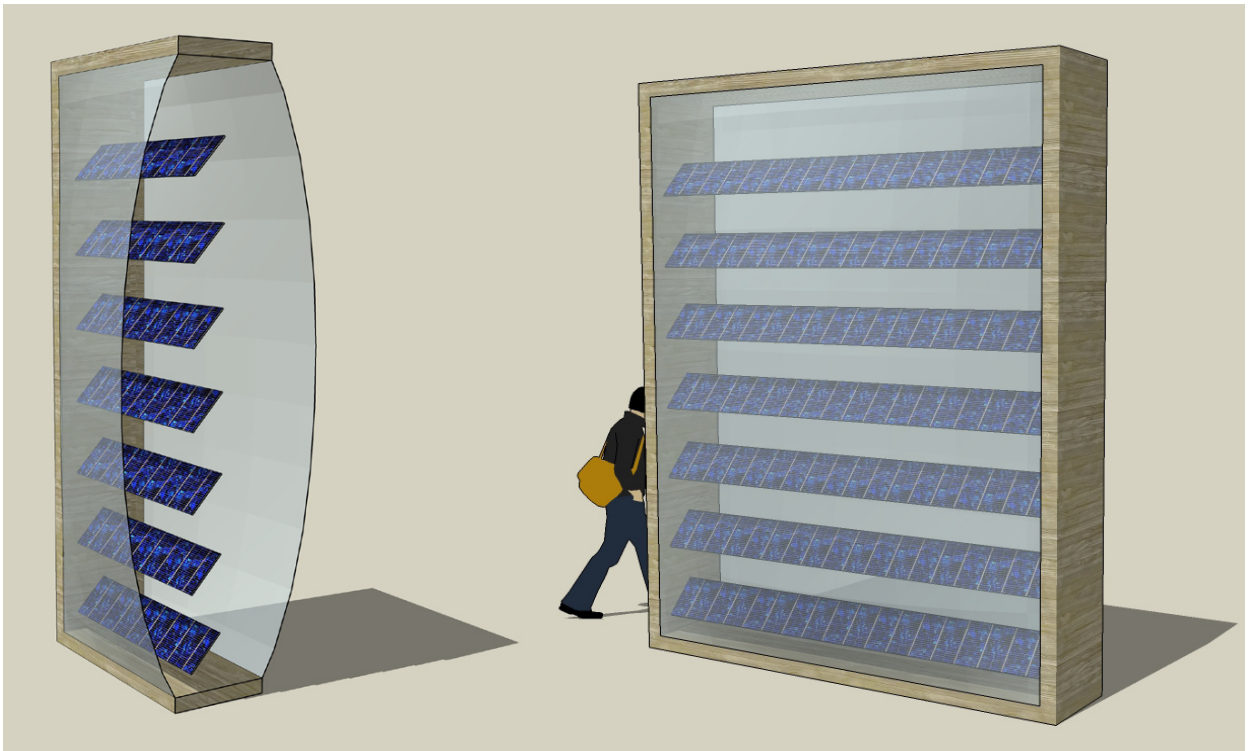


Bild 40: Photovoltaiklamellen als Schutzmaßnahme (Schnitt)

Bild 41: Photovoltaiklamellen als Schutzmaßnahme (Ansicht)

Einige dieser vorgeschlagenen Möglichkeiten bieten die Option beweglich konstruiert zu werden, sodass sie während des Betriebs aufgerollt oder zur Seite gefahren werden können und die reine Folienkonstruktion bleibt. Die Zusatzmaßnahmen können aber nicht nur die Aufgabe der Gebäudesicherung, sondern auch Sonnenschutzfunktion übernehmen oder im Fall von Photovoltaik und Solarthermie eine Energiequelle für das Gebäude darstellen. Die Elemente stellen also keineswegs ein notwendiges Übel dar, sondern können sinnvolle und notwendige Zusatzfunktionen übernehmen, die auch die Energiebilanz durch Verschattung oder Energiegewinnung positiv beeinflussen können. Bewegliche Elemente geben dem Nutzer zusätzlich das Gefühl, seine Fassade individuell auf seine Bedürfnisse einstellen zu können, was der Akzeptanz der Fassade zugute kommt.

2.4.3 Folie-Glas Kombinationen

Bei der Kombination aus Glas und Folie sind sehr viele verschiedene Kombinationen denkbar. Im Folgenden wird die Folie-Glas Kombination in vier Arten unterteilt. Die Möglichkeit mit Folienkonstruktionen wärmedämmende Elemente herzustellen, steht außer Frage. Die Frage, die sich stellt, ist aber: Wenn sowieso Glas in einer Fassade zum Einsatz kommt, warum sollte man dann Teile durch Folienkonstruktionen ersetzen wollen? Dazu ist es notwendig, die Vorteile von Folien gegenüber Glas herauszustellen, um beurteilen zu können, ob der Einsatz in speziellen Fällen sinnvoll sein kann. Die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale sind die Fügbarkeit von Folien, die es erlaubt, unendlich lange Elemente herzustellen. Diese Fügbarkeit erlaubt es auch, über den Zuschnitt der einzelnen aneinandergefügten Folien, gekrümmte Formen herzustellen. Das Material ist leichter als Glas. Daraus folgt, dass die Unterkonstruktion filigraner ausgeführt werden kann. Die vier möglichen Kombinationsformen von Glas und Folien sind:

- Folie als wärmedämmendes Element mit Glas als vorgehängte Schicht
- Glas als wärmedämmendes Element mit Folie als vorgehängte Schicht
- Folie und Glas als wärmedämmende Elemente
- Folie im Scheibenzwischenraum (SZR)

2.4.3.1 Folie als wärmedämmendes Element

Das Problem des unbefugten Zutritts bei reinen Folienfassaden könnte beispielsweise so gelöst werden, dass vor die Folien eine Einfachverglasung aus VSG angebracht wird. Es würde sich also um eine Zweite-Haut-Fassade handeln, bei der die Isolierverglasung gegen eine Folienkonstruktion ausgetauscht wird. Man könnte so eine unbegrenzt lange isolierende Schicht als ETFE Pneu realisieren. Wenn man die Verglasung nur oben und unten hält, wäre es so möglich, eine Fassade ohne senkrechte Elemente zu realisieren. Die senkrechten Striche in dem Bild sind lediglich die Fugen zwischen den vorgehängten Glasscheiben, die sogar ohne Silikon ausgeführt werden könnten.

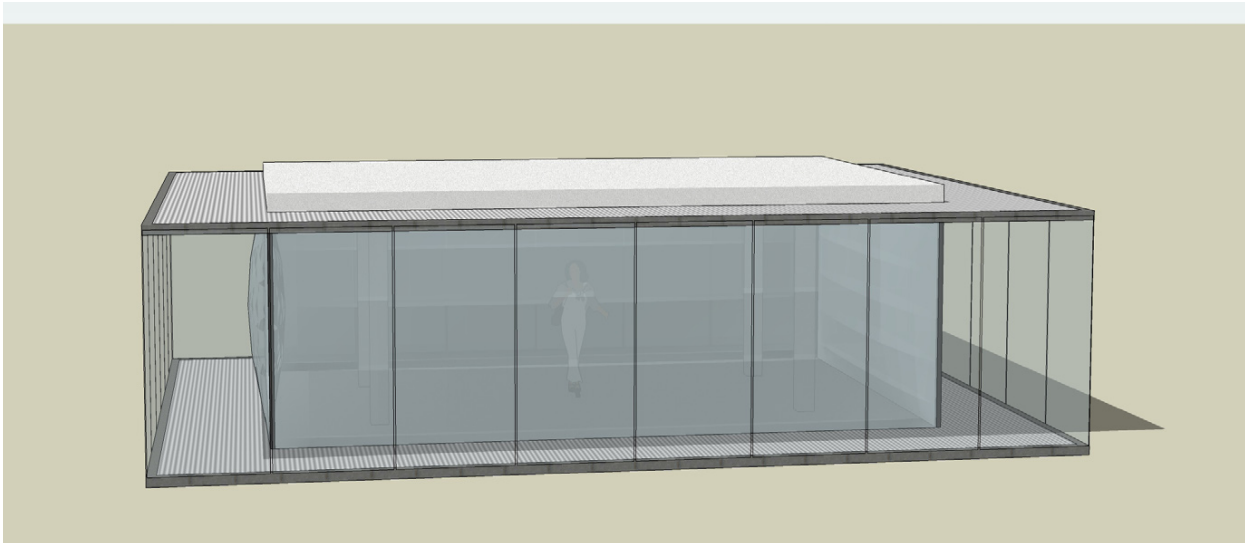


Bild 42: Pavillon mit Doppelfassade

2.4.3.2 Glas als wärmedämmendes Element

Es ist auch denkbar, eine Zweite-Haut-Fassade mit einer äußeren Folienschicht herzustellen und einer inneren Doppelverglasung. Es ist bei solch einem System, wie auch bei jeder anderen Fassade, genau zu überprüfen, welche Funktion die Fassade dann übernehmen kann. Viele Doppelfassaden werden aus Schallschutzgründen und nicht aus wärmeschutztechnischen Gründen gebaut [Pot04]. Diese Funktion kann die Folie sicher nicht übernehmen. Das Fassadensystem kann nur zur Verbesserung der natürlichen Lüftung oder Optimierung des Wärmeschutzes verwendet werden. Es ist durch die hohe Transparenz von ETFE in solchen Fassaden möglich, den Fassadenzwischenraum zu begrünen und als natürlichen Sonnenschutz zu aktivieren. In diesem Fall hätte die Folie gravierende Vorteile gegenüber einer Verglasung. Durch das geringere Gewicht der Folie ist auch eine leichtere Unterkonstruktion möglich und somit weniger Masse im Fassadenzwischenraum (FZR), die sich aufheizen kann.

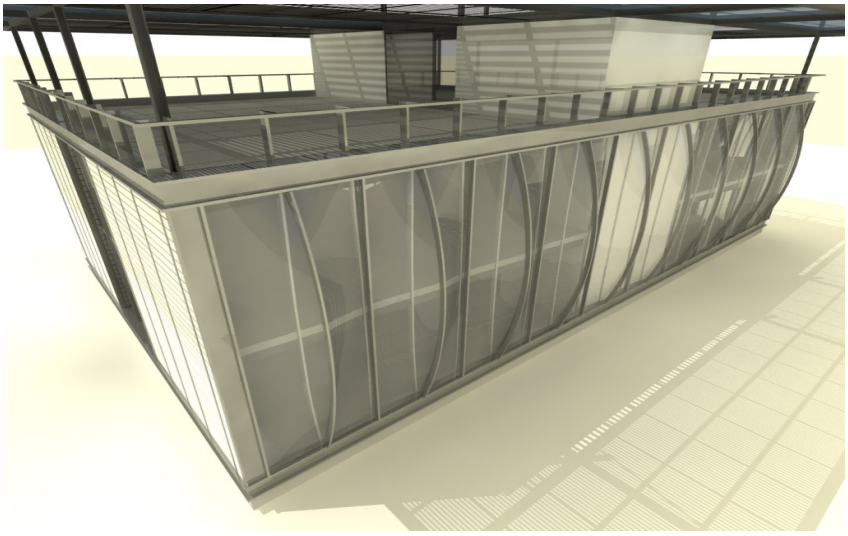


Bild 43: Bürogebäude mit Doppelfassade

Als äußere Fassadenschicht ist aber auch die besondere Formensprache als Vorteil zu erwähnen, die dem Gebäude einen eigenen Charakter verleiht. Diese äußere Fassadenschicht aus Folie könnte außerdem mit den Möglichkeiten des Bedruckens oder des Metallbedampfens einen effektiven Sonnenschutz darstellen, der den FZR und das Gebäude selbst vor solarer Einstrahlung schützt.
Sofern Einspannmechanismen benutzt werden, die ein schnelles Montieren und Demontieren der Folie ermöglichen, besteht auch die Möglichkeit Werbung auf der Fassade zu platzieren und auszutauschen, was bei schweren Verglasungen nicht ohne weiteres möglich wäre. Solche Aufdrucke könnten so gestaltet werden, dass sie von innen noch eine relativ hohe Transparenz haben, aus der Entfernung aber als flächiger Druck wirken. Die herkömmlichen großformatigen Werbungen an Gebäuden aus PVC beschichteter PES Membran sind höchstens transluzent und nur während Baumaßnahmen akzeptabel. Die bedruckte ETFE Folie kann als außenliegender Sonnenschutz und Werbefläche maßgeblich zum Gebäudeunterhalt beitragen.

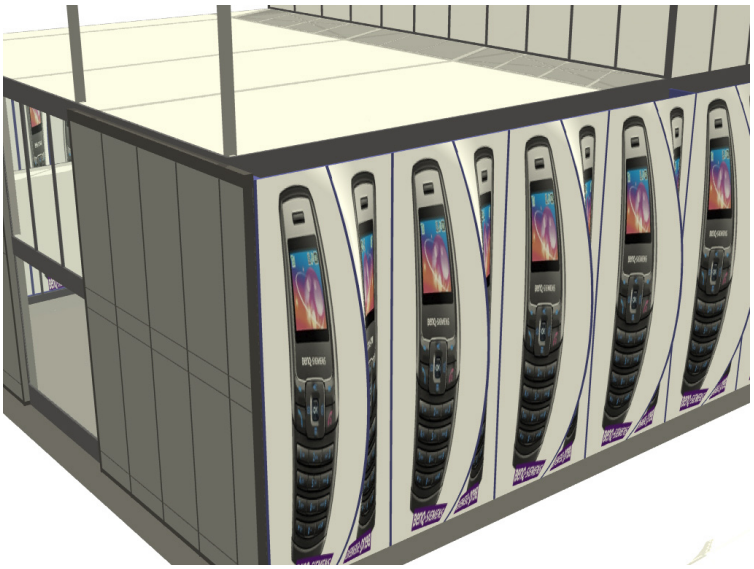


Bild 44: Werbeaufdruck auf Folienfassade

2.4.3.3 Folie und Glas als wärmedämmende Elemente

Diese Kombination würde eine Pufferfassade ergeben. Da eine natürliche Belüftung bei diesem Fassadentyp ohnehin nicht möglich ist, weil im FZR keine Frischluft für den Innenraum zur Verfügung steht, könnte die innere Fassadenschicht beispielsweise aus sehr langen Folienfenstern bestehen, ohne eine senkrechte Unterteilung. Wenn die Folie als äußere Schicht eingesetzt wird, könnte auch hier eine Fassadenbegrünung im FZR als natürlicher Sonnenschutz verwendet werden.

2.4.3.4 Folie im Scheibenzwischenraum

Im Zuge der immer weiter schreitenden Optimierung von Verglasungen wurde aus der Doppelverglasung die Dreifachverglasung entwickelt, die eine weitere Optimierung des Wärmedurchgangskoeffizienten darstellt. Da die mittlere Scheibe der Dreifachverglasung keinerlei statische Anforderungen erfüllen muss, kann sie aber auch durch ein weit schwächeres Material ersetzt werden. So wurde in den 70er Jahren eine Isolierverglasung in den USA entwickelt, bei der im SZR eine Folie eingezogen ist, an Stelle einer weiteren Glasscheibe. Diese Folie kann wegen der extrem geringen statischen Anforderungen ausschließlich auf ihre optischen Qualitäten optimiert werden. Die Verglasung hat dadurch keinerlei optische Einbußen. Ein Vorteil dieser Verglasungsart ist das geringere Gewicht der Scheibe, wodurch bei zu öffnenden Fenstern größere Öffnungsflügel realisiert werden können. Heute ist diese Bauweise unter dem Begriff „Heat Mirror“ bei verschiedenen Anbietern zu finden, da über die Folienschicht der g-Wert des Fensters nahezu beliebig verändert werden kann. Die Technologie ist auch mit zwei Folienlagen und Gasfüllung auf dem Markt.

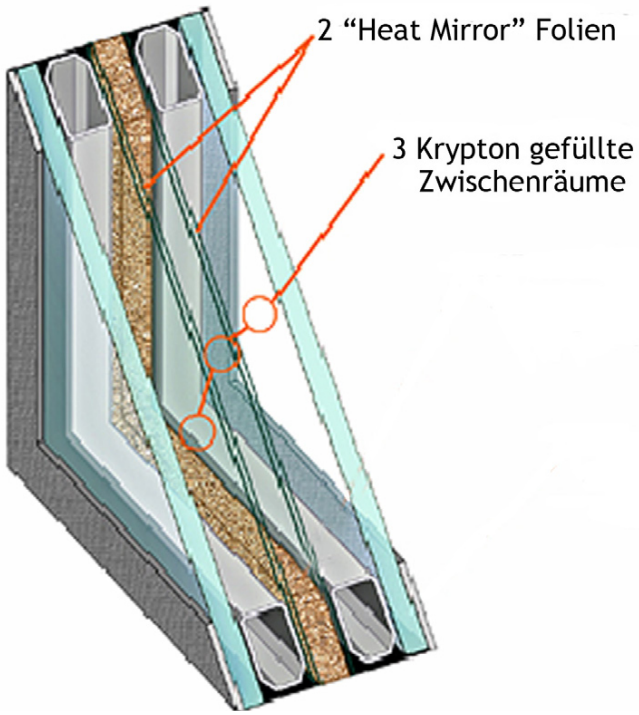


Bild 45: Isolierverglasung mit Folien im Scheibenzwischenraum (SZR) [Sou07]

2.5 Folienmanipulatoren

Als Manipulatoren bezeichnet man solche Elemente, die Art und Maß von inneren und äußeren Einflussfaktoren sowie deren Wechselbeziehung beeinflussen können. Um diesem Zweck zu dienen, müssen sie in irgendeiner Form veränderbar sein. Diese Veränderbarkeit kann über Mechanismen realisiert werden wie Klappen, Verschieben, Aufrollen oder Schwenken, sie kann aber auch durch Veränderung der Materialeigenschaften des Manipulators selbst geschehen, wie z.B. thermotrope, elektrotrope oder phototrope Reaktionen.
Manipulatoren sind kein spezielles Thema der Folienfassade. Sie werden in jeder Art von Fassade verbaut. Sie können aus allen möglichen Materialien bestehen, je nach der Anordnung des Manipulators können Belastungen wie Wind oder UV-Licht gewisse Einschränkungen für die Materialwahl und die Konstruktionsform mit sich bringen, die zu beachten sind.

2.5.1 Optische Manipulation

2.5.1.1 Folienrollos

Es ist möglich, Manipulatoren aus Folien herzustellen. Die offensichtlichste Form des Manipulators ist das Folienrollo. Es kann z.B. aus ETFE hergestellt werden. Die meisten Hersteller verwenden jedoch PET oder PE Folie. Bei diesen Folien ist darauf zu achten, dass PET und PE als Grundwerkstoff nicht UV-beständig sind. Die Folienrollos werden von den meisten Herstellern soweit UV-stabilisiert, dass sie hinter einer Glasscheibe eingesetzt werden können. Die Folie ist also für die Lichtdurchlässigkeit von Glasscheiben ausgelegt. Beim Einsatz von Folienrollos in ETFE Fassaden sind die Rollos mehr UV-Licht ausgesetzt, da die ETFE Folien eine größere Lichtdurchlässigkeit haben als Glas. Es müssen also spezielle Folienrollos verwendet werden, die entweder selbst aus ETFE bestehen oder einen größeren Anteil an Stabilisatoren enthalten.
Die Folien, die für Rollos eingesetzt werden, können unterschiedliche optische und mechanische Eigenschaften aufweisen. Die Möglichkeiten der Beeinflussung der optischen Eigenschaften sind die Einfärbung des Grundwerkstoffs, Metallbedampfung und Bedruckung. Die Bedruckung wird bei Rollos selten angewandt, Standardprodukte sind pigmentiert und metallbedampft, beides in verschiedensten Abstufungen. Zum Schutz der Metallbedampfung kann eine transparente Folienschicht auf die Bedampfung auflaminiert werden oder eine Schutzlackierung aufgetragen werden, da diese sonst zerkratzen könnte.
Die mechanische Beeinflussung kann durch Prägung erreicht werden. Durch das Einprägen von Falten (auch Plissierung genannt) wird das Material etwas steifer und wölbt sich weniger. Außerdem wird den Rollos oft eine feine geriffelte Oberfläche aufgeprägt, was weniger die mechanischen Eigenschaften beeinflussen soll, sondern vielmehr die optischen. Die Metallbeschichtung bewirkt nämlich eine Spiegelung, die durch die Verwölbung der Folie die

Fassade zu einem Spiegelkabinett werden ließe. Durch die Prägung ist die Folie entspiegelt. Es ist also kein Spiegelbild mehr erkennbar und Unebenheiten bei Verwölbungen werden kaum oder als nicht störend wahrgenommen.
Die Folien können auch als Lamellen senkrecht hängend eingesetzt werden mit den gleichen optischen Eigenschaften wie die Rollos. Es handelt sich dabei lediglich um eine andere Unterteilung und Bewegungsart als bei Rollos.

2.5.1.2 Beleuchtung mit Elektrolumineszenzfolie

EL-Folien sind Folien, die selbst leuchten. Das Grundprinzip ist ein Halbleiterphänomen. Elektronen werden mittels einer Wechselspannung in ein höheres Energieniveau gehoben und rekombinieren im sichtbaren Bereich. EL-Folien sind so genannte Lambertstrahler. Sie geben ein schmalbandiges Licht ab, beinahe monochromatisch. Die Folie kann weiß leuchten, Farben sind von 480nm - 580nm Wellenlänge möglich, was dem Bereich von blau bis gelb entspricht.

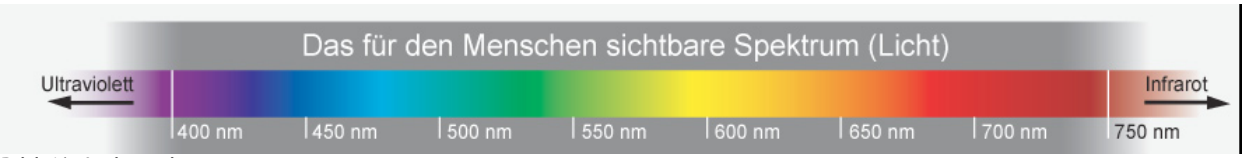


Bild 46: Lichtspektrum

Das Licht dieser Folien ist sehr augenschonend, da es keinen UV-Anteil enthält.
Diese Folien wurden ursprünglich für militärische Zwecke und für die Flugzeugindustrie entwickelt. Sie werden aber mittlerweile auch im zivilen Bereich eingesetzt. Die Folie ist nur bedingt UV-beständig und auch nur bedingt wasserfest. Beachtet man diese Einschränkungen, gehen Hersteller von einer Lebenserwartung von 10.000 bis 20.000 Betriebsstunden aus. Die Folie fällt dann nicht plötzlich aus, sondern die Leuchtkraft lässt langsam nach.
Eine EL-Folie besteht aus mehreren Schichten:

- Schutzfolie
- Transparente Elektrode
- Pigment und Isolation
- Untere Elektrode
- Schutzfolie

Die Folie hat eine Leistungsaufnahme von 50 W/m².
[Lig07]

2.5.1.3 Sonnenschutz mit luftdruckgesteuerter Mittellage

Eine spezielle Form des Manipulators, die nur bei pneumatischen Foliensystemen angewandt werden kann, ist die luftdruckgesteuerte Mittellage.
Ein pneumatisch vorgespanntes Kissen wird mit einer transparenten Folie und einer bedruckten Folie hergestellt. Zwischen diese beiden Folien wird eine dritte Folienlage eingefügt, die mit der inversen Bedruckung der außen liegenden bedruckten Folie versehen wird. Die Mittellage ist so konfektioniert, dass sie sich der bedruckten Außenfolie exakt anpassen kann. Durch eine Luftdrucksteuerung kann nun diese Mittellage entweder an die transparente Innenfolie gedrückt werden, was nur zu einer partiellen Verschattung führt oder an die bedruckte Außenfolie, was zu einer vollständigen Verschattung führt. Beispiele für diese Bauweise sind das Festo Technologiezentrum oder der Cycle Bowl auf der Expo 2000.

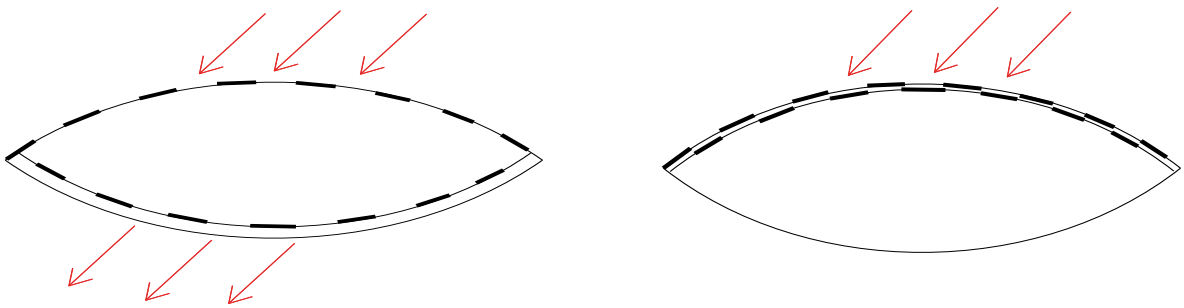


Bild 47: Sonnenschutz mit luftdruckgesteuerter Mittellage

2.5.2 Thermische Manipulation

Diese Form der Manipulation ist bisher nicht gebaut worden und ist auch in der Literatur nicht erwähnt. Der Bedarf einen Wärmedurchgangskoeffizienten erhöhen zu können, ist erst durch die immer weiter schreitende Optimierung der Gebäudehüllen entstanden. Ein immer weiter optimierter U-Wert bedeutet auf der einen Seite einen geringeren Wärmeverlust im Winter. Im Sommer hingegen bedeutet er, dass eine nächtliche Auskühlung des Gebäudes nur noch unzureichend stattfinden kann, woraus wiederum am Tage eine schnellere Überhitzung des Gebäudes resultiert. Diese Anpassung des U-Wertes an den jeweiligen Bedarfsfall kann mit den folgenden Maßnahmen erreicht werden.

2.5.2.1 Pneumatischer U-Wert Manipulator

Denkbar wäre ein nächtlicher Wechsel von Überdruckpneu zu Unterdruckpneu. Durch die Veränderung der Luftschichtdicke und Geometrie des Pneus verändert sich der U-Wert der Fassade.
Der Wechsel bringt das Problem mit sich, dass die Fassade beim Übergang nicht gespannt ist. Bei Windlasten, vor allem im Gebäuderandbereich, wo sich Verwirbelungen bilden können, kann das zu Problemen führen. Der Vorgang sollte also auf niedrige Windgeschwindigkeiten begrenzt werden und möglichst schnell von statten gehen.

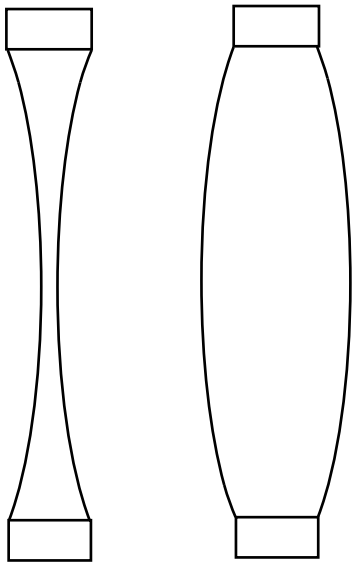


Bild 48: Pneumatischer U-Wertmanipulator

2.5.2.2 Mechanischer U-Wert Manipulator

Technisch weniger aufwendig als die pneumatische Manipulation wäre ein Pneu mit einer oder zwei mittleren Folienlagen. Diese mittleren Folien müssen in Form von Rollos ausgeführt werden, um die Luftzirkulation im Pneu freizugeben oder zu behindern und somit den U-Wert zu manipulieren.
Bei diesem System können die mechanisch unbelasteten Mittellagen im bauphysikalisch optimalen Abstand von 16mm angeordnet werden und unabhängig von äußeren Belastungen, die auf den Pneu einwirken, gesteuert werden.

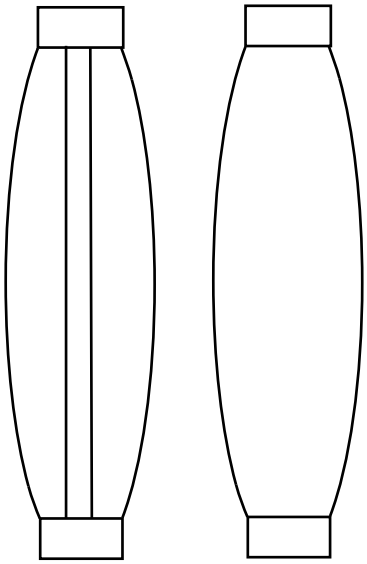


Bild 49: Mechanischer U-Wertmanipulator

3 Bauphysik

Die bauphysikalischen Eigenschaften einer Fassade sind der Wärmedurchgangskoeffizient, Tauwasserschutz, Bauakustik, Gesamtenergiedurchlassgrad und der Brandschutz. Im Rahmen dieser Arbeit werden Untersuchungen zu wärmedämmenden Eigenschaften und zur Wasserdampfdiffusion durchgeführt.
Bauakustische Eigenschaften wurden nicht näher untersucht, wobei klar ist, dass Folien keinerlei schallisolierende Funktion haben können.
Der Gesamtenergiedurchlassgrad (G-Wert) wird auch nicht näher analysiert. Der Beeinflussung der Lichtdurchlässigkeit von Folien ist durch Pigmentzugabe, Bedruckung, Metallbedampfung, Prägung und anderen Maßnahmen nahezu keine Grenze gesetzt, kann aber nur im Gesamtzusammenhang mit allen anderen Fassadenschichten bewertet und gemessen werden, was zu sehr aufwendigen Versuchsaufbauten führt.

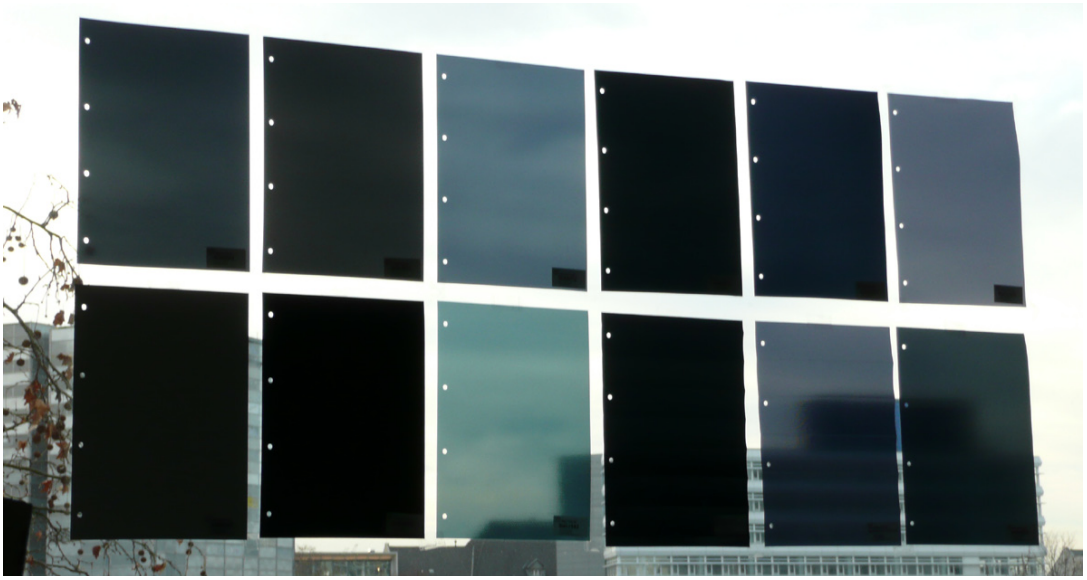


Bild 50: Folienrolloproben

Die hier gezeigte Auswahl an Folien gibt einen kleinen Eindruck von der Vielfalt optischer Eigenschaften.
Der Brandschutz wird auch in dieser Arbeit nicht weiter erforscht. Die meisten Folien weisen gegenüber Feuer keine besondere Resistenz auf. PE-Folie ist ungeeignet für Anwendungsbereiche, die irgendeine Brandschutzklasse erfüllen müssen. EFEP Folie gibt sogar toxische Gase bei der Verbrennung ab. ETFE Folie ist die einzige Folie, die eine Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung [ABP03] für den Brandfall hat. Sie ist der Brandschutzklasse B1 zugeordnet und tropft im Brandfall nicht brennend ab und ist selbstverlöschend. Sie brennt also nicht weiter, wenn der Brandherd verloschen ist. Der Brandschutz ist der Grund dafür, dass es manchmal auch bei den nur schwach mechanisch belasteten Folienrollos zum Einsatz von ETFE Folien kommt.

3.1 U-Wert

Den wärmedämmenden Eigenschaften von Folienkonstruktionen ist bisher in der Literatur kaum Beachtung geschenckt worden. Wenn Angaben zu finden sind, dann solche von Herstellern, die ohne genauere Information über Untersuchungsverfahren noch sonst irgendwelcher Differenzierung jeglicher wissenschaftlicher Grundlage entbehren. Das Unternehmen CENO TEC macht auf seiner Homepage folgende Angaben:

- U-Wert: 2 Folienlagen (1 Luftkammer) 2,95 W/m²K
- U-Wert: 3 Folienlagen (2 Luftkammer) 1,96 W/m²K
- U-Wert: 4 Folienlagen (3 Luftkammer) 1,47 W/m²K
- U-Wert: 5 Folienlagen (4 Luftkammer) 1,18 W/m²K

Diese Angaben können, wenn man sie in einer Versuchsreihe bestätigen könnte, lediglich als Anhaltspunkt gelten, da jegliche Randbedingungen fehlen und nicht anzunehmen ist, dass ein Kissen mit einer Dicke von 50 cm den gleichen U-Wert haben wird, wie eines mit einer Dicke von 1,50 m. Die nächste Frage, die man bei dieser Aufstellung stellen muss, ist die nach der Konstruktionsform. Die kann bei zwei Folienlagen schon stark variieren, bei fünf, wenn man mal von der mangelnden optischen Qualität in Bezug auf die Durchsichtigkeit absieht, ist die Formenvielfalt schon gewaltig.
Im Folgenden sind einige denkbare Folienkonstruktionen abgebildet.

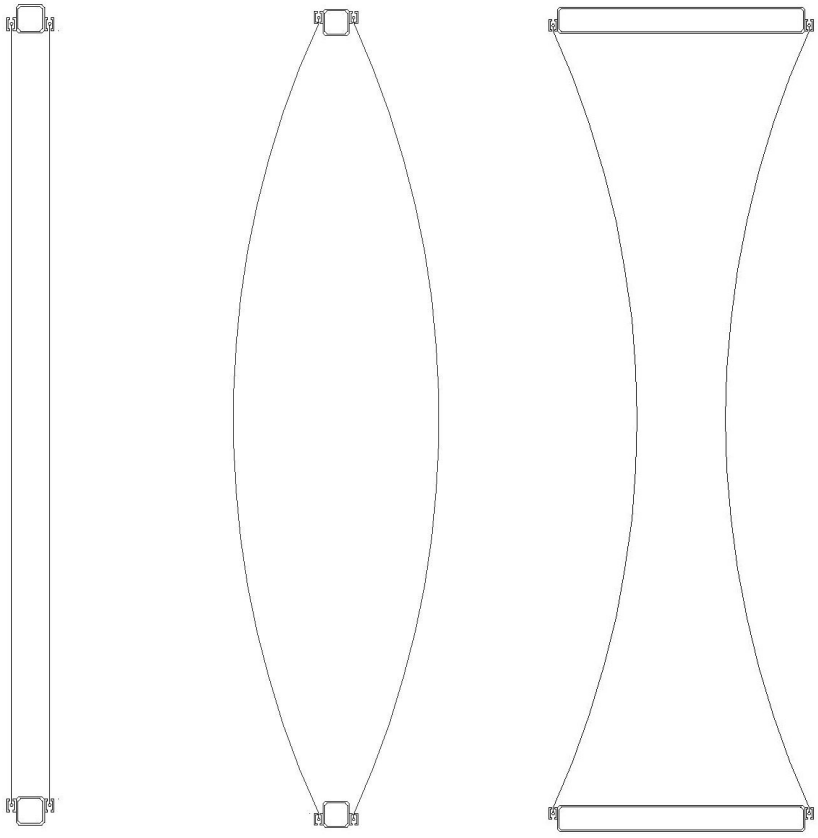


Bild 51: 2-lagige Folienmodule

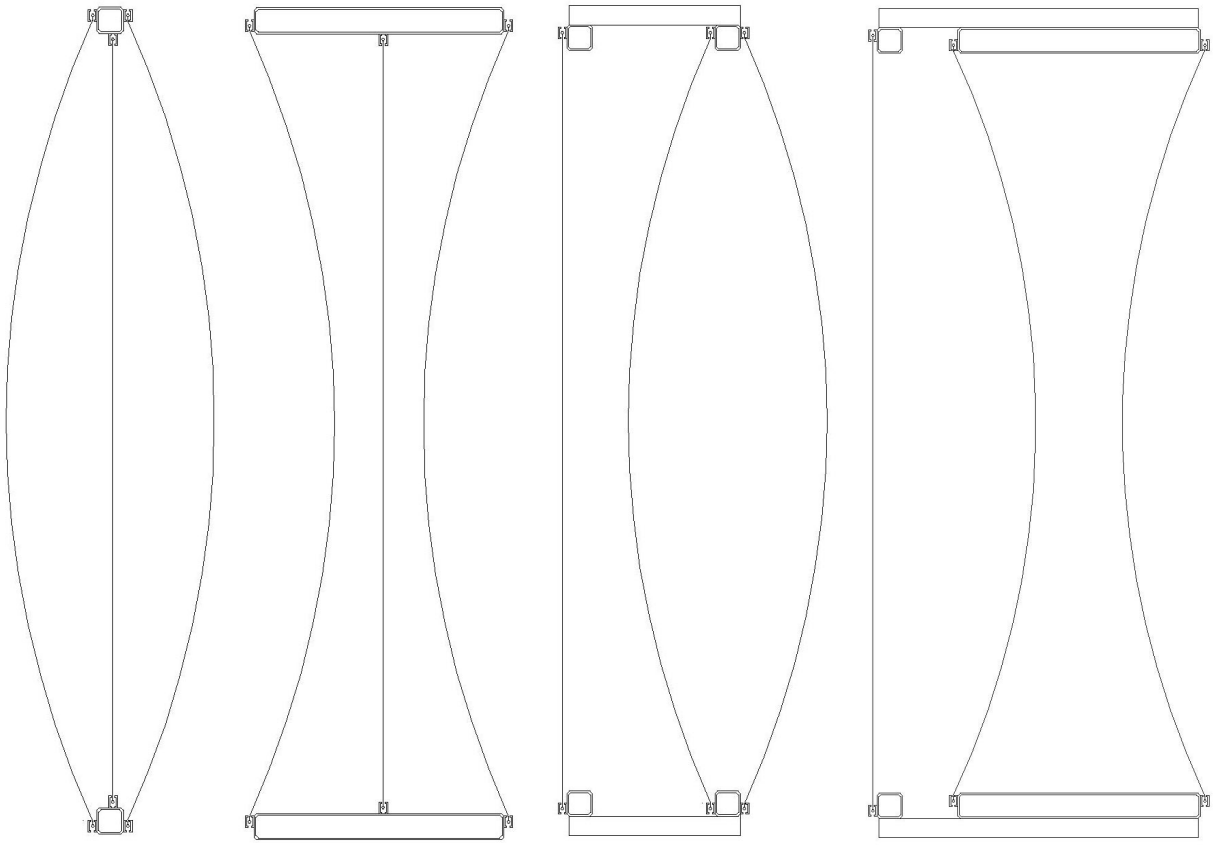


Bild 52: 3-lagige Folienmodule

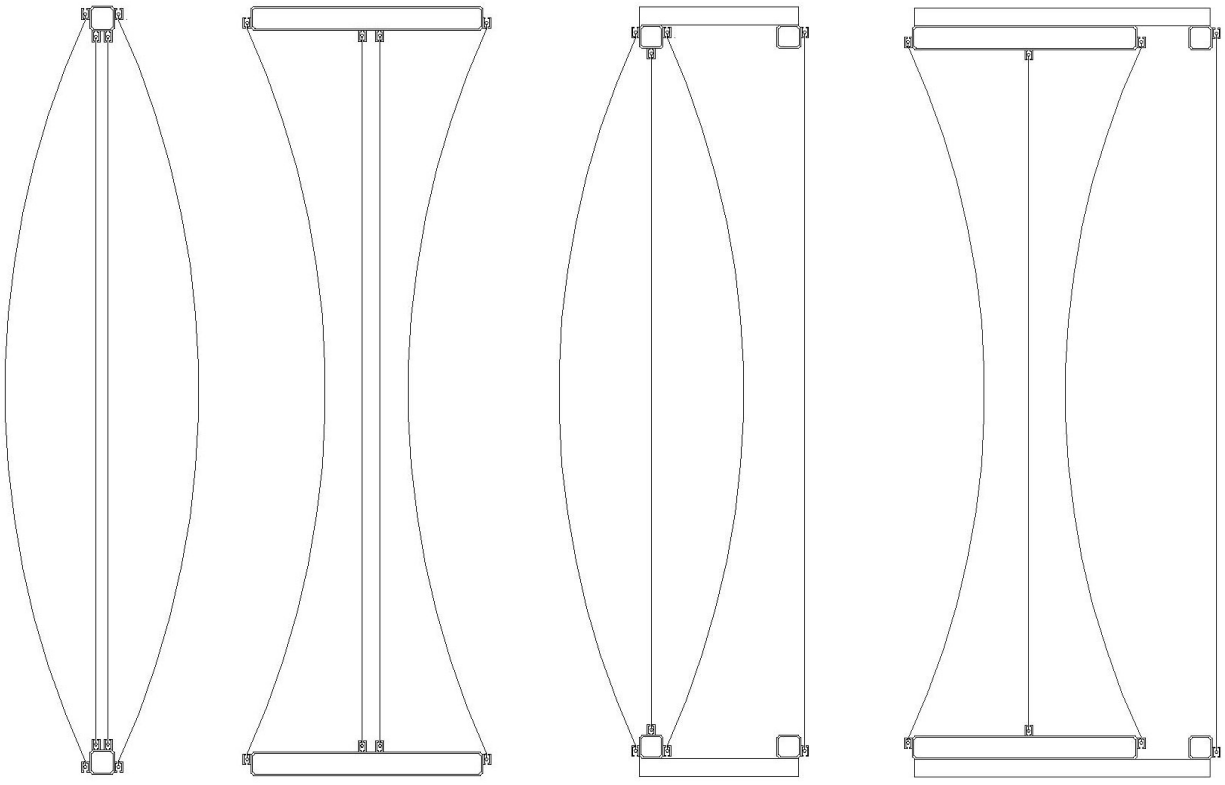


Bild 53: 4-lagige Folienmodule

Es ist offensichtlich, dass es keine pauschale Aussage über den U-Wert einer 2-, 3- oder 4-lagigen Konstruktion geben kann. Es kommt auf die Formgebung, die Randdetails und vieles mehr an.
Um die bauphysikalische Qualität von Folienfassaden beurteilen zu können, wird zunächst dargestellt, wie der Wärmefluss in der Konstruktion abläuft, dann wird der Versuch unternommen, einen U-Wert für eine zweilagige Konstruktion rechnerisch zu ermitteln. Anschließend werden zur experimentellen Ermittlung des U-Wertes an zweilagigen Folienkonstruktionen sieben Versuche in einer sogenannten Hotbox durchgeführt.

3.1.1 Wärmetransport innerhalb der Fassade

Die Frage ist, wie eine optimal dämmende Folienkonstruktion aussehen muss und nach welchen Kriterien man die Lagen anordnen sollte.
Die Wärmeenergie wird über Konvektion und Strahlung von der Umgebungsluft in die Folie eingetragen und verlässt über Konvektion und Strahlung diese auch wieder zur nächsten angrenzenden Luftschicht. Innerhalb einer Kammer wird Wärmeenergie über Wärmeleitung übertragen. Der konvektive Wärmeübergang und die Wärmeleitung werden durch Luftströmungen begünstigt.
Die Folienlagen dienen dem Zweck, die freie Luftströmung zwischen innen und außen zu verhindern und für Luftwalzen innerhalb der Fassade möglichst ungünstige Geometrien zu schaffen.
Je mehr Luftkammern der Wärmestrom durchfließen muss, umso besser wird der U-Wert, umso schlechter werden aber auch die optischen Qualitäten der Fassade. Es ist also abzuwägen, wie viele Folien notwendig sind, um den thermischen und den optischen Qualitäten der Fassade gerecht zu werden.
Bei Isolierverglasungen hat sich ein optimaler Scheibenabstand von 16mm durchgesetzt [Gre03]. Bei diesem Scheibenabstand kann sich keine Luftwalze im Scheibenzwischenraum bilden und die Luftschicht kann als ruhend angenommen werden. Solche Abstände sind für Folienkonstruktionen ungeeignet, da die großen Verformungen, bei Lastangriffen den Abstand schnell auf Null abbauen würden. Dieser sehr kleine Abstand zeigt aber deutlich die Schwierigkeit, mit Folienkonstruktionen eine gute Wärmedämmung zu erreichen. Im Fall von pneumatisch vorgespannten Konstruktionen entsteht schnell ein Folienabstand von 1m.
In bauchigen Formen können sich Luftwalzen sehr gut ausbilden. An der warmen Seite steigt die Luft an der Folie auf und an der kalten Seite fällt sie wieder ab. Es ist also nicht unbedingt davon auszugehen, dass ein besonders dickes bauchiges Kissen besonders gut wärmedämmend ist, da für den Wärmetransport nicht nur die Dicke ausschlaggebend ist, sondern auch die Luftbewegung, die in sich in breiteren Bereichen besser ausbilden kann als in schmalen. Obwohl der Weg in einer Luftwalze länger ist, den die Wärme zurücklegt, ist der Energietransport in der Luftströmung effektiver, also schlechter für den U-Wert, als über Wärmeleitung in ruhender Luft.

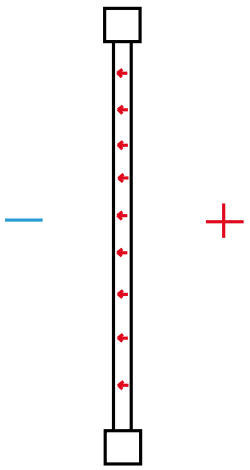


Bild 54: Wärmefluss im 2-lagigen Folienmodul

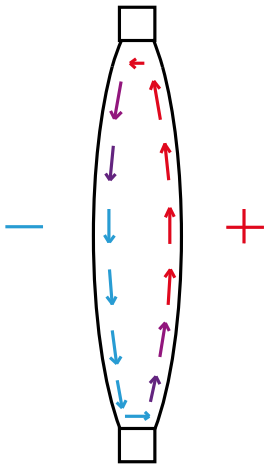


Bild 55: Erwartete Luftbewegung im Überdruckpneu

Die Versuche, die im Rahmen dieser Arbeit zur Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass bei Pneus besonders im mittleren Bereich, also da wo das Kissen am dicksten ist, die Oberflächentemperaturen am stärksten von der Umgebungstemperatur abweichen, der Wärmetransport also am stärksten stattfindet. Die oben dargestellte theoretische Skizze muss also durch die Versuchsergebnisse dahingehend korrigiert werden, dass die Luftwalze vor allem im mittleren Bereich wirkt und sich in den Randbereichen höchstens kleinere Wirbel bilden.

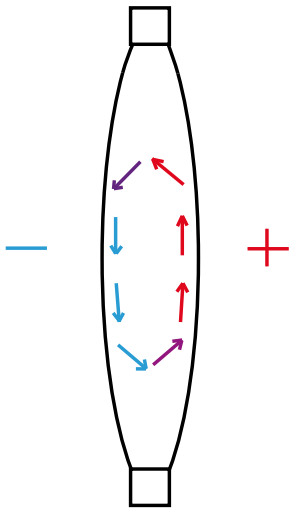


Bild 56: Nach Versuchsauswertung modifizierter Wärmefluss

Wird eine Mittellage in den Pneu eingeführt, ist die Temperaturdifferenz der angrenzenden Kammern kleiner und somit wird auch die Strömungsgeschwindigkeit der Luft geringer. Außerdem muss die Wärme eine zusätzliche Folienlage überwinden. Die einzelnen Kammern innerhalb des Pneus werden kleiner und somit kann die Luft schlechter zirkulieren.

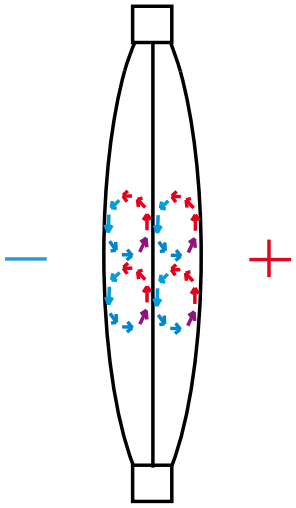


Bild 57: Schematische Luftbewegung im 3-lagigen Überdruckpneu

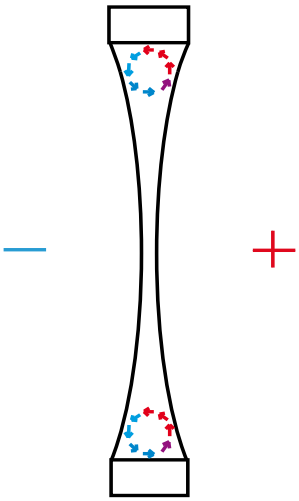


Bild 58: Schematische Luftbewegung im Unterdruckpneu

Es stellt sich aber prinzipiell die Frage, ob der Überdruckpneu eine geeignete Form für Folienfassaden darstellt, wenn die Luftwalze der optimale Wärmetransport ist und der Überdruckpneu durch seine bauchige Form genau diese unterstützt. Der Unterdruckpneu mit seiner konkaven Form behindert die Luftströmung offensichtlich besser. Auch hier können Luftströmungen entstehen. Mehrere kleine Luftwalzen stellen aber, wie oben schon erwähnt, einen uneffektiveren Energietransport dar, als eine große, da die Streichlänge über die Folienoberfläche kleiner wird und somit die Energieaufnahme der Luft geringer. Aus der daraus folgenden geringeren Erwärmung der Luft an der Oberfläche folgen auch eine geringere Luftgeschwindigkeit und ein langsamerer Wärmetransport.

Beim Spannen von Zwischenlagen sollte auch in Erwägung gezogen werden, die Mittellage schräg zu spannen. Durch den schräg zulaufenden Zwischenraum wird die Luftzirkulation in den Eckbereichen erschwert. Bei Überdruck Pneus wird dies durch die synklastische Form keinen Einfluss haben, bei mechanisch gespannten Konstruktionen hingegen kann es die Luftzirkulation behindern.

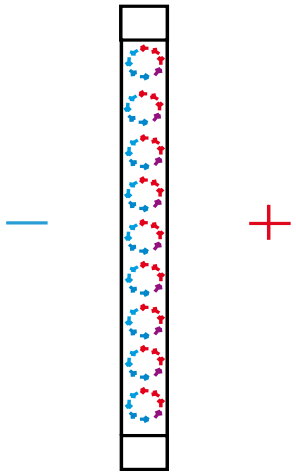


Bild 59: Schematische Luftbewegung in 2-lagig mechanisch vorgespannten Modul

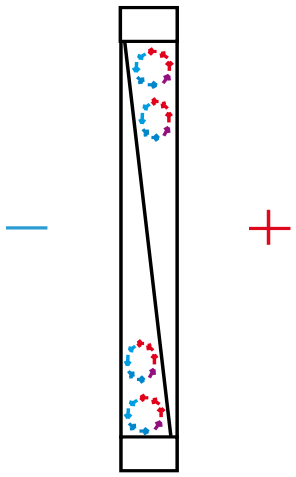


Bild 60: Schematische Luftbewegung in 3-lagig mechanisch vorgespannten Modul mit schräger Mittelfolie

3.1.2 Rechnerische U-Wertermittlung

Es gibt keine Norm, die ein Rechenverfahren für Folienkonstruktionen vorgibt. Es existieren zwei Normen zur Berechnung von U-Werten. Hier ist die DIN EN ISO 6946 Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren vom Juni 2005 zu nennen. Der Anwendungsbereich dieser Norm schließt allerdings Türen, Fenster und andere verglaste Einheiten aus. Streng genommen ist eine Folienfassade keine verglaste Einheit. Die thermischen Vorgänge werden aber denen von verglasten Konstruktionen mehr ähneln, als denen von opaken Konstruktionen. Die DIN EN 673 Glas im Bauwesen – Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) scheint zunächst das geeignete Werkzeug zur Ermittlung des U-Wertes, enthält aber im Kapitel 1: „Anwendungsbereich“ auch eine wesentliche Einschränkung, die für pneumatische Folienkonstruktionen ein Ausschlusskriterium darstellt. „Die verschiedenen Ebenen der Verglasung müssen eben und parallel zueinander sein.“
Da es keine anderen normativen Anhaltspunkte zu Folienkonstruktionen gibt, wird hier zunächst mit diesen beiden Normen eine U-Wertermittlung durchgeführt. Als Erstes ist zu klären, welche thermischen Vorgänge die Wärme durch die Folienkonstruktion durchleiten bzw. was den Wärmefluss behindert.

3.1.2.1 Wärmeübergangswiderstände

An der Innen- und an der Außenseite eines Bauteils gibt es einen Wärmeübergangswiderstand bzw. Wärmeübergangskoeffizient. In DIN 6946 sind diese abhängig von der Richtung des Wärmestroms. Im Fall der senkrecht stehenden Fassade, also einem horizontalen Wärmestrom, ist der Wärmeübergangswiderstand innen mit R_{si} = 0,13 m²·K/W und außen mit R_{se} = 0,04 m²·K/W festgelegt. In DIN 673 werden diese Werte als Wärmeübergangskoeffizienten angegeben. Der äußere Wärmeübergangskoeffizient wird mit h_e = 23 W/(m²·K) angegeben, was als Kehrwert $1/h_e$ = 0,04 m²·K/W entspricht und somit dem aus DIN 6946 gleich ist. Der innere Wärmeübergangskoeffizient wird berechnet mit $h_i = h_r + h_c$, wobei h_r der Strahlungsleitwert ist und h_c der Wärmeübergangskoeffizient infolge von Konvektion. Der Strahlungsleitwert beträgt bei einem Natron-Kalk-Glas h_r = 4,4 W/(m²·K) und der Wärmeübergangskoeffizient h_c = 3,6 W/(m²·K). Daraus errechnet sich ein Gesamtwert für h_i von h_i = 4,4 + 3,6 = 8,0 W/(m²·K), was als Kehrwert einem Wärmeübergangswiderstand von $1/h_i$ = 0,13 m²·K/W entspricht.
Die Werte sind also in beiden Normen identisch. Die DIN 673 differenziert aber über den Strahlungsleitwert den inneren Wärmeübergangswiderstand. Bei Kenntnis des genauen Emissionsvermögens der Materialoberfläche wird sich der Wert für den inneren Wärmeübergangswiderstand genauer berechnen lassen, als dies in der DIN 6946 der Fall ist.

3.1.2.2 Konvektion

Die einzelnen Schichten des Fassadenaufbaus haben jeweils ihren eigenen Wärmedurchgangswiderstand [m·K/W], der, multipliziert man ihn mit der Schichtdicke, den Wärmedruchlasswiderstand [m^2·K/W] ergibt. Auch der Luftraum hat einen Wärmedurchlasskoeffizient. Dieser ist aufwendiger zu berechnen, als der einer Materialschicht, da Luft, in Abhängigkeit von der Luftbewegung, unterschiedliche Konvektions- und Wärmeleitungseigenschaften aufweist.
In DIN 673 wird dieser Wärmedurchlasskoeffizient mit h_g bezeichnet. Dieser Wert hängt von der Luftschichtdicke, der Richtung des Wärmestroms, der Temperaturdifferenz, der mittleren Temperatur, der Luftdichte, der dynamischen Viskosität, der spezifischen Wärme der Luft und ihrer Wärmeleitfähigkeit ab.
In DIN 6946 wird der Wärmeübergangskoeffizient durch h_a gekennzeichnet. Dieser Wert für die Konvektion wird berechnet mit 0,025/d, wobei „d“ die Luftschichtdicke ist oder ein Tabellenwert $h_{a,c}$, der sich bei einem horizontalen Wärmestrom errechnet mit $h_{a,c}=0{,}73(\triangle T)^{1/3}$, wobei $\triangle T$ die mittlere Temperatur ist. Der Größere der beiden Werte ist maßgebend.

3.1.2.3 Strahlung

Zwischen zwei Glasscheiben (bei Isolierverglasungen), findet ein Wärmeaustausch durch Strahlung von einer Scheibe zur gegenüberliegenden statt. Dieser Vorgang wird auch bei Folienkonstruktionen stattfinden. Durch die gekrümmten Oberflächen ist dieser Vorgang schwer zu erfassen. Deshalb wird in den Normen auch die Einschränkung gemacht, dass nur ebene, parallele Oberflächen zulässig sind. Der Wert für die Strahlung hängt von dem effektiven Emissionsvermögen der Oberflächen und der mittleren Temperatur des Luftraumes ab. Das Ergebnis ist in beiden Normen identisch.

3.1.2.4. Berechnung nach DIN EN 673 und DIN EN ISO 6946

DIN EN 673: 1997	DIN EN ISO 6946: 2005
U-Wert $\frac{1}{U} = \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_i}$	U-Wert $U = \frac{1}{R_T}$ Mit $R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \ldots R_n + R_{se}$
Wärmeübergangswiderstand innen $\frac{1}{h_i} = 0{,}13\,\frac{m^2 \cdot K}{W}$	Wärmeübergangswiderstand innen $R_{si} = 0{,}13\,\frac{m^2 \cdot K}{W}$
Wärmeübergangswiderstand außen $\frac{1}{h_e} = 0{,}04\,\frac{m^2 \cdot K}{W}$	Wärmeübergangswiderstand außen $R_{se} = 0{,}04\,\frac{m^2 \cdot K}{W}$
Gesamtwärmedurchlasswiderstand $\frac{1}{h_t} = \sum_1^N \frac{1}{h_s} + \sum_1^M d_j \cdot r_j$ mit $d_{1,2} \cdot r_{1,2} = 0{,}0002m \cdot \frac{1}{0{,}24\,\frac{W}{m \cdot K}} =$ $0{,}00083\,\frac{m^2 \cdot K}{W}$	Gesamtwärmedurchlasswiderstand $R_1 + R_G + R_3$ mit $R_{1,3} = \frac{d}{\lambda} = \frac{0{,}0002m}{0{,}24\,\frac{W}{m \cdot K}} =$ $0{,}00083\,\frac{m^2 \cdot K}{W}$
Wärmedurchlasskoeffizient des Luftraumes $h_s = h_r + h_g$ mit $h_r = 4 \cdot \sigma \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} T_m^3$ mit $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\,\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ $T_m = 283K$ $\varepsilon_{1,2} = 0{,}837$	Wärmedurchlasswiderstand des Luftraumes $R_g = \frac{1}{h_a + h_r}$ mit $h_r = E \cdot h_{ro}$ mit $E = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$ $\varepsilon_{1,2} = 0{,}837$ $h_{ro} = 4 \cdot \sigma \cdot T_m^3$ $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\,\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ $T_m = 283K$
Bis zu diesem Punkt sind die Berechnungsverfahren identisch	

$h_g = Nu \frac{\lambda}{s}$ $Nu = A(Gr \cdot \mathrm{Pr})^n$ A=0,035 n=0,38 $Gr = \frac{9{,}81 \cdot s^3 \cdot \Delta T \cdot \rho^2}{T_m \cdot \mu^2}$ $\mathrm{Pr} = \frac{\mu \cdot c}{\lambda}$ s = Luftschichtdicke $\Delta T = 15K$ $\rho = 1{,}232 \frac{kg}{m^3}$ $\mu = 1{,}761 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}$ $\lambda = 2{,}496 \cdot 10^{-2} \frac{W}{m \cdot K}$ $c = 1{,}008 \cdot 10^3 \frac{J}{kg \cdot K}$ $T_m = 283K$ Wenn Nu<1, dann Nu=1 setzen	$h_a =$ größerer Wert von $\frac{0{,}025}{d}$ $0{,}73(\Delta T)^{1/3}$ $\Delta T = 15K$

Der Unterschied zwischen den beiden Normen besteht also ausschließlich in der Berechnung des konvektiven Wärmeübergangs durch die Luftschicht. Alle anderen Berechnungsgrößen sind identisch.

Die Folienstärke hat keinen nennenswerten Einfluss auf den U-Wert. Den wesentlichen Einfluss hat die Luftschichtdicke. Hierbei ist der Strahlungsanteil unabhängig von der Luftschichtdicke, lediglich die Konvektion wird von ihr beeinflusst.

Nach DIN 6946 ändert sich der U-Wert nur im Bereich von 0-14mm Luftschichtstärke. In diesem Bereich wird der Wert für h_a mit 0,025/d berechnet. Ab 14mm ist der Wert für mit $0{,}73(\triangle T)^{1/3}$ zu berechnen, da dieser dann größer ist als 0,025/d.

Nach DIN 673 ist die Konvektion mit zu $h_g = Nu \frac{\lambda}{s}$ ermitteln, wobei die Zahl *Nu* nicht größer als 1 sein darf. Das bedeutet, solange die Zahl *Nu* noch kleiner als 1 ist, verändert sich der U-Wert, danach bleibt er konstant. Dies trifft ab einer Luftschichtdicke von etwa 1600mm zu, aber schon ab 1000 mm ändert sich der U-Wert nur noch in der dritten Nachkommastelle.

Bei einer Gegenüberstellung der U-Werte nach den beiden Normen ergibt sich für ein Element mit konstanter Luftschichtdicke im Zwischenraum die folgende Tabelle:

Luftschichtdicke [mm]	U-Wert nach DIN 673	U-Wert nach DIN 6946
10	3,01	3,00
100	2,35	2,83
200	2,31	2,83
300	2,29	2,83
400	2,29	2,83
500	2,28	2,83
1000	2,27	2,83
1500	2,27	2,83
2000	2,27	2,83

Die DIN 6946 zeigt ab einer Luftschichtdicke von 100mm überhaupt keine Veränderung des U-Wertes. Es ist höchst unwahrscheinlich, dass dies die Realität angemessen widerspiegelt. Auch die DIN 673 zeigt ab 200mm Luftschichtdicke nur noch sehr geringe Veränderungen des U-Wertes. Der U-Wert wird hierbei mit größer werdender Luftschicht immer besser. Die Versuche im Fassadenprüfstand werden Aufschluss darüber geben, ob dies wirklich zutreffend ist.

3.1.3 Experimentelle U-Wertermittlung an der TU-Berlin

3.1.3.1 Der Prüfstand

Die Versuche wurden in einem Fensterprüfstand durchgeführt. Dieser Prüfstand ist in eine Warmseite und eine Kaltseite unterteilt. In die Wand zwischen den beiden Räumen wird das zu prüfende Fenster eingebaut. Auf der Warmseite wird nach dem Einbau des Fensters ein Heizkasten vor das Fenster gestellt, der mit einer Wärmequelle und mit Lüftern zur gleichmäßigen Verteilung der Wärme ausgestattet ist. Die Öffnung zwischen Warm- und Kaltseite, in die der Probekörper eingebaut wird, ist 1,25 m breit und 1,50 m hoch.

1 Ventilator
2 Elektrische Heizung
3 Strahlungsschirm
4 Heizkasten
5 Probekörper

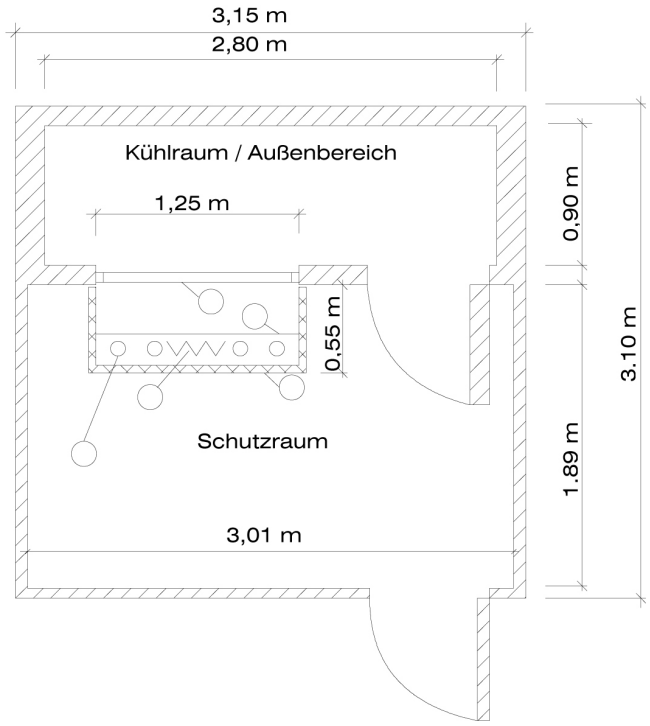


Bild 61: Grundriss Fassadenprüfstand

Für die dreidimensionale Darstellung wurde die obere Decke, eine Wand und zwei Wände zur Hälfte entfernt, um den Versuchsaufbau besser erkennen zu können. Der Versuchsstand hat eine Öffnung zwischen dem warmen und dem kalten Raum, in die das Fenster (der Probekörper) eingebaut wird. Außerdem hat er zwei Türen. Eine um den Schutzraum (warm) von außen betreten zu können und eine, um vom Schutzraum und den Kaltraum zu gelangen. Beide Türen sind genau so hochwertig gedämmt, wie die Wände, in die sie eingebaut sind.

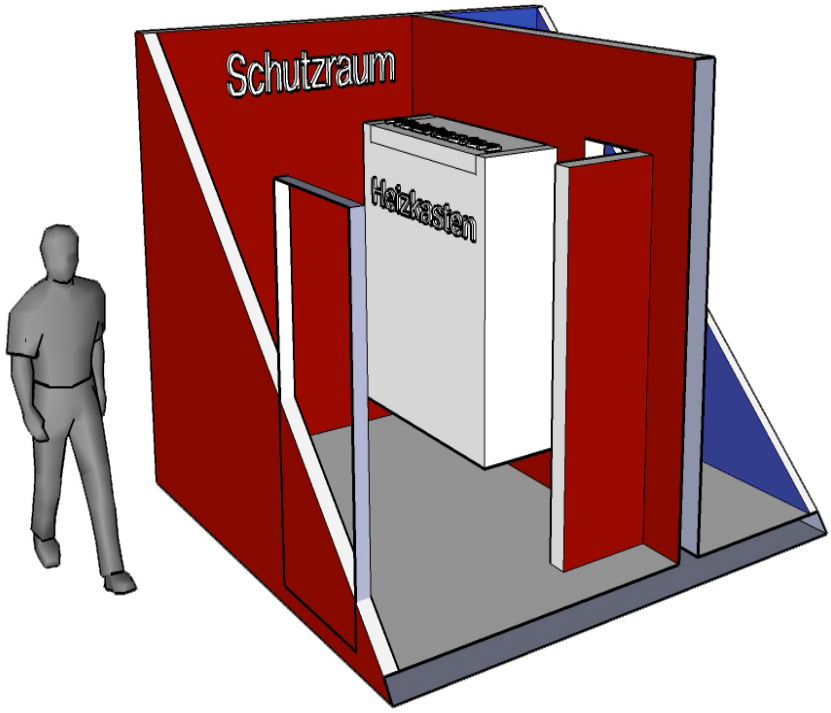


Bild 62: Versuchsstand Schutzraumseite

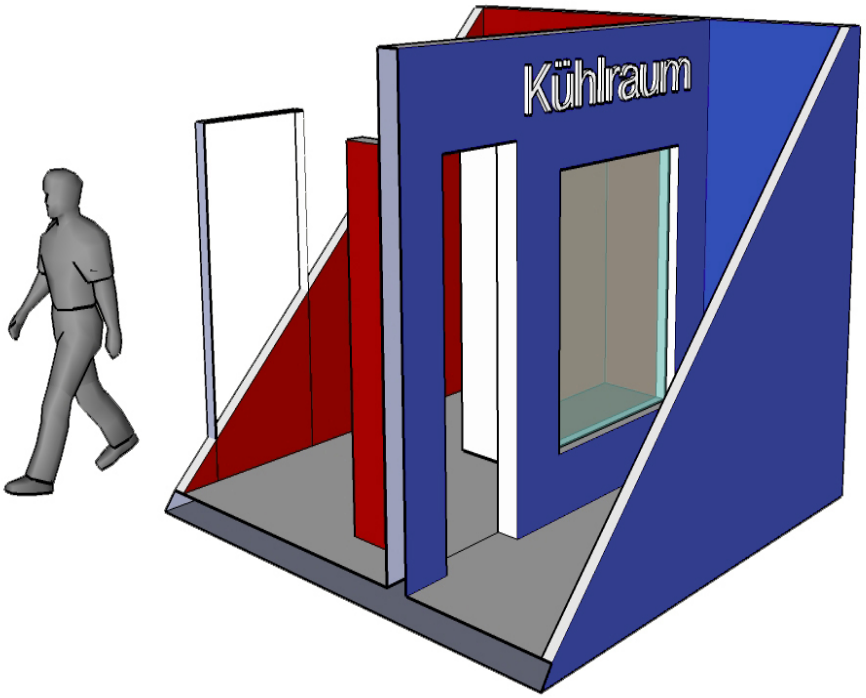


Bild 63: Versuchsstand Kaltraumseite

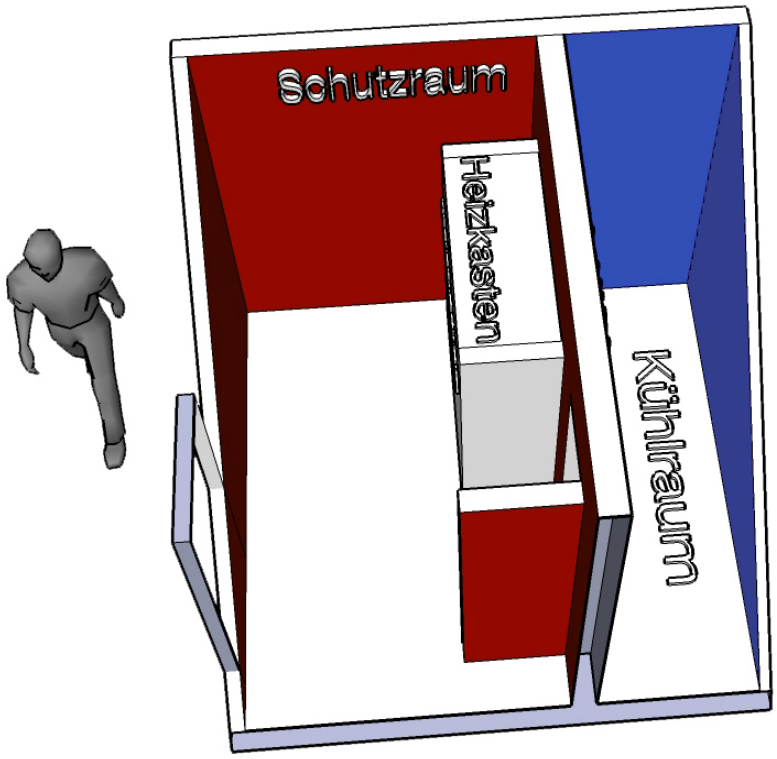


Bild 64: Versuchsstand Draufsicht

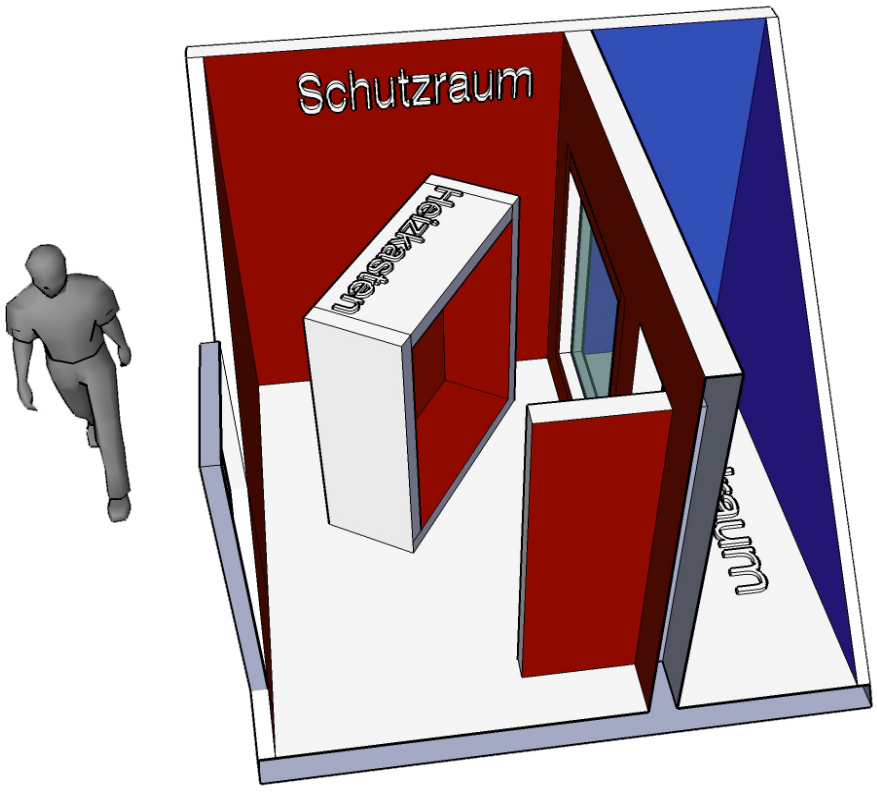


Bild 65: Versuchstand mit abgrücktem Heizkasten

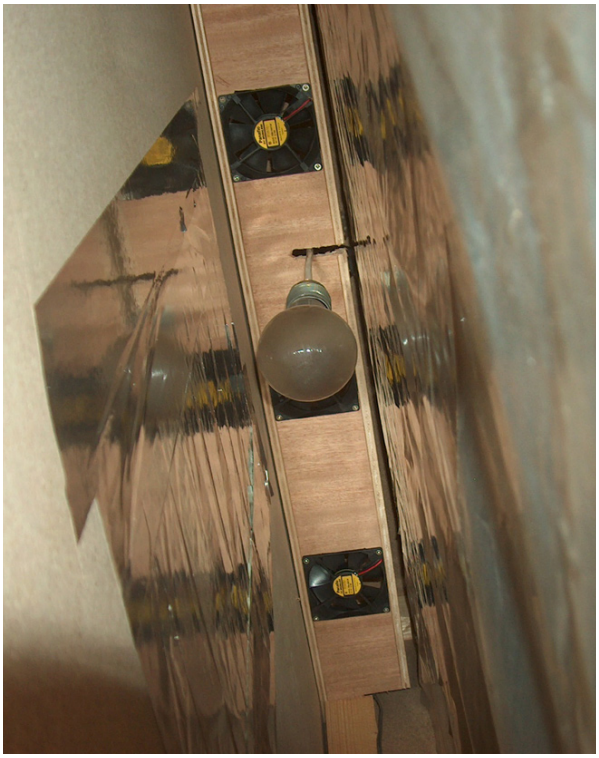


Bild 66 Innenansicht Heizkasten mit Wärmequelle

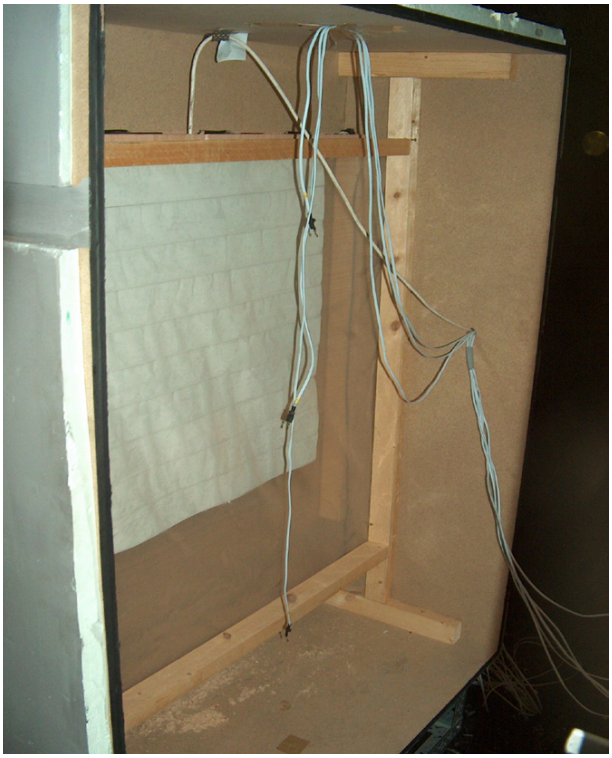


Bild 67: Innenansicht Heizkasten

3.1.3.2 Funktionsprinzip des Prüfstands

Während der Kühlraum auf 0°C abgekühlt wird, wird der Schutzraum auf Raumtemperatur von 20°C belassen. Im Heizkasten, der direkt vor dem Probekörper montiert ist, befindet sich die einzige Wärmequelle.

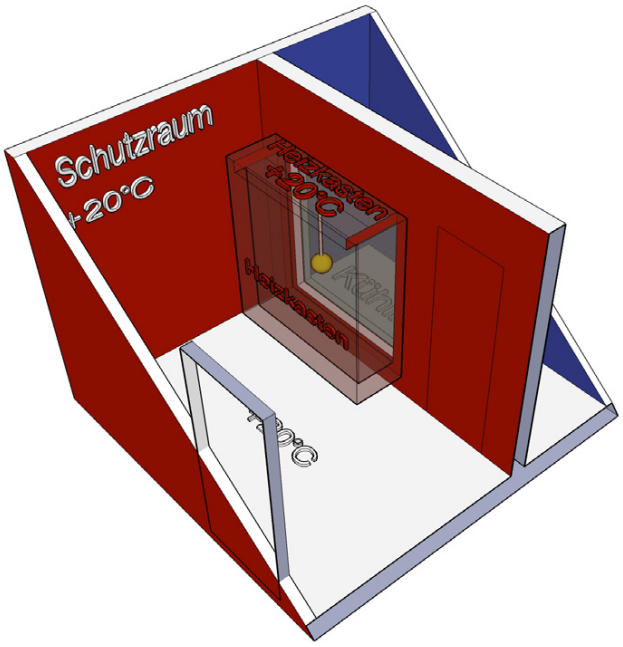


Bild 68: Versuchstand mit transparentem Heizkasten

Die Wärmequelle des Heizkastens wird so reguliert, dass der Heizkasten und der Schutzraum exakt die gleiche Temperatur haben. So wird gewährleistet, dass die Energie, die dem Heizkasten zugeführt wird, ausschließlich durch den Probekörper entweicht. Gemessen wird die Energie, die notwendig ist, um den Heizkasten auf der Schutzraumtemperatur von etwa 20°C zu halten.

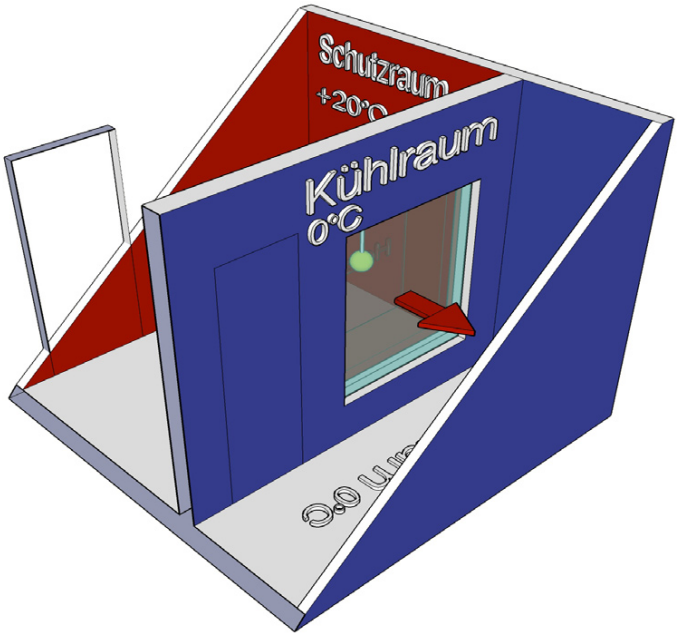


Bild 69: Gemessener Wärmefluss im Versuchsstand

Ein Strahlungsschirm (in der 3D Darstellung nicht dargestellt), der zwischen der Glühlampe und dem Probekörper hängt, soll verhindern, dass die eingebrachte Energie durch Strahlung in den Kühlraum abgegeben wird.
Ventilatoren (in der 3D Darstellung nicht dargestellt) sollen die Energie gleichmäßig verteilen und eine Temperaturschichtung im Heizkasten verhindern.

3.1.3.3 Probemessung

Zuerst werden alle Temperatursensoren mit einem geeichten Thermometer verglichen und die Differenz dokumentiert, um Messfehler aus dem Ergebnis herausrechnen zu können. Dann werden im Kühlraum, im Heizkasten und im Schutzraum jeweils drei Temperatursensoren aufgehängt, um die Temperatur in verschiedenen Höhen messen zu können. Auf der Oberfläche der Prüfkörper werden auf der Warm- und der Kaltseite jeweils fünf Sensoren aufgeklebt.
Zunächst wird zur Überprüfung der Messapparatur ein Probekörper mit bekanntem Wärmedurchgangskoeffizienten eingebaut. Hierbei handelt es sich um eine 4cm starke Styroporplatte mit einer Wärmeleitgruppe WLG 040. Diese Platte hat also Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0{,}040 \frac{W}{m \cdot K}$. Der U-Wert eines Bauteils errechnet sich mit

$$U = \frac{1}{R_T} \quad \text{und} \quad R_T = \frac{1}{h_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \ldots + \frac{d_n}{\lambda_n} + \frac{1}{h_e}.$$

Anordnung der Messensoren:
Auf der kalten Seite wurden die Sensoren 1-5 auf die Folie aufgeklebt während die Sensoren 6-8 in den Raum gehängt wurden.

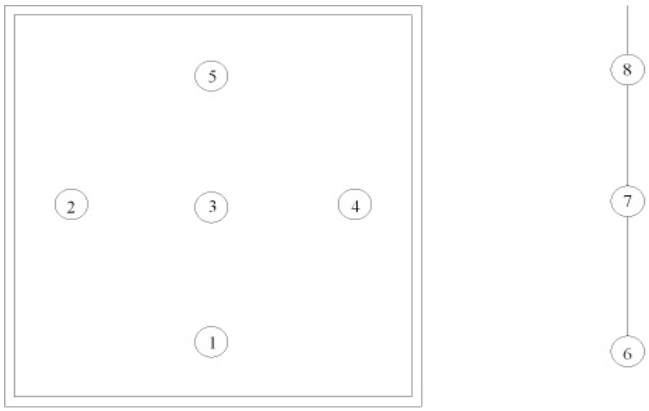


Bild 70: Sensoranordnung Kaltseite (Zeichnung)

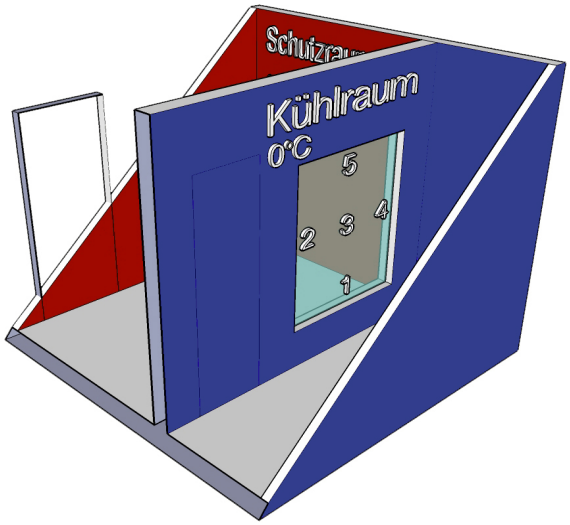


Bild 71: Sensoranordnung auf Probekörper (Kaltseite)

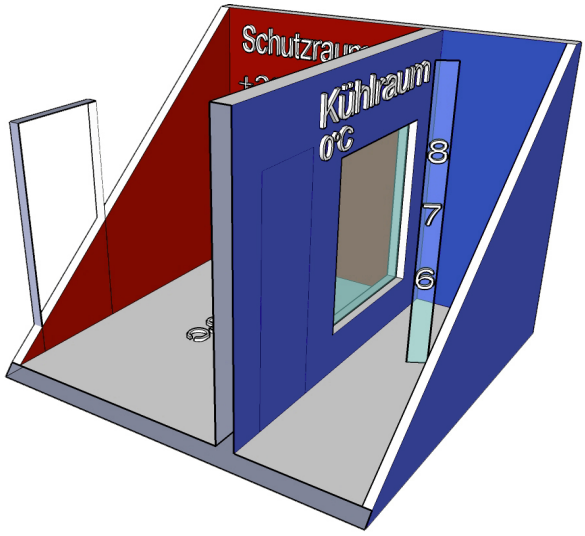


Bild 72: Sensoranordnung im Kaltraum

Auf der warmen Seite wurden die Sensoren 11-15 auf die Folie aufgeklebt und die Sensoren 16-18 in den Raum gehängt.

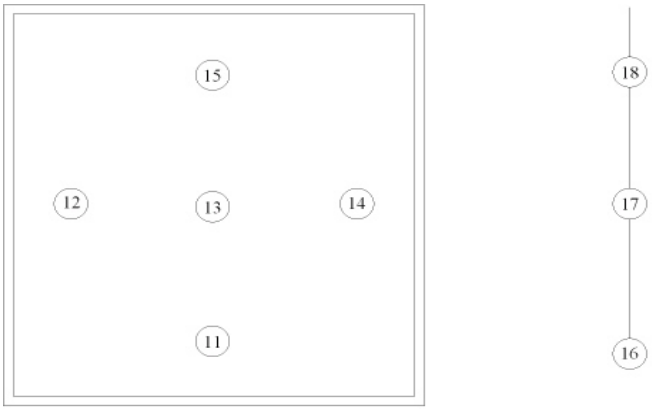


Bild 73: Sensoranordnung Warmseite (Zeichnung)

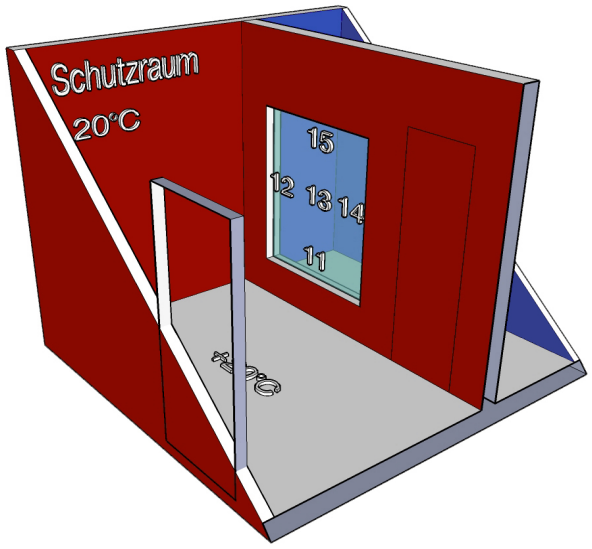


Bild 74: Sensoranordnung auf Probekörper (Warmseite)

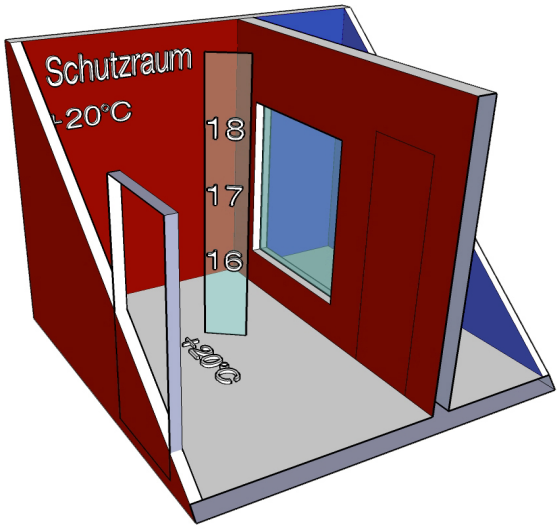


Bild 75: Sensoranordnung im Warmraum

Versuchsergebnis des Probekörpers:

Bild 76: Versuchsergebnis der Styroporplatte

Die Werte für $\frac{1}{h_i}$ und $\frac{1}{h_e}$ sind in der folgenden Auswertungstabelle des Testversuchs

als R_{si} uns R_{se} angegeben.
Folgende Formeln wurden zur Werteermittlung verwendet:
Mittelwert Kaltraum = Mittelwert von Sensoren 6, 7 und 8
Mittelwert Warmraum = Mittelwert von Sensoren 16, 17 und 18
Temperaturdifferenz = Mittelwert Warmraum - Mittelwert Kaltraum
q = Fläche / Leistung gesamt
U-Wert = q / Temperaturdifferenz
Mitteltemp. Fenst. Innen = Mittelwert von Sensoren 11, 12, 13, 14 und 15
R_{si} = (Mittelwert Warmraum - Mitteltemp. Fenst. Innen) / q
Mitteltemp. Fenst. außen = Mittelwert von Sensoren 1, 2, 3, 4 und 5
R_{se} = (Mittelwert Kaltraum - Mitteltemp. Fenst. außen) / q
Lambda = Dicke /(1/U - R_{si} - R_{se})

Mittelwert Kaltraum	-0,117	Kelvin
Mittelwert Warmraum	21,102	Kelvin
Temperaturdifferenz	21,219	Kelvin

Fläche	1,875	m^2
Leistung Lampe	28,000	W
Leistung Lüfter	6,000	W
Leistung gesamt	34,000	W
Wärmestromdichte q	18,133	W/m^2

U-Wert	0,855	W/m^2K

Mitteltemp. Fenst. innen	20,182	Kelvin
$\mathbf{R_{si}}$	0,051	m^2K/W

Mitteltemp. Fenst. außen	0,945	Kelvin
$\mathbf{R_{se}}$	0,059	m^2K/W

Temp.Kontrolle:		
warmraum Mittel:	21,102	°C
Großwarmraum mittel	21,309	°C
Differenz:	-0,208	Kelvin

Lambda	0,038	W/mK

Der Wert für Lambda weicht also um 5% von dem WLG Wert ab. Da dies ein Mindestwert ist und Produktionsschwankungen möglich sind, ist dies als ein befriedigendes Ergebnis zu bewerten.

3.1.3.4 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Gemessen wurden die folgenden Konstruktionen:

- Versuch U1 + U2 eben gespannte ETFE Folie 2-lagig
- Versuch U3 eben gespannte PE Folie 2-lagig
- Versuch U4 eben gespannte EVA (Ethylenvinylacetat) Folie 2-lagig
- Versuch U5 pneumatisch vorgespannte EVA Folie Kissenstärke: 17 cm
- Versuch U6 pneumatisch vorgespannte EVA Folie Kissenstärke: 26 cm
- Versuch U7 pneumatisch vorgespannte EVA Folie Kissenstärke: 36 cm

Bild 77: Probekörper links U1 (ETFE) rechts U2 (PE)

Bild 78: Versuch U1 Probekörper eingebaut und mit Sensoren bestückt

Bild 79: Versuch U6 Probekörper eingebaut, Ansicht Kühlraumseite

Bild 80: Versuch U6 Probekörper eingebaut, Ansicht Warmseite

Der Rahmen der Fenster besteht aus einer Holzkonstruktion von 4,0 cm Breite und 6,0 cm Tiefe. Der Abstand der Folien ist somit auch auf 6,0 cm am Rand festgelegt. Die Folien wurden über den Rahmen gezogen und an den Außenseiten festgetackert. Anschließend wurde die Befestigung mit Klebeband abgedichtet und der Probekörper mit Silikon in der Öffnung fixiert und vollständig abgedichtet.
Im Fall der pneumatisch vorgespannten Fenster wird in einer Ecke der Folie ein Loch mit etwa 5cm Durchmesser geschnitten, an das ein Schlauch angeschlossen wird, über den der Luftdruck aufgebaut wird. Da das Foliensystem sehr gut abgedichtet ist, findet trotz des angeschlossenen Lüfters kein nennenswerter Lufteintrag statt, der die Messung verfälschen könnte.
Es wurden auf der Warm- und der Kaltseite des Fensters jeweils fünf Messsensoren aufgeklebt, um die Temperaturverteilung auf der Oberfläche des Folienfensters und den Wärmeübergangkoeffizienten zu ermitteln.

3.1.3.5 Ergebnisse im Detail

Versuch U1: 2-lagig eben gespannte ETFE Folie

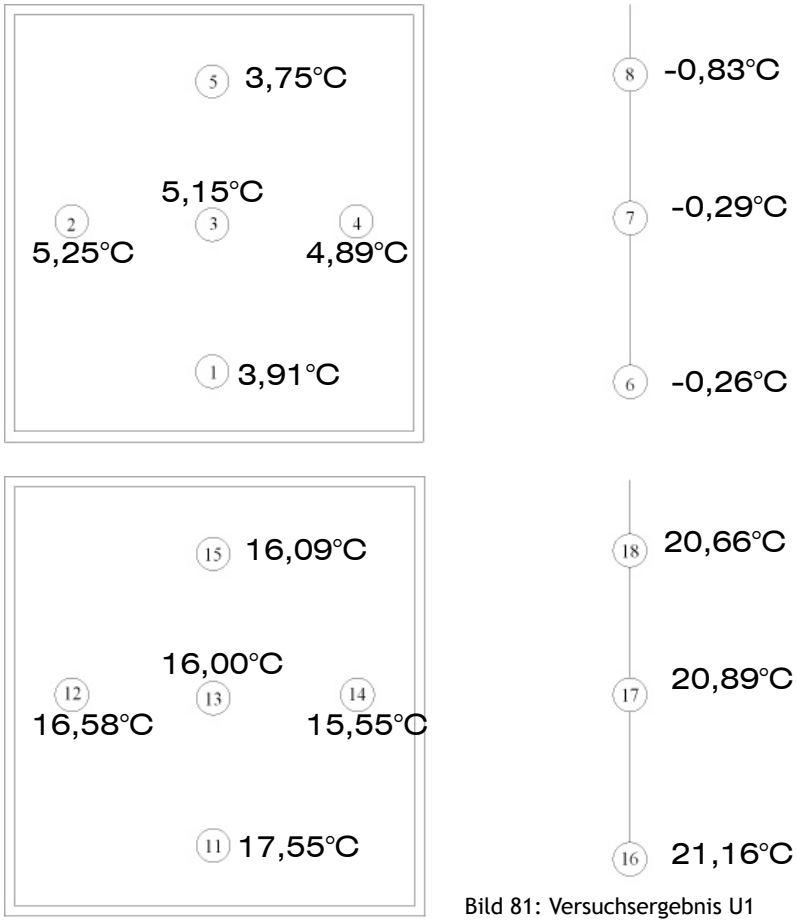


Bild 81: Versuchsergebnis U1

Mittelwert Kaltraum	-0,46	Kelvin
Mittelwert Warmraum	20,90	Kelvin
Differenz	21,36	Kelvin

Fläche	1,88	m²
Leistung Lampe	126,50	W
Leistung Lüfter	6,00	W
Leistung gesamt	132,50	W
Wärmestromdichte q	70,67	W/m²
U-Wert	3,31	W/m²K

Mitteltemp. Fenst. innen	16,35	Kelvin
Rsi	0,06	m²K/W

Mitteltemp. Fenst. außen	4,51	Kelvin
Rse	0,07	m²K/W

Versuch U2: 2-lagig eben gespannte ETFE Folie

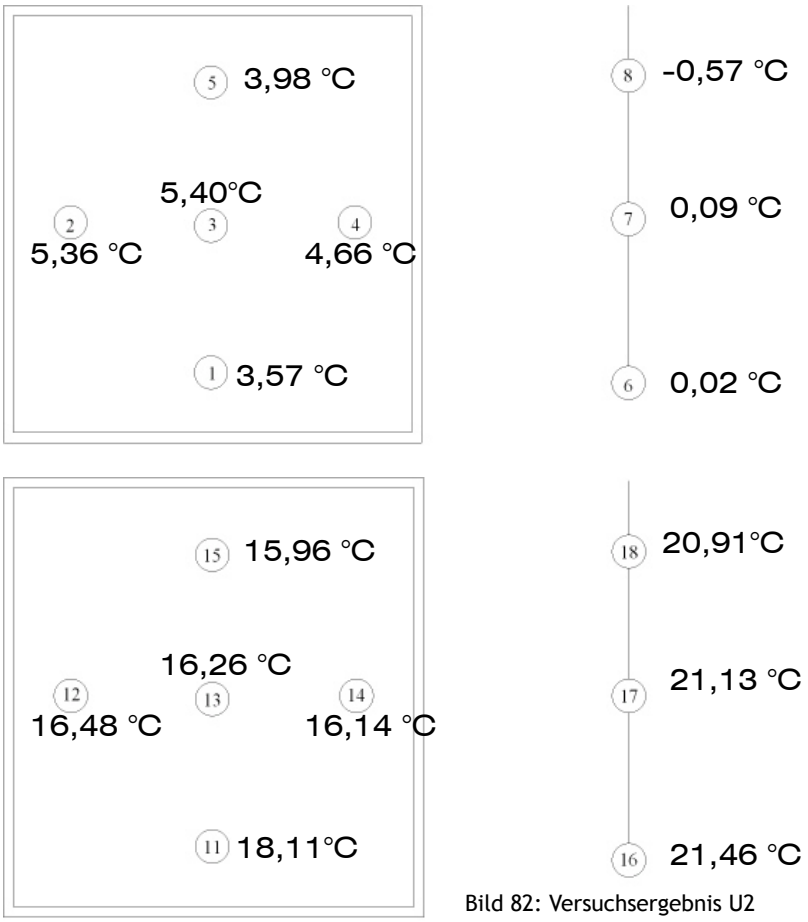


Bild 82: Versuchsergebnis U2

Mittelwert Kaltraum	-0,15	Kelvin
Mittelwert Warmraum	21,17	Kelvin
Differenz	21,32	Kelvin

Fläche	1,88	m²
Leistung Lampe	130,50	W
Leistung Lüfter	6,00	W
Leistung gesamt	136,50	W
Wärmestromdichte q	72,80	W/m²
U-Wert	3,41	W/m²K

Mitteltemp. Fenst. innen	16,59	Kelvin
Rsi	0,06	m²K/W

Mitteltemp. Fenst. außen	4,59	Kelvin
Rse	0,07	m²K/W

Versuch U3: 2-lagig eben gespannte PE Folie

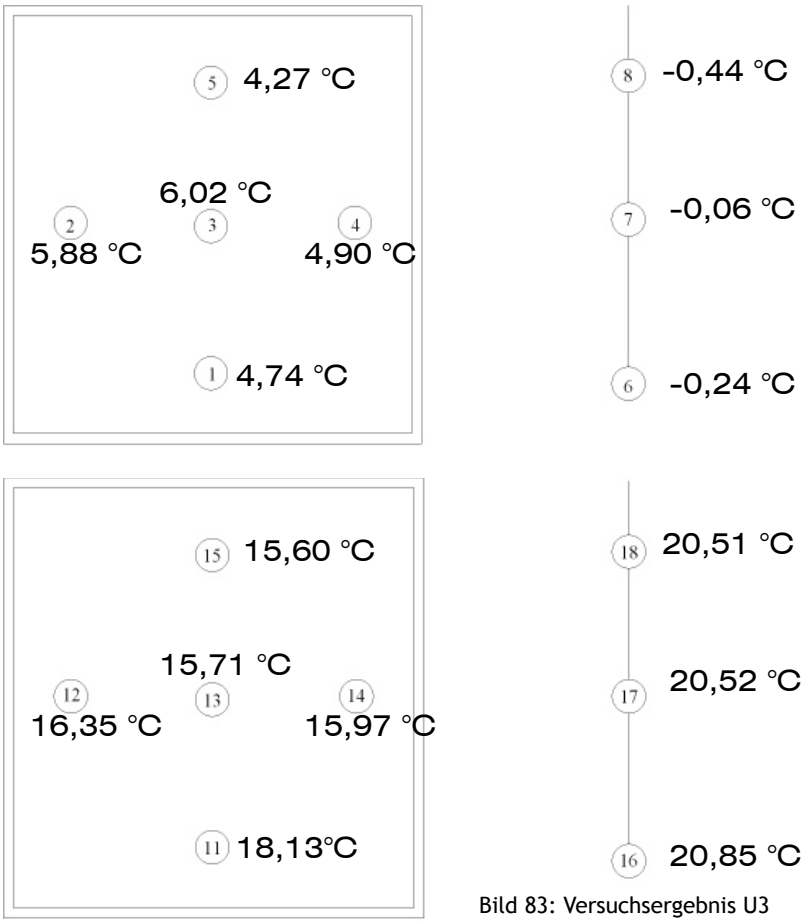


Bild 83: Versuchsergebnis U3

Mittelwert Kaltraum	-0,25	Kelvin
Mittelwert Warmraum	20,63	Kelvin
Differenz	20,873	Kelvin

Fläche	1,88	m²
Leistung Lampe	157,50	W
Leistung Lüfter	6,00	W
Leistung gesamt	163,50	W
Wärmestromdichte q	87,20	W/m²
U-Wert	4,18	W/m²K

Mitteltemp. Fenst. innen	16,35	Kelvin
Rsi	0,05	m²K/W

Mitteltemp. Fenst. außen	5,16	Kelvin
Rse	0,06	m²K/W

Versuch U4: 2-lagig eben gespannte EVA Folie

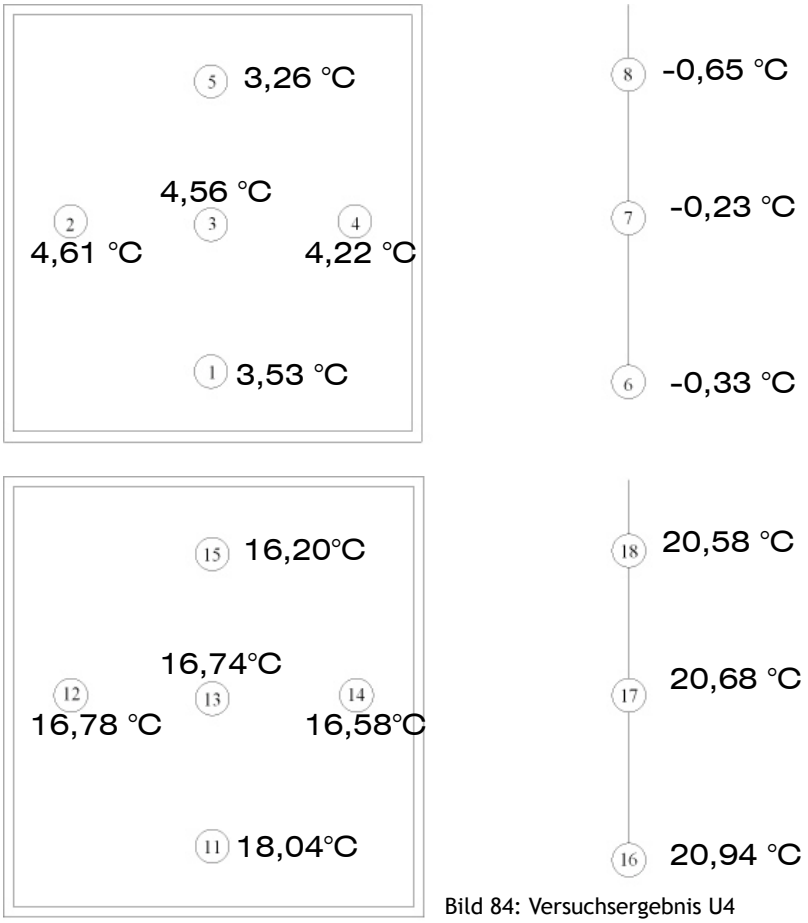


Bild 84: Versuchsergebnis U4

Mittelwert Kaltraum	-0,40	Kelvin
Mittelwert Warmraum	20,73	Kelvin
Differenz	21,13	Kelvin

Fläche	1,88	m²
Leistung Lampe	140,00	W
Leistung Lüfter	6,00	W
Leistung gesamt	146,00	W
Wärmestromdichte q	77,87	W/m²
U-Wert	3,69	W/m²K

Mitteltemp. Fenst. innen	16,87	Kelvin
Rsi	0,05	m²K/W

Mitteltemp. Fenst. außen	4,04	Kelvin
Rse	0,06	m²K/W

Versuch U5: 2-lagig pneumatisch gespannte EVA Folie, mit einer Kissendicke von 15 cm

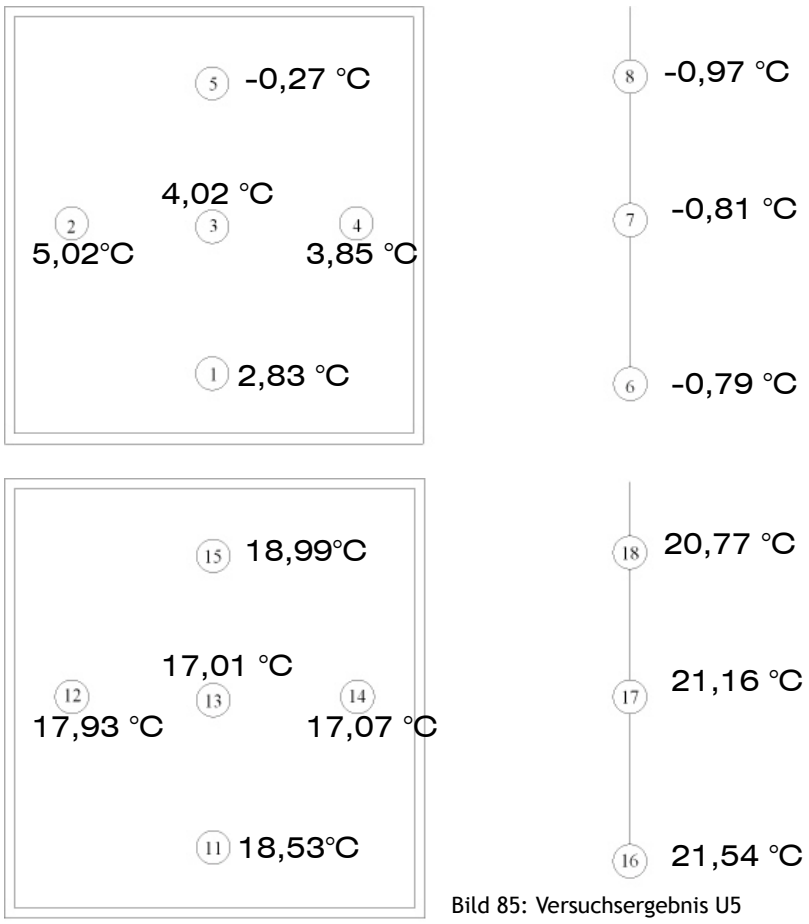


Bild 85: Versuchsergebnis U5

Mittelwert Kaltraum	-0,86	Kelvin
Mittelwert Warmraum	21,16	Kelvin
Differenz	22,02	Kelvin

Fläche	1,88	m²
Leistung Lampe	130,00	W
Leistung Lüfter	6,00	W
Leistung gesamt	136,00	W
Wärmestromdichte q	72,53	W/m²
U-Wert	3,29	W/m²K

Mitteltemp. Fenst. innen	17,91	Kelvin
Rsi	0,05	m²K/W

Mitteltemp. Fenst. außen	3,09	Kelvin
Rse	0,05	m²K/W

Versuch U6: 2-lagig pneumatisch gespannte EVA Folie, mit einer Kissendicke von 26 cm

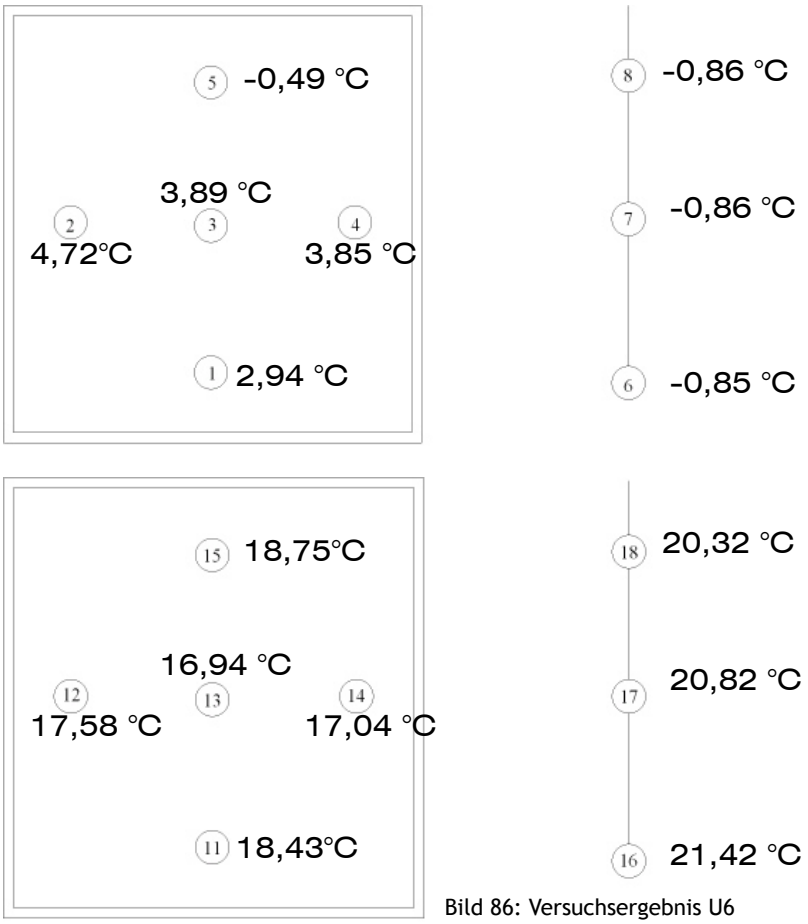


Bild 86: Versuchsergebnis U6

Mittelwert Kaltraum	-0,85	Kelvin
Mittelwert Warmraum	20,85	Kelvin
Differenz	21,71	Kelvin

Fläche	1,88	m²
Leistung Lampe	147,50	W
Leistung Lüfter	6,00	W
Leistung gesamt	153,50	W
Wärmestromdichte q	81,87	W/m²
U-Wert	3,77	W/m²K

Mitteltemp. Fenst. innen	17,75	Kelvin
Rsi	0,04	m²K/W

Mitteltemp. Fenst. Aussen	2,98	Kelvin
Rse	0,05	m²K/W

Versuch U7: 2-lagig pneumatisch gespannte EVA Folie, mit einer Kissendicke von 36 cm

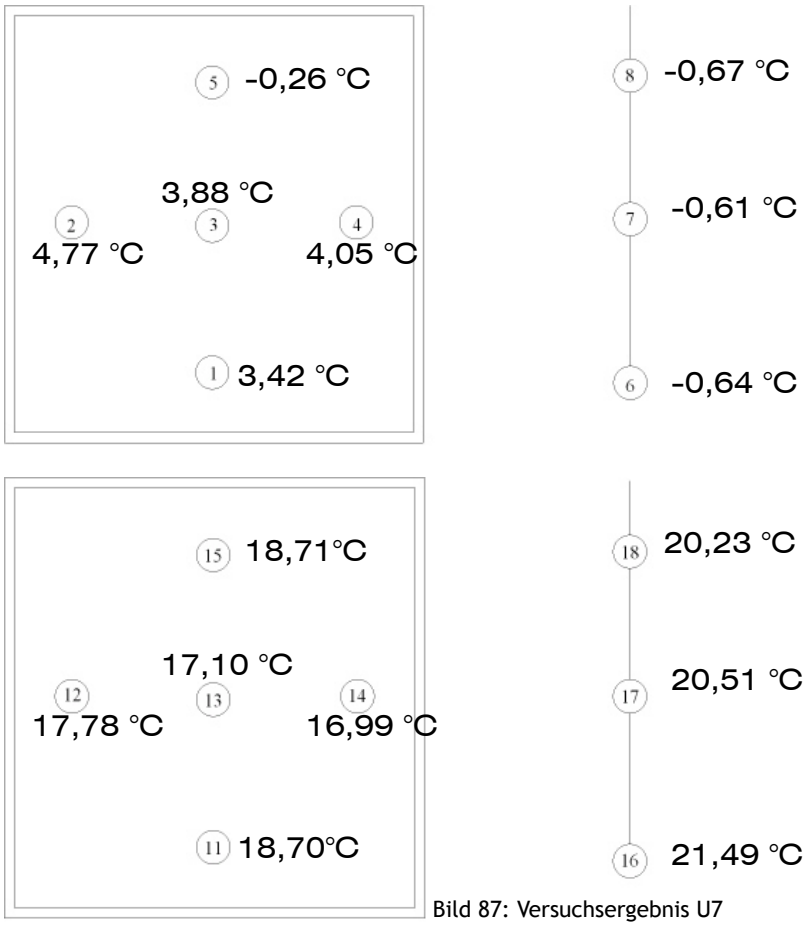


Bild 87: Versuchsergebnis U7

Mittelwert Kaltraum	-0,64	Kelvin
Mittelwert Warmraum	20,75	Kelvin
Differenz	21,38	Kelvin

Fläche	1,88	m²
Leistung Lampe	157,50	W
Leistung Lüfter	6,00	W
Leistung gesamt	163,50	W
Wärmestromdichte q	87,20	W/m²
U-Wert	4,08	W/m²K

Mitteltemp. Fenst. innen	17,86	Kelvin
Rsi	0,03	m²K/W

Mitteltemp. Fenst. Aussen	3,17	Kelvin
Rse	0,04	m²K/W

3.1.3.6 Ergebnisübersicht

Messung	U-Wert [W/m²K]	Rsi [m²K/W]	Rse [m²K/W]
PS Hartschaum d=4cm	0,88	0,051	0,059
Versuch U1 ETFE glatt	3,31	0,064	0,070
Versuch U2 ETFE glatt Nr.2	3,41	0,063	0,065
Versuch U3 PE glatt	4,18	0,049	0,062
Versuch U4 EVA glatt	3,69	0,050	0,057
Versuch U5 EVA Kissen d=15 cm	3,29	0,045	0,054
Versuch U6 EVA Kissen d=26 cm	3,77	0,038	0,047
Versuch U7 EVA Kissen d=36 cm	4,08	0,033	0,044

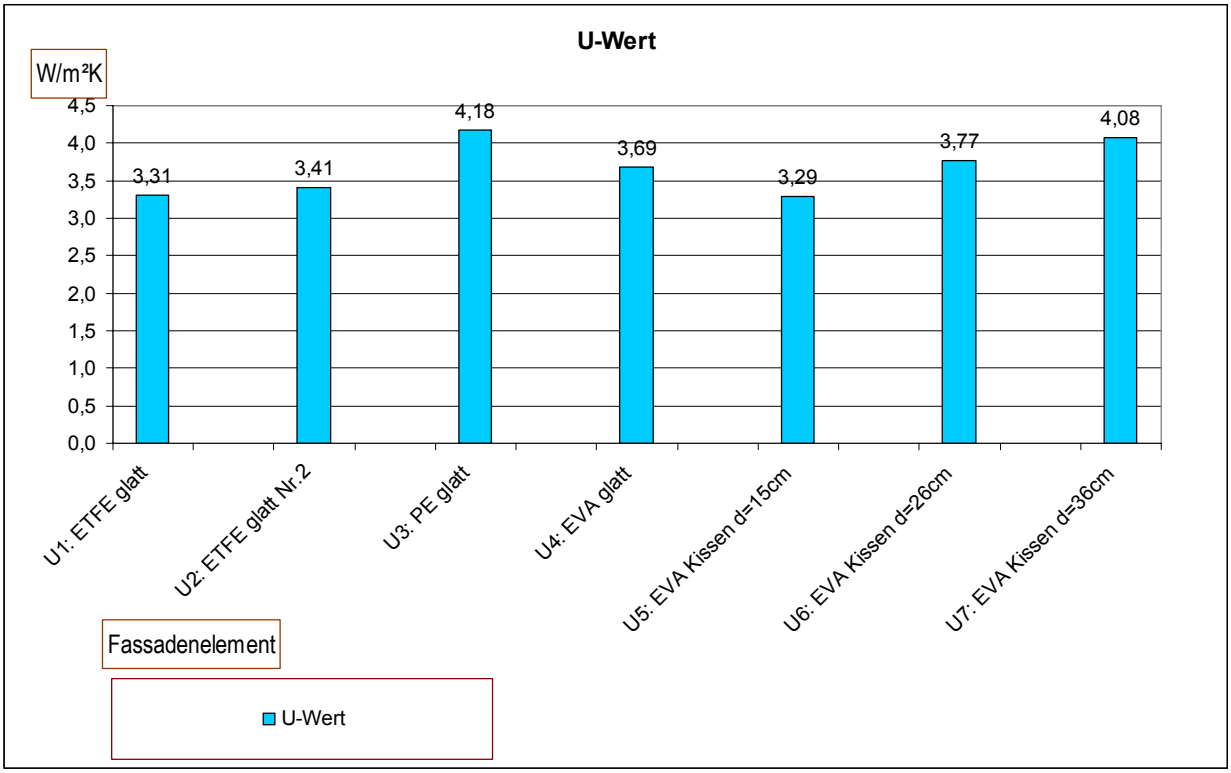


Bild 88: U-Wert Ergebnisse (Diagramm)

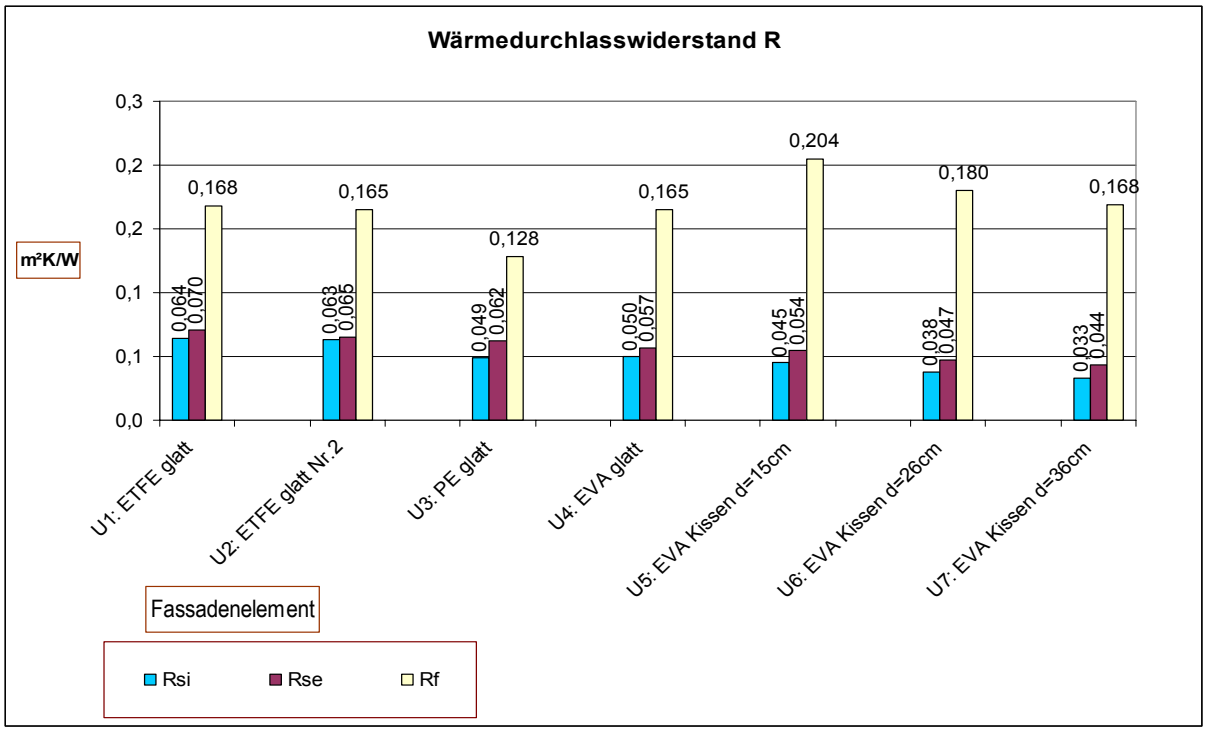


Bild 89: Versuchsergebnis Wärmedurchgangswiderstand (Diagramm)

3.1.3.7 Auswertung

Aus diesem Ergebnis ist zu erkennen, dass

- ein größeres Luftpolster nicht zwangsläufig zu einem besseren U-Wert führt.
- das Folienmaterial trotz der geringen Dicke einen nennenswerten Einfluss auf den U-Wert hat. (Zu erkennen bei Vergleich von Versuch U1, U2, U3 und U4)
- Das Versuchsergebnis ist deutlich schlechter, als die aus der Norm errechneten Werte.

Die Differenz des U-Wertes insbesondere zwischen ETFE (U1, U2) und PE (U3) resultiert nicht aus einer unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit der Materialien. Dazu ist die Materialstärke zu gering, um das Ergebnis nennenswert zu beeinflussen. Es ist aber schon bei der Betrachtung des PE Fensters und des ETFE Fensters zu erkennen, dass diese beiden Materialien ein unterschiedliches Emissionsvermögen haben müssen. Die Behandlung der Oberflächen von Glasscheiben zur Optimierung des U-Wertes durch Reduzierung des Emissionsvermögens ist in der Fensterindustrie nichts Neues und kann offensichtlich auch bei ETFE Kissen zur Optimierung verwendet werden. Spiegelnde Oberflächen haben beispielsweise ein geringeres Emissionsvermögen. Eine Isolierverglasung ohne Oberflächenbehandlung hat einen U-Wert von 2,8 W/m²K, ein Isolierfenster mit low-e Beschichtung hingegen nur 1,4 W/m²K. Hier könnte eine erhebliche Optimierung erreicht werden, wobei untersucht werden muss, ob diese Verbesserung im gleichen Maße stattfinden würde, wie bei Glas. Durch die Krümmung der Kissen wird sich der Einfluss der Strahlung auf den U-Wert, von dem bei Isoliergläsern unterscheiden. Eine leichte Metallbedampfung der inneren Oberflächen eines Kissens würde also wahrscheinlich eine Optimierung darstellen, die aber im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr untersucht wird. Bedruckungen hingegen erhöhen das Emissionsvermögen und wirken

sich somit negativ für den U-Wert aus.
Die Luftschichtdicke und damit verbunden auch ihre Geometrie beeinflussen den U-Wert offensichtlich. Die Annahme, dass dickere Luftschichten zwangsläufig den U-Wert verbessern, ist falsch. Die Luftbewegung innerhalb des Kissens ist von entscheidender Bedeutung. Diese Luftbewegung braucht Platz und wird durch dicke Luftschichten offensichtlich begünstigt.
Im Vergleich zu der U-Wertberechnung mit Hilfe der Normen fallen die Versuchsergebnisse weit schlechter aus. Die Normen sind folglich nicht geeignet, auch nur näherungsweise Aussagen über U-Werte von Folienkonstruktionen zu treffen.
Das zweilagige Folienkissen kann mit normaler Isolierverglasung wie erwartet nicht konkurieren. Zum Vergleich kann man annehmen, dass eine unbeschichtete Isolierverglasung einen U-Wert von etwa 2,8 W/m²K aufweist, eine Wärmeschutzverglasung etwa 1,4 W/m²K erreichen kann und eine Dreifachverglasung Werte unter 1,0 W/m²K. Als Negativbeispiel sei noch die Einfachverglasung mit einem U-Wert von 5,8 W/m²K erwähnt [Gla06]. Die Folienkissen liegen zwischen 3,2 und 4,08 W/m²K und sind somit schlechter als eine unbeschichtete Isolierverglasung.

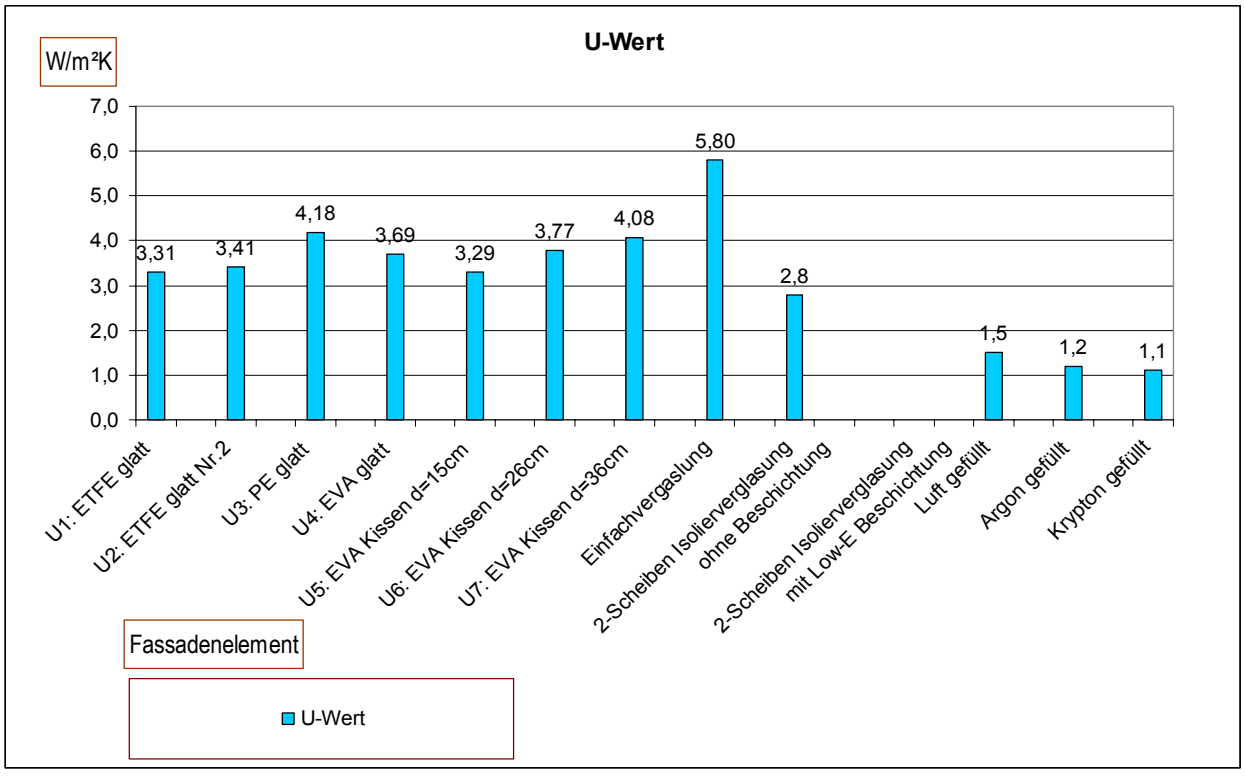


Bild 90: U-Wertvergleich Glas - Folie (Diagramm)

Die Energieeinsparverordnung 2007 schreibt für Verglasungen an Wohngebäuden und Zonen von Nichtwohngebäuden mit Innenraumtemperaturen >19°C einen maximalen U-Wert von 1,7 W/m²K vor [Enev07, Anlage 3, Abs. 7, Tab. 1].
Die Optimierung von Fenstern besteht in der Oberflächenbehandlung und im Ersetzen von Luft zwischen den Scheiben durch Edelgase. Die Oberflächenoptimierung wurde bereits erwähnt und bezieht sich auf die Beeinflussung der Wärmestrahlung. Die Beeinflussung der Wärmeleitung durch Konvektion indem man Luft durch Gas ersetzt, ist bei Kissen nicht vorstellbar. Durch Undichtigkeiten würde das Gas permanent in kleinen Mengen entweichen. Außerdem müsste der gesamte Luftdruckmechanismus zum stabilisieren der Kissen auf Gas umgestellt werden. Diese Maßnahme wäre unter ökonomischen Gesichtspunkten undenkbar und auch der ökologische Nutzen ist zweifelhaft.

3.2 Tauwasserschutz

Innerhalb einer Fassade kann es zu großen Temperaturdifferenzen zwischen der Innen- und Außenseite kommen. Unter bestimmten Voraussetzungen kann diese Tatsache zu Kondensatbildung auf oder innerhalb der Fassade führen. Dies kann bei entsprechenden Untergründen zu Schimmelbildung führen oder im Fall von transparenten Fassadenelementen zu Undurchsichtigkeit durch einen Tropfenfilm auf der Oberfläche. Bei Isoliergläsern wird zwischen den beiden Glasscheiben ein hygroskopisches Randprofil eingefügt, das dem Scheibenzwischenraum (SZR) die Feuchtigkeit entzieht. Durch die Dampfdichtigkeit von Glas kommt keine Feuchtigkeit nach und somit kann sich im SZR auch kein Kondensat an den Oberflächen mehr bilden. Glas gilt als absolut dampfdicht, hat also einen µ-Wert von $\mu = \infty$. Kunststoffe sind zwar wasserdicht, deswegen aber keineswegs absolut dampfdicht. Die dimensionslose Zahl µ beschreibt die Dampfdichtigkeit, indem sie das Material in Verhältnis setzt zu einer äquivalenten Luftschichtdicke. Als Dampfbremse gelten solche Materialien, die einen µ-Wert zwischen 10.000 und 100.000 aufweisen. Dieser Wert bedeutet, dass die Materialien dem Wasserdampf den gleichen Widerstand entgegensetzten, wie eine 10.000 Mal bzw. 100.000 Mal dickere Luftschicht. Der sogenannte s_d Wert gibt dem Ganzen dann die Dimension Meter indem er sich berechnet aus

$s_d = \mu \cdot d$,

wobei d die Schichtdicke des Materials ist. In der Regel gelten nur Metallfolien als absolut dampfdicht [Blä02].
Da ETFE lediglich eine Dampfbremse ist, und durch Undichtigkeiten an den Einspannstellen auch Luft entweichen kann und neue Luft nachströmt, ist ein einmaliges Verschließen des Zwischenraumes und ein Entziehen der Feuchtigkeit über den Randverbund bei Folien unmöglich. Es muss permanent dafür gesorgt werden, dass die Luft innerhalb der Konstruktion getrocknet wird, unabhängig davon, ob es sich dabei um eine mechanisch vorgespannte , eine überdruck- oder unterdruckstabilisierte Konstruktion handelt.

Die zugeführte Luft bei Überdrucksystemen wird immer getrocknet bevor sie eingeblasen wird. Die Schwierigkeit besteht darin, dass bei sehr dichten Systemen, also einer guten Bauausführung, dem Pneu extrem wenig Luft zugeführt wird und Feuchtigkeit über die Folie eindiffundieren kann. Der Feuchtigkeitsgehalt der Luft im Pneu erhöht sich also wieder. Um dies zu verhindern, muss ein Luftaustausch stattfinden. Da das Eindiffundieren nur sehr langsam geschieht, muss auch der Luftaustausch nur sehr gering sein. Die Mechanismen für diesen Luftaustausch und somit die Lufttrocknung, sollten aber vorgesehen werden. Eine Lösung des Problems kann sein, ein Ventil einzubauen, durch das kontrolliert Luft aus dem Kissen entweichen kann. Getrocknete Luft kann so nachströmen und der Kisseninnenraum permanent trocken gehalten werden. Ein Beispiel für diese Lösung ist das Orang-Utan Haus in Hamburg Hagenbeck [Wet05].
Bei Unterdrucksystemen ist die Trocknung der Luft schon schwieriger zu realisieren, weil das eigentliche Vorspannprinzip keine Luftzufuhr, sondern einen Luftentzug vorsieht und somit die verbleibende Luft nicht konditioniert werden kann. Es muss also ein Ventil eingefügt werden, über das getrocknete Luft nachströmen kann, was den Aufwand für luftführende Leitungen verdoppelt und auch den Aufwand an Maschinen steigert.
Bei mechanisch vorgespannten Folien ist eine Luftversorgung statisch nicht erforderlich. Da die Kondensatbildung aber bei nicht getrockneter Luft ungehindert stattfinden kann, ist auch hier eine Konditionierung der Luft innerhalb der Fassade sinnvoll, was den Gebrauch von mechanisch vorgespannten Folien als wärmedämmende Bauteile stark in Frage stellt, wenn sowieso eine Luftversorgung verlegt werden muss. Die Luftversorgung muss zwar weit weniger leistungsstark sein, der Arbeitsaufwand für Leitungsverlegung und Anschlüsse ist aber ähnlich dem eines Pneus.
Bei jeder Fassadenkonstruktion muss genau analysiert werden, an welchen Stellen es überhaupt zur Kondensatbildung kommen könnte. Bei Fassaden gibt es Zonen, die tauwasseranfallgefährdet sind und solche, die es nicht sind, gerade bei mehrlagigen Konstruktionen. Es müssen dann natürlich nur die mit konditionierter Luft versorgt werden, die eine potentielle Gefahr darstellen. Mechanisch vorgespannte Konstruktionen sind also keinesfalls prinzipiell fragwürdig für Fassaden. Lediglich in den Bereichen größter Temperaturunterschiede auf kurzer Distanz sollte ihr Einsatz bauphysikalisch genau untersucht werden.

3.2.1 Dampfdichtigkeit von ETFE Folie

ETFE Folien weisen eine Wasserdampf-Diffusionsstromdichte von i_D = 0,65 $\frac{g \cdot mm}{m^2 \cdot h}$ oder i_D = 0,027 $\frac{g \cdot mm}{m^2 \cdot day}$ auf. Dieser Wert wurde mit dem Versuchsaufbau nach ASTM E96 von der Firma Mecadi GmbH ermittelt. Bei diesem Versuch wird ein zylindrischer Behälter, etwa in der Größe einer Tasse, mit Wasser gefüllt. Die Probe verschließt den Behälter am oberen Rand. Der Wasserspiegel liegt zu Versuchsbeginn zwischen 0,64cm und 1,91 cm unterhalb der Probe. Dieser Versuchswert muss zunächst in einen im Bauwesen gebräuchlichen Wert umgewandelt werden. Der s_d-Wert ermittelt sich aus

$$s_d = \delta_L \cdot A \cdot \frac{P_{D1} - P_{D2}}{I_D} - s_L .$$

Mit $i_D = \frac{I_D}{A}$ ergibt sich dann $s_d = \delta_L \cdot \frac{P_{D1} - P_{D2}}{i_D} - s_L$

Der Wert s_L ist in der Gleichung zu vernachlässigen, da sich bei Folien Werte im Bereich von einigen Kilometern ergeben und die wenigen Millimeter unterhalb der Probe nicht ins Gewicht fallen. Der Versuch wurde bei einer Temperatur von 23°C und 85% relativer Luftfeuchtedifferenz durchgeführt. Der Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient in Luft beträgt

$$\delta_L = \frac{1}{1500} \frac{g}{m \cdot h \cdot Pa} .$$

Der Druck errechnet sich mit

$$P = \frac{\varphi}{100} \cdot P_S$$

wobei φ die relative Luftfeuchte ist. P_s ist der Wasserdampfsättigungsdruck und beträgt bei 23°C 2810 Pa. Die Druckdifferenz errechnet sich also mit

$$P_{D1} - P_{D2} = \frac{\varphi_1}{100} \cdot P_S - \frac{\varphi_2}{100} \cdot P_S = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{100} \cdot P_S = \frac{85}{100} \cdot 2810Pa = 2389Pa$$

Daraus folgt ein s_d-Wert von

$$s_d = \frac{1}{1500} \frac{g}{m \cdot h \cdot Pa} \cdot \frac{2389Pa}{0{,}027 \frac{g \cdot mm}{m^2 \cdot h}} = 59 \frac{m}{mm}$$

Für 1mm Folienstärke ergibt sich also eine äquivalente Luftschichtdicke von 59 m. Der entsprechende μ-Wert liegt bei 59000.

Untersuchungen des Fraunhofer Institutes haben ergeben, dass dieser Wert von der Höhe der Luftfeuchtigkeit abhängt und in entsprechend feuchten Bereichen auf bis zu 45000 abfallen kann, also um etwa ¼ seines Ausgangswertes.

3.2.2 Tauwasserschutz von Folienfenstern nach DIN 4108-3

Nach DIN 4108-3:2001 sind für die Berechnung des Tauwasserschutzes folgende Randbedingungen anzunehmen:

Außenlufttemperatur: θ_e = -10°C

Raumlufttemperatur: θ_i = +20°C

Relative Luftfeuchte außen: φ_e = 80%

Relative Luftfeuchte innen: φ_i = 50%

Tauperiodendauer: t_T = 1440h (=60 Tage)

Wasserdampfsättigungsdruck:

Außen bei : θ_e = -10°C p_e = 260*Pa* · 80 / 100 = 208*Pa*

Innen bei : θ_i = +20°C p_i = 2340*Pa* · 50 / 100 = 1170*Pa*

Zur Untersuchung des Tauwasseranfalls wird das ebene ETFE Fenster herangezogen. Mit den normierten Wärmeübergangwiderständen für Außenbauteile und dem Wärmeübergangswiderstand des Fensters nach Versuchergebnis ergibt sich ein Wert für den Gesamtwärmeübergangswiderstand von

$$R_T = 0{,}13 + 0{,}168 + 0{,}04 = 0{,}38 \frac{m^2 \cdot K}{W}.$$

Der Temperaturverlauf über das Bauteil wird jetzt aufgeteilt.

$$R_T = 0{,}338 \frac{m^2 \cdot K}{W} \mathrel{\hat{=}} \Delta\theta = 30°C.$$

Der Temperaturabfall pro Wärmeübergangswiderstand ergibt sich dann zu:

R_T =	0,13	+	0,168	+	0,04
	11,5°C		14,9°C		3,6°C

Es ergibt sich also der folgende Temperaturverlauf:

Innenraum: +20°C $\mathrel{\hat{=}}$ p_s = 2340*Pa*

Innenoberfläche des Fensters: +8,5°C $\mathrel{\hat{=}}$ p_s = 1110*Pa*

Außenoberfläche des Fensters: -6,4°C $\mathrel{\hat{=}}$ p_s = 356*Pa*

Außenraum: -10°C $\mathrel{\hat{=}}$ p_s = 260*Pa*

Annahme: Die Temperatur ändert sich innerhalb der 0,2 mm Dicken Folie nicht.

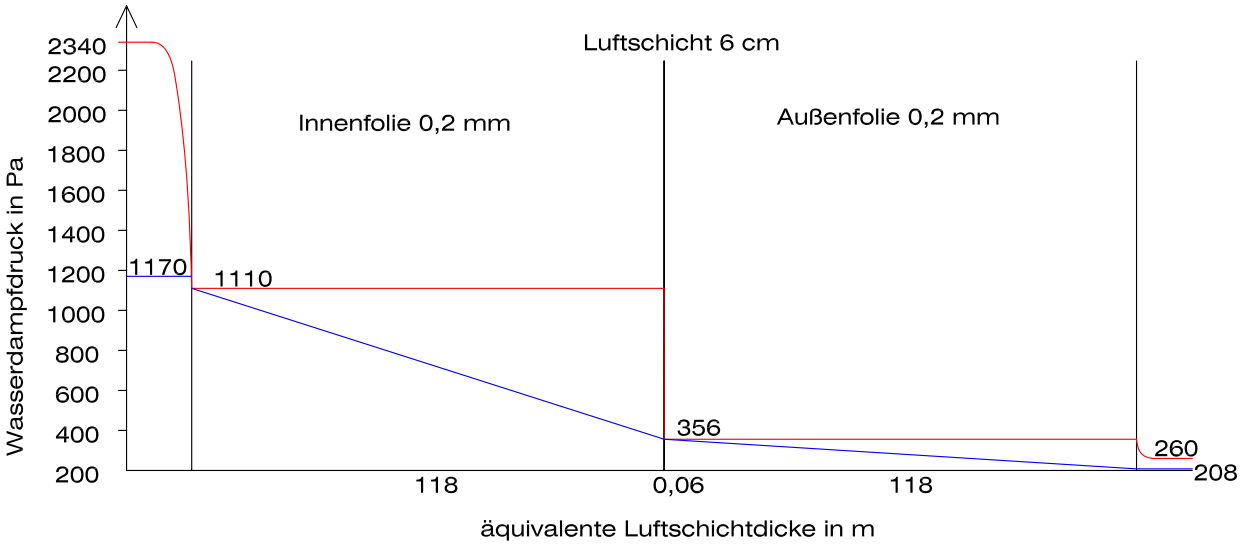


Bild 91: Glaserdiagramm für Folienfenster mit 6 cm Luftschicht

Die blaue Linie im Diagramm müsste eine Gerade bilden können zwischen dem Wasserdampfdruck auf der Innenseite und dem auf der Außenseite, darf aber nie oberhalb der roten Linie, dem Sättigungsdruck, liegen. Muss die blaue Linie geknickt werden, um unterhalb der roten Sättigungsdrucklinie zu liegen, fällt am Knick der Kurve Tauwasser an.
Das Glaserdiagramm zeigt, dass es sowohl auf der inneren Folie als auch an der Außenfolie auf der jeweils dem Innenraum zugewanden Seite zum Tauwasseranfall kommt. Um den Tauwasseranfall auf der Innenfolie des Fensters zu vermeiden, muss der Wasserdampfsättigungsdruck über dem vorhandenen Wasserdampfteildruck von 1170 Pa liegen. Dies ist der Fall bei einer Oberflächentemperatur der Innenfolie von 9,3°C. Bei dieser Temperatur liegt der Wasserdampfsättigungsdruck bei 1171 Pa. Diese Temperatur wird nur erreicht, wenn der Temperaturabfall durch den Wärmeübergangswiderstand maximal 10,7°C beträgt und nicht wie im Rechenbeispiel 11,5°C. Der Wärmeübergangswiderstand des Folienfensters muss dafür mindestens 0,194 m²K/W betragen. Bei dem Temperaturverlauf ergibt sich dann:

$$R_T = \underset{10,7°C}{0,13} + \underset{16,0°C}{0,194} + \underset{3,3°C}{0,04}$$

In der Versuchsreihe hat nur das EVA - Kissen mit einer maximalen Kissenausdehnung von 15cm diesen Wert erreichen können, wobei dieser Wert ein Mittelwert über die gesamte Kissenfläche ist und es durch die geometriebedingte variable Dicke wahrscheinlich ist, dass auch dieses Kissen den Wert nicht an jeder Stelle erfüllt.

Es würde sich unter der Annahme einer konstanten Oberflächentemperatur und einem Wärmeübergangswiderstand des Fensters von 0,194 m²K/W der folgende Temperaturverlauf ergeben:

Innenraum:	$+20\,^{\circ}C \mathrel{\hat{=}} p_s = 2340Pa$
Innenoberfläche des Fensters:	$+9{,}3\,^{\circ}C \mathrel{\hat{=}} p_s = 1171Pa$
Außenoberfläche des Fensters:	$-6{,}7\,^{\circ}C \mathrel{\hat{=}} p_s = 347Pa$
Außenraum:	$-10\,^{\circ}C \mathrel{\hat{=}} p_s = 260Pa$

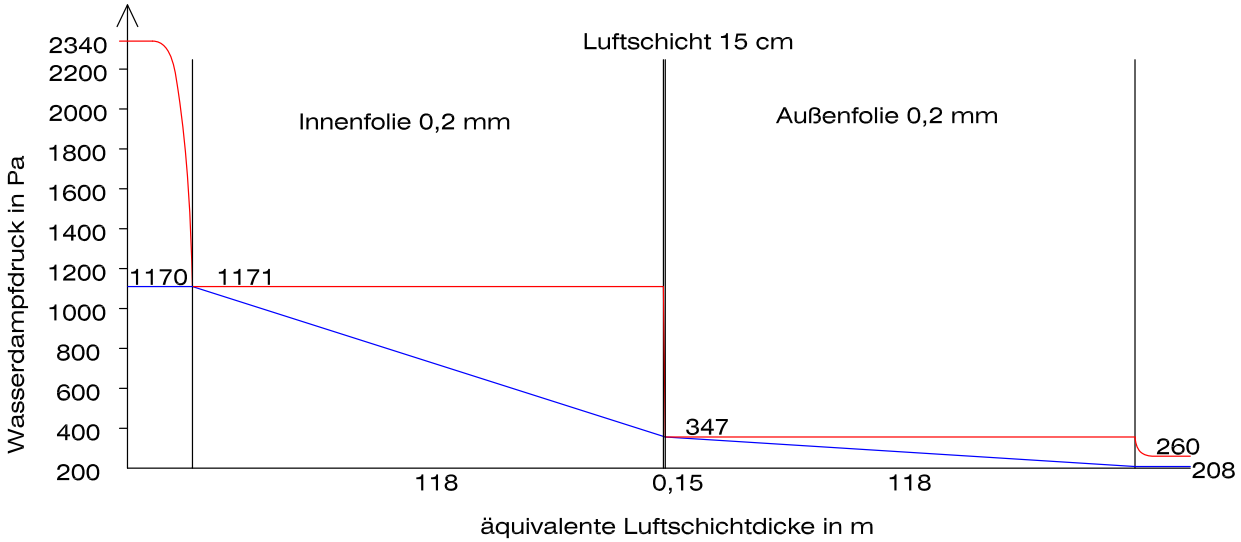


Bild 92: Glaserdiagramm für Folienfenster mit 0,194 mK/W Wärmeübergangswiderstand

Es ist zu erkennen, dass zwar der Tauwasseranfall auf der Innenseite vermieden werden kann, auf der Innenseite der Außenfolie ist er allerdings, ohne Zusatzmaßnahmen, unvermeidbar. Diese Zusatzmaßnahme ist bei Folienkissen das Einblasen getrockneter Luft. Anhand dieser Rechnung wird deutlich, dass auch mechanisch gespannte Konstruktionen, wenn sie wärmedämmende Funktion innerhalb der Fassade erfüllen sollen, mit getrockneter Luft versorgt werden müssen, obwohl diese zur statischen Stabilisierung nicht notwendig wäre.

4 Mechanische Eigenschaften

Bei ETFE handelt es sich um einen visko-elastischen Werkstoff. Das bedeutet, dass das Spannungs-Dehnungsverhältnis zeitabhängig ist. Beim Aufbringen einer Spannung tritt nur ein Teil der Dehnung sofort auf. Wird nach dem Aufbringen der Spannung diese konstant gehalten, nimmt die Dehnung mit der Zeit zu. Bei der Entlastung des Materials tritt wiederum nur ein Teil der Rückdehnung sofort auf, während die restliche Rückdehnung zeitlich verzögert auftritt. Dieses Dehnungsverhalten bei konstant gehaltener Spannung nennt man Kriechen.
Mathematisch formuliert, folgt ein elastisches Material der Funktion:

$\varepsilon = f(\sigma)$

In dem Spezialfall, in dem der Zusammenhang linear ist, spricht man vom linear elastischen oder Hook´schen Deformationsverhalten. [Schw90].

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Jeder Spannung kann eindeutig eine Verformung zugeordnet werden. Die klassischen Werkstoffe, Stahl, Glas und Keramik können näherungsweise mit diesem Materialgesetz beschrieben werden unter der Voraussetzung kleiner Deformationen.
Das viskose Fließen bedeutet, dass einer Spannung eine Deformationsgeschwindigkeit zugeordnet werden kann:

$\dot{\varepsilon} = f(\sigma)$

Dieses Verhalten wird als linear viskoses oder Newton´sches Fließverhalten bezeichnet. Es gilt für niedermolekulare Flüssigkeiten und Gase. Die Deformation wird mit Hilfe der Strömungsmechanik beschrieben. [Schw90]
Beide Materialgesetze sind unzureichend für die Beschreibung von Polymeren, die ein linear visko-elastisches Deformationsverhalten aufweisen. Für das plötzliche Aufbringen einer Last und konstant Halten dieser Last kann das Verformungsverhalten des Polymers beschrieben werden mit:

$\varepsilon(\sigma_0, t) = \sigma_0 \cdot J(t)$

Die Funktion J(t) ist unabhängig von der angelegten Spannung unter der Grundvoraussetzung kleiner Verformungen. Die Kurvenverläufe müssen also identisch sein, wenn man sie durch den Wert der angelegten Spannung dividiert. [Schw90]
Vor der Untersuchung der mechanischen Eigenschaften sollte zunächst auch noch geklärt werden, worin der Unterschied zwischen beschichteten Geweben und Folien besteht. Während das Gewebe aus vielen Fäden besteht, die mit einem Kunststoff beschichtet werden, ist die Folie ein monolithisches, isotropes Material. Bei den Geweben ist es üblich die Kräfte bzw. Spannungen als Streckenlasten anzugeben, weil die Dicke des Werkstoffes nicht unbedingt etwas mit seiner Tragfähigkeit zu tun hat. Bei Folien ist das anders. Die gesamte Fläche des Werkstoffs hat in allen Richtungen gleiche Eigenschaften. Deshalb ist es bei Folien sinnvoll, die Spannung auch auf die Querschnittsfläche zu beziehen.

Die Materialwerte von ETFE sind im Kurzzeitverhalten bekannt. Materialversuche wurden im Wesentlichen von Herrn Klaus Saxe im Tagungsband zum Symposium „Transparenz und Leichtigkeit“, in seinem Beitrag „Zum Einsatz von ETFE -Folien für einlagige Membrankonstruktionen am Beispiel des Konferenzzentrums der DBU in Osnabrück“ veröffentlicht. Des Weiteren gibt es diverse Herstellerangaben, die sich auf einaxiale mechanische Eigenschaften beziehen und im Wesentlichen das Kurzzeitverhalten des Werkstoffs erfassen. Zu nennen wären hier die temperaturabhängigen Untersuchungen zum Bruchspannung und E-Modul von der Firma Du Pont [Dup03].

4.1 Materialprüfung

4.1.1 Prüfverfahren nach DIN

Da die Folienwerkstoffe nicht geregelte Bauprodukte sind und keine Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung für ihre Tragfähigkeit vorhanden ist, gibt es keinen Qualitätsstandard, der geprüft und per Gütesiegel bestätigt werden könnte. Das führt dazu, dass die Kennwerte für die Festigkeiten einer Folie bei jedem Projekt neu in Versuchsreihen ermittelt werden müssen. Zu diesem Zweck gibt es eine Reihe von Normen die die entsprechenden Versuchsaufbauten beschreiben:

- DIN EN ISO 527 Kunststoffe - Bestimmungen der Zugeigenschaften
- DIN 53 354 Prüfung von Kunstleder – Zugversuch
- DIN 53 356 Prüfung von Kunstleder und ähnlichen Flächengebilden – Weiterreißversuch
- DIN 53363 Prüfung von Kunststoff-Folie – Weiterreißversuch an trapezförmigen Proben mit Einschnitt
- DIN EN ISO 899-1 Kunststoffe – Bestimmung des Kriechverhaltens Teil 1 Zeitstand-Zugversuch

4.1.2 Zugprüfung nach DIN EN ISO 527-1 : 1996

Bei der Materialuntersuchung nach DIN EN ISO 527 handelt es sich um eine einaxiale Zugprüfung mit konstanter Geschwindigkeit, bei der eine Probe bis zum Bruch oder einer vorgegebenen Spannung oder Dehnung belastet wird. In Teil 3 der Norm wird die Form des Probekörpers beschrieben. Empfohlen wird ein rechteckiger Probekörper mit einer Mindestlänge von 150mm und einer Breite zwischen 10mm und 25mm. Der Abstand der Messmarken sollte 50mm betragen. Die Prüfgeschwindigkeit soll der nationalen Norm entnommen werden. Gibt es keine Norm für den zu prüfenden Baustoff, kann die Geschwindigkeit zwischen 1 – 500 mm/min festgelegt werden. In speziellen Fällen können taillierte Probekörper zum Einsatz kommen. Die Mindestprobenanzahl für eine Versuchsreihe ist fünf.

4.1.3 Zugprüfung nach DIN 53 354 : 1981

Die DIN 53354 sieht bei einer Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/min ∓ 10 mm/min eine Belastung bis zum Bruch vor. Ein Abbruch vor dem Erreichen der Bruchlast ist allerdings nicht vorgesehen. Der Prüfkörper ist rechteckig mit einer Länge von 300 mm und einer Breite von 50 mm.
Aus dieser Probenform stammt die im Membranbau häufig verwendete Einheit N/5cm.
Auch bei diesem Prüfverfahren müssen fünf Proben geprüft werden, um repräsentative Materialwerte zu erhalten.

4.1.4 Weiterreißversuch nach DIN 53356

Versuche zur Weiterreißfestigkeit nach DIN 53 356 werden an rechteckigen, eingeschnittenen Versuchskörpern durchgeführt. Die beiden entstandenen Schenkel werden senkrecht zur Ebene auseinander gezogen. Auch hierbei wird mit einer Prüfgeschwindigkeit von 100mm/min ∓ 10 mm/min gefahren. Mindestens fünf Proben sind für eine Versuchsreihe erforderlich.

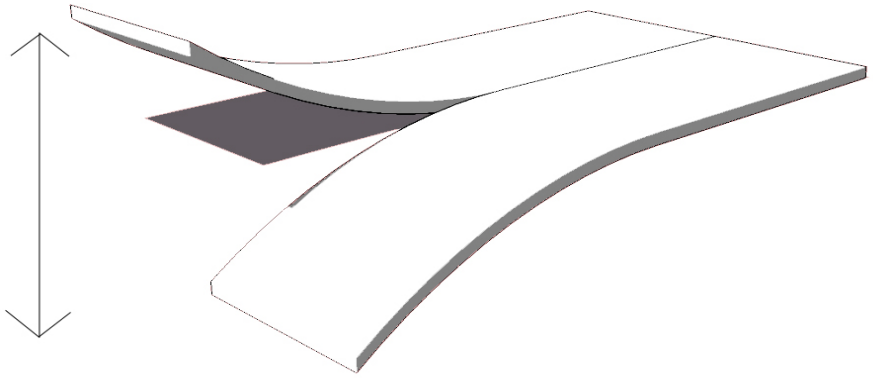
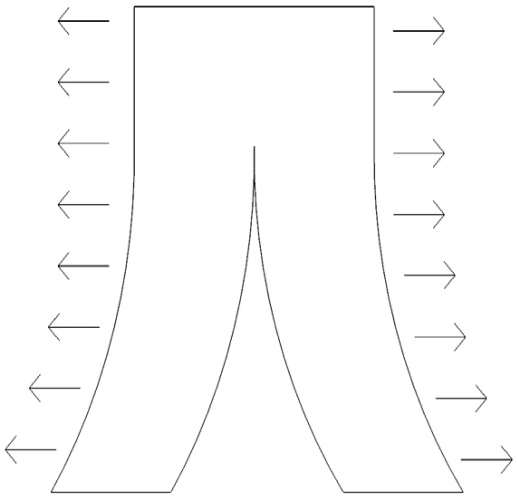


Bild 93: Weiterreißversuch nach DIN 53356

4.1.5 Weiterreißversuch nach DIN 53363



Weiterreißversuche nach DIN 53363 entsprechen viel eher dem Belastungsfall, der sich durch einen entstandenen Riss in einer Folie einstellt. Die Folieprobe wird bei dieser Versuchsanordnung eingeschnitten und in ihrer Ebene auseinander gezogen. Es werden wieder fünf Probekörper verlangt und eine Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/min ∓ 10 mm/min.

Bild 94: Weiterreißversuch nach DIN 53363

4.1.6 Kriechversuche nach DIN EN ISO 899-1

Die Geometrie des Probekörpers soll die gleiche sein, wie bei der Untersuchung der Zugeigenschaften. Die Prüftemperatur sollte im Versuchsverlauf keine größeren Schwankungen als + 2°C aufweisen. Die Prüfkraft sollte innerhalb von 1-5 sek. aufgebracht werden. Die Norm gibt keine maximale Versuchsdauer an, sondern schlägt vorzugsweise zu verwendende Versuchdauern und Messintervalle vor.

4.1.7 Prüfung allgemein

Die Versuche, die durchgeführt werden, um eine Zulassung im Einzelfall zu erwirken, gehen weit über das hinaus, was in den Normen geregelt ist. Zu den Materialuntersuchungen im Folienbau gehören einaxiale Zugversuche, wie sie auch in den Normen beschrieben sind. Diese Versuche geben Aufschluss über das Kurzzeitverhalten. Die Folie wird aber immer als Flächentragwerk konstruiert und gehorcht somit nicht mehr den Gesetzmäßigkeiten der Stabwerktheorie nach der gilt:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Sondern im zweidimensionalen Spannungszustand gilt:

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{E_{1111} \cdot t}\left(\sigma_{11} + \nu \cdot \sigma_{22}\right)$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{1}{E_{2222} \cdot t}\left(\sigma_{22} + \nu \cdot \sigma_{11}\right)$$

Für die Ermittlung der Querdehnzahl und des korrekten E-Moduls ist ein biaxialer Zugversuch unerlässlich, der aber in keiner DIN-Norm geregelt wird. Diese Versuchsanlagen können kraft- und / oder weggesteuert sein. Die Versuchslasten werden den zu erwartenden Belastungen des Bauprojektes angepasst. [Eur04]
Auch der Weiterreißversuch kann in einer biaxialen Prüfmaschine realitätsnaher durchgeführt werden, als dies bei den Versuchen nach DIN 53356 oder DIN 53363 der Fall wäre.
Zur Bestimmung des Kriech- und Relaxationsverhaltens und des Rückdehnungsverhaltens nach Entlastung, werden Dauerlastversuche durchgeführt. Auch hierbei wird die Lasthöhe den zu erwartenden Belastungen im Bauwerk angepasst. [DIN 899-1] Außerdem werden Lastwiederholungsversuche durchgeführt, bei denen eine Probe in einem Versuch mehrmals be- und entlastet wird.

4.2 Molekulare Struktur von ETFE

ETFE gehört zu der Gruppe der Thermoplaste. Wie im Kapitel „Folienmaterial“ schon erwähnt, haben Thermoplaste keine Bindungen zwischen den Molekülketten. Die Ketten sind nur ineinander verknäult. Die Thermoplaste werden unterschieden in amorphe und teilkristalline Thermoplaste. In teilkristallinen Thermoplasten gibt es Gebiete, in denen sich die Molekülketten regelmäßig angeordnet haben. Bei ETFE ist die Teilkristallinität durch die leicht milchige Durchsicht schon zu vermuten. Eine DSC Analyse, durchgeführt an der TU-Berlin am Fachgebiet Polymertechnik/-physik, bestätigt diese Vermutung.

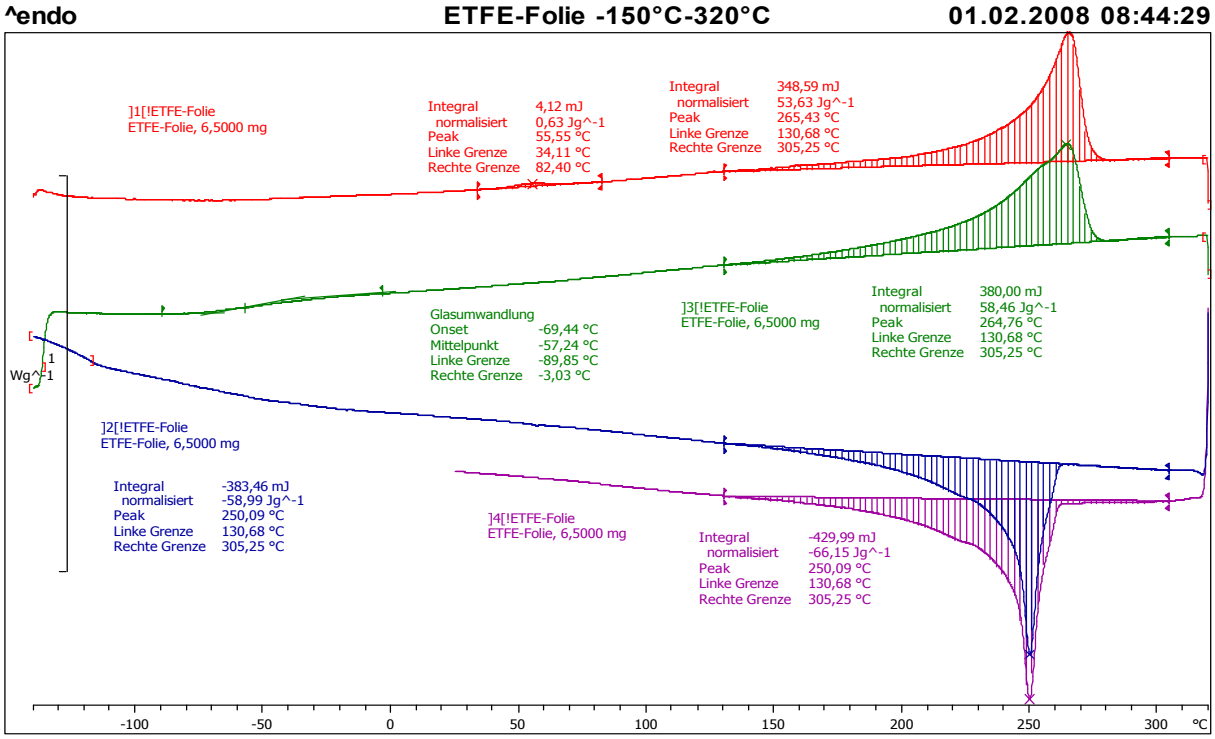


Bild 95: DSC Analyse Versuchsergebnis

Die DSC Analyse ist ein thermisches Analyseverfahren und misst beim gleichmäßigen Aufheizen und anschließenden Abkühlen einer Materialprobe den Temperaturverlauf in der Probe selbst. Durch den Temperaturunterschied, zwischen Probe und Versuchseinrichtung kann man feststellen, bei welchen Temperaturen im Material Umwandlungsprozesse stattfinden. Der Versuch wurde zwischen -150°C und +300°C durchgeführt. Es wurde zwei Mal aufgeheizt und abgekühlt. Die rote und grüne Kurve stellen jeweils den Aufheizungsprozess dar, die blaue und lila Kurve zeigen den Temperaturverlauf der Probe während der Abkühlungsphase. Das Aufschmelzen der Kristalle ist deutlich zu erkennen. Es beginnt ab einer Temperatur von 130°C, hat ein ausgeprägtes Peak bei 265°C und endet bei 305°C. Die Glasumwandlungstemperatur von ETFE liegt zwischen -60°C und -90°C. Ab dieser Temperatur ist mit einem spröden Werkstoffverhalten zu rechnen. In dem für das Bauwesen relevanten Temperaturbereichen wird sich das Materialverhalten qualitativ nicht ändern.

4.3 Einaxiale Zugversuche

Die Maschine, an der diese Versuche durchgeführt wurden, ist eine Zwick 2201.

Bild 96: Versuchsmaschine für einaxiale Zugversuche

Es wurden verschiedene Untersuchungen mit dieser Maschine durchgeführt. Mehrere Proben unterschiedlicher Dicke und mit unterschiedlichen Modifikationen, von verschiedenen Herstellern wurden verglichen, um herauszufinden, wie groß die Abweichungen der Materialwerte sind. Da Folienhersteller die genauen Rezepturen nicht preis geben und diese auch verändern, ohne dies den verarbeitenden Firmen mitzuteilen, ist zu vermuten, dass es zu Schwankungen in den Eigenschaften kommen kann. Außerdem wurde untersucht, welchen Einfluss die Zuggeschwindigkeit auf den Spannungs- Dehnungsverlauf hat.
Für solche Zugversuche muss zunächst festgelegt werden, nach welcher Norm die Probenform und sonstige Randparameter festgelegt werden. Die Normen DIN EN ISO 527 (Kunststoffe - Bestimmungen der Zugeigenschaften) und die Norm DIN 53 354 (Prüfung von Kunstleder – Zugversuch) finden hier Anwendung.

4.3.1 Vergleichsmessung unterschiedlicher Hersteller, Modifikationen und Folienstärken an der TU-Berlin

Für die Untersuchungen wurde die Probenform auf 20 mm x 200 mm festgelegt, also der EN ISO 527-1 entnommen.
Die Prüftemperatur in dem klimatisierten Raum lag konstant bei 20°C. Die Wegmesssensoren lagen im Abstand von 50mm an der Probe an. Die Prüfgeschwindigkeit wurde auf 100 mm/min festgelegt.
Es wurden 10 verschiedene Proben untersucht, die sich in Dicke, optischen Eigenschaften und Hersteller voneinander unterschieden. Zusätzlich zu dem bekannten Problem, dass ETFE Folien in ihren Materialeigenschaften Schwankungen unterworfen sind, kommt hier noch die optische Manipulation durch Bedruckung oder Pigmentzugabe hinzu. Die 10 Proben haben folgende Eigenschaften:

- Versuch M1.1: 100 µm bedruckt (große Punkte)
- Versuch M1.2: 200 µm bedruckt (große Punkte)
- Versuch M1.3: 200 µm bedruckt (kleine Punkte)
- Versuch M1.4: 200 µm bedruckt (negative Punktbedruckung)
- Versuch M1.5: 100 µm transparent
- Versuch M1.6: 180 µm transparent
- Versuch M1.7: 200 µm transparent
- Versuch M1.8: 250 µm transparent
- Versuch M1.9: 200 µm weiß pigmentiert
- Versuch M1.10: 250 µm weiß pigmentiert

Bei den Proben handelt es sich um Produkte der Firmen Asahi Glass und Nowofol.

Versuch M1.1

100 µm bedruckt (große Punkte)

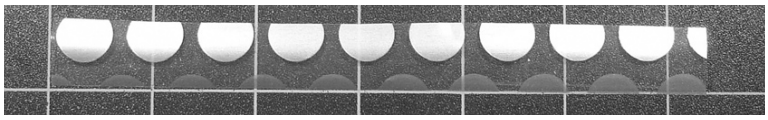


Bild 97: Folienprobe Versuch M1.1

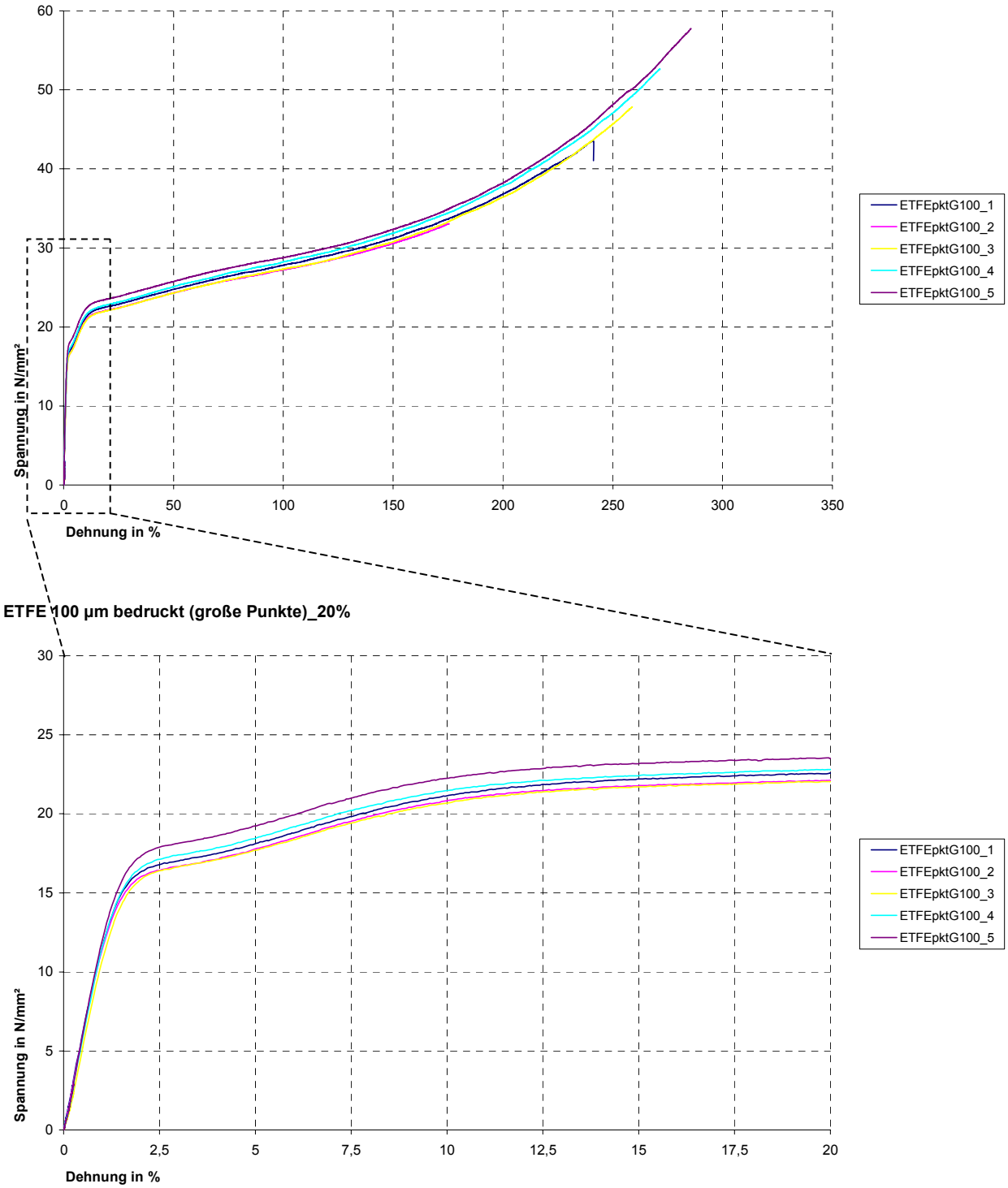


Bild 98: Spannungs- Dehnungsdiagramm Versuch M1.1

Spannung bei 2,5 % Dehnung: 16,9 N/mm²

Spannung bei 15% Dehnung: 22,3 N/mm²

Versuch M1.2

200 µm bedruckt (große Punkte)

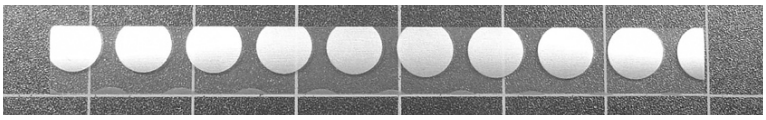


Bild 99: Folienprobe Versuch M1.2

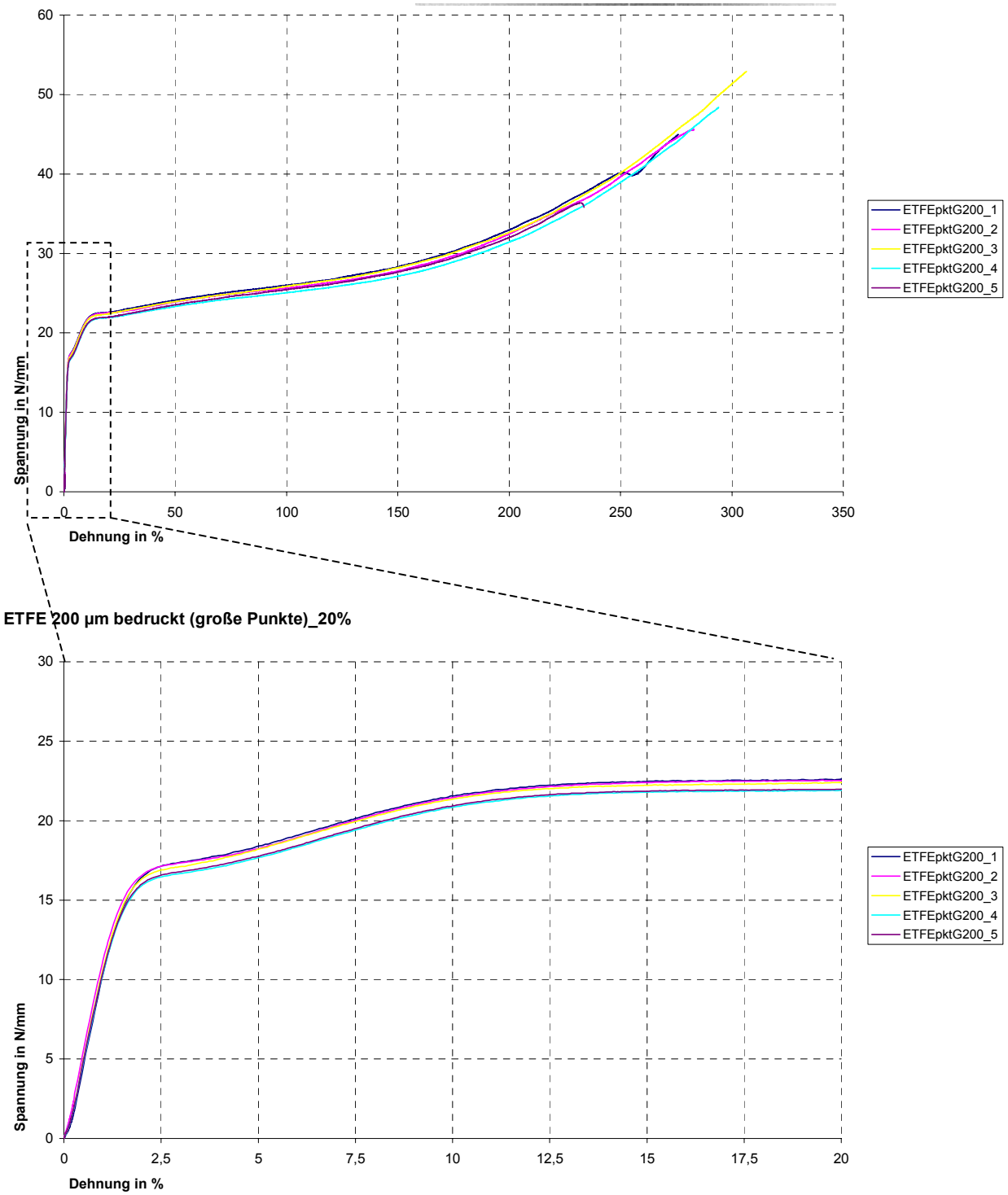


Bild 100: Spannungs- Dehnungsdiagramm Versuch M1.2

Spannung bei 2,5 % Dehnung: 16,8 N/mm²

Spannung bei 15% Dehnung: 22,1 N/mm²

Versuch M1.3

200 µm bedruckt (kleine Punkte)

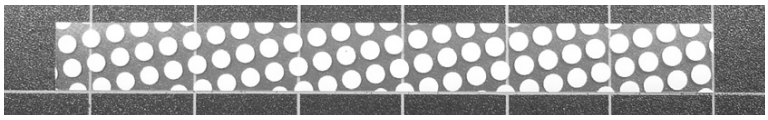


Bild 101: Folienprobe Versuch M1.3

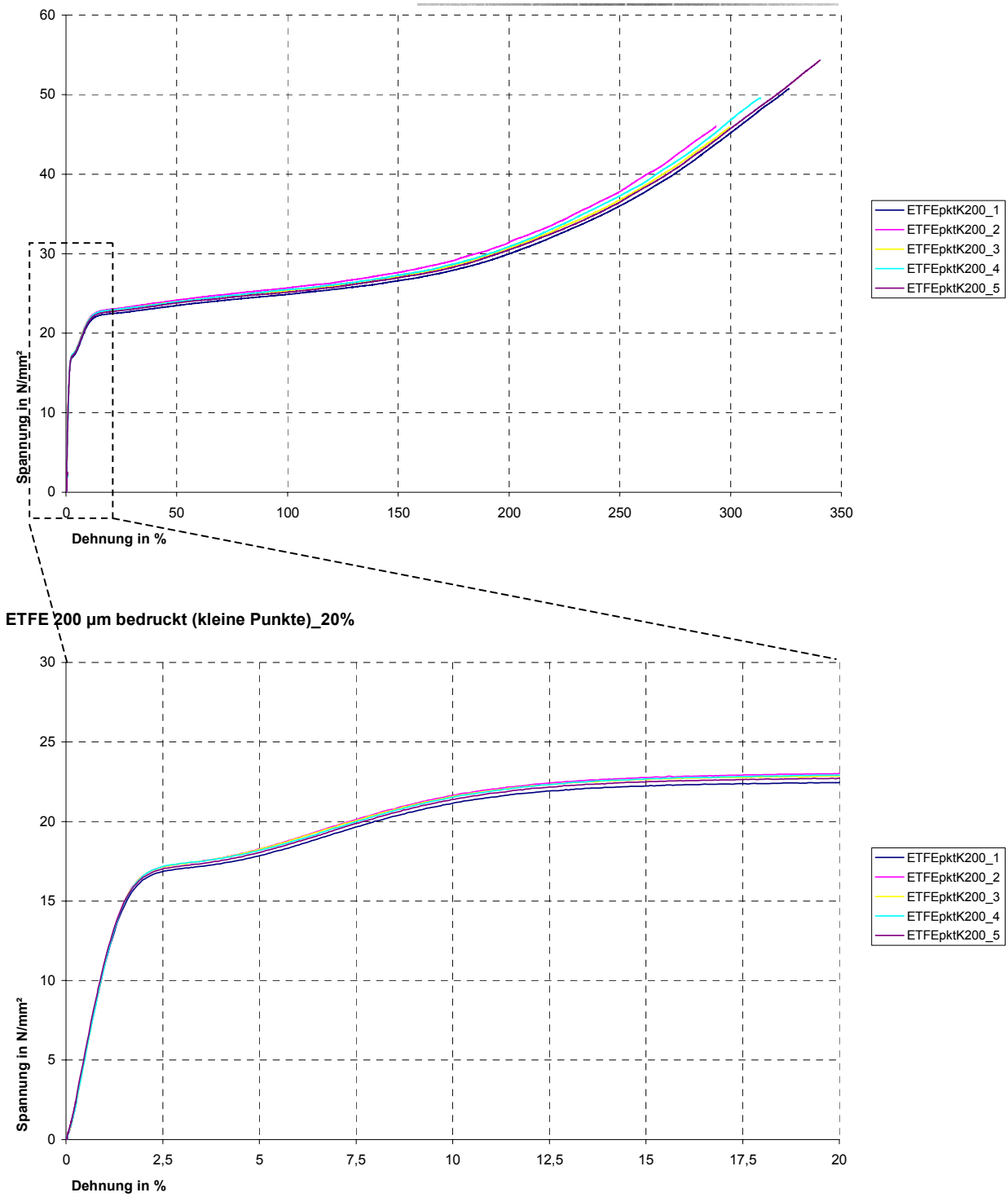


Bild 102: Spannungs- Dehnungsdiagramm Versuch M1.3

Spannung bei 2,5 % Dehnung: 17,1 N/mm²

Spannung bei 15% Dehnung: 22,6 N/mm²

Versuch M1.4

200 µm bedruckt (negative Punktbedruckung)

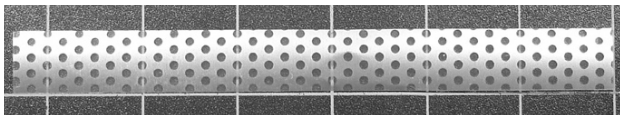


Bild 103: Folienprobe Versuch M1.4

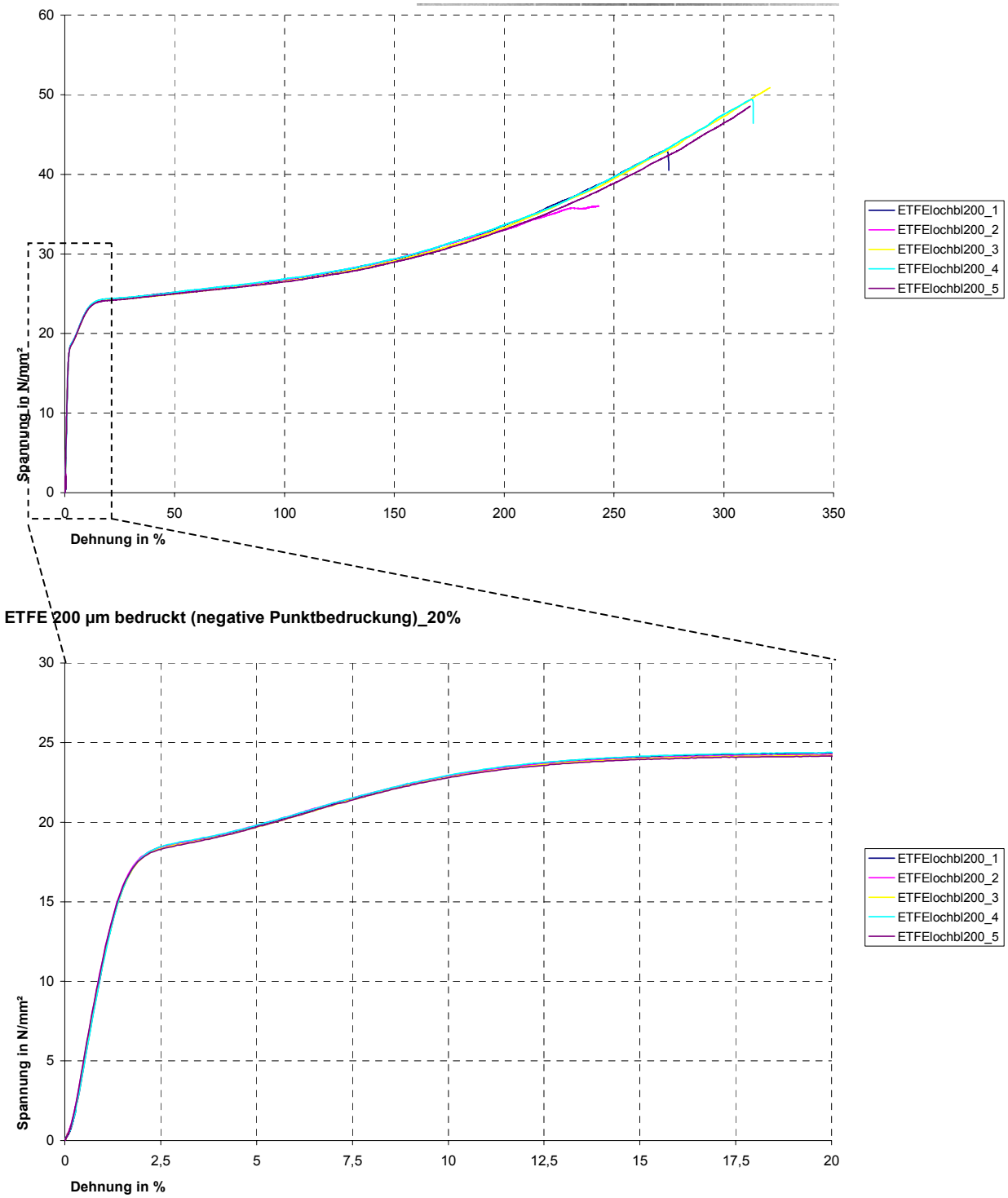


Bild 104: Spannungs- Dehnungsdiagramm Versuch M1.4

Spannung bei 2,5 % Dehnung: 18,4 N/mm²

Spannung bei 15% Dehnung: 24,0 N/mm²

Versuch M1.5

100 µm transparent

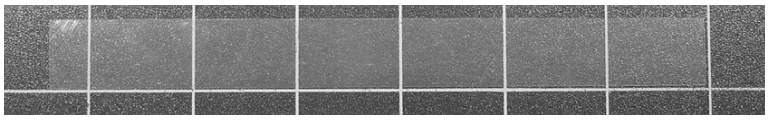


Bild 105: Folienprobe Versuch M1.5

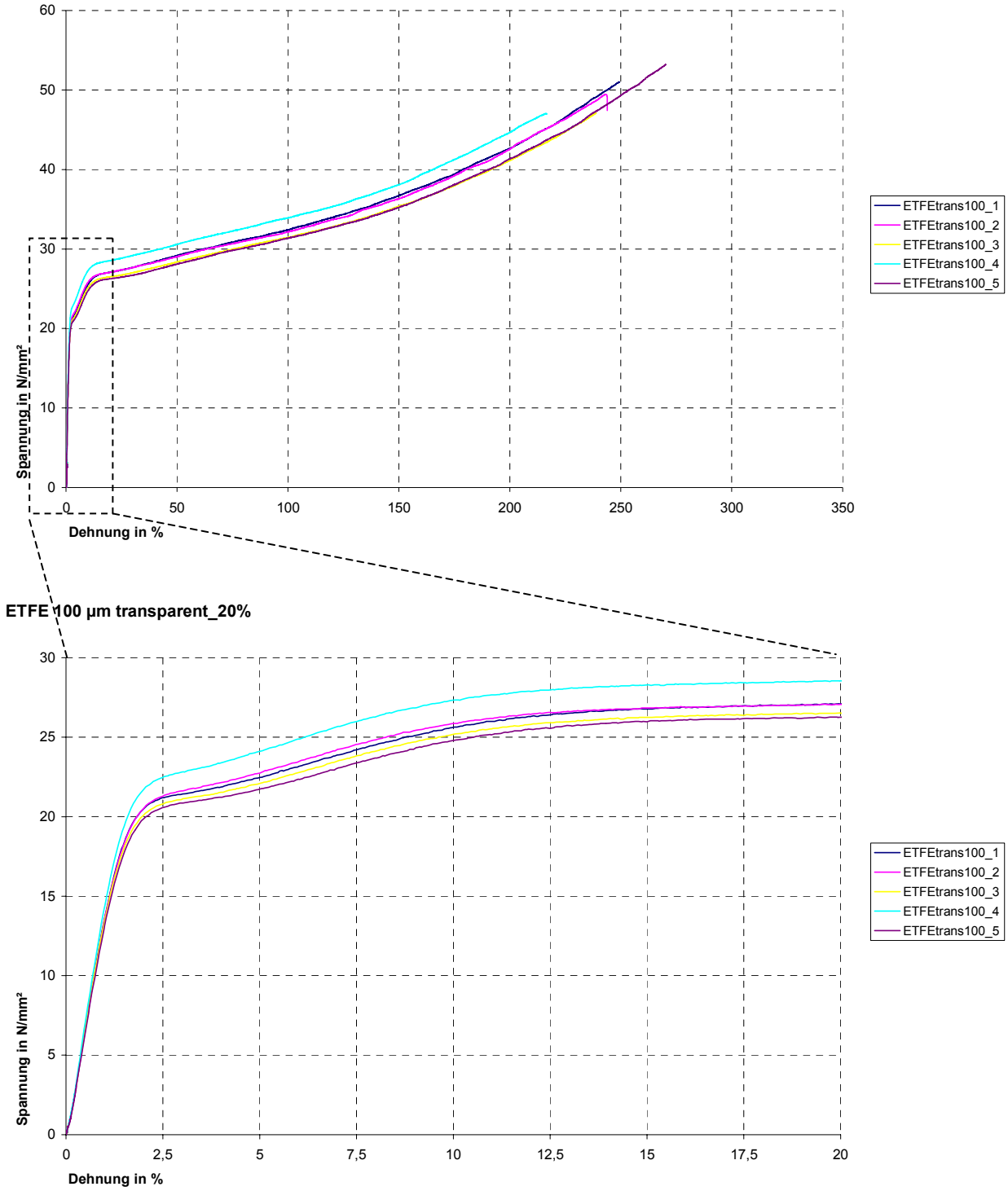


Bild 106: Spannungs- Dehnungsdiagramm Versuch M1.5

Spannung bei 2,5 % Dehnung: 21,3 N/mm²

Spannung bei 15% Dehnung: 26,8 N/mm²

Versuch M1.6

180 µm transparent

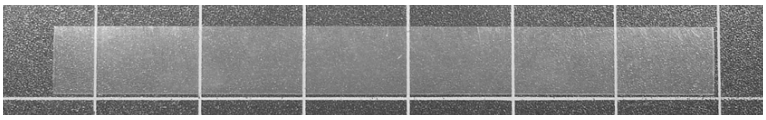


Bild 107: Folienprobe Versuch M1.6

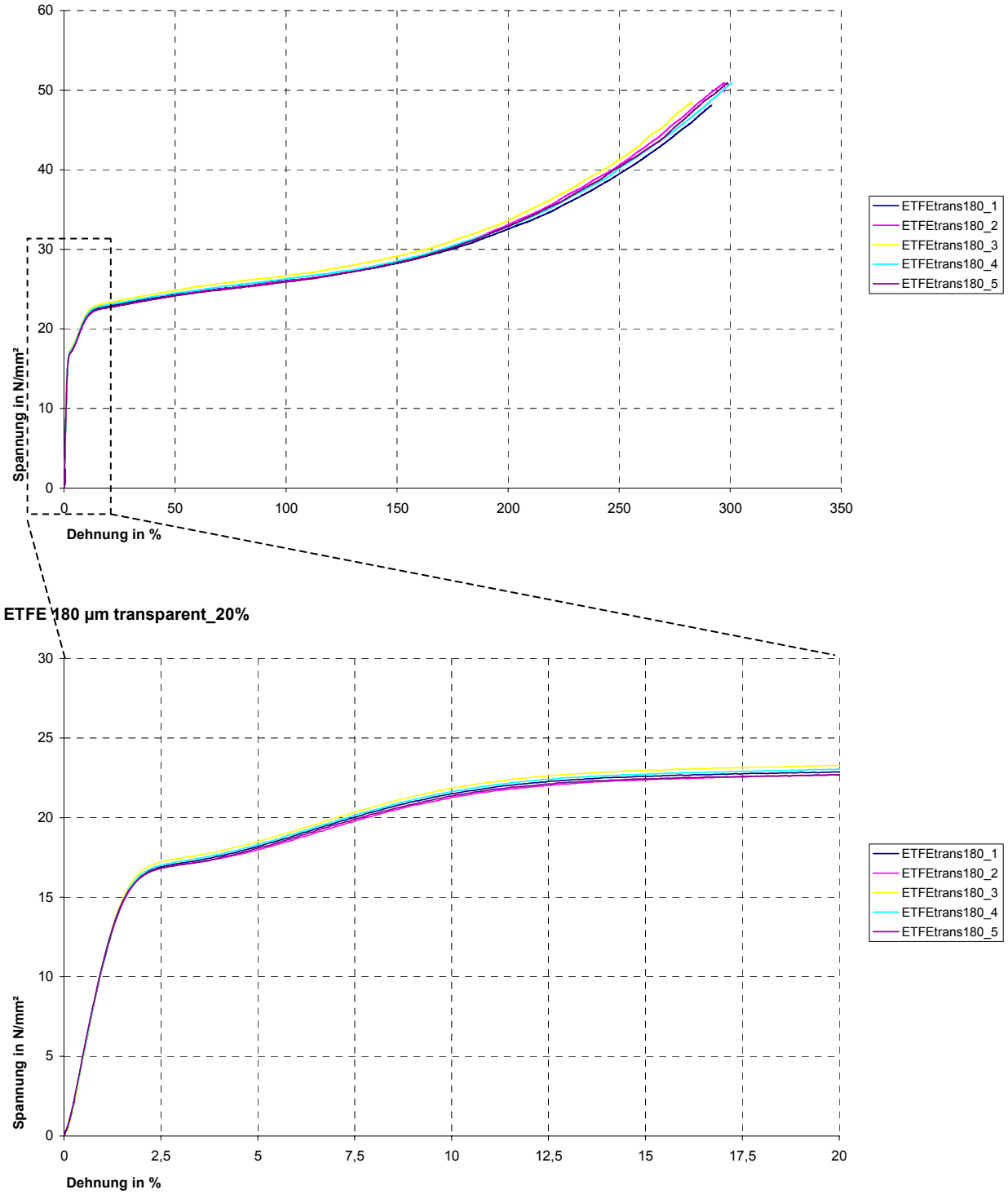


Bild 108: Spannungs- Dehnungsdiagramm Versuch M1.6

Spannung bei 2,5 % Dehnung: 17,0 N/mm²

Spannung bei 15% Dehnung: 22,6 N/mm²

Versuch M1.7

200 µm transparent

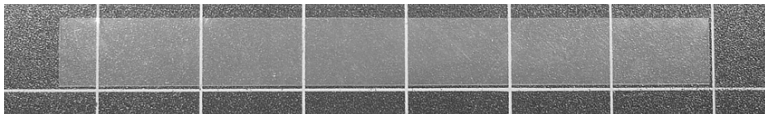


Bild 109: Folienprobe Versuch M1.7

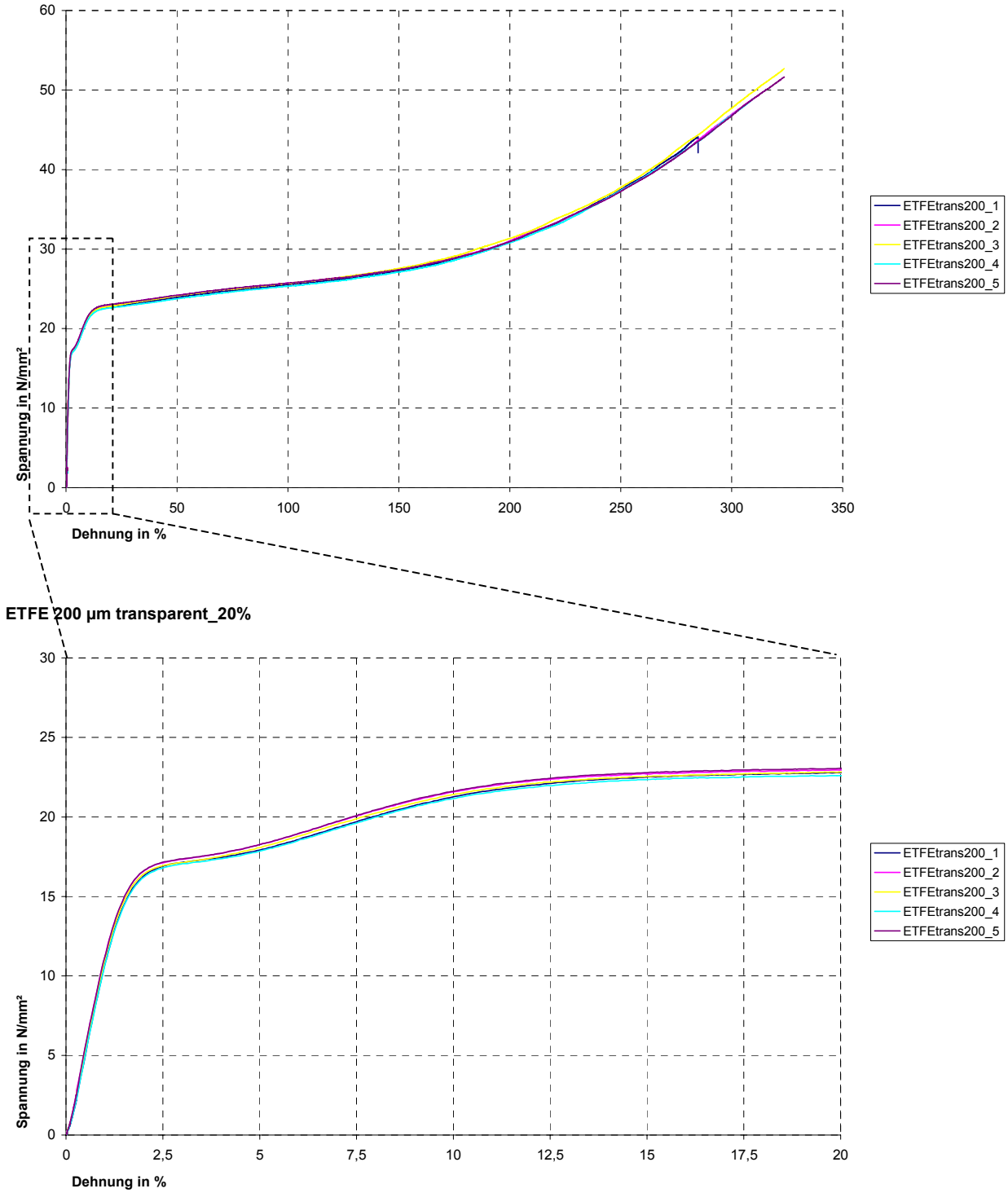


Bild 110: Spannungs- Dehnungsdiagramm Versuch M1.7

Spannung bei 2,5 % Dehnung: 17,0 N/mm²

Spannung bei 15% Dehnung: 22,6 N/mm²

Versuch M1.8

250 µm transparent

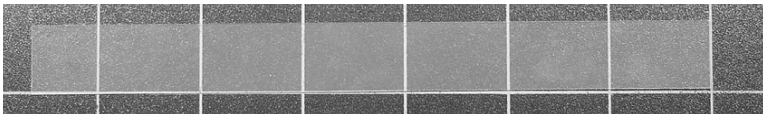


Bild 111: Folienprobe Versuch M1.8

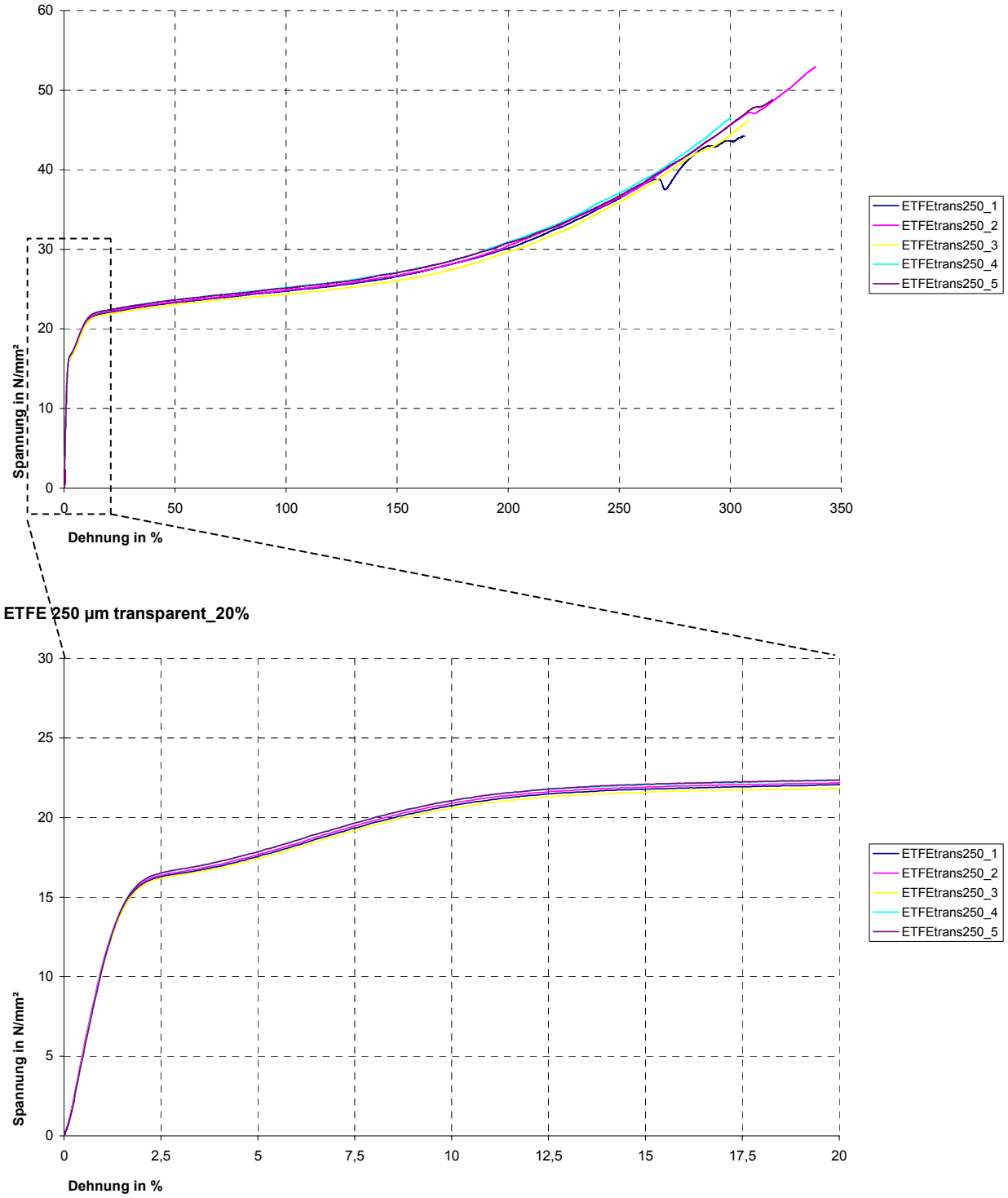


Bild 112: Spannungs- Dehnungsdiagramm Versuch M1.8

Spannung bei 2,5 % Dehnung: 16,4 N/mm²

Spannung bei 15% Dehnung: 21,9 N/mm²

Versuch M1.9

200 µm weiß pigmentiert

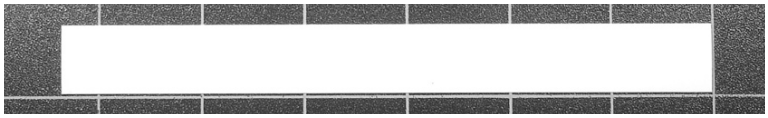


Bild 113: Folienprobe Versuch M1.9

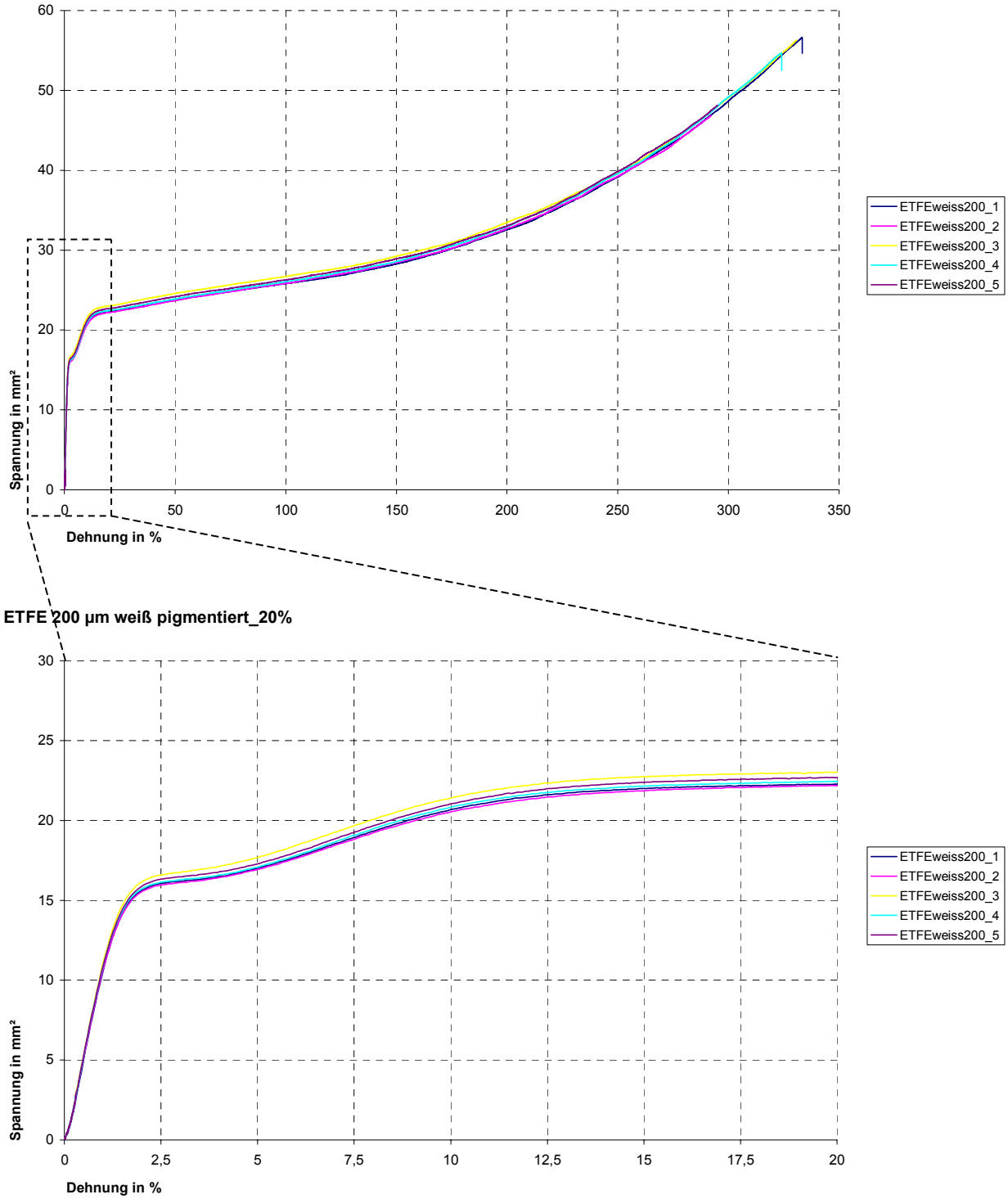


Bild 114: Spannungs- Dehnungsdiagramm Versuch M1.9

Spannung bei 2,5 % Dehnung: 16,2 N/mm²

Spannung bei 15% Dehnung: 22,2 N/mm²

Versuch M1.10

250 µm weiß pigmentiert

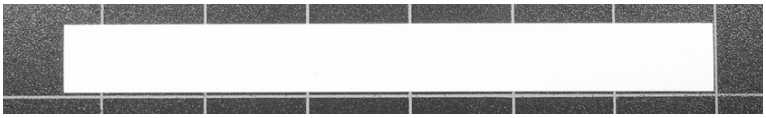


Bild 115: Folienprobe Versuch M1.10

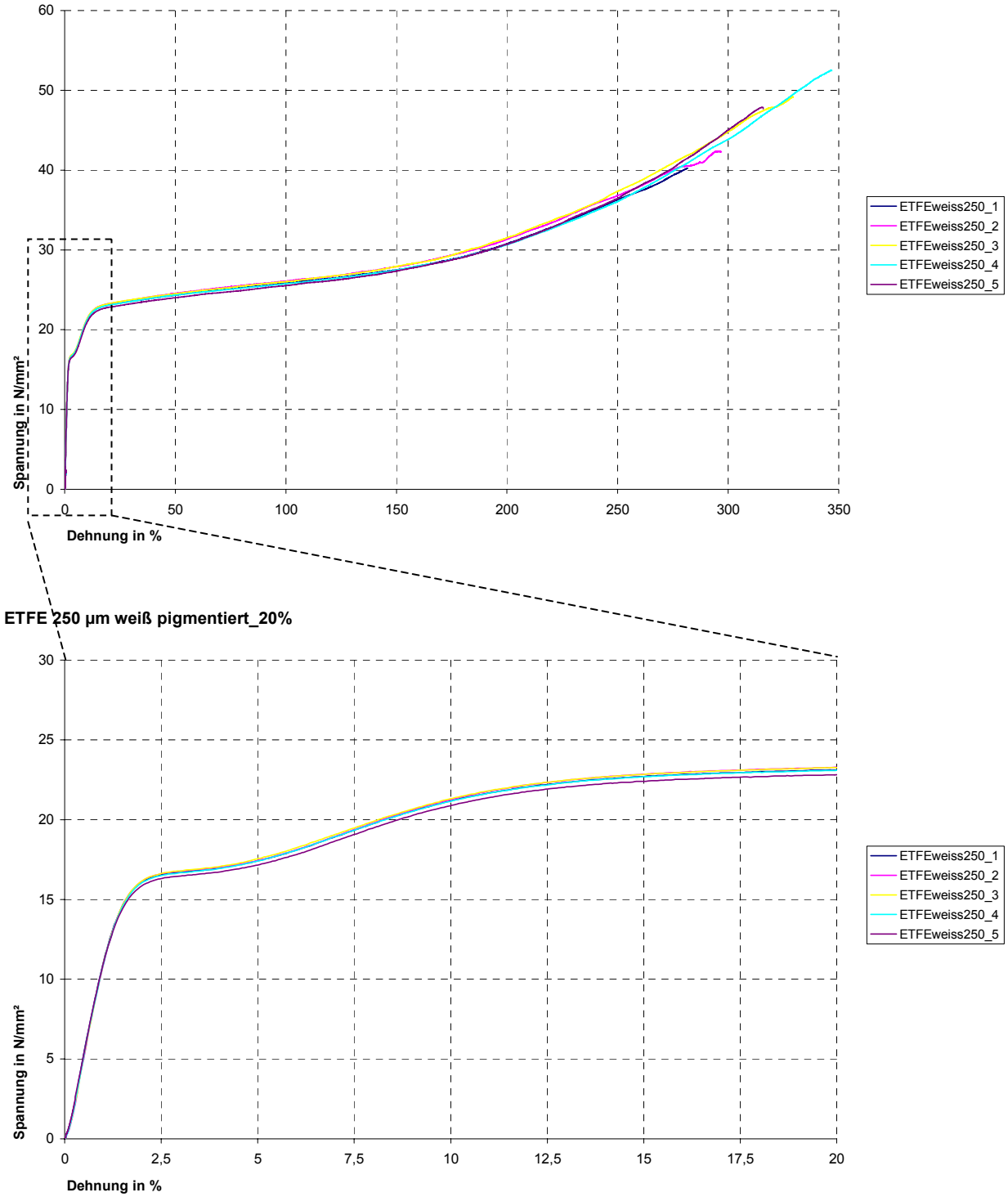


Bild 116: Spannungs- Dehnungsdiagramm Versuch M1.10

Spannung bei 2,5 % Dehnung: 16,5 N/mm²

Spannung bei 15% Dehnung: 22,7 N/mm²

4.3.1.1 Versuchsauswertung

Man kann in dem Spannungs- Dehnungsverlauf ein drastisches Abnehmen der Dehnsteifigkeit ab einer Dehnung von 2,5% erkennen. Eine weitere Abnahme der Dehnsteifigkeit ist bei etwa 15% Dehnung zu verzeichnen. Aus diesem Grund wurden die Spannungswerte an diesen beiden Stellen zum Vergleich der Materialsteifigkeiten verwandt.

Material	Spannung bei 2,5% (Mittelwert) N/mm²	Spannung bei 15% (Mittelwert) N/mm²
M 1.1 ETFE 100 µm bedruckt	16,93	22,26
M 1.2 ETFE 200 µm bedruckt	16,84	22,14
M 1.3 ETFE 200 µm bedruckt	17,06	22,55
M 1.4 ETFE 200 µm bedruckt	18,40	24,04
M 1.5 ETFE 100 µm transparent	21,30	26,82
M 1.6 ETFE 180 µm transparent	16,95	22,62
M 1.7 ETFE 200 µm transparent	16,97	22,57
M 1.8 ETFE 250 µm transparent	16,37	21,89
M 1.9 ETFE 200 µm weiß pigmentiert	16,22	22,23
M 1.10 ETFE 250 µm weiß pigmentiert	16,53	22,69

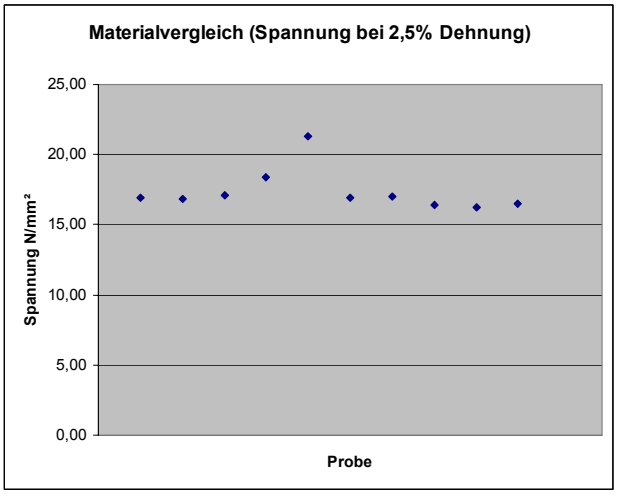


Bild 117: Spannungsvergleich bei 2,5% Dehnung

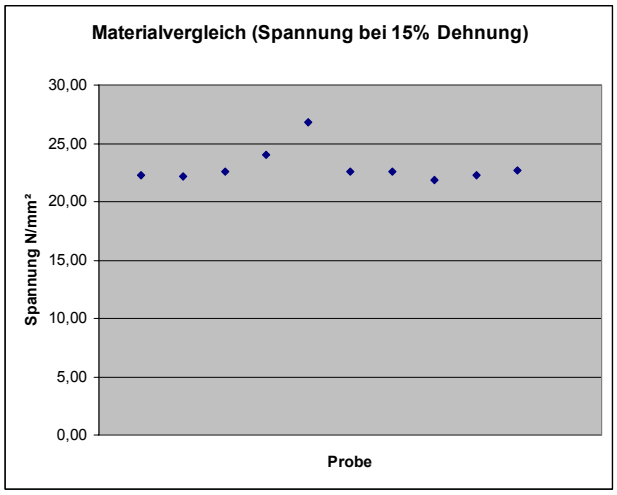


Bild 118: Spannungsvergleich bei 15% Dehnung

Die Spannungen bei 2,5% Dehnung zeigen deutlich eine Häufung zwischen 16 und 17 N/mm². Der höchste Wert von 21,30 N/mm² liegt allerdings 31% über dem niedrigsten Wert von 16,22 N/mm².

Die Werte von transparenter Folie, bedruckter Folie und pigmentierter Folie liegen bis auf drei Abweichungen alle im Bereich zwischen 16 und 17 N/mm², weichen also nur leicht voneinander ab. Die zugefügten Manipulatoren beeinflussen demzufolge nicht die Dehnsteifigkeit der Folien.

Auch die Materialstärke scheint keinen Einfluss auf die Dehnsteifigkeit zu haben. Während bei der punktbedruckten Folie die dickere 200 µm Folie einen niedrigeren Wert als die 100 µm Folie aufweist, ist es bei der pigmentierten Folie die dünnere 200 µm Folie, die

gegenüber der 250 µm Folie den schwächern Wert hat.
Zusammenfassung:
• Qualitativ ist der Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie bei allen Proben identisch.
• Die gemessenen Werte sind zwar bei vielen Proben sehr ähnlich, die wenigen Abweichungen können aber erhebliche Größenordung annehmen (in diesen Fall 31% Abweichung vom Maximal- zum Minimalwert bei 2,5% Dehnung)

4.3.1.2 Erklärung des Kurvenverlaufs

Ein Thermoplast besteht aus langen Molekülketten. Die Ketten sind aber nicht direkt miteinander über atomare Bindungen verknüpft, sondern nur ineinander verknäult. Die Position der Molekülkette ist zufällig, wobei die vollständig gestreckte Position nur eine von unendlich vielen anderen Formationen ist. ETFE ist ein teilkristallines Thermoplast, deshalb entspricht der Kurvenverlauf der Zugversuche nicht exakt dem, den man von einem Thermoplast erwarten würde.
In der ersten nahezu linearen Phase des Spannungs- Dehnungsdiagramms richten sich diese ungerichteten Molekülketten zwischen den kristallinen Bereichen in Richtung der Beanspruchung aus. Dieser Vorgang ist reversibel.
Im Anschluss daran fangen die kristallinen Bereiche an, sich „aufzuräufeln“ und sich in Belastungsrichtung neu anzuordnen. Es kommt also in den kristallinen Bereichen zu einer Orientierung der Kristallite bzw. Umkristallisation der Kristallite. Dieser Prozess ist irreversibel. [Bon71]

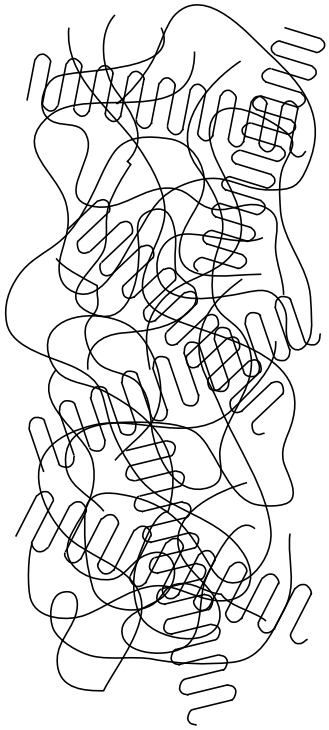


Bild 119: Ausgangszustand eines teilkristallinen Thermoplasts

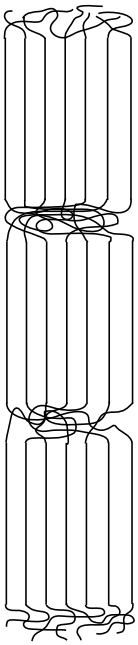


Bild 120: Teilkristallines Thermoplast nach Umkristallisation

Der Anstieg der Kurve im plastischen Bereich hängt damit zusammen, dass der Umstrukturierungsprozess im Material nicht so schnell abläuft, wie die äußere Last ansteigt. Der Anstieg ist also keine Verfestigung, sondern ein temporäres Phänomen, was kleiner wird, umso langsamer die Zuggeschwindigkeit ist. Man wird dies deutlich in den Relaxationsversuchen sehen.
Für die Bautechnik ist das Materialverhalten ab dem ersten Knick der Kurve, also etwa ab 15 N/mm², für den Gebrauchszustand nahezu unbrauchbar, da ab dieser Last die Verformungen irreversibel sind und in normalkraftbeanspruchten Bauteilen die Ausnutzung dieses plastischen Bereiches mit großen Verformungen einhergeht.
Dieser Bereich ist nur noch interessant, wenn man versucht die Krümmung der Folie durch Überlastung und nicht durch Zuschnitt herzustellen. Diese Technik muss aber noch auf ihre Tauglichkeit überprüft werden. Probleme dieser Technik sind einerseits die größere Steifigkeit der Folie an Schweißnähten, was zu ungleichmäßigen Verformungen führt und andererseits die Schwierigkeit den Verformungsprozess kontrolliert ablaufen zu lassen.

4.3.2 Analyse unterschiedlicher Zuggeschwindigkeiten

Die Belastungsgeschwindigkeit spielt bei Kunststoffen durchaus eine Rolle. Das hängt vor allem damit zusammen, dass Kunststoffe kein linear elastisches Verhalten aufweisen, sondern ein visko-elastisches Verhalten. Die Reaktion auf eine Belastung erfolgt etwas verzögert. Um den Einfluss der Geschwindigkeit auf Versuchsergebnisse zu ermitteln, wurde eine 200μm Dicke ETFE Folie bei Zuggeschwindigkeiten von 50 mm/min, 100 mm/min und 500 mm/min getestet. Bei jeder Geschwindigkeit wurden 5 Proben getestet. Im Diagramm ist jeweils der Mittelwert dieser 5 Proben dargestellt.
Versuch M 2.1:

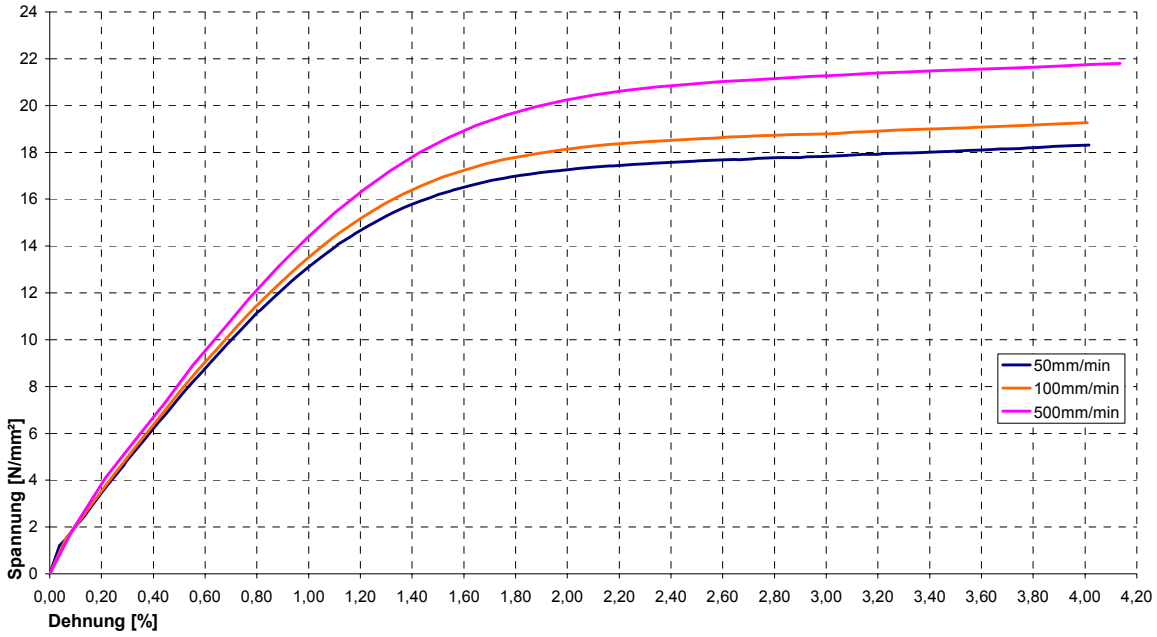


Bild 121: Vergleich von Prüfgeschwindigkeiten bei ETFE d=0,2mm

Das Ergebnis der ETFE Folie zeigt deutlich das visko-elastische Verhalten. Bei höherer Prüfgeschwindigkeit erhöht sich die Materialsteifigkeit scheinbar. Bei extremen Geschwindigkeiten kann es sogar zu einer Versprödung kommen. Das heißt hohe Geschwindigkeiten haben einen ähnlichen Einfluss auf die Probe, wie niedrige Temperaturen und umgekehrt.

4.3.2.1 Versuchsauswertung

Ergebnisübersicht:
Versuch M 2.1: ETFE bei 2,5% Dehnung (Mittelwert)

50 mm/min	17,6 N/mm²
100 mm/min	18,6 N/mm²
500 mm/min	21,0 N/mm²

Die Variation der Prüfgeschwindigkeit ergibt bei ETFE eine Festigkeitserhöhung um 19%. Die Spannungsunterschiede entsprechen bei der ETFE Folie den erwarteten Differenzen, der sich durch das visko-elastische Materialverhalten erklären lässt. Es kommt schon während des Versuchs zu Relaxationsprozessen, bzw. bei hohen Geschwindigkeiten werden diese unterbunden, und der Werkstoff wird scheinbar steifer. Bei der Bemessung könnte dieses Verhalten für stoßartige, sehr kurze Belastungen, wie Windböen oder evtl. Anprall, zu einer Erhöhung der Beanspruchbarkeit verwendet werden.

4.4 Zeitabhängiges Verformungsverhalten

Kriechen eines Materials liegt dann vor, wenn die Dehnung trotz konstanter Spannung weiter zunimmt. Zu der anfänglichen elastischen Dehnung ε_{el} kommt also eine Kriechdehnung ε_k hinzu. Von Relaxation spricht man, wenn die gedehnte Länge eines gespannten Materials konstant gehalten wird und sich die anfängliche Spannung vermindert, also eine Entspannung σ_k auftritt.
Die beiden Mechanismen lassen sich im Folienbau eindeutig den beiden Vorspannungsarten zuordnen. Das Kriechen tritt bei pneumatischer Vorspannung auf, bei der die Vorspannung konstant bleibt und die Länge des Materials sich ändern kann. Die Relaxation tritt bei der mechanischen Vorspannung auf, bei der die Einspannstellen der Folie in einem konstanten Abstand bleiben und auch die Form der Folie konstant bleibt, die Vorspannung in der Membran aber mit der Zeit nachlässt.Da in beiden Fällen im Materialgefüge derselbe Prozess abläuft, hängen beide Mechanismen zusammen.
Wesentliche Erkenntnisse zum Kriechverhalten sind in [Bar03] veröffentlicht worden. Die Ergebnisse dieser Arbeit werden im folgenden Kapitel zusammengefasst.

4.4.1 Kriechen

Das Kriechen ist eine Dehnung des Materials unter Last, dass im Gegensatz zur elastischen Dehnung, verzögert auftritt. Die Kriechdehnung besteht aus einem reversiblen und irreversiblen Anteil. Ein Material, bei dem das Kriechen eine Rolle spielt, ist beispielsweise der Beton. Bei dem reversiblen Anteil des Kriechens spricht man hier von einer verzögerten elastischen Verformung. Bei dem irreversiblen Anteil spricht man vom Fließen des Betons. Für die Ermittlung der Kriechverformung im Beton benötigt man die Grundfließzahl φ_{f0}, den Beiwert für das Fließen k_f und den Beiwert für die verzögerte, elastische Verformung k_v. Die Grundfließzahl ist abhängig von der den Beton umgebenen Feuchtigkeit, der Beiwert k_f ist abhängig von der Zementklasse, der wirksamen Körperdicke und dem Betonalter und der Beiwert k_v ist abhängig von der Belastungsdauer.

$$\varepsilon_{k,t} = \frac{\sigma_b}{E_b}\varphi_t$$

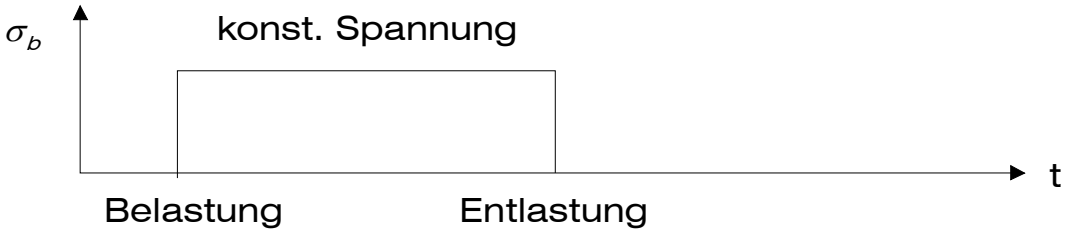
Mit

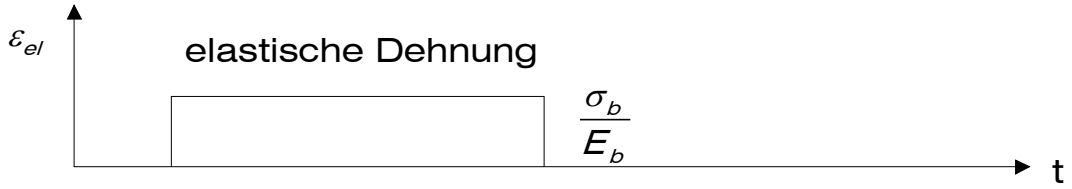
$$\varphi_t = \varphi_{f0}\,(k_{f,t} - k_{f,a}) + 0{,}4 \cdot k_{v,\,(t-a)}$$

Mit

k_f	Beiwert für den zeitlichen Ablauf des Fließens
k_v	Beiwert für die verzögerte elastische Verformung
a	Betonalter beim aufbringen der Last
t	Untersuchungszeitpunkt

Der Wert ist also unabhängig von der Höhe der angebrachten Spannung σ_b. Daraus folgt, dass es sich bei Beton um einen linear visko-elastischen Werkstoff handelt.





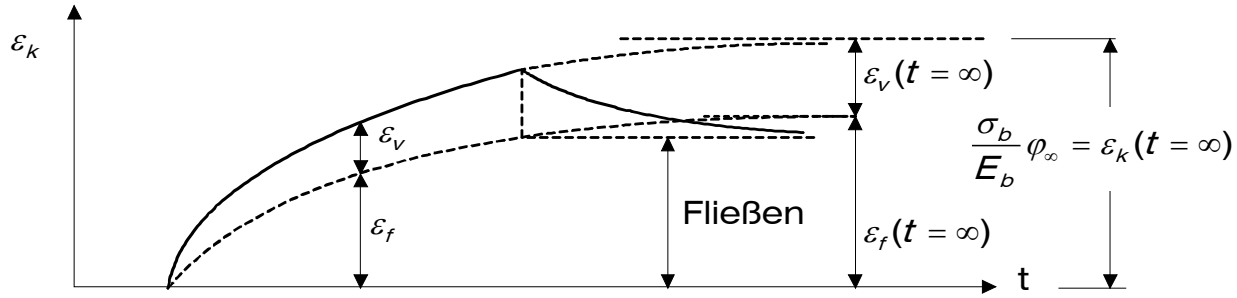


Bild 122: Verlauf der Kriechverformung [Leo80]

Die Frage ist nun, inwieweit das Kriechverhalten des Betons auf das Kriechverhalten von Folien übertragbar ist. Es ist kaum zu erwarten, dass die Luftfeuchtigkeit und das Alter der Folie einen großen Einfluss auf das Kriechverhalten haben. Sicher wird die Belastungsdauer einen Einfluss haben, aber auch die Temperatur wird eine Rolle spielen. Insofern ist das Kriechen von Folien nur im qualitativen Verlauf mit dem des Betons vergleichbar. Der Verlauf wird mit seiner sofortigen Verformung, der verzögert elastischen und der verzögert irreversiblen Verformung derselbe sein.

4.4.1.1 Kriechversuche an der Universität Duisburg Essen

Einaxiale Kriechversuche sind sehr leicht und ohne großen technischen Aufwand durchführbar. Man braucht eine Einspannvorrichtung, in die die Folie am oberen Ende eingeklemmt wird, an das untere Ende hängt man ein Gewicht an. Je länger der Folienstreifen gewählt wird, umso leichter sind die Verformungen zu messen. Da der Kriechvorgang über einen langen Zeitraum von 1000 Stunden gemessen werden sollte [EUR04], sind Längenmessungen maximal ein Mal pro Tag erforderlich. Der Raum sollte möglichst eine konstante Temperatur aufweisen, da das Material auf Temperaturänderungen empfindlich reagiert.
Für den Bau des Daches der Deutschen Bundes Umweltstiftung in Osnabrück wurden Kriechversuche durchgeführt und veröffentlicht. Das getestete Material war eine ETFE Folie mit einer Stärke von 0,225mm. Nach einer Belastungszeit von 1000 Stunden wurde die Rückverformung über weitere120 Stunden gemessen.

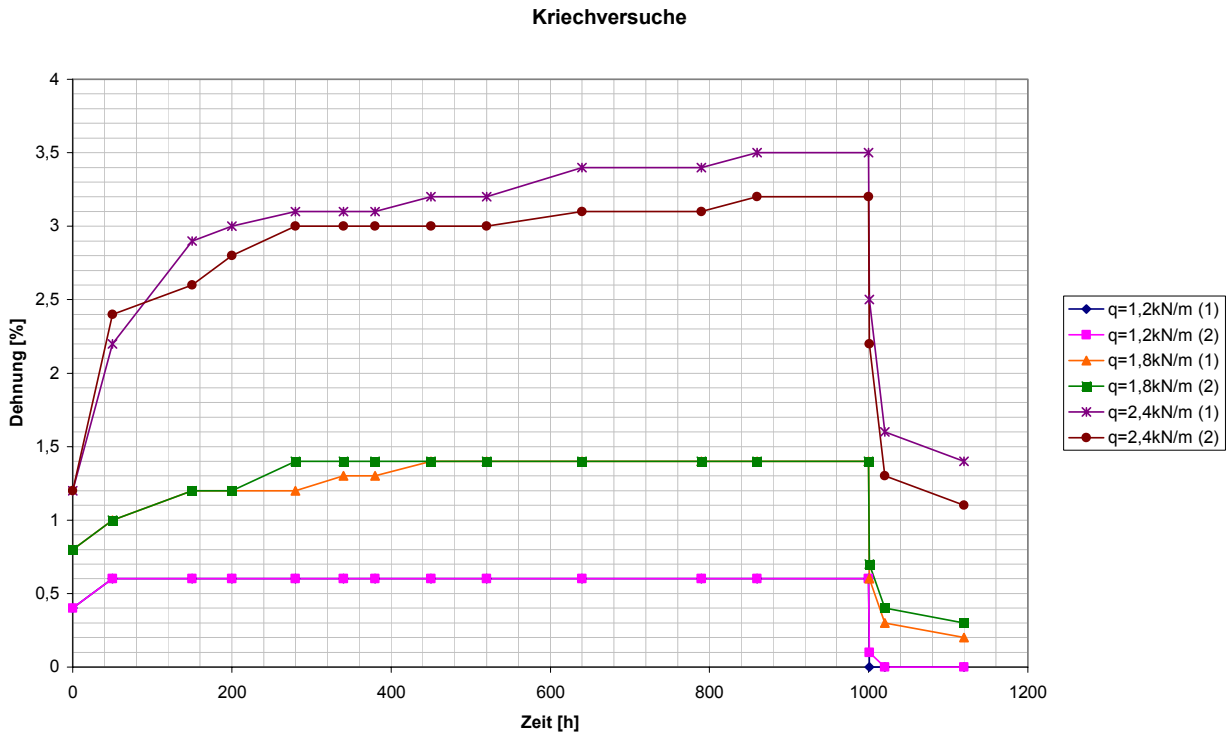


Bild 123: Entwicklung der Dehnung und Rückdehnung in Abhängigkeit vom Lastniveau und der Lasteinwirkungsdauer [Bar03]

Q=1,2 kN/m entspricht einer Spannung von 5,3 N/mm²
Q=1,8 kN/m entspricht einer Spannung von 8,0 N/mm²
Q=2,4 kN/m entspricht einer Spannung von 10,7 N/mm²

Die Dehnungen nach 0h, 1000h und 1120h (120h Entlastung) sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

$\sigma_{t=0}$ N/mm²	$\varepsilon_{el} = \varepsilon_{t=0}$ %	$\varepsilon_{el} + \varepsilon_k = \varepsilon_{t=1000h}$ %	ε_k %	$\varepsilon_f = \varepsilon_{t=1120h}$ %	$\varphi_\infty = \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_{el}}$
5,33	0,4	0,6	0,2	0	0,5
5,33	0,4	0,6	0,2	0	0,5
8,00	0,8	1,4	0,6	0,2	0,75
8,00	0,8	1,4	0,6	0,4	0,75
10,67	1,2	3,5	2,3	1,1	1,92
10,67	1,2	3,2	2,0	1,4	1,67

Die Formel für den Beton $\frac{\sigma}{E}\varphi_\infty = \varepsilon_k(t=\infty)$ würde, bei identischen Ausgangsvoraussetzungen des Materials, ein konstantes φ_∞ ergeben. Das ist, wie man aus der Tabelle lesen kann, bei diesen Versuchen nicht der Fall.

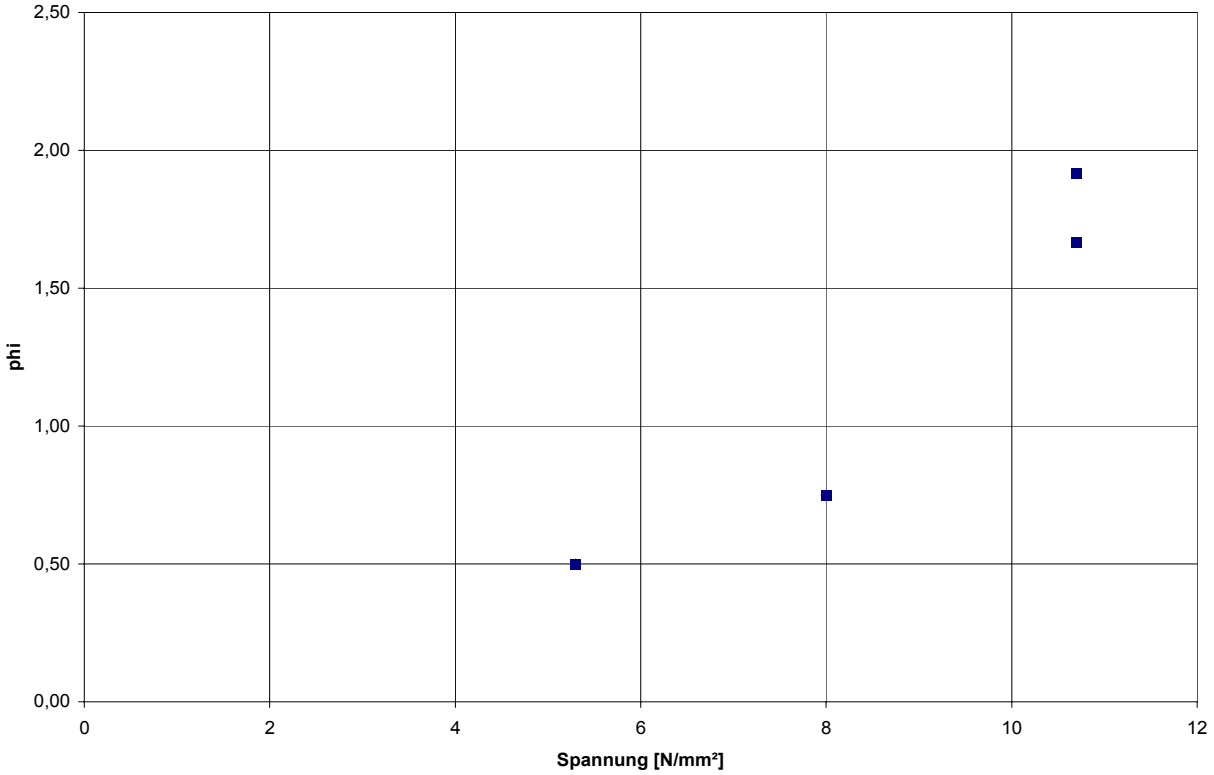


Bild 124: Kriechzahl in Abhängigkeit von der Spannung

Der Wert φ ist offensichtlich nicht unabhängig von der Ausgangsspannung. Da die Folie den linear visko – elastischen Werkstoffen zugeordnet ist, bedeutet dieses Versuchsergebnis, dass bei der Folie die Grundvoraussetzung der kleinen Verformungen in diesen Versuchen schon überschritten wurde.

Der Verlauf der Kurven bei 2,4 KN/m lässt die Vermutung zu, dass nach 1000 Stunden die Dehnung noch weiter ansteigt. Dies macht eine allgemeine Aussage über eine Kriechfunktion zur Ermittlung von $\varepsilon_{t=\infty}$ unmöglich. Es liegen nicht genügend Funktionswerte für φ_∞ vor, um eine Näherungsfunktion für φ_∞ zu berechnen.
Es kann lediglich der Spannung einer zugehörigen Dehnung nach 1000h zugeordnet werden, was für die Spannungszustände im Bauwerk nur eine begrenzte Aussagekraft hat.

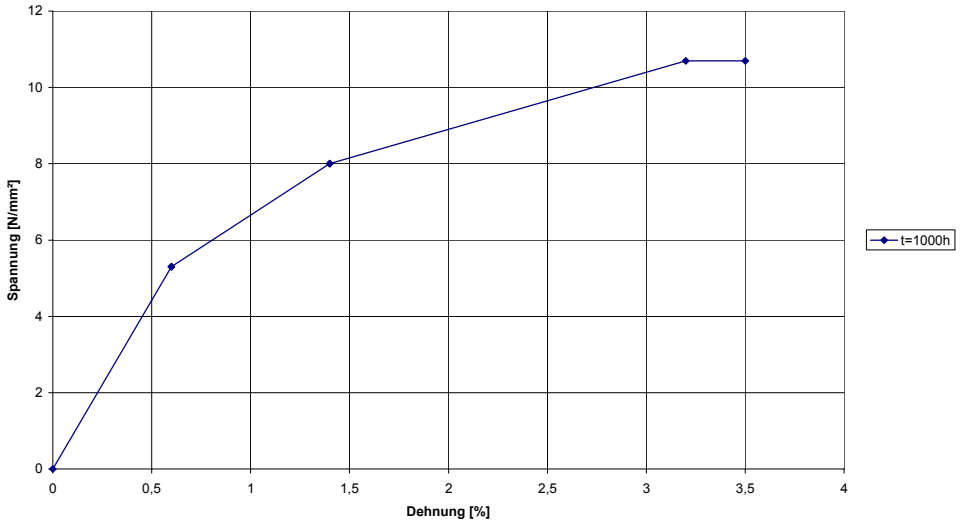


Bild 125: Dehnung nach 1000h konstanter Spannung

4.4.2 Relaxation

Die Relaxation ist eine entscheidende Begrenzung für die mechanisch vorgespannten Systeme. Die aufgebrachte Vorspannung wird durch sie abgebaut. Auch äußere Lasten, die auf ein mechanisch vorgespanntes System einwirken, tragen zum Abbau der Vorspannung bei. Es muss also untersucht werden, in welchen Maße dieser Spannungsabbau stattfindet, um eine dauerhafte Vorspannung des Systems gewährleisten zu können und um festzulegen, ob auf eine Nachspannmöglichkeit eventuell verzichtet werden kann.

4.4.2.1 Relaxationsversuche an der TU-Berlin

Die Versuche werden an einer einaxialen Zugmaschine durchgeführt. Die Probe ist 50mm breit. Der Abstand der Klemmen zueinander beträgt 90mm. Die Maschine ist weggesteuert. Es wird ein Dehnweg vorgegeben, der mit einer Geschwindigkeit von 50mm/min angefahren wird. Wenn die Enddehnung erreicht ist, wird für den Rest der Versuchsdauer die Dehnung konstant gehalten und die Spannungen gemessen. Die Versuchsdauer bei den Versuchen RV1 und RV2 beträgt 1000h. Bei diesen beiden Versuchen hat sich herausgestellt, dass nach einer Versuchsdauer von etwa 500h keine Relaxation mehr stattfindet. Deshalb wurden die Versuche RV3 bis RV7 auf eine Versuchsdauer von 500h begrenzt. Die Temperatur während des Versuchs lag bei 20°C.

Versuch	Ausgangsspannung [N/mm²]
RV1	19,14
RV2	17,25
RV3	14,78
RV4	15,97
RV5	15,44
RV6	9,26
RV7	15,49

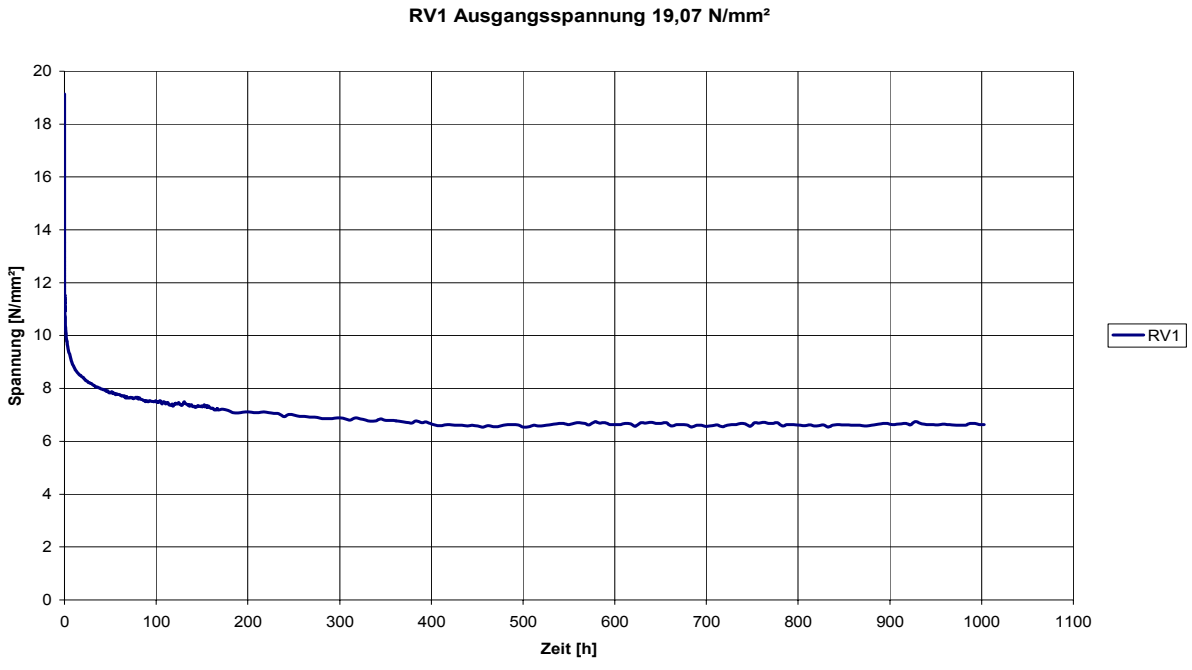


Bild 126: Relaxationsversuch RV1 zeitabhängiger Spannungsverlauf

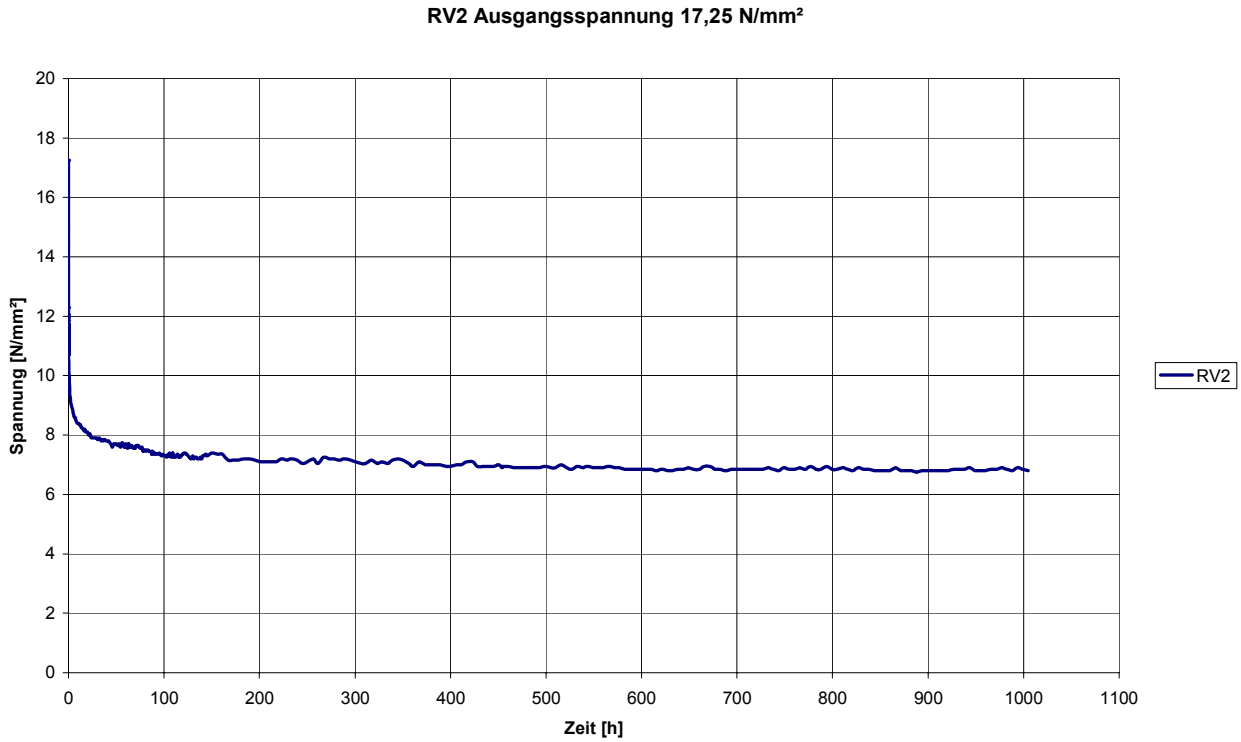


Bild 127: Relaxationsversuch RV2 zeitabhängiger Spannungsverlauf

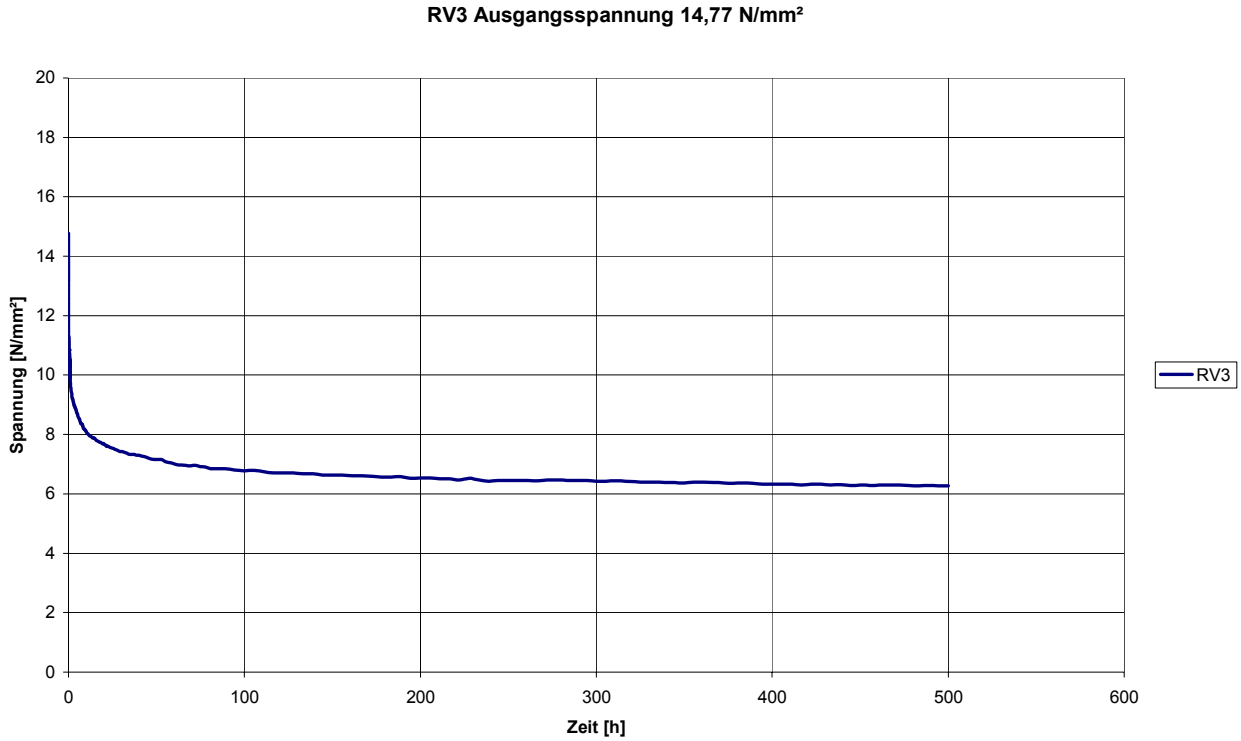


Bild 128: Relaxationsversuch RV3 zeitabhängiger Spannungsverlauf

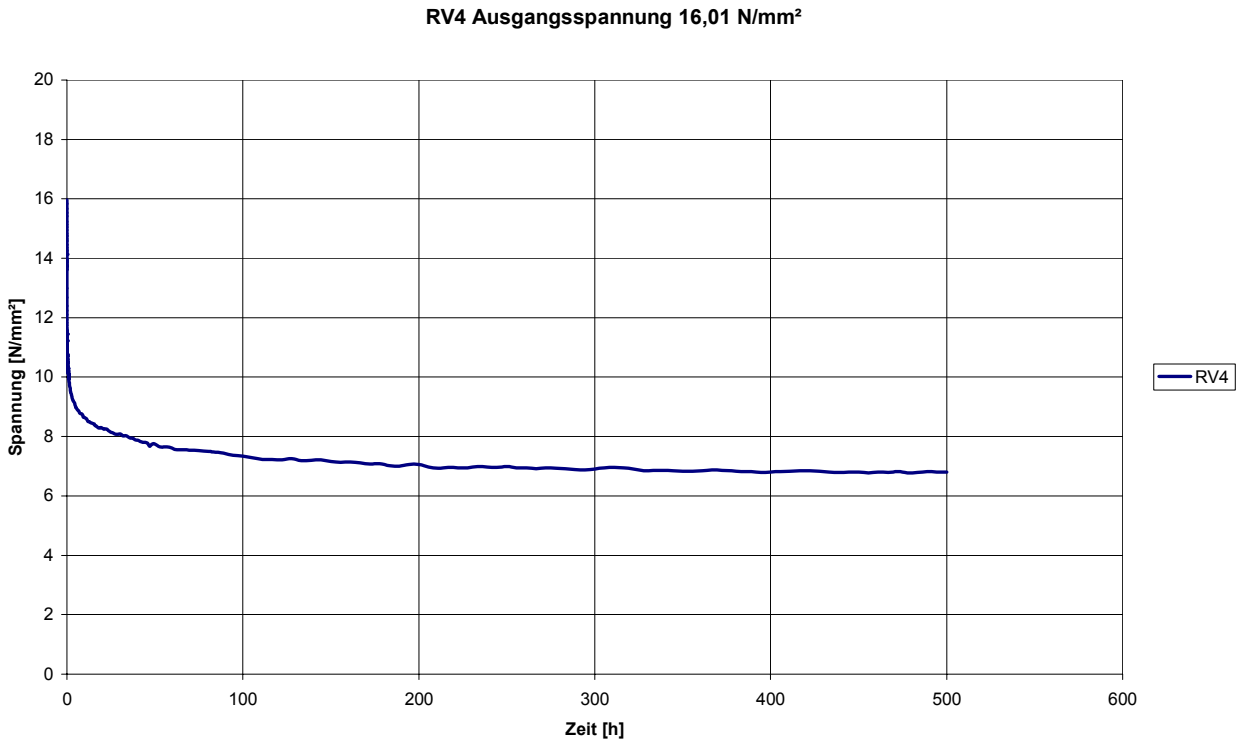


Bild 129: Relaxationsversuch RV4 zeitabhängiger Spannungsverlauf

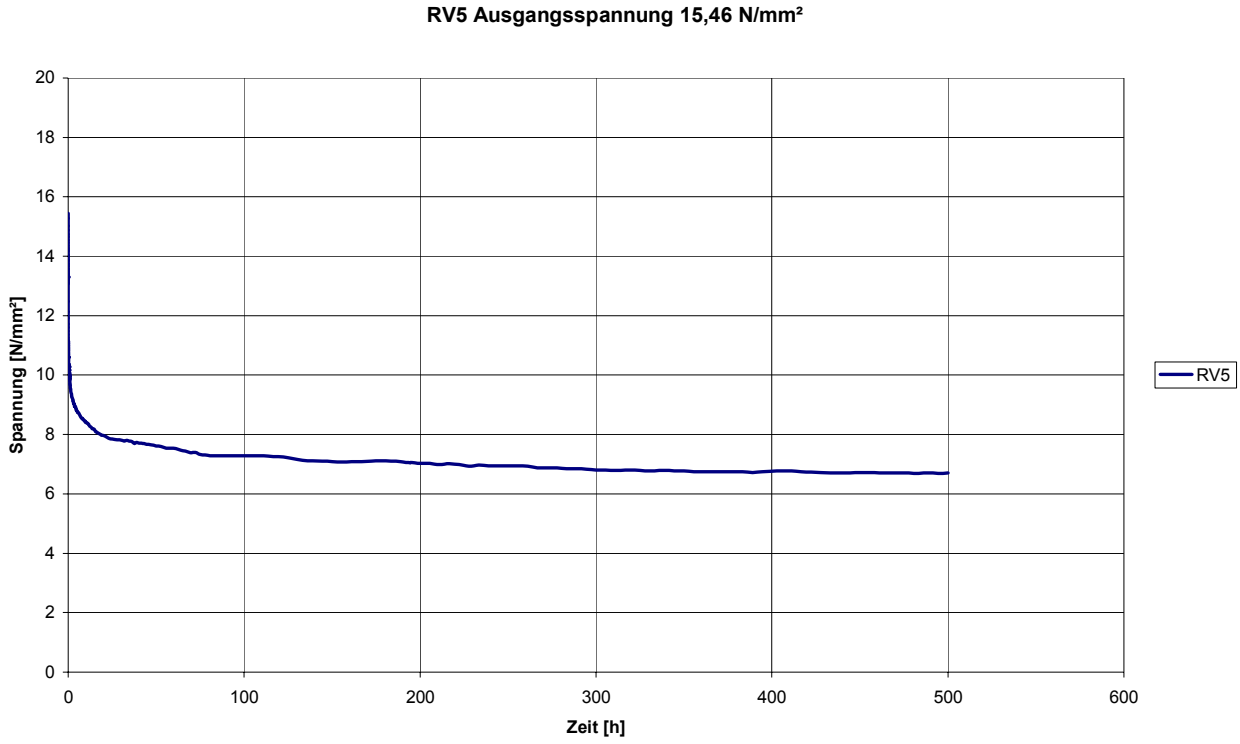


Bild 130: Relaxationsversuch RV5 zeitabhängiger Spannungsverlauf

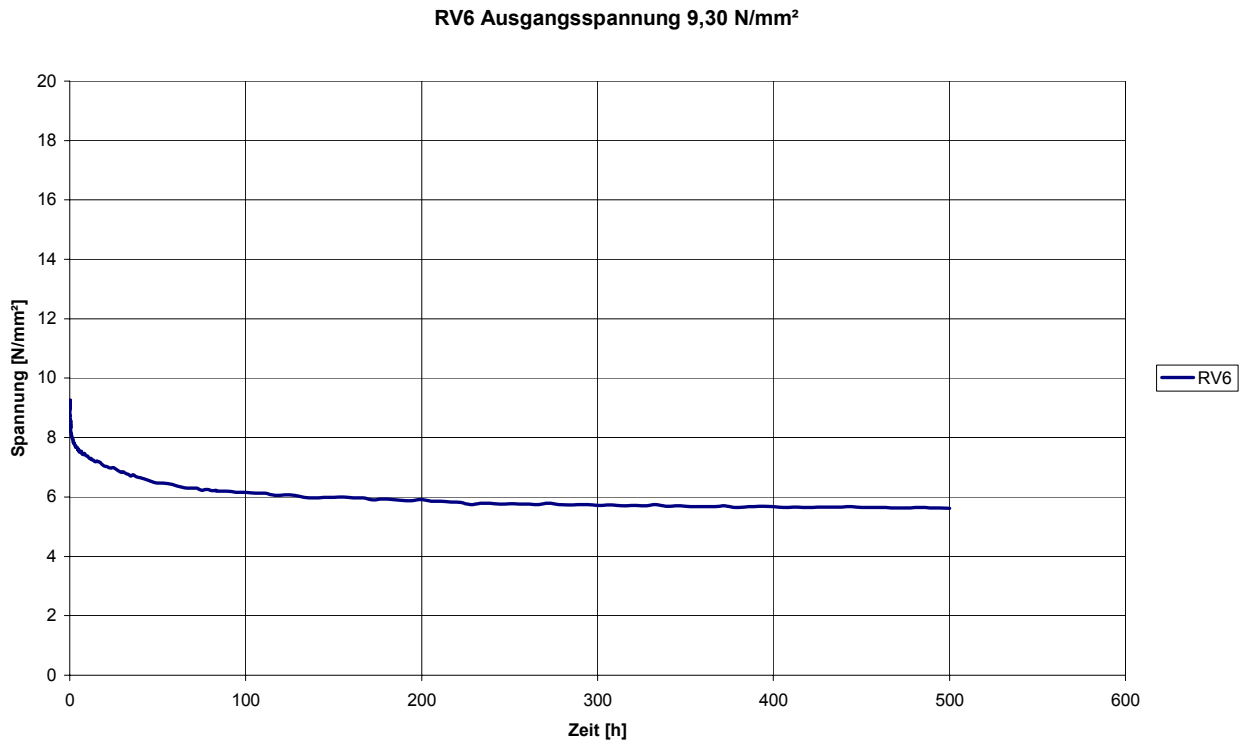


Bild 131: Relaxationsversuch RV6 zeitabhängiger Spannungsverlauf

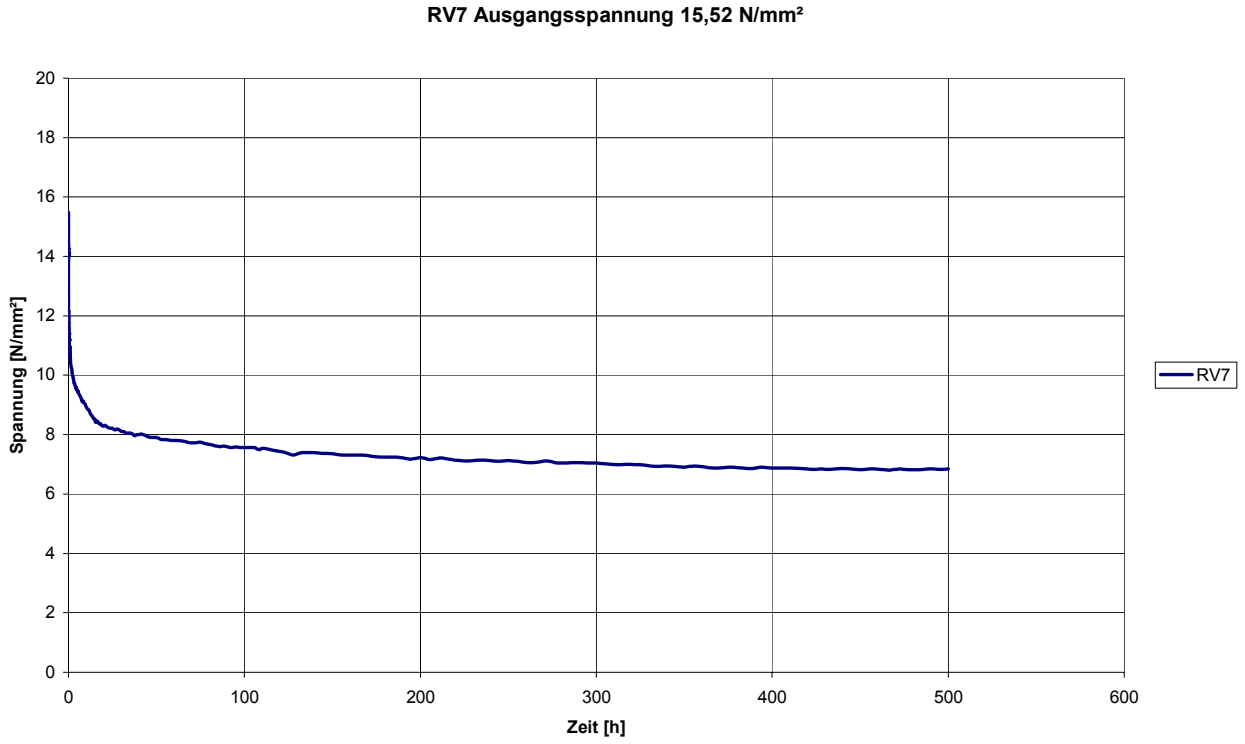


Bild 132: Relaxationsversuch RV7 zeitabhängiger Spannungsverlauf

Der Spannungsabfall verläuft am Anfang sehr schnell, sodass schon nach 36 Stunden knapp 90 % des Relaxationsprozesses abgeschlossen ist. Wie man an Versuch RV1 und RV2 sehen kann, hat die Spannung bei diesem Versuch ihren Endwert spätestens nach etwa 20 Tagen erreicht, was 480 Stunden entspricht.

4.4.2.2 Endwert des Relaxationsprozesses

Für die Berechnung eines Relaxationsverlaufes benötigt man das Relaxationsmodul G(t). Die Ermittlung eines allgemeingültigen Relaxationsmoduls für jeden Zeitpunkt und jede Ausgangsspannung wird deshalb nicht gelingen, weil in den Versuchen die Voraussetzung der kleinen Verformungen verlassen wurde und somit kein linear visko -elastisches Verhalten mehr angenommen werden kann. Die wesentliche Information der Versuche liegt aber in der Endspannung $\sigma(t=\infty)$. Um für diesen Wert ein geeignetes Relaxationsmodul G_∞ zu finden, wurde die folgende Graphik erstellt.
Sie stellt die Ausgangsspannung σ_0 zum Zeitpunkt t=0 dar, die gemessenen Endspannungen der Relaxationsversuche als grüne Punkte und eine türkisfarbene Kurve als Näherung für die Ermittlung der Spannung für t = unendlich.

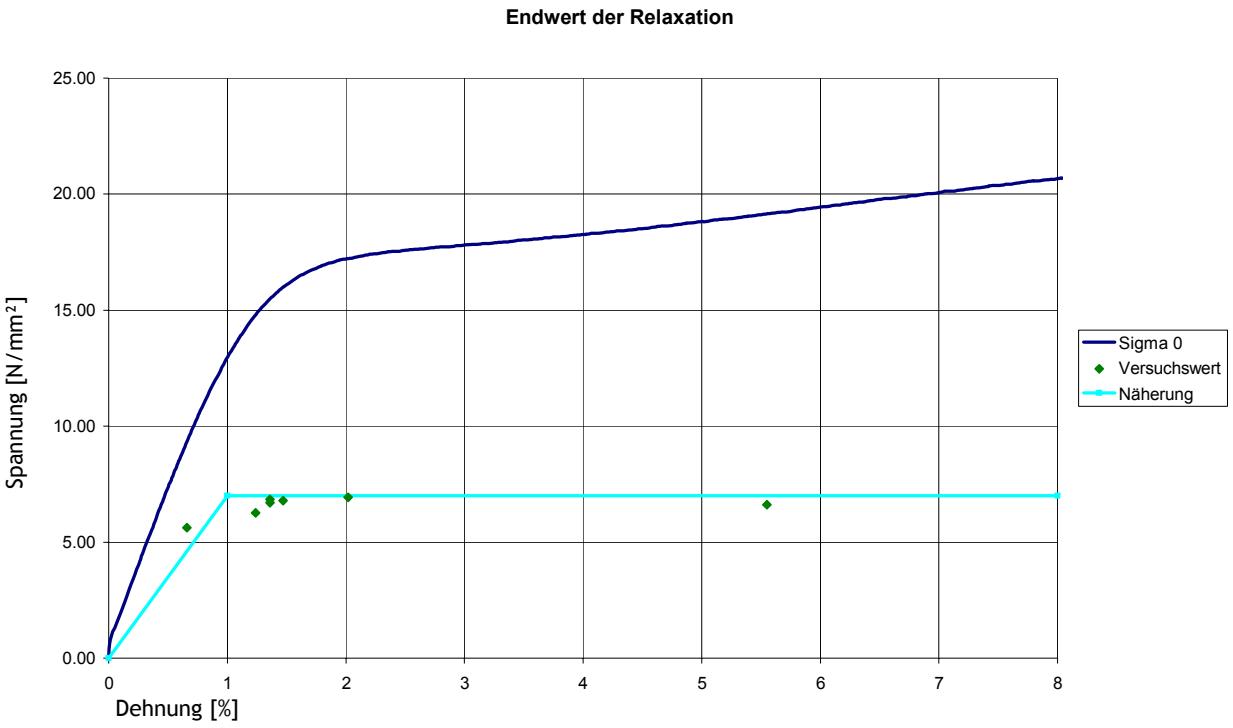


Bild 133: Spannungs- Dehnungsverlauf bei t=0 und t=unendlich

Für die Annahme linear visko – elastischem Materialverhaltens und kleiner Verformungen gilt (Bereich <1% Dehnung):

$$\sigma(\varepsilon_0, t) = \varepsilon_0 \cdot G(t)$$

[Schw90]

Mit

G(t) Relaxationsmodul

Daraus folgt für den Endwert der Relaxation:

$$\sigma(\varepsilon_0, t = \infty) = \varepsilon_0 \cdot G(t = \infty)$$

Oder anders geschrieben:

$$\sigma_\infty(\varepsilon_0) = \varepsilon_0 \cdot G_\infty$$

Das Relaxationsmodul im linear visko-elastischen Bereich, unterhalb von 1,0% Dehnung, liegt bei etwa G_∞=700 N/mm². Es gilt also die Gleichung:

$$\sigma_\infty(\varepsilon < 1\%) = \varepsilon_0 \cdot 700 \frac{N}{mm^2}$$

Oberhalb dieser Grenze gilt die Gleichung:

$$\sigma_\infty(\varepsilon > 1\%) = 7{,}00 \frac{N}{mm^2}$$

Eine Langzeitbelastung oberhalb von 7N/mm² muss in einem Tragwerk, das ohne eine Nachspannmöglichkeit konstruiert wird, unbedingt ausgeschlossen werden.

4.4.3 Bolzmannsche Superpositionsprinzip

Ein sehr wichtiger Hinweis für die Bewertung von Relaxations- und Kriechverhalten sei hier noch gegeben. Bereits 1874 wurde von Bolzmann das Prinzip der Superposition beim visko-elastischen Verhalten erkannt. Dieses Prinzip sagt aus, dass sich dauerhafte Verformungen infolge von Belastungen addieren. Etwas anders formuliert heißt das: Eine Belastung, die immer mal wieder für ein kurzes Zeitintervall auftritt, verursacht die gleiche Verformung, wie eine gleich große Belastung, die nur einmal genau so lange wie die Summe der kurzen Zeitintervalle auftritt. Als Gleichung kann man schreiben:

$$\left.\begin{array}{l}\sigma_1(t) \rightarrow \varepsilon_1(t) \\ \sigma_2(t) \rightarrow \varepsilon_2(t)\end{array}\right\} \Leftrightarrow \sigma_1(t) + \sigma_2(t) \rightarrow \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$$

[Schw90]

Für die Praxis bedeutet dies: Eine Windlast von beispielsweise 2 Beaufort, die insgesamt 500 Stunden aufgetreten ist, ist als Dauerlast zu bewerten. Dies gilt unabhängig davon, wie oft der Wind auftreten musste, um diese Gesamtdauer zu erreichen und wie lang die Windpausen waren.

4.5 Biaxiale Zugversuche

Die biaxiale Materialprüfung ist ein unverzichtbares Mittel, um den späteren Spannungszustand im Bauwerk realistisch einschätzen zu können. Die einaxiale Prüfung kann über wichtige Daten wie beispielsweise die Querdehnzahl keine Aussage treffen. Aber auch der Spannungs-Dehnungsverlauf in einer biaxialen Probe wird sich von dem einer einaxial belasteten Probe unterscheiden, da es bei einaxial belasteten Proben zunächst zu einer Ausrichtung der Makromoleküle in Lastrichtung kommt, was bei der biaxialen Belastung zwar auch stattfinden wird, wahrscheinlich aber nicht im gleichen Maß.
Biaxiale Prüfverfahren gibt es schon seit langem. Da schon seit langem in der Luftfahrt, im Speziellen in Heißluftballons und Luftschiffen, das Leben der Insassen an beschichteten Geweben hängt, die biaxial belastet werden, ist es nicht verwunderlich, dass es schon zu Anfang des 20 Jahrhunderts biaxiale Prüfverfahren gab.

4.5.1 Prüfverfahren

4.5.1.1 Berstversuch

Bei dem Berstversuch wird die Materialprobe auf eine glatte Oberfläche mit einem Ring gepresst. Dann wird zwischen die glatte Oberfläche und den Probekörper Luft oder Wasser gepumpt und so zu einer Kugelkalotte verformt. In Abhängigkeit von Innendruck und Wölbung können so Materialkennwerte ermittelt werden. In der DIN 53 861 ist dieser Versuch inklusive Auswertungstabellen geregelt. Der Versuch ist in mancherlei Hinsicht problematisch:

- Er setzt isotropes Materialverhalten voraus.
- Er gilt nur im linearen Spannungs- Dehnungsbereich.
- Das Verhältnis der Hauptspannungen ist durch die Geometrie festgelegt und nicht variabel.
- Durch die starke Verformung verzerren sich die ursprünglich rechtwinklig zueinander stehenden Richtungen.

Die in der Norm vorgegebenen Flächen der Probekörper sind mit 10, 50 und 100 cm^2 recht klein und sollten für Membrane und Folien größer gewählt werden. Ungleiche Belastungen in den Hauptrichtungen können durch eine elliptische Grundfläche erreicht werden.

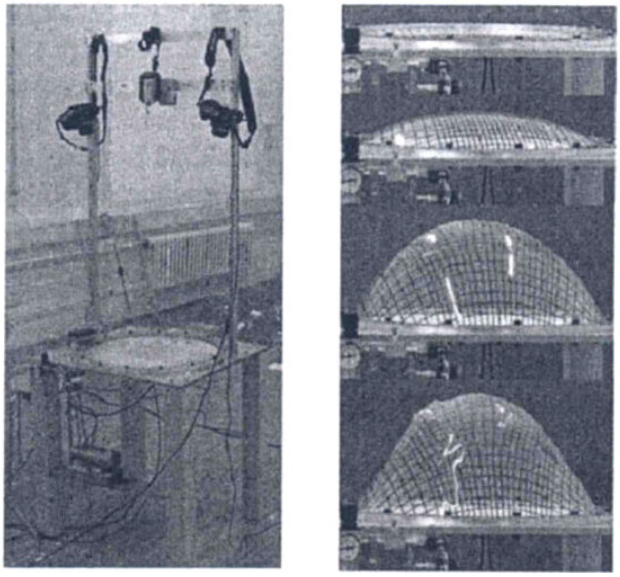


Bild 134: Berstversuch [Str07]

4.5.1.2 Zylinderversuch

Bei diesem Versuch wird ein Zylinder aus dem zu testenden Material hergestellt. An diesem Zylinder kann dann über die Stirnflächen eine Längskraft und über einen Innendruck eine Ringspannung aufgebracht werden. Diese beiden Kräfte können nahezu unabhängig voneinander geregelt werden. Der Versuch birgt die Schwierigkeit des Herstellens eines geeigneten Probekörpers mit sich. Zum Herstellen einer zylindrischen Form muss das Material verschweißt werden, was die Aussagekraft der Messergebnisse erheblich beeinträchtigt.

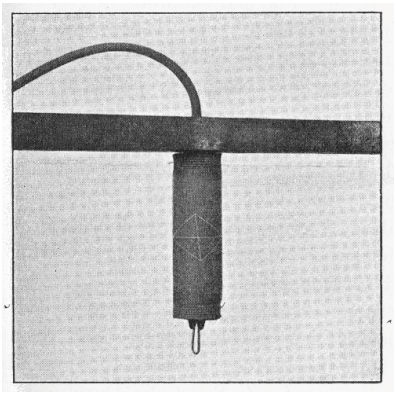


Bild 135: Biaxialer Zugversuch mit zylindrischem Probekörper [Haa13]

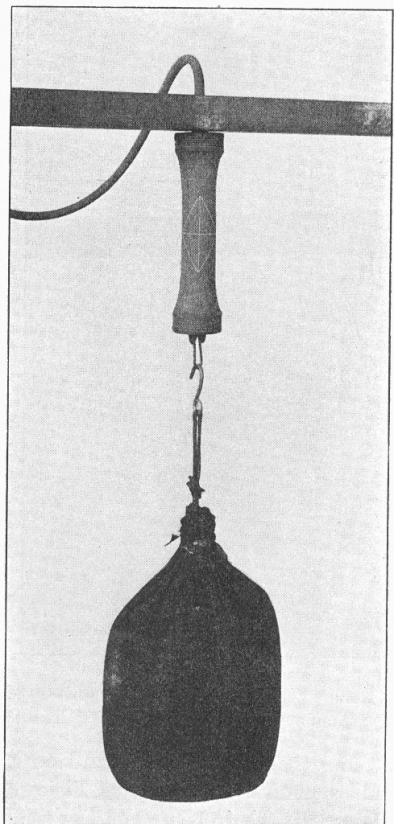


Bild 136: Biaxialer Zugversuch mit zylindrischem Probekörper unter Last [Haa13]

4.5.1.3 Ebener Versuch

Der ebene Zugversuch simuliert am besten den Spannungszustand im späteren Bauwerk. Der Probekörper kann ohne Schweißnaht im Prüffeld in zwei Richtungen unabhängig voneinander gezogen werden. Die Bedingung für eine gute Prüfung ist die konstante Spannung über die gesamte Breite des Probekörpers. Hierfür sind bei einer Prüfmaschine zwei Dinge zu beachten:

- Laschen am Rand des Prüffeldes zum Angreifen der Klemmbacken schnüren sich bei zunehmender Verformung ein und konzentrieren somit die Kraft im mittleren Bereich

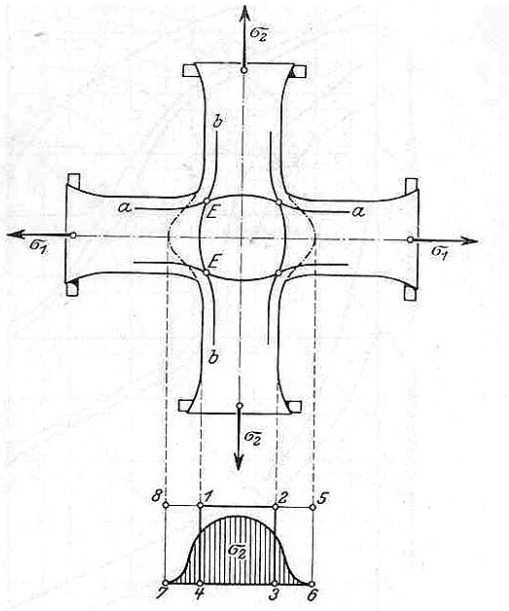


Bild 137: Biaxialer Zugversuch mit zylindrischem Probekörper unter Last [Haa13]

- Wenn nur eine der beiden Klemmseiten pro Richtung die Verformung aufbringt, steht die Kraft nie senkrecht zur Probe

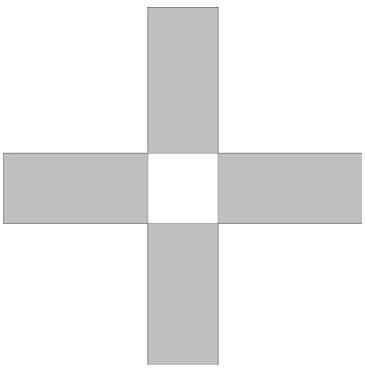


Bild 138: Probekörper von ebenen biaxialen Zugersuch in Ausgangsposition

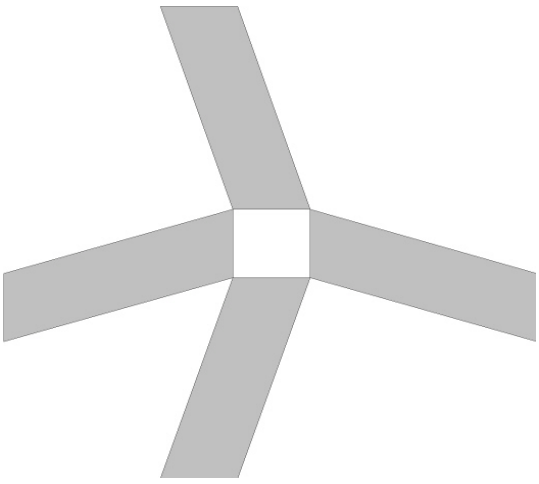


Bild 139: Probekörper von ebenen biaxialen Zugversuch im verformten Zustand, wenn in jeder Zugrichtung nur jeweils eine Klemme fahrbar ist

4.5.2 Prüfmaschinen

4.5.2.1 Königliche Technische Hochschule zu Berlin

Am 26. Oktober 1912 wurde von Dipl.-Ing. Rudolf Haas eine Dissertation vorgelegt, in der biaxiale Versuche an Membranen dokumentiert sind.
Im Rahmen dieser Arbeit wurden Versuchanordnungen verwendet, die heute wohl nicht mehr Anwendung finden.

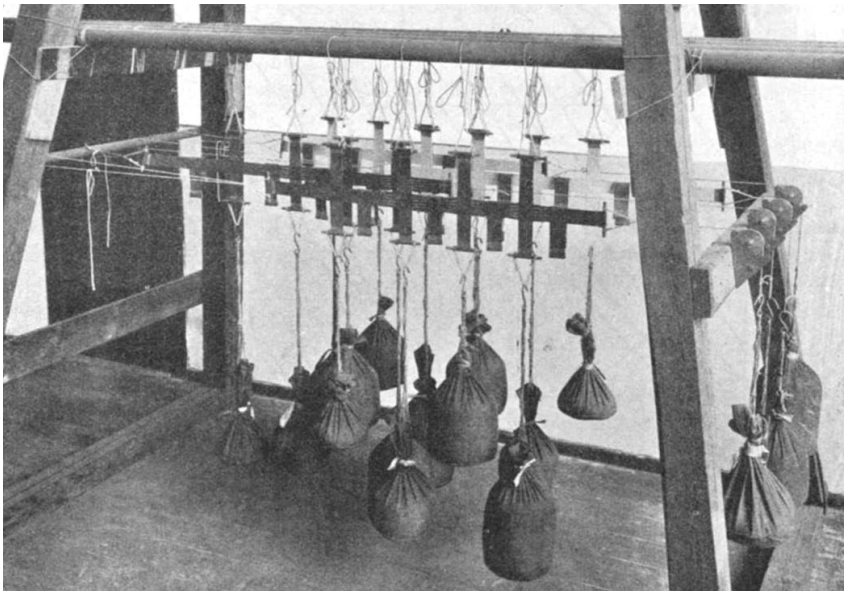


Bild 140: Biaxiale Prüfmaschine von Dipl.-Ing. Rudolf Haas an der Königlichen Technischen Hochschule zu Berlin [Haa13]

Haas arbeitete aber auch schon mit Versuchaufbauten, die den heutigen, mal abgesehen von Messtechnik und Kraftaufbringung, recht ähnlich sind. Das Einschnüren der Laschen am Rand hat er mit Hilfsspannern behindert. Die Kraft bringt er nur an zwei Seiten auf, was bei kleinen Wegen zu noch kleinen Fehlern führt.

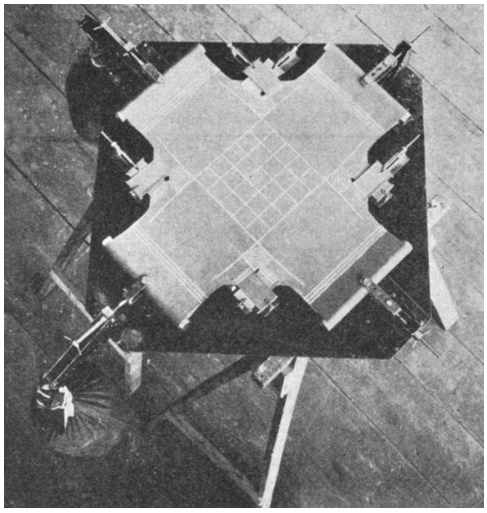


Bild 141: Ebener biaxialer Probekörper mit Hilfsspannern [Haa13]

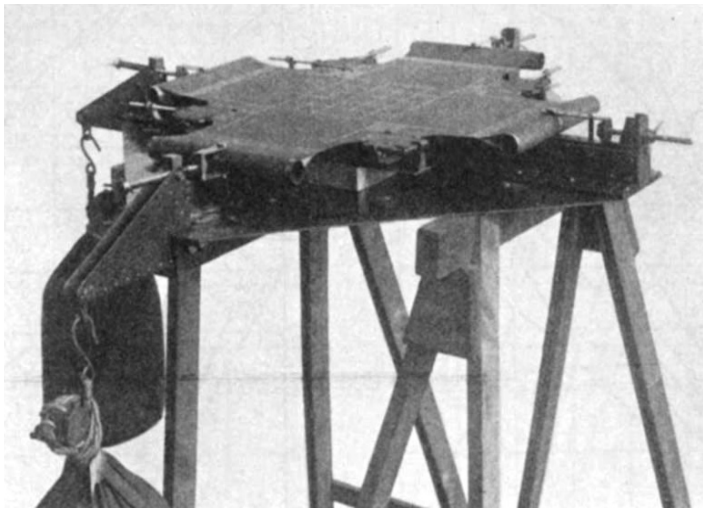


Bild 142: Ebener biaxialer Versuchsaufbau mit Hilfsspannern [Haa13]

4.5.2.2 Laboratorium Blum

Das Laboratorium Blum verwendet eine Prüfmaschine, bei der an allen vier Seiten eine Verformung aufgebracht wird. An jeder Seite wird der Rand in sieben Streifen unterteilt, an denen jeweils ein Hydraulikzylinder angreift. An allen sieben Klemmen pro Seite ist eine Kraftmessdose angebracht und jeder der Hydraulikzylinder kann mit Hilfe von Servomotoren so verschoben werden, dass die Kraft immer senkrecht zur Probe aufgebracht wird. In der Mitte der Probe werden die Wegaufnehmer angebracht.
Die Maschine gewährleistet also stets eine senkrechte Krafteinleitung jeder einzelnen Lasche. Die Einschnürung der Laschen wird durch die Einteilung in sieben kleine Laschen pro Seite minimiert.

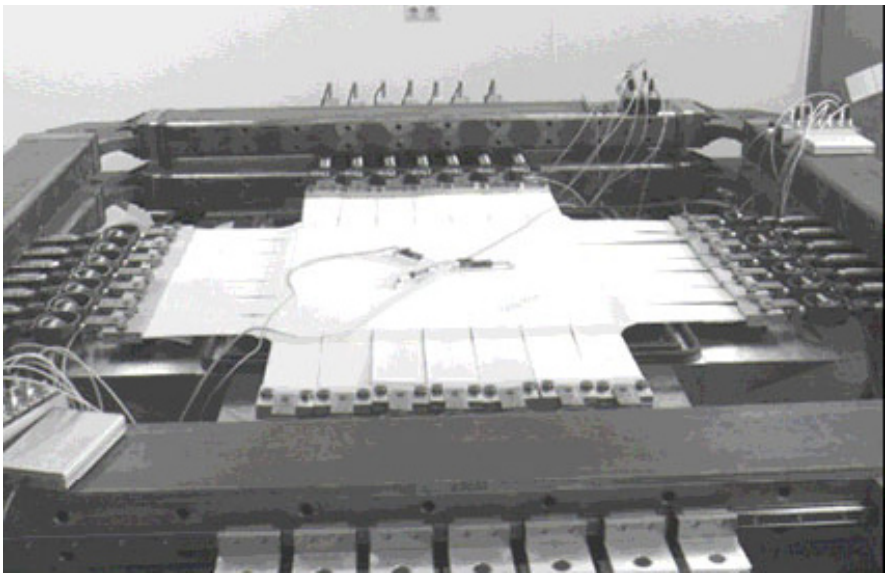


Bild 143: Biaxiale Prüfmaschine von Laboratorium Blum [Tex06]

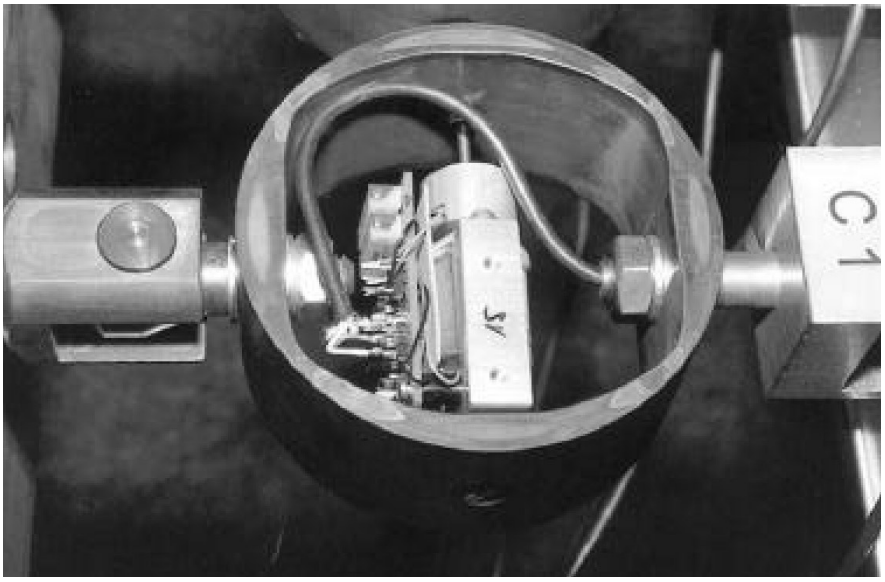


Bild 144: Kraftmessung an der biaxialen Prüfmaschine von Laboratorium Blum [Bög04]

4.5.2.3 Universität Duisburg Essen

Die Prüfmaschine der Universität Duisburg Essen vom Fachbereich Bauwissenschaften Lehrstuhl Konstruktives Gestalten / Leichtbau löst das Problem der Einschnürung an den Zuglaschen durch Schlitze in den Laschen. Die Maschine kann kraft- oder weggesteuert prüfen. Die Dehnwege werden in der Mitte des Probekörpers gemessen.

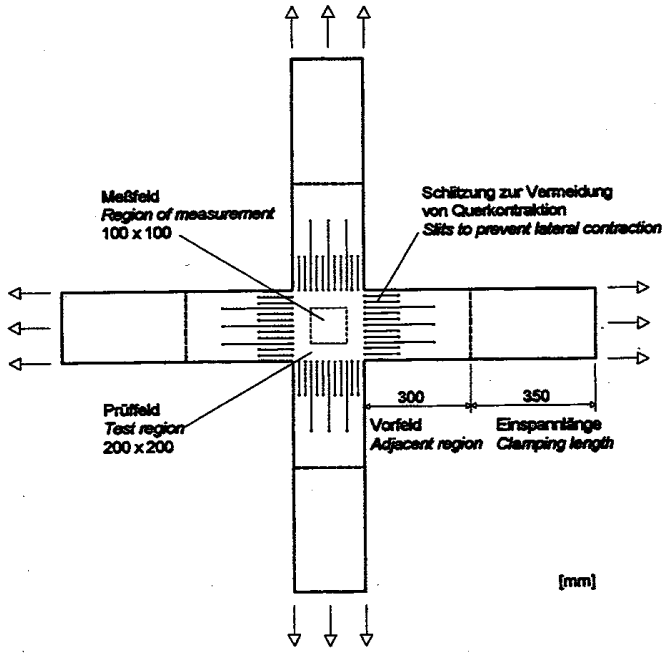


Bild 145: Probekörper der biaxialen Zugmaschine Universität Duisburg Essen

Die Schlitze können die Einschnürungen gleichmäßig verteilen , können aber nicht verhindern, dass bei größeren Dehnungen die äußeren Bereiche der Laschen stärker gedehnt werden und somit stärker unter Spannung stehen als die Inneren.

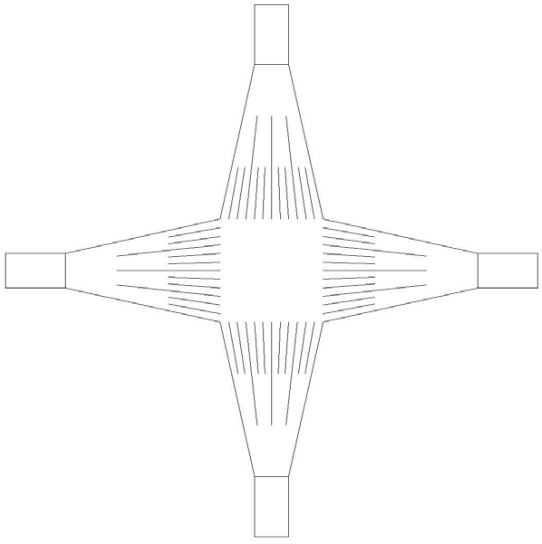


Bild 146: Probekörper der biaxialen Zugmaschine Universität Duisburg Essen im verformten Zustand

4.5.2.4 University of Newcastle

Bei dieser Versuchseinrichtung wird der Probekörper an den Rändern geschlitzt. Der Dehnweg wird nur an zwei Seiten der Probe aufgebracht. Der obere Rahmen ist so gelagert, dass die Probe immer orthogonal belastet wird. Er ist also zweiachsig verfahrbar. Die Verformung wird optisch gemessen.

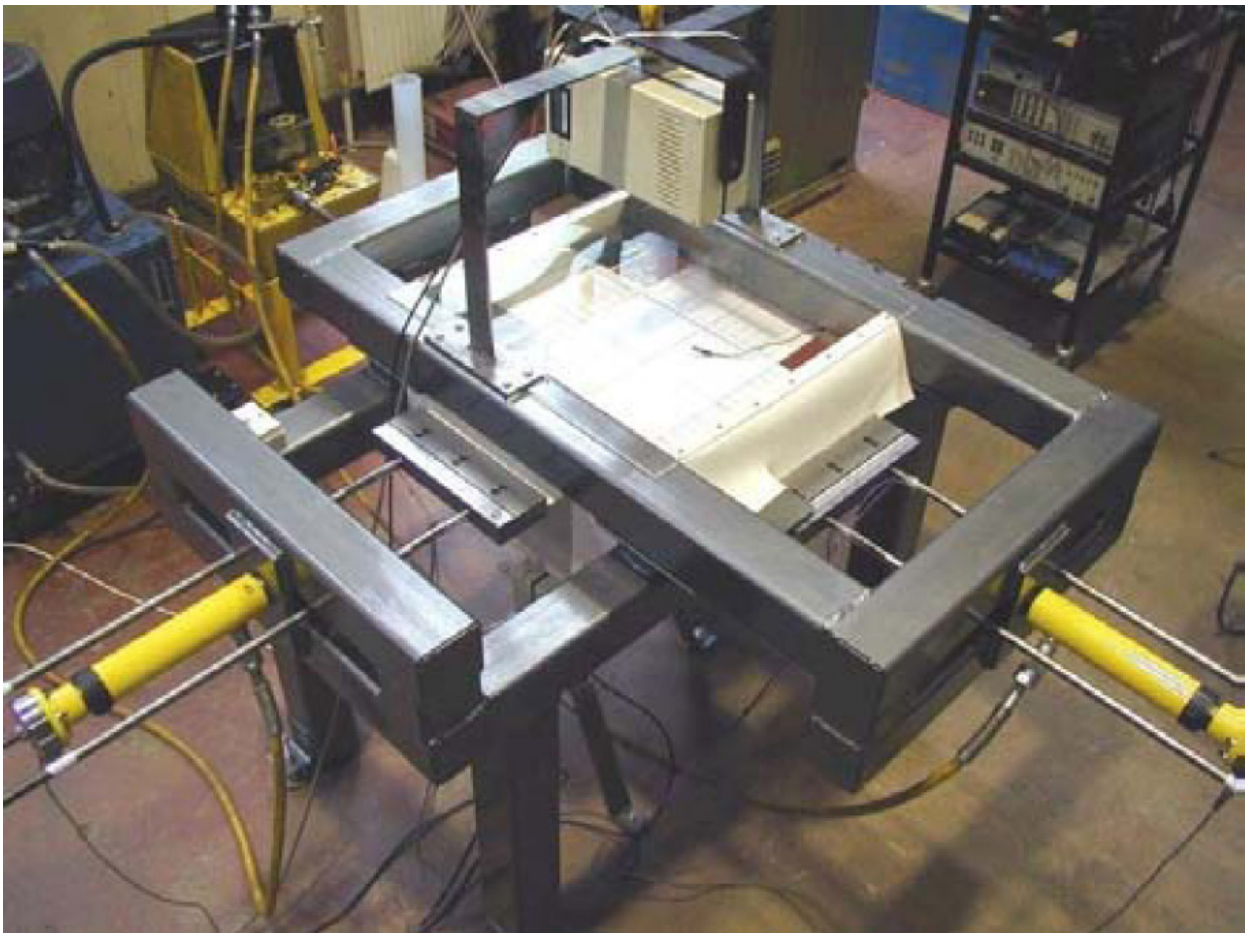


Bild 147: Biaxiale Zugmaschine der University of Newcastle [Bri04]

4.5.2.5 Brueckner Karo IV

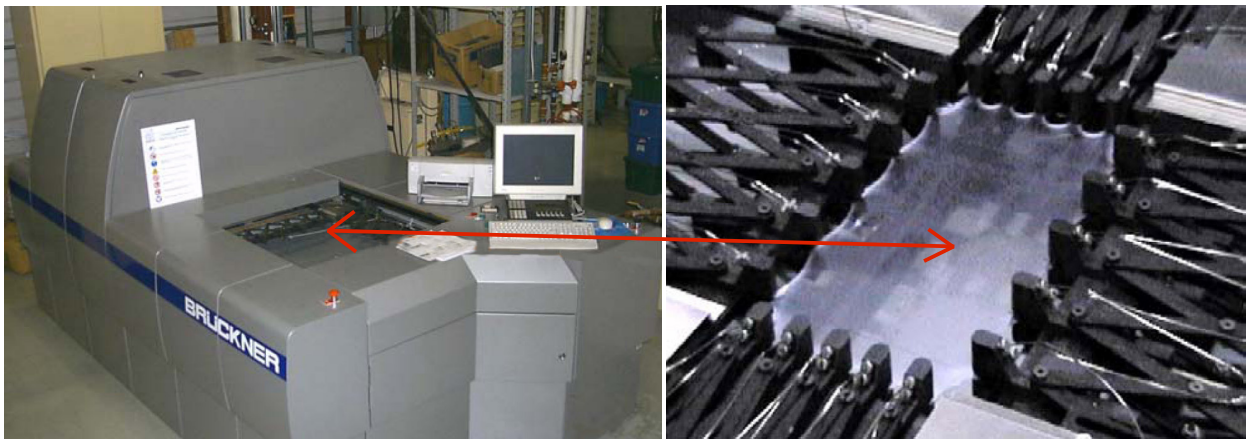


Bild 148: Biaxiale Zugmaschine der Firma Brückner mit Prüffeldansicht [NRC07]

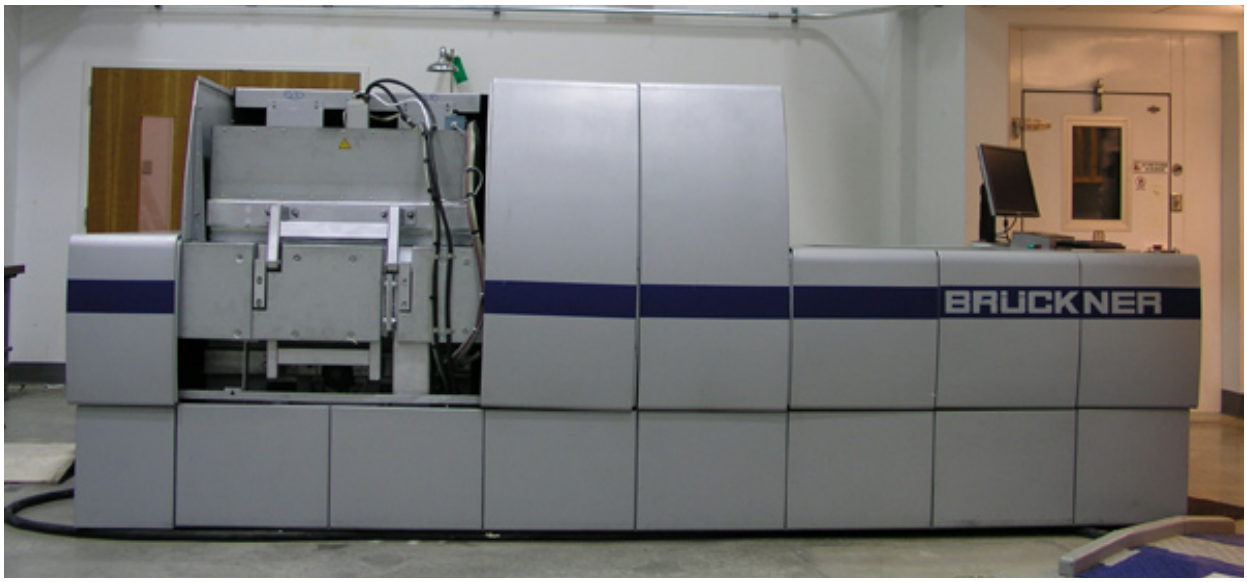


Bild 149: Biaxiale Zugmaschine der Firma Brückner Seitenansicht [Cap07]

Die Maschine der Firma Brückner arbeitet mit einem Scherenmechanismus. Wird die Probe in einer Richtung gezogen, wird der Scherenmechanismus der anderen Richtung automatisch auseinandergezogen, sodass es zu keiner Behinderung der Dehnung kommt. Die Probengröße ist auf 130mmx130mm begrenzt und die maximale Last liegt bei 2kN pro Achse. Eine Temperierung der Probe ist möglich, was gerade im Folienbau ein wichtiger Faktor für Materialwerte ist.

4.5.2.6 Weitere Testmaschinen

An der Technischen Universität Delft wurde folgender Versuchsaufbau gewählt. Der Beschreibung nach funktioniert der Versuchsaufbau nach dem gleichen Prinzip, wie der der Universität Newcastle.

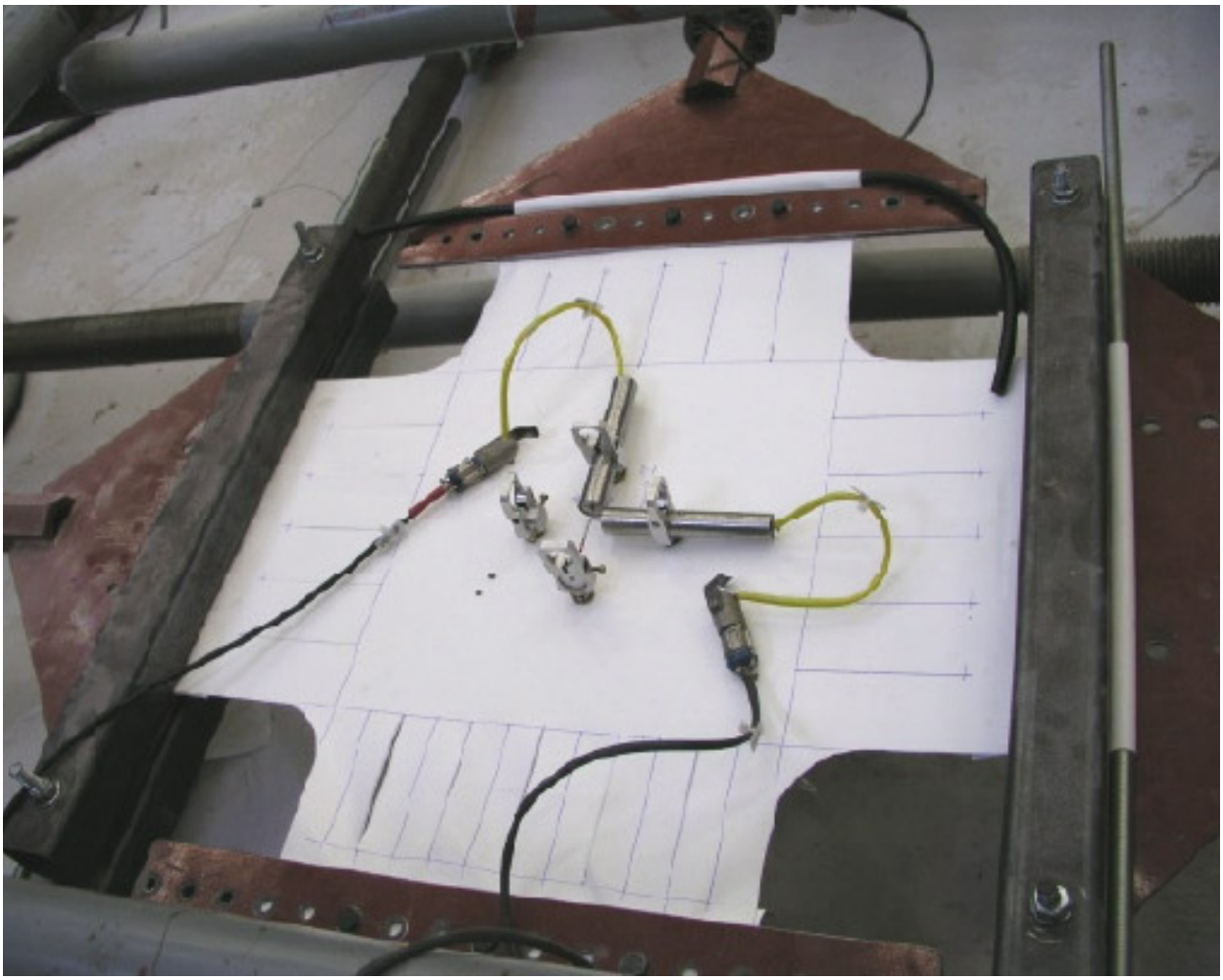


Bild 150: Biaxiale Zugmaschine der Universität Delft [TUD07]

Die beiden unten abgebildeten Prüfmaschinen wurden anlässlich der jährlichen Konferenz “Textile Roofs 2001“ präsentiert.

Bild 151: Biaxiale Zugmaschine von Dr.-Ing. Trompette [Tex01]

Bild 152: Biaxiale Zugmaschine von L. S. Rasch und Bradatsch [Tex01]

4.5.3 Bau einer biaxialen Prüfmaschine an der TU-Berlin

4.5.3.1 Analyse mögliche Probekörper

Folien und Membranwerkstoffe können extrem unterschiedliche Spannungs-Dehnungsverhalten aufweisen. Deshalb muss zunächst ermittelt werden, welche Kräfte die Maschine aufbringen können muss und welche Dehnungen zu erwarten sind. Alle Angaben in der folgenden Aufzählung sind in kN/m.

Material	Bruchlasten [kN/m]
• Baumwollgewebe	34,0/20,0
• PTFE-Gewebe	
• Flächengewicht 300 g/m²	47,8/44,2
• Flächengewicht 520 g/m²	65,8/67,4
• Flächengewicht 710 g/m²	89,4/90,2
• PES-Gewebe PVC-beschichtet	
• Typ I	60,0/60,0
• Typ II	88,0/79,0
• Typ III	115,0/102,0
• Typ IV	149,0/128,0
• Typ V	196,0/166,0
• Glasfasergewebe PTFE-beschichtet	
• Flächengewicht 800 g/m²	70,0/70,0
• Flächengewicht 1150 g/m²	116,0/116,0
• Flächengewicht 1550 g/m²	150,0/150,0
• Glasfasergewebe Silikon-beschichtet	
• Flächengewicht 800 g/m²	70,0/70,0
• Flächengewicht 1270 g/m²	132,0/132,0
• Aramidfasergewebe PVC-beschichtet	
• Flächengewicht 900 g/m²	140,0/180,0
• Flächengewicht 2020 g/m²	490,0/490,0
• ETFE-Folie	
• 50 µm	2,8/2,8
• 80 µm	4,4/4,4
• 100 µm	5,5/5,5
• 150 µm	8,3/8,3
• 200 µm	11,0/11,0
• 250 µm	13,8/13,8

Bei einem 7,2 cm breiten Streifen entspricht das den Werten in kN von:

Material	Bruchlasten [kN]
• Baumwollgewebe	2,4/1,4
• PTFE-Gewebe	
• Flächengewicht 300 g/m²	3,4/3,2
• Flächengewicht 520 g/m²	4,7/4,9
• Flächengewicht 710 g/m²	6,4/6,5
• PES-Gewebe PVC-beschichtet	
• Typ I	4,3/4,3
• Typ II	6,3/5,7
• Typ III	8,3/7,3
• Typ IV	10,7/9,2
• Typ V	14,1/12,0
• Glasfasergewebe PTFE-beschichtet	
• Flächengewicht 800 g/m²	5,0/5,0
• Flächengewicht 1150 g/m²	8,4/8,4
• Flächengewicht 1550 g/m²	10,8/10,8
• Glasfasergewebe Silikon-beschichtet	
• Flächengewicht 800 g/m²	5,0/5,0
• Flächengewicht 1270 g/m²	9,5/9,5
• Aramidfasergewebe PVC-beschichtet	
• Flächengewicht 900 g/m²	10,1/13,0
• Flächengewicht 2020 g/m²	35,3/35,3
• ETFE-Folie	
• 50 µm	0,2/0,2
• 80 µm	0,3/0,3
• 100 µm	0,4/0,4
• 150 µm	0,6/0,6
• 200 µm	0,8/0,8
• 250 µm	1,0/1,0

4.5.3.2 Konstruktion der biaxialen Zugmaschine

Die Konstruktion besteht aus einem Stahlgestell auf dem vier elektrisch fahrbare Schlitten montiert sind. An diese Schlitten wird die Klemmkonstruktion montiert. Die Schlitten werden von Servomotoren geführt. Diese Maschine war schon vorhanden und wurde deshalb auch nicht weiter modifiziert. Die Klemmkonstruktion wurde neu für die Anwendung konstruiert. Sie besteht aus einem Teil, das an den Schlitten angeschraubt wird und mit einer Führungsschiene versehen ist (im Rendering grün dargestellt), an der sechs Klemmbacken montiert werden. Diese Backen können sich orthogonal zur Zugrichtung frei verschieben. Das verhindert eine Behinderung der Querdehnung an der Einspannstelle. Jeder dieser beweglichen Klemmbacken hat eine Breite von 12 mm, bei sechs Klemmbacken ergibt sich eine Einspannbreite von 72 mm. Dies ist gleichzeitig die Breite des Prüffeldes, das direkt an der Einspannung beginnt. Die Messung des Weges kann somit unmittelbar am elektrisch fahrbaren Schlitten vorgenommen werden.

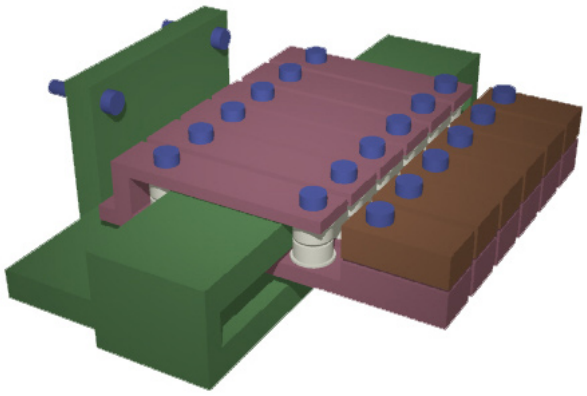


Bild 153: Klemmkonstruktion der biaxialen Zugmaschine der TU-Berlin

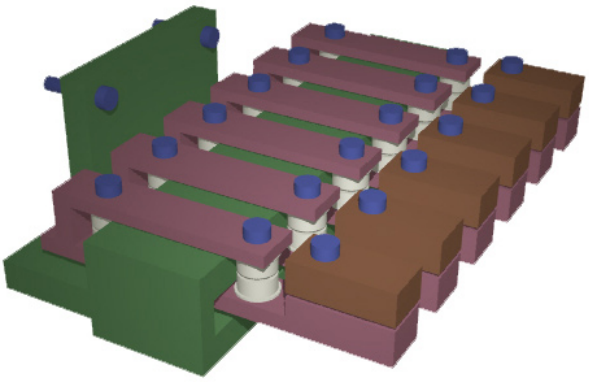


Bild 154: Klemmvorrichtung der biaxialen Zugmaschine der TU-Berlin mit auseinandergezogenen Klemmbacken

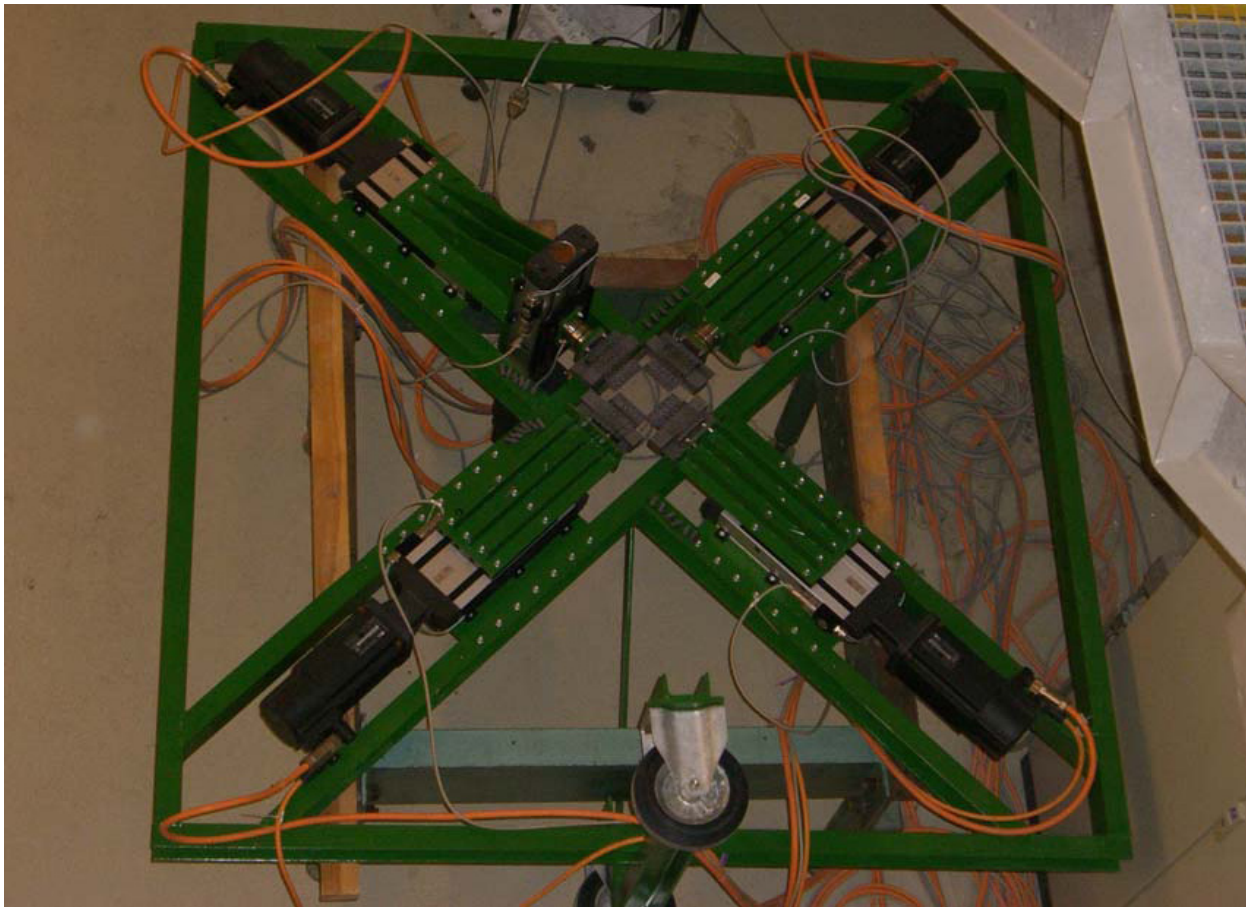


Bild 155: Biaxiale Zugmaschine der TU-Berlin

Vier Servomotoren liegen sich kreuzweise gegenüber. Jeder dieser Servomotoren steuert einen Führungsschlitten, an dessen Ende die Klemmvorrichtung montiert ist. Jeder dieser Motoren kann eine maximale Last von 1kN aufbringen. Für den Versuch wird der Versuchsrahmen auf ein Untergestell gelegt. Die Räder sind lediglich für Transportzwecke angebracht.

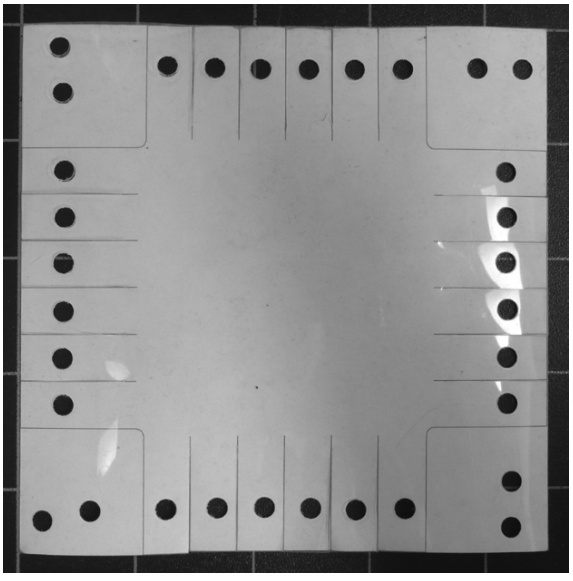


Bild 156: Probekörper für die biaxiale Zugmaschine der TU-Berlin

Die Folie wird zwischen den Klemmbacken eingeschlitzt. Durch die Löcher wird die Schraube gesteckt, die die Klemmbacke zusammenpresst. Die Folie wird ausschließlich über die Pressung gehalten und nicht über Lochleibungskräfte. Die überschüssige Folie in den Ecken wird nicht entfernt, um ein Einreißen in den Ecken zu vermeiden. Das überschüssige Material beeinflusst den Versuch aber nicht, da es völlig unbelastet bleibt, somit sind auch die Löcher in den Ecken unerheblich, die aus dem Herstellungsprozess der notwendigen Lochungen an den Klemmbacken resultieren.

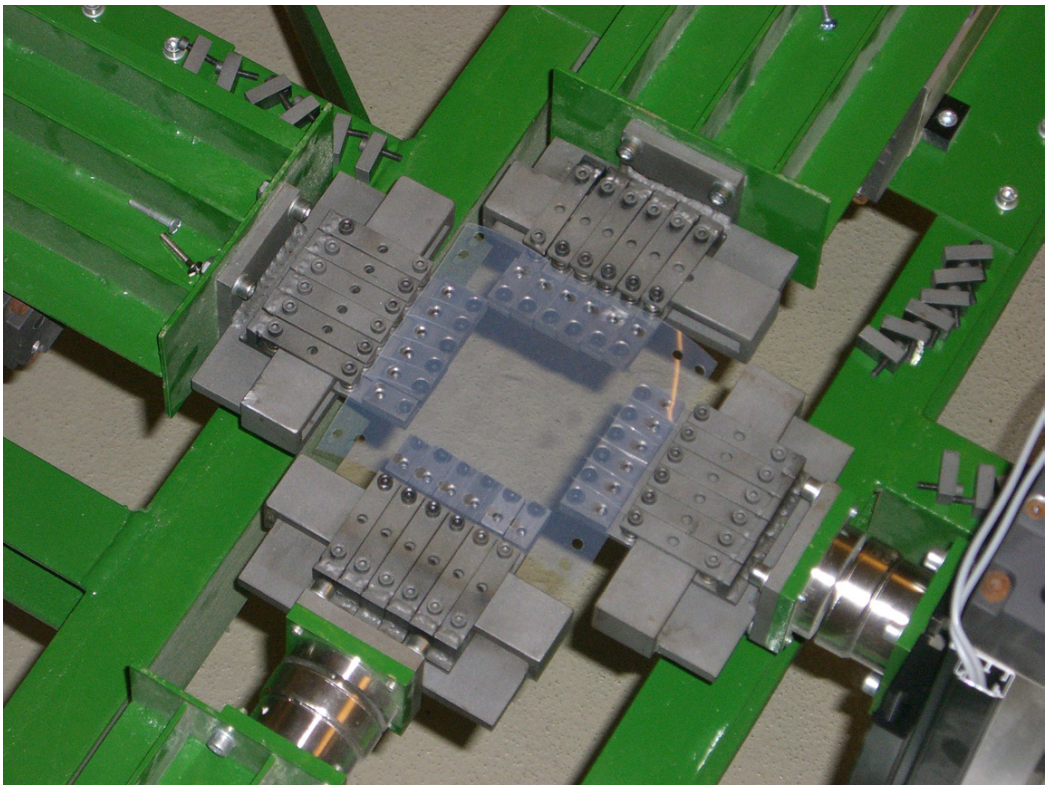


Bild 157: Biaxiale Zugmaschine mit Probekörper noch nicht fixiert

Die Folie wird auf die untere Hälfte der Klemmbacken aufgelegt. Dann wird die obere Hälfte der Klemmbacke aufgeschraubt.

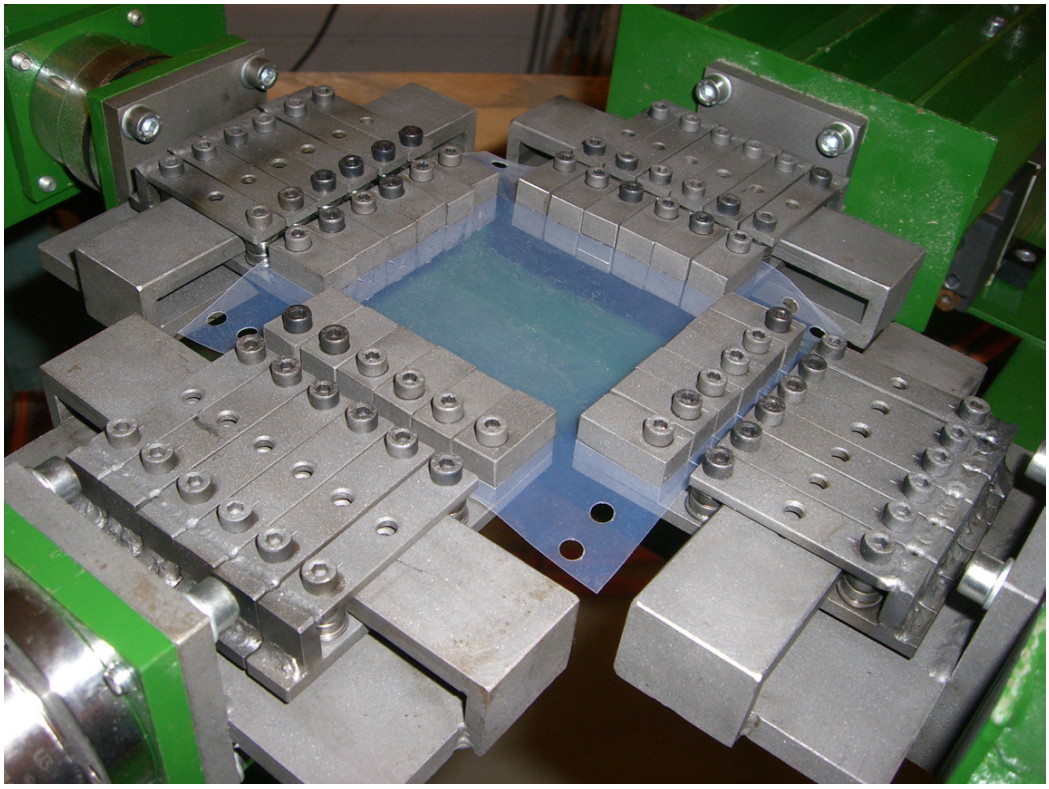


Bild 158: Biaxiale Zugmaschine mit eingespanntem Probekörper

Bild 159: Biaxiale Zugmaschine mit Probekörper in gedehntem Zustand

Während des Versuchs werden die Klemmbacken auseinandergezogen und behindern somit nicht die Querdehnung.

4.5.4 Materialwertberechnung mit Hilfe von Biaxialversuchen

Mit Hilfe des biaxialen Zugversuchs sollen wichtige Materialwerte wie die Querdehnzahl und die E-Moduln ermittelt werden. Hierfür werden zunächst die mechanischen Grundlagen geklärt.

Für einen biaxialen Spannungszustand einer Folie gilt:

$$\begin{bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{12}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}E_{1111} & E_{1122} & 0\\ E_{2211} & E_{2222} & 0\\ 0 & 0 & E_{1212}\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \gamma_{12}\end{bmatrix}$$

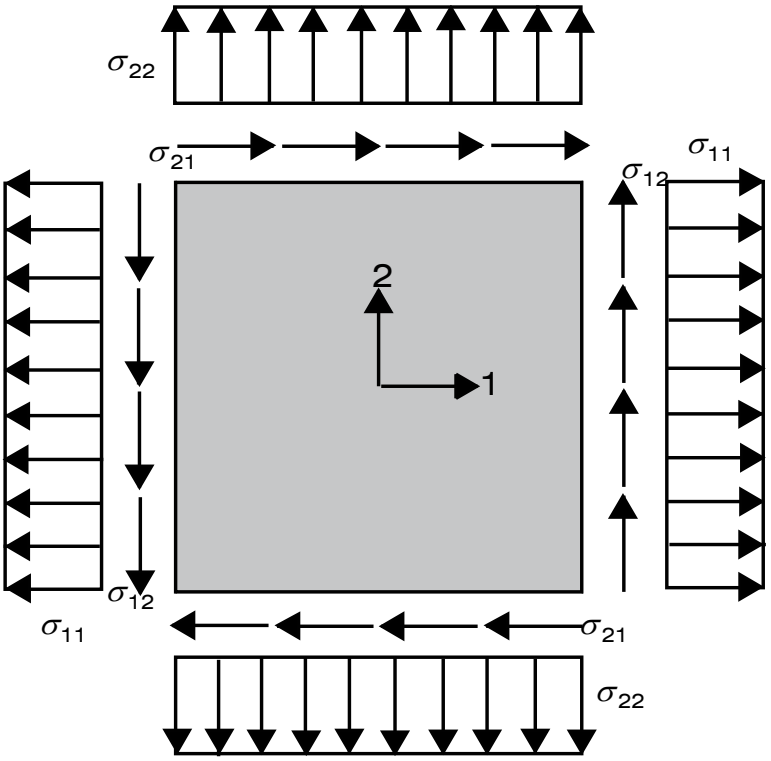


Bild 160: Spannungen am Flächenelement

In biaxialen Tests wird die Probe nur normal zu ihren Rändern belastet. Dadurch wird σ_{12}=0 und die Matrix vereinfacht sich zu:

$$\begin{bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}E_{1111} & E_{1122}\\ E_{2211} & E_{2222}\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\end{bmatrix}$$

Als Gleichung geschrieben folgt daraus:

$$\sigma_{11} = E_{1111} \cdot \varepsilon_{11} + E_{1122} \cdot \varepsilon_{22} = E_{1111} \cdot \left(\varepsilon_{11} + \nu_{12} \cdot \varepsilon_{22}\right)$$
$$\sigma_{22} = E_{2211} \cdot \varepsilon_{11} + E_{2222} \cdot \varepsilon_{22} = E_{2222} \cdot \left(\nu_{21} \cdot \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}\right)$$

wobei υ die Querdehnzahl ist. Für die Querdehnzahl gilt:

$$\nu_{12} = \frac{E_{1122}}{E_{1111}} \text{ und } \nu_{21} = \frac{E_{1122}}{E_{2222}}$$

Aufgrund der Symmetrie des Spannungstensors und des Verzerrungstensors folgt, dass auch der Elastizitätstensor symmetrisch bezüglich der Hauptdiagonalen sein muss [Man04]. Das bedeutet, dass $E_{1122} = E_{2211}$ ist. Es existieren in dem Gleichungssystem also noch drei Unbekannte E_{1111}, E_{2222} und E_{1122} aber nur zwei Gleichungen. Zur Lösung des Problems arbeitet man mit Differenzen $\Delta\sigma_{11}$, $\Delta\sigma_{22}$, $\Delta\varepsilon_{11}$ und $\Delta\varepsilon_{22}$. Der Versuchsablauf sieht dann wie folgt aus. Zunächst wird die Probe in beiden Richtungen mit einer geringen Vorspannung belastet. In einer Richtung wird dann eine zusätzliche Last $\Delta\sigma_{11}$ aufgebracht, während die andere Richtung konstant gehalten wird. Anschließend wird die Last in der anderen Richtung variiert. Zur Versuchauswertung dienen dann die Gleichungen:

Für den ersten Teil des Versuchs:

$$\Delta\sigma_{11} = E_{1111} \cdot \Delta\varepsilon_{11} + E_{1122} \cdot \Delta\varepsilon_{22}$$

$$0 = E_{1122} \cdot \Delta\varepsilon_{11} + E_{2222} \cdot \Delta\varepsilon_{22}$$

Für den zweiten Teil des Versuchs:

$$0 = E_{1111} \cdot \Delta\varepsilon_{11} + E_{1122} \cdot \Delta\varepsilon_{22}$$

$$\Delta\sigma_{22} = E_{1122} \cdot \Delta\varepsilon_{11} + E_{2222} \cdot \Delta\varepsilon_{22}$$

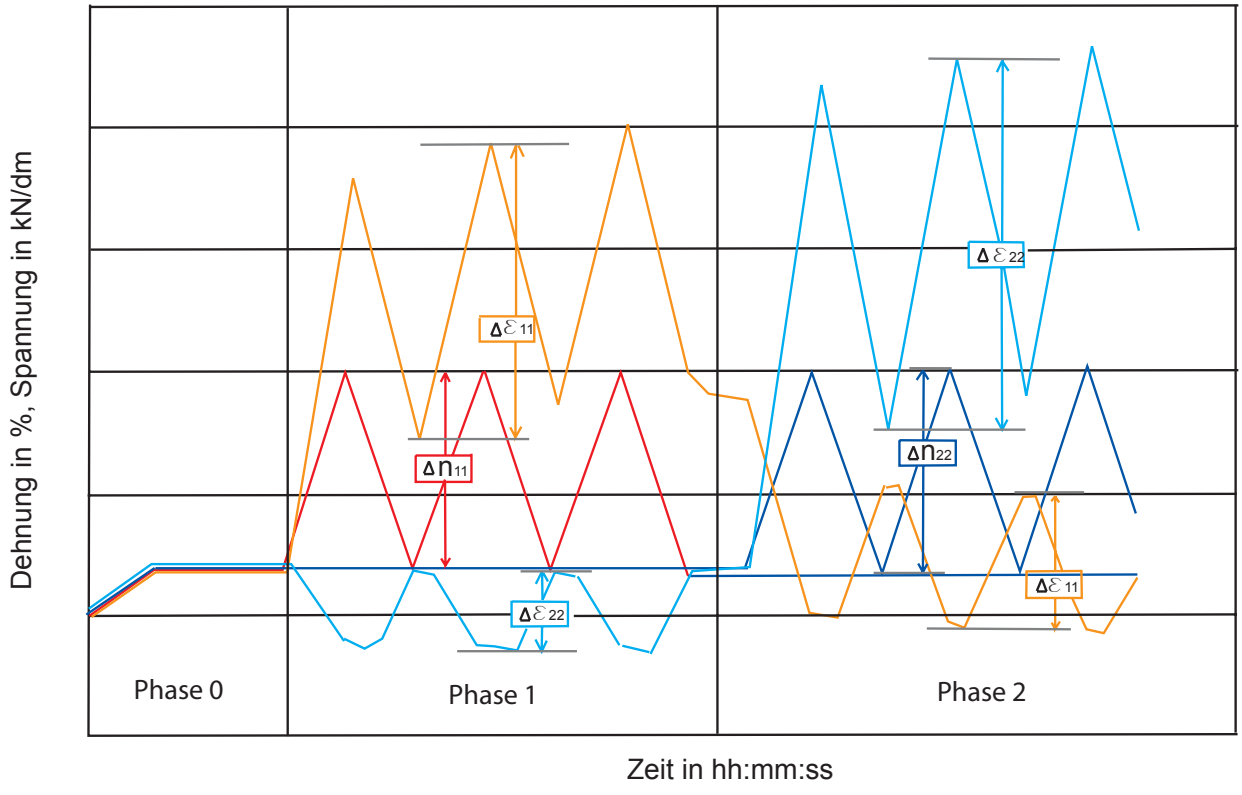


Bild 161: Spannungs- Dehnungsverlauf eines biaxialen Zugversuchs zur Ermittlung der Querdehnzahl [Eur04]

In der Graphik sieht man die Spannungen und Dehnungen während eines biaxialen Zugversuchs zur Ermittlung der Querdehnung.

Zuerst wird eine geringe Spannung in beiden Richtungen aufgebracht (Phase 0). Dann wird die Spannung $\Delta\sigma_{11}$ aufgebracht und die Spannung σ_{22} konstant gehalten (Phase 1). Um diese Spannungserhöhung in 1-Richtung zu erreichen, wird die Dehnung in 1-Richtung erhöht, was in der Graphik als $\Delta\varepsilon_{11}$ zu erkennen ist. Aufgrund der Querdehnung entsteht bei diesem Vorgang eine Dehnung in 2-Richtung. Damit die Spannung in 2-Richtung konstant bleibt, also $\Delta\sigma_{22}$=0, muss die Dehnung hier etwas reduziert werden, was in der Graphik als $\Delta\varepsilon_{22}$ zu erkennen ist. In Phase 2 des Versuchs wird die Spannung in 2-Richtung erhöht, was in der Graphik als $\Delta\sigma_{22}$ zu sehen ist und die Spannung σ_{11} konstant belassen. Hierfür wird eine Dehnung in 2-Richtung aufgebracht und in der Graphik als $\Delta\varepsilon_{22}$ gekennzeichnet, während die Dehnung in 1-Richtung wiederum etwas reduziert werden muss, damit die Dehnung aufgrund der Querdehnung nicht zu einer Spannungserhöhung führt.
Bei weggesteuerten Maschinen ergeben sich die Gleichungen:
Für den ersten Teil des Versuchs:

$$\Delta\sigma_{11} = E_{1111} \cdot \Delta\varepsilon_{11} + E_{1122} \cdot 0 = E_{1111} \cdot \Delta\varepsilon_{11}$$
$$\Delta\sigma_{22} = E_{1122} \cdot \Delta\varepsilon_{11} + E_{2222} \cdot 0 = E_{1122} \cdot \Delta\varepsilon_{11}$$

Für den zweiten Teil des Versuchs:

$$\Delta\sigma_{11} = E_{1111} \cdot 0 + E_{1122} \cdot \Delta\varepsilon_{22} = E_{1122} \cdot \Delta\varepsilon_{22}$$
$$\Delta\sigma_{22} = E_{1122} \cdot 0 + E_{2222} \cdot \Delta\varepsilon_{22} = E_{2222} \cdot \Delta\varepsilon_{22}$$

Mit Hilfe dieser Gleichungen ist es möglich alle Materialwerte zu berechnen.

Das Verhältnis von E_{1122} zu E_{1111}, bzw. E_{1122} zu E_{2222} wird als Querdehnzahl bezeichnet, bzw. auch als Poissonzahl, im Weiteren wird immer von der Querdehnzahl gesprochen. Die Querdehnzahl liegt bei isotropen Werkstoffen zwischen 0 und 0,5, wobei diese Grenzen Extremwerte darstellen. Der Wert 0 bedeutet, dass eine Zugbelastung keinen Einfluss auf die Querrichtung hat. Es gibt nur wenige Ausnahmen bei denen die Querdehnzahl einen negativen Wert annehmen kann. Das bedeutet, dass sich die Probe bei Zugbelastung nicht einschnürt, sondern breiter wird. Die Querdehnzahl 0,5 bedeutet, dass das Material absolut inkompressibel ist. Das Volumen bleibt also gleich, was zum Beispiel bei Gummi der Fall ist. Einen Wert größer als 0,5 kann es nicht geben, da das eine Volumenverkleinerung unter Zugbelastung, bzw. eine Volumenvergrößerung unter Druckbelastung, bedeuten würde. Dies ist aus energetischen Gründen unmöglich.

4.5.5 Biaxiale Zugversuche an der TU-Berlin

Es wurden zwei verschiedene Versuche gefahren. Der Erste entspricht dem im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Ablauf zur Bestimmung der E-Moduln und der Querdehnzahl. Die hier verwendete Maschine arbeitet ausschließlich weggesteuert. Es wird also eine kleine Vorspannung aufgebracht, dann wird in einer Richtung die Dehnung erhöht, während in der anderen Richtung die Dehnung unverändert bleibt.
Der zweite Versuchsablauf dient zur Bestimmung der E-Moduln nach mehrfacher Be- und

Entlastung. Dabei wird die Probe in beiden Richtungen gleichermaßen belastet und wieder entlastet. Dieser Zyklus wird mehrmals wiederholt, um Veränderungen des Spannungs-Dehnungsverlaufs bzw. der E-Moduln zu erkennen.

4.5.5.1 Versuch zur Bestimmung der E-Moduln und der Querdehnzahl

E-Moduln sind die Beschreibung der Geraden im Spannungs- Dehnungsverlauf bei kleinen Verformungen, also die Beschreibung des linear elastischen Bereichs. Die Versuche, die über diesen Bereich hinaus gehen, sind also zur Ermittlung der E-Moduln und Querdehnzahl ungeeignet und würden zu falschen Werten führen. Es ist deshalb genau darauf zu achten, dass nur kleine Dehnungen aufgebracht werden.
Da die hier verwendete Versuchsmaschine weggesteuert ist, wird mit den folgenden Bestimmungsgleichungen gerechnet:

$$\Delta\sigma_{11} = E_{1111} \cdot \Delta\varepsilon_{11}$$
$$\Delta\sigma_{22} = E_{1122} \cdot \Delta\varepsilon_{11}$$

und

$$\Delta\sigma_{11} = E_{1122} \cdot \Delta\varepsilon_{22}$$
$$\Delta\sigma_{22} = E_{2222} \cdot \Delta\varepsilon_{22}$$

Die Spannung in einer Versuchsreihe sollte möglichst 16 N/mm² nicht übersteigen, da ab dieser Größe der lineare Bereich verlassen wird und die Beschreibung des Materialverhaltens mit E-Moduln unzulässig wird.

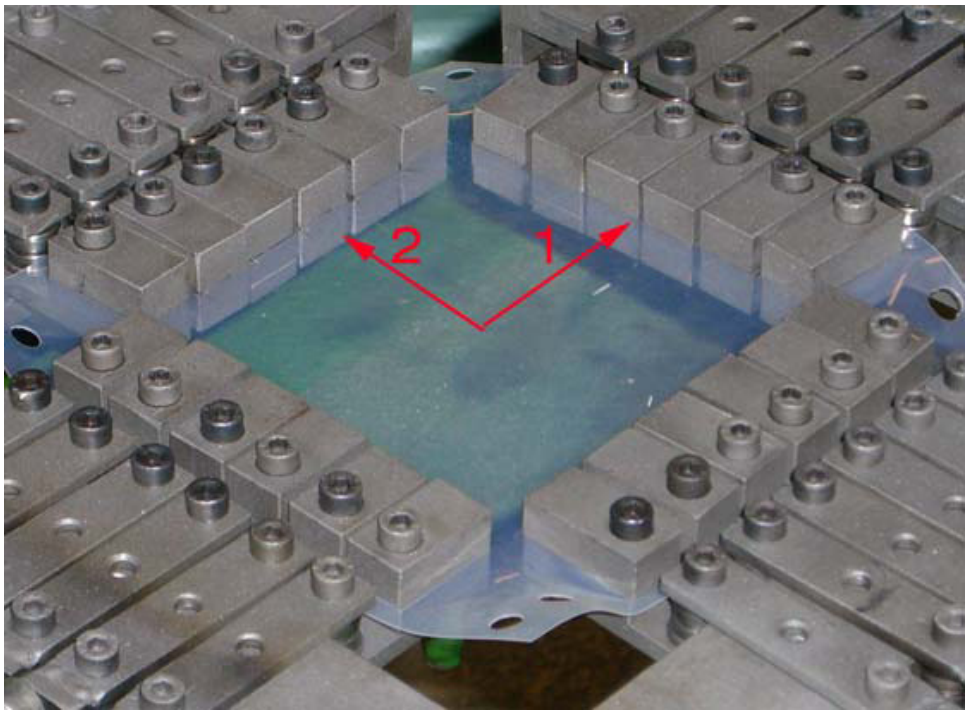


Bild 162: Koordinatensystem auf der Folienprobe

Die folgende Grafik zeigt den Verlauf der Dehnung über die Zeit. Der Versuchsablauf und somit auch das Diagramm, ist in zwei Teile unterteilt, wobei im ersten Teil die Dehnung in 2-Richtung aufgebracht wird und in 1-Richtung konstant gehalten wird. Im zweiten Teil wird die Dehnung in 1-Richtung erhöht, während die 2-Richtung konstant bleibt:

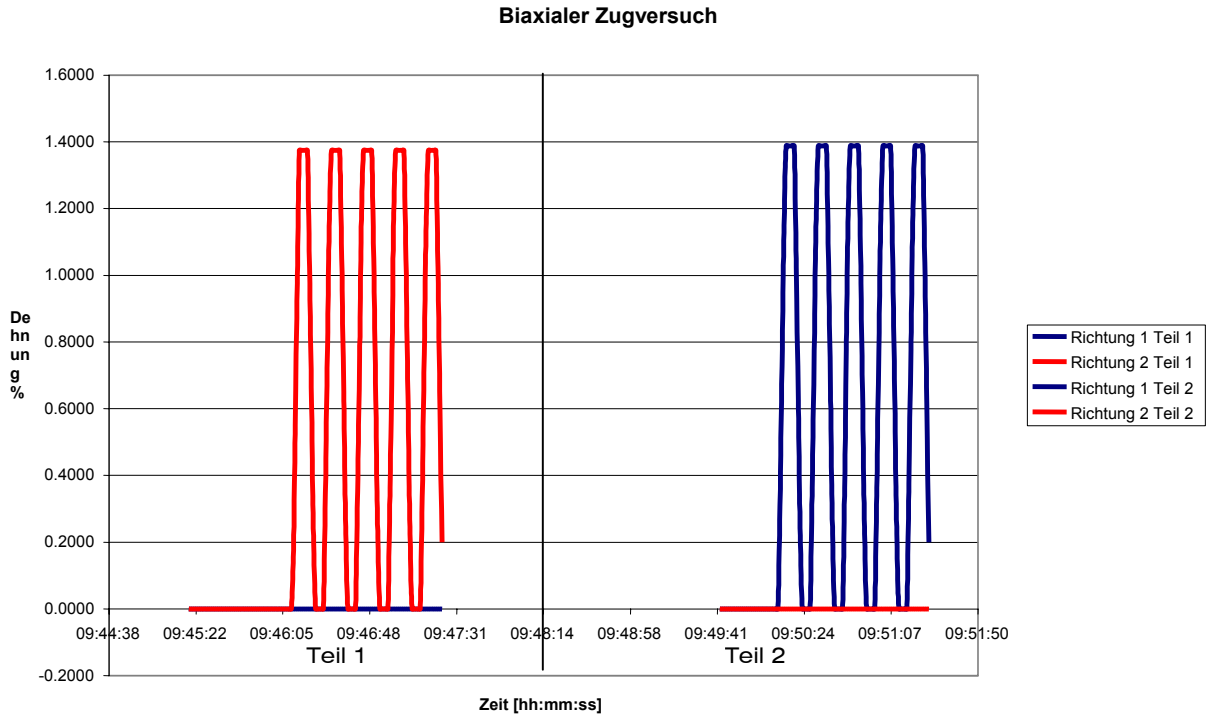


Bild 163: Dehnungsverlauf eines biaxialen Zugversuchs zur Ermittlung der Querdehnzahl an der TU-Berlin

Der daraus folgende Spannungsverlauf ist in dem folgenden Diagramm dargestellt:

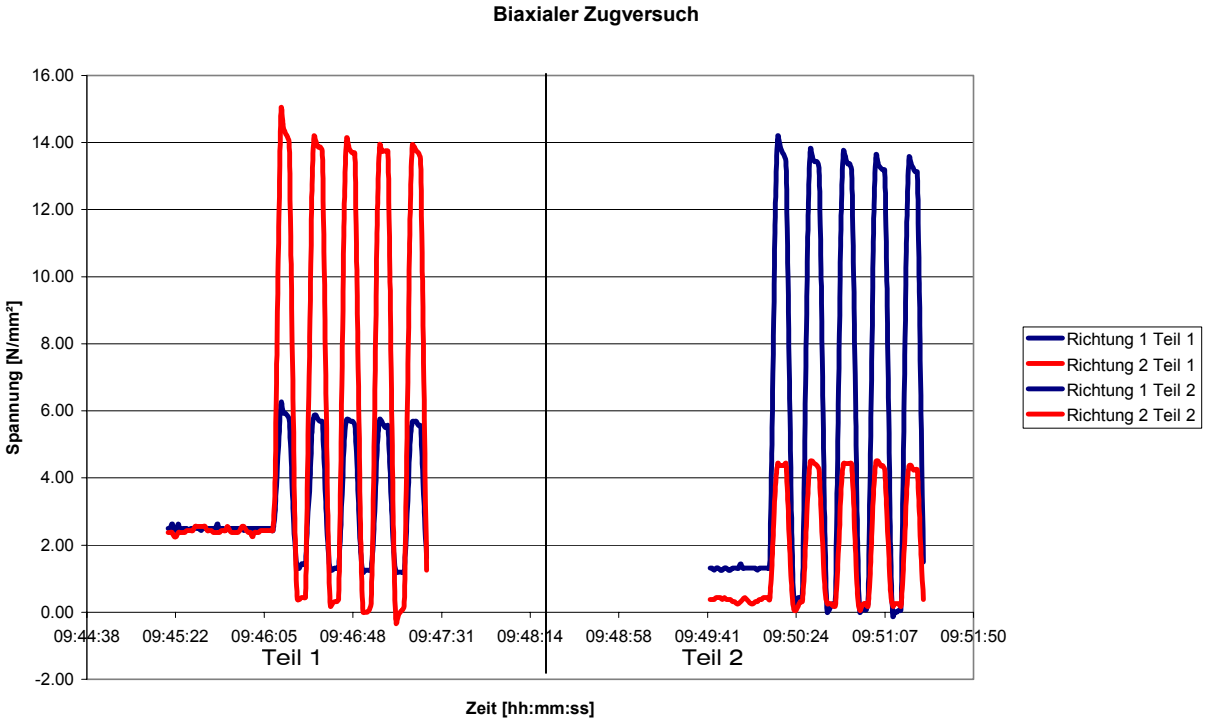


Bild 164: Spannungsverlauf eines biaxialen Zugversuchs zur Ermittlung der Querdehnzahl an der TU-Berlin

Die zugehörigen Materialwerte sind in dieser Tabelle für jeden Belastungszyklus zusammengestellt.

Versuch BQ1:

Zyklus	E_{2222} [N/mm²]	E_{1122} [N/mm²]	E_{1111} [N/mm²]	Querdehnzahl	Max. Spannung [N/mm²]
1	913.64	277.27		0.30	14.00
2	1000.00	322.73		0.32	13.19
3	1000.00	322.73		0.32	13.12
4	995.45	327.27		0.33	12.94
5	1000.00	327.27		0.33	12.94
6		292.79	927.93	0.32	14.19
7		301.80	959.46	0.31	14.25
8		306.31	972.97	0.31	14.19
9		310.81	963.96	0.32	14.06
10		301.80	972.97	0.31	14.00

Die Querdehnzahl liegt also bei dieser ETFE Folie bei 0,32.

Zwei weitere Versuche mit dem gleichen Material haben folgende Werte ergeben:

Versuch BQ2:

Zyklus	E_{2222} [N/mm²]	E_{1122} [N/mm²]	E_{1111} [N/mm²]	Querdehnzahl	Max. Spannung [N/mm²]
1	781.82	236.36		0.30	15.56
2	909.09	300.00		0.33	15.12
3	922.73	309.09		0.33	14.75
4	922.73	336.36		0.36	14.56
5	927.27	318.18		0.34	14.56
6		309.09	854.55	0.36	15.69
7		295.45	886.36	0.33	15.00
8		295.45	886.36	0.33	14.81
9		295.45	895.45	0.33	14.62
10		300.00	890.91	0.34	14.56

Mittlere Querdehnzahl: 0,34

Versuch BQ3

Zyklus	E_{2222} [N/mm²]	E_{1122} [N/mm²]	E_{1111} [N/mm²]	Querdehnzahl	Max. Spannung [N/mm²]
1	927.27	286.36		0.31	16.44
2	1027.27	322.73		0.31	16.00
3	1027.27	327.27		0.32	15.75
4	1027.27	336.36		0.33	15.56
5	1031.82	345.45		0.33	15.56
6		322.73	959.09	0.34	16.50
7		340.91	981.82	0.35	15.81
8		336.36	986.36	0.34	15.62
9		327.27	995.45	0.33	15.56
10		345.45	990.91	0.35	15.44

Mittlere Querdehnzahl: 0,33

Versuchsauswertung

Die Querdehnzahl bewegt sich in dem für Thermoplaste normalen Bereich von etwa 0,33. Ein Standardwert für Thermoplaste, wenn keine genauen Messungen vorliegen, wird in der Literatur mit 0,3 angegeben [Ing96]. Das Ergebnis war aber so nicht erwartet, weil in der Literatur [Bar03a; Schö07] der Wert mit 0,45 weit höher angegeben wird.
Für diese Differenz kann es zwei verschiedene Ursachen geben.
Die erste ist die schon im einaxialen Versuch belegte große Schwankungsbreite von Materialeigenschaften. Es ist also keineswegs sicher, dass dieser Wert für alle ETFE Folien gilt.
Die zweite Fehlerquelle ist die nur sehr geringe maximale Dehnung, die bei diesem Versuch gewählt werden darf. Dadurch, dass bei diesem Versuch zunächst eine geringe Vorspannung aufgebracht werden muss und dann die Belastung in einer Richtung aufgebracht wird, kann schnell die maximale elastische Dehnung von 1,5% überschritten werden. Das bedeutet dann ein Verlassen des linear elastischen Bereichs, was wiederum das E-Modul in Lastrichtung (E_{1111} oder E_{2222}) kleiner werden lässt, während das E-Modul in Querrichtung (E_{1122} oder E_{1122}) gleich bleibt. Somit würde für die Querdehnzahl ein zu hoher Wert berechnet werden.

4.5.5.2 Biaxialer Zugversuch mit identischer Belastung in beiden Hauptspannungsrichtungen

Bei diesem Versuch wird die Probe in beiden Richtungen der gleichen Belastung ausgesetzt. Die Maximallast wird vorher festgelegt. Ist diese Last erreicht, wird die Probe wieder entlastet und anschließend wieder belastet. Dieser Zyklus wird sechs Mal durchlaufen, um die Festigkeit nach mehreren Belastungszyklen ermitteln zu können.

Das biaxiale Spannungs- Dehnungsverhalten wird beschrieben mit:

$$\sigma_{11} = E_{1111} \cdot \varepsilon_{11} + E_{1122} \cdot \varepsilon_{22}$$
$$\sigma_{22} = E_{2211} \cdot \varepsilon_{11} + E_{2222} \cdot \varepsilon_{22}$$

Werden jetzt beide Richtungen mit der gleichen Dehnung $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon$ belastet, ergibt sich:

$$\sigma_{11} = E_{1111} \cdot \varepsilon + E_{1122} \cdot \varepsilon = \left[E_{1111} + E_{1122}\right] \cdot \varepsilon$$
$$\sigma_{22} = E_{2211} \cdot \varepsilon + E_{2222} \cdot \varepsilon = \left[E_{2211} + E_{2222}\right] \cdot \varepsilon$$

Versuch BE1:

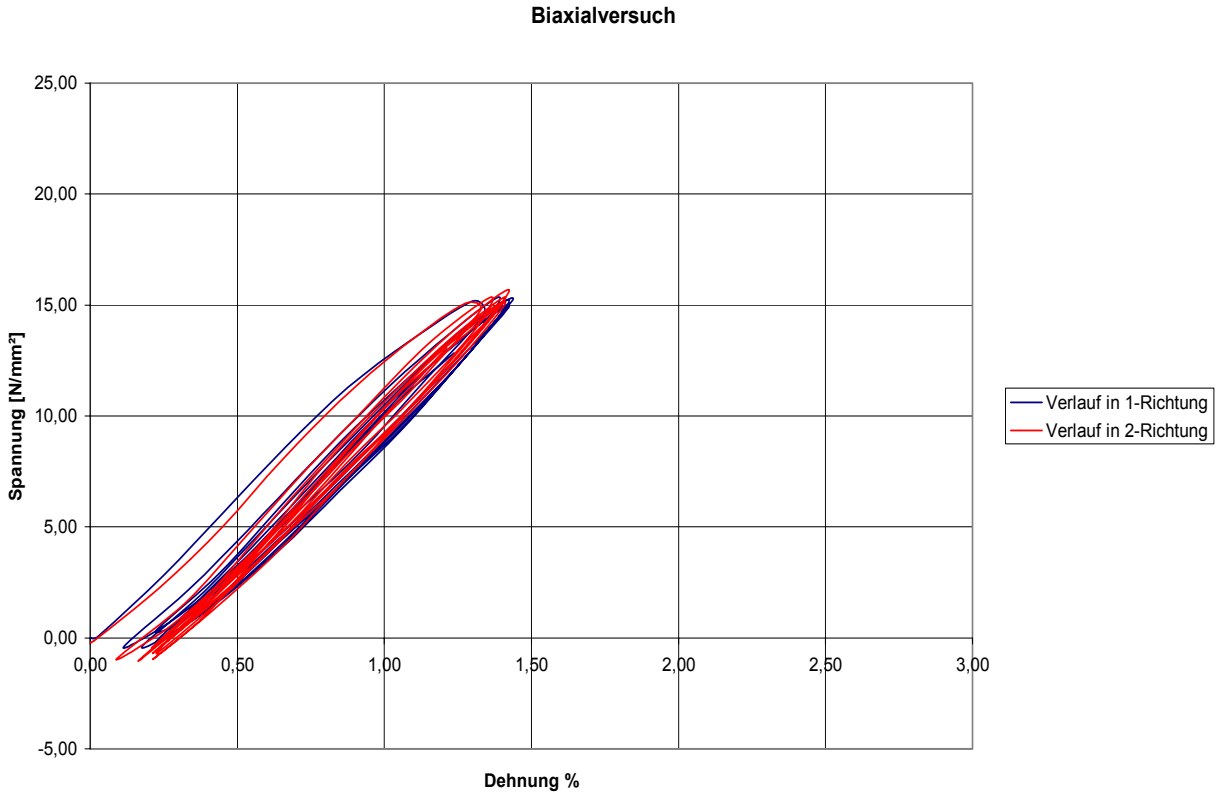


Bild 165: Spannungs- Dehnungsdiagramm von Versuch BE1

Sekantenmodul in 1- und 2-Richtung

Zyklus	$E_{1111}+E_{1122}$	$E_{2222}+E_{2211}$
0	1105	1132
1	1239	1280
2	1227	1323
3	1254	1311
4	1279	1333
5	1285	1332
6	1274	1333

Versuch BE2:

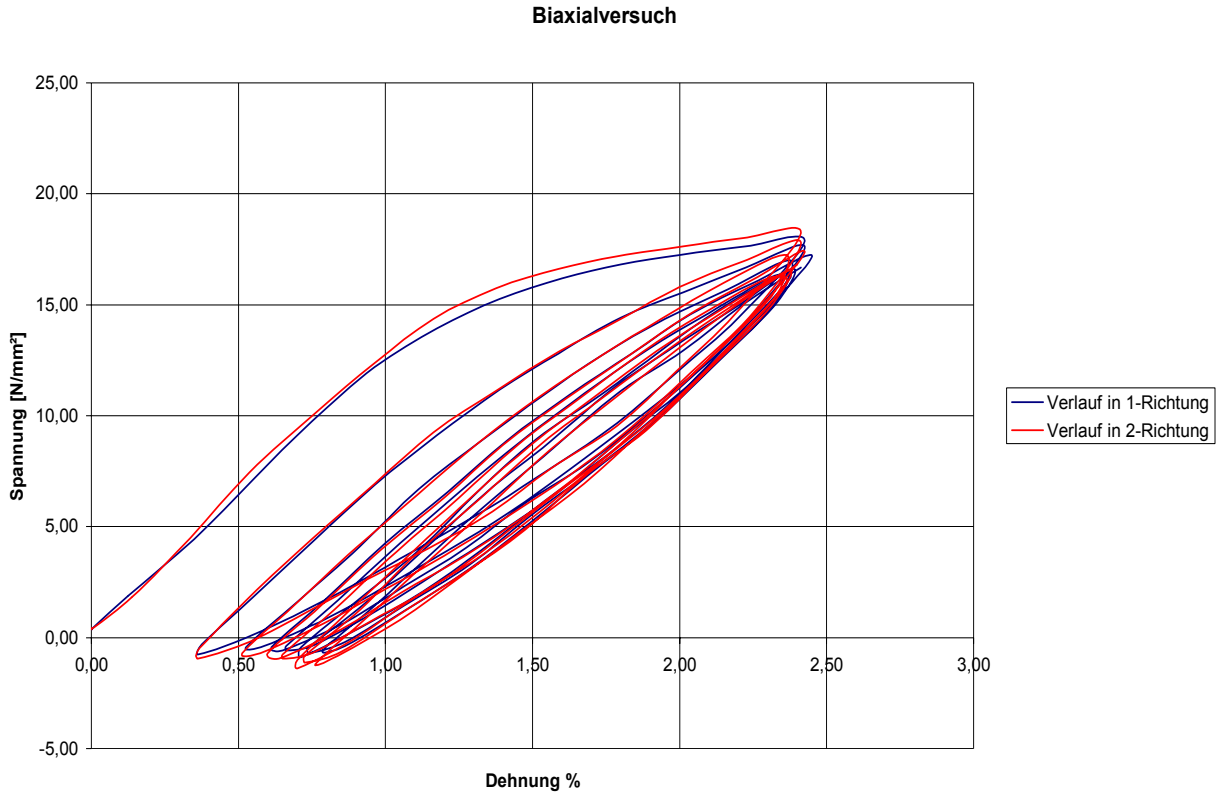


Bild 166: Spannungs- Dehnungsdiagramm von Versuch BE2

Sekantenmodul in 1- und 2-Richtung

Zyklus	$E_{1111}+E_{1122}$	$E_{2222}+E_{2211}$
0	722	738
1	875	896
2	943	970
3	959	990
4	967	978
5	1023	1053
6	1034	1053

Versuch BE3:

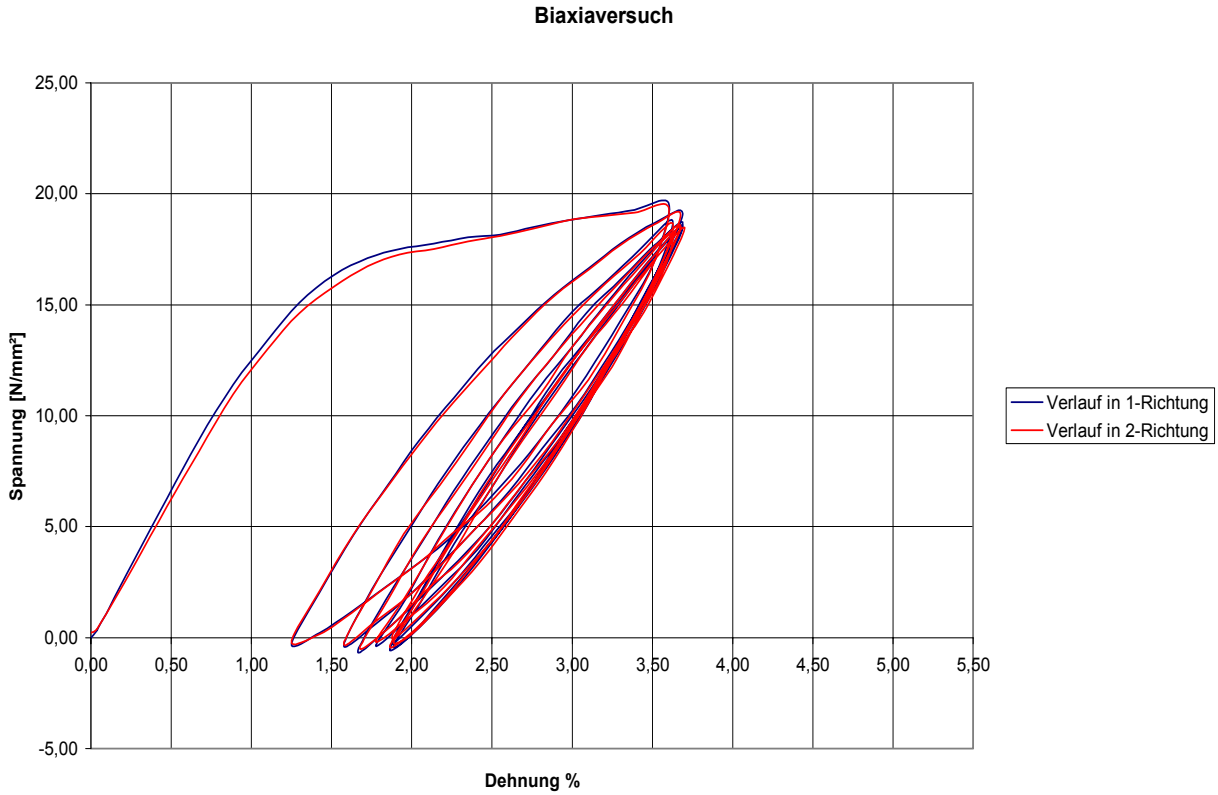


Bild 167: Spannungs- Dehnungsdiagramm von Versuch BE3

Sekantenmodul in 1- und 2-Richtung

Zyklus	$E_{1111}+E_{1122}$	$E_{2222}+E_{2211}$
0	544	533
1	794	791
2	935	927
3	953	950
4	1011	995
5	1035	1026
6	1038	1024

Versuch BE4:

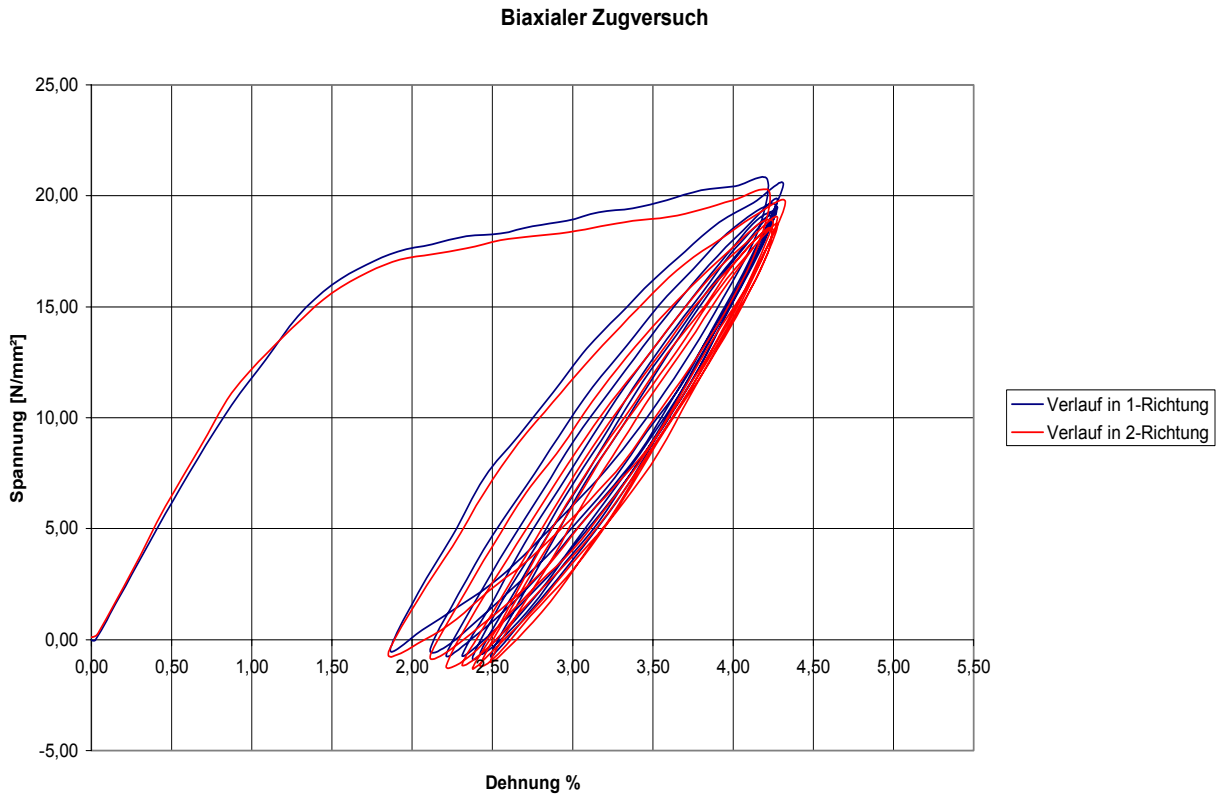


Bild 168: Spannungs- Dehnungsdiagramm von Versuch BE4

Sekantenmodul in 1- und 2-Richtung

Zyklus	$E_{1111}+E_{1122}$	$E_{2222}+E_{2211}$
0	493	475
1	857	823
2	927	912
3	997	982
4	1016	1006
5	1081	1074
6	1084	1074

Versuch BE5:

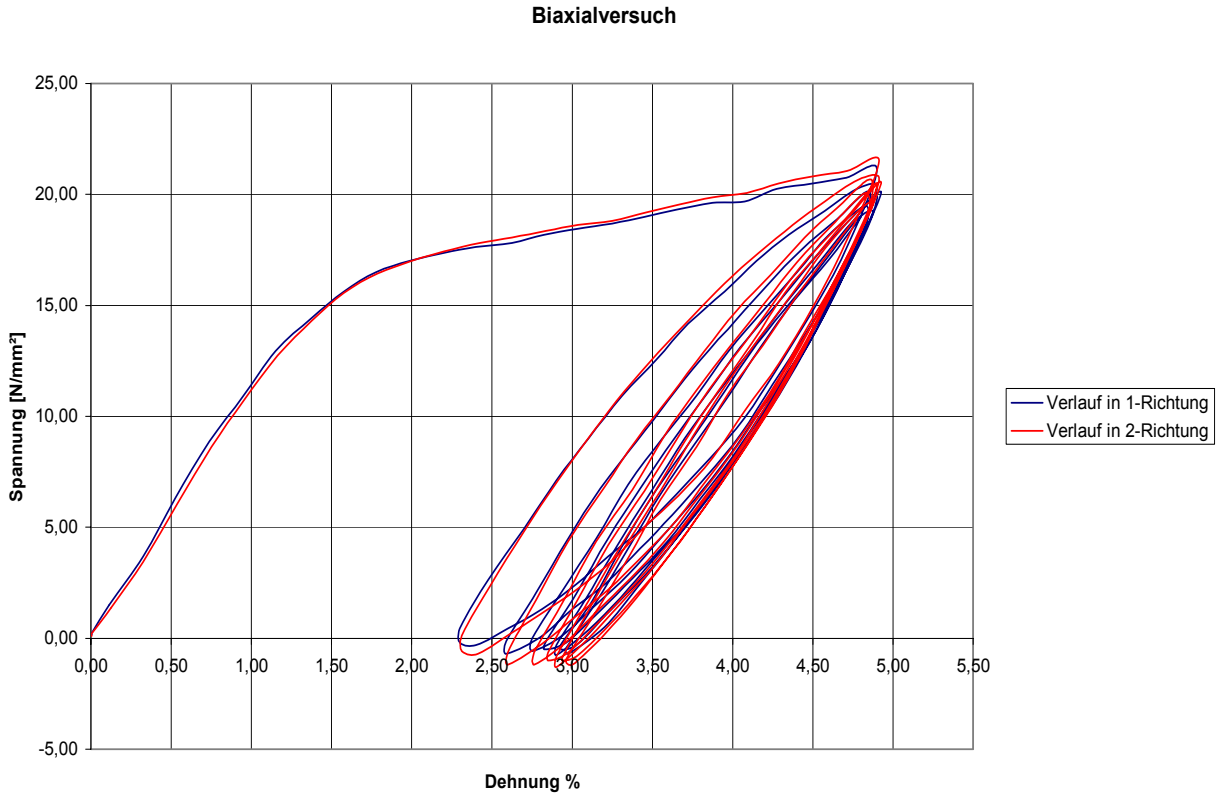


Bild 169: Spannungs- Dehnungsdiagramm von Versuch BE5

Sekantenmodul in 1- und 2-Richtung

Zyklus	$E_{1111}+E_{1122}$	$E_{2222}+E_{2211}$
0	427	434
1	786	815
2	895	942
3	901	949
4	973	1030
5	1006	1052
6	1006	1061

Versuchsauswertung

Die E-Moduln des Versuchs BE1 ergeben ähnliche Werte wie sie aus den Versuchen zur Ermittlung der Querdehnzahl bekannt waren. Bei den Versuchen BE2 bis BE5, die alle den linearen Bereich überschritten haben, ergibt sich ein anderes Bild. Die E-Moduln erreichen nicht mehr als Summe einen Wert von bis zu 1333 N/mm², sondern maximal noch 1074 N/mm². Es ist dabei egal wie weit das Material plastisch verformt wurde. Der Wert bleibt immer etwa gleich und ist somit niedriger als im elastischen Bereich.

Das Materialverhalten in Extrusionsrichtung (Bahnrichtung) und quer dazu ist nahezu identisch, sodass weder im Herstellungsprozess noch bei der Berechnung darauf geachtet werden muss, die Extrusionsrichtung in einer bestimmten Richtung zu verwenden.

5 Bemessung

5.1 Bemessungsgrundlagen

Folien folgen im Wesentlichen den Gesetzmäßigkeiten des Membranbaus. Der Unterschied zum Membranbau besteht darin, dass es kein Gewebe gibt und somit auch keine Festigkeitsunterschiede in verschiedenen Belastungsrichtungen. Durch das Herstellungsverfahren kann es bei Folien zu geringen Festigkeitsunterschieden in Bahnrichtung und quer dazu kommen, wenn sich Molekühle in Extrusionsrichtung ausrichten. Allerdings konnte dieses Phänomen bei den im Rahmen dieser Arbeit getesteten Folien nicht festgestellt werden.
Die Folien besitzen keinerlei Biegesteifigkeit und können ausschließlich Zugkräfte in ihrer Ebene aufnehmen.

5.1.1 Rechtliche Grundlagen

Die Landesbauordnungen unterscheiden
- Geregelte Bauprodukte
- Sonstige Bauprodukte
- Nicht geregelte Bauprodukte

ETFE gehört zu der Gruppe der nicht geregelten Bauprodukte. Es existiert auch keine Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung, die die statisch relevanten Kennwerte regeln würde. Es gibt lediglich eine Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung [ABP03], die die Brandsicherheit behandelt. Diese Zulassung ist damit im Sinne der Landesbauordnungen unvollständig und bedarf eines zusätzlichen Verwendbarkeitsnachweises [Kle03]. Somit ist für Projekte, bei denen Folien als statisch tragende Teile verwendet werden, jeweils eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich.

5.1.2 Normative Vorgaben

Die Normen, die sich direkt mit der Bemessung von Membranen auseinandersetzen, sind:
- DIN 4134 Tragluftbauten – Berechnung, Ausführung und Betrieb
- E DIN 18 204-1 (Entwurf) Raumabschließende Bauteile aus textilen Flächengebilden und Folien (Zeltplanen) für Hallen und Zelte; Teil 1: PVC-beschichtetes Polyestergewebe

Die DIN 4134 weist deutlich darauf hin, dass alle Werkstoffe, sofern ihre Eigenschaften nicht in DIN-Normen festgelegt sind, einer Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassung oder einer Zustimmung im Einzelfall bedürfen. Ein Bemessungskonzept, das die spezifischen Materialeigenschaften einschließt, ist hier also nicht zu finden.
Die E DIN 18 204-1 regelt nur die Materialeigenschaften und das Bemessungskonzept für PVC beschichtetes Polyestergewebe. Ein weiterer Teil für Folien existiert nicht.

5.1.3 Sicherheit und Versagenswahrscheinlichkeit

Das Grundprinzip der Bemessung beruht darauf, dass die Beanspruchung kleiner sein soll, als die Beanspruchbarkeit.

$S < R$

S : Beanspruchung

R : Beanspruchbarkeit

Beide Parameter, sowohl die Beanspruchbarkeit als auch die Beanspruchung, sind keine festen Größen, sondern variieren.

Auf der Beanspruchungsseite ist dies offensichtlich der Fall durch die variable Nutzung von Bauteilen und der dadurch schwankenden Größe der Verkehrslast, z.B. unterschiedliche Verkehrsdichte auf Brücken oder variable Personenzahl in Veranstaltungsräumen etc..

Die zweite variable Größe sind die stark schwankenden Umwelteinflüsse, wie Wind und Schnee. Außerdem gibt es noch Beanspruchungen, bei denen nicht mal sicher ist, ob sie überhaupt während der Lebenszeit des Bauwerks auftreten, wie Erdbeben, Brandlasten, Explosionen oder Ähnliches.

Auf der Beanspruchbarkeitsseite kommt es zu Unsicherheiten, da die Herstellung der Materialien gewissen Schwankungen in der Qualität unterworfen ist. Die Modellierung eines Tragwerks zur Berechnung ist mit Vereinfachungen verbunden, die von der Realität abweichen(z.B. lineares, nichtlineares Modell) und außerdem kann es bei der Ausführung zu Abweichungen von dem berechneten Model kommen.

Alle Werte auf der Beanspruchbarkeits- und auf der Beanspruchungsseite unterliegen somit den Gesetzmäßigkeiten der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Der angestrebte Zustand $R > S$ unterliegt also der Wahrscheinlichkeit und kann wie folgt formuliert werden:

$P_f = P(R<S) < P_{f0}$

P_f : Versagenswahrscheinlichkeit

$P(R<S)$: Wahrscheinlichkeit, dass R kleiner ist als S

P_{f0} : zulässige Versagenswahrscheinlichkeit

Der Wunsch nach einem Gebäude, dass eine Versagenswahrscheinlichkeit von $Pf = 0$ hat, würde zu einer absurden Architektur führen, da man bei der Bemessung beispielsweise davon ausgehen müsste, dass der höchst unwahrscheinliche Fall eines Flugzeugabsturzes auf das Bauwerk eintritt, ein Krieg ausbricht oder ähnliches. Es ist offensichtlich, dass die Forderung nach einem absolut sicheren Gebäude nur für Bunker einen Sinn ergibt.

Um die Versagenswahrscheinlichkeit eines Bauteils zu ermitteln, müssen zunächst die beiden dafür entscheidenden Komponenten, die Beanspruchung und die Beanspruchbarkeit, analysiert werden. Da beide, wie bereits erwähnt, keinen festen Wert annehmen, sondern Schwankungen unterworfen sind, gibt es zwei Möglichkeiten diese Darzustellen. Zum einen können sie als Häufigkeitsverteilung dargestellt werden und zum anderen als Dichtefunktion.

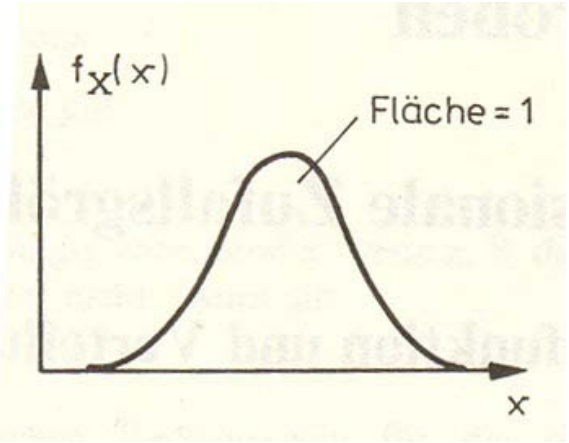


Bild 170a: Dichtefunktion [Spa87]

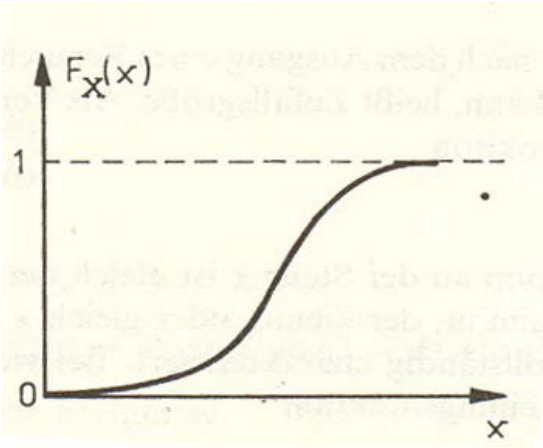


Bild 170b: Häufigkeitsfunktion [Spa87]

Bei beiden Darstellungen wird auf der Ordinate die Häufigkeit in Prozent angegeben und auf der Abszisse die untersuchte Größe (Beanspruchung oder Beanspruchbarkeit). Die Häufigkeitsverteilung zeigt, bei welcher untersuchten Größe wie viel Prozent diesen Wert mindestens erreicht haben. Bei der Dichtefunktion wird dargestellt, bei welchem untersuchten Wert wie viel Prozent der Proben genau diesen Wertebereich erreicht haben. Zeichnet man die Dichtefunktion der Beanspruchung und der Beanspruchbarkeit in einen Grafen, so wird sich für ein im normativen Sinne standsicheres Bauwerk folgendes Bild ergeben:

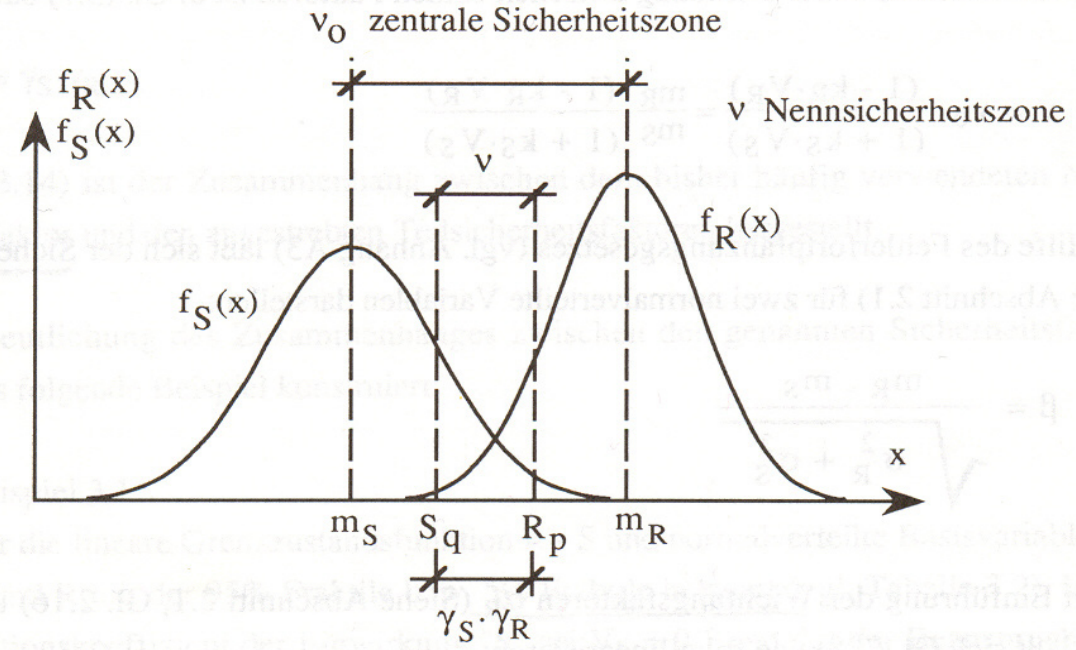


Bild 170c: Schematische Darstellung der Sicherheitszonen [Kli92]

Die zentrale Sicherheitszone liegt zwischen den beiden Modalwerten der Dichtefunktionen. Der Modalwert, ist der Wert, der am häufigsten vorkommt, also die Spitze der Glockenkurve. Dies ist nicht notwendigerweise das arithmetische Mittel der Versuchswerte. Geht man aber von einer Gaußschen Verteilung aus, stimmen Modalwert und Mittelwert überein.
Die zentrale Sicherheitszone ergibt sich, wenn man die Modalwerte mit Teilsicherheitsbeiwerten multipliziert. Die Beanspruchung wird erhöht und die Beanspruchbarkeit verringert. So ergibt sich die in der Grafik mit ν gekennzeichnete zentrale Sicherheitszone.

5.2 Sicherheitskonzept für ETFE Folien

Das Bauen mit Folien unterscheidet sich insofern von den klassischen Baustoffen, dass es keine Norm zur Bemessung der Folien oder Zulassung gibt, die den Herstellern Materialwerte vorschreibt. Daraus folgt, dass es nicht zulässig ist, eine Materialcharge zu verwenden, ohne vorher die Materialeigenschaften im Versuch getestet zu haben. Eine Aussage über die Schwankungen der Materialwerte ist nur dann sinnvoll, wenn die Hersteller das Material herstellen, mit dem Ziel, bestimmte vorgegebene Materialwerte zu erreichen. Ohne vorgegebene Materialwerte, die die Hersteller erreichen müssen, gleicht der Versuch Standartmaterialwerte für alle Folien festzulegen dem Versuch allen Betonfestigkeitsklassen eine einzige Druckfestigkeit für die Berechnung zuzuschreiben.
Es hat sich zwar in dieser Arbeit herausgestellt, dass es eine Häufung der Materialwerte gibt. So waren z.B. bei den Vergleichen von ETFE Folien unterschiedlicher Hersteller im einaxialen Zugversuch deutlich eine Häufung der Spannungswerte bei 2,5% Dehnung von 16,9 N/mm² zu sehen. Trotzdem kann hier keine Aussage darüber getroffen werden, ob die Materialproben, die von diesem Wert stärker abgewichen sind, dies auch getan hätten, wenn der Hersteller mit der Maßgabe gearbeitet hätte, diesem Wert erreichen zu müssen. Es wird also hier bei der Bemessung weiter davon ausgegangen, dass mit jeder Materialcharge, die Materialwerte wieder überprüft werden. Die Normen für diese Materialversuche geben vor, dass fünf Proben ausreichend sind, um den Materialwert zu ermitteln. Mit fünf Proben ist eine statistische Auswertung mir Hilfe von Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen nicht sinnvoll. Bei den hier durchgeführten Versuchen wurde festgestellt, dass die Materialwertschwankungen innerhalb einer Materialcharge sehr gering sind. Der Varianzkoeffizient beim einaxialen Zugversuch der Dehnung von 2,5% lag zwischen 1 und 4 % (Varianzkoeffizient = Standardabweichung / arithmetisches Mittel).
Es ist sinnvoll bei solch geringen Schwankungen den niedrigsten Messwert als Materialwert

festzulegen.
Damit wäre aber zunächst erst mal nur die physikalische Unsicherheit beschrieben, also die natürliche Streuung der Basisvariablen aus den Materialversuchen. Wie bereits erwähnt, liegen aber die Unsicherheiten auf der Beanspruchbarkeitsseite nur zum Teil im Material begründet. Die weit größeren Unsicherheiten liegen in der Annahme des statischen Modells und in den Abweichungen bei der Ausführung.
Die Abweichungen zwischen dem statischen Modell und dem realen Bauwerk können entstehen durch die Annahmen:

- Verschiebbarkeit und Einspannungen an den Rändern. (Planung)
- Vereinfachungen der Spannungs- Dehnungslinie. (Planung)
- Vernachlässigung von Materialversteifungen an Schweißnähten. (Planung)
- Verziehen einer polygonalen Fläche aus miteinander verschweißten, ebenen Zuschnittsteilen zu einer faltenfreien gekrümmten Fläche. (Bauausführung)
- Abweichungen von Luftdruck bei pneumatischen Konstruktionen durch Leitungs längen, Höhenunterschieden mehrerer Pneus mit gleicher Luftversorgung oder Leckagen (Planung und Bauausführung)

Die Abweichungen, die durch die hier erwähnten Punkte entstehen, sind weit größer, als die aus der Materialschwankung. Da diese Fehlerquellen im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht worden sind, ist hier eine Aussage über Wahrscheinlichkeiten nicht möglich.
Im Juli 2003 wurde eine Entwurfsnorm zur Bemessung von PVC-Beschichteten PES Membranen herausgegeben. Das Materialverhalten ist nicht übertragbar auf das von ETFE Folien, deshalb kann hier auch keine Bewertung der Höhe der gewählten Sicherheitsbeiwerte stattfinden. Ähnlich sind hingegen die Fehlerquellen bei den Annahmen für das statische Modell. Deshalb soll das Bemessungskonzept aus dieser Entwurfsnorm hier zunächst vorgestellt werden, um zu sehen, wie hier diesen Unsicherheitsfaktoren Rechnung getragen wird.

5.2.1 Bemessung von PVC beschichteten PES Membranen

Wenn man für die Bemessung von Membranen die E DIN 18204-1 als Grundlage heranzieht, ergibt sich folgendes Bemessungskonzept:
Auf der Beanspruchungsseite steht der Sicherheitsfaktor γ_F, der abhängig von der Art der Einwirkung ist. Es gibt folgende Beanspruchungsarten:

- Ständige Einwirkung „G“ infolge Schwerkraft
- Ständige Einwirkung „P“ infolge Vorspannung
- Veränderliche Einwirkung „S“ infolge Schnee
- Veränderliche Einwirkung „W“ infolge Wind (ungünstig wirkend)

Die zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerte sind:

$\gamma_F^G = 1,35$

$\gamma_F^P = 1,35$

$\gamma_F^S = 1,5; \gamma_F^W = 1,5; \psi = 0,9$

Die Beanspruchbarkeit wird ermittelt mit der Formel:

$$f_{t,i,d} = \frac{f_{u,k}}{A \cdot \gamma_M}$$

Dabei ist

$f_{u,k} = \frac{\text{Reißkraft (nachTabellenwert)}}{5}$ [in kN/cm] Höchstzugkraft des Gewebes bei 20°C bzw. 70°C;

γ_M der Teilsicherheitsbeiwert für Widerstandsgrößen;

A der Abminderungsfaktor in Abhängigkeit von der Art der Einwirkung

Es wird dann unterschieden zwischen

- Beanspruchbarkeit bei kurzzeitigen Einwirkungen ohne erhöhte Temperatur (t=20°C)
  $A_0 \cdot \gamma_0 = 2,0$
  Für die Einwirkungen G+P+S+W oder G+P+S

- Beanspruchbarkeit bei kurzzeitigen Einwirkungen mit erhöhter Temperatur (t=70°C)
  $A_\vartheta \cdot \gamma_M = 2,2$
  Für die Einwirkungen G+P+W

- Beanspruchbarkeit bei dauernder Einwirkungen (t=20°C)
  $A_t \cdot \gamma_M = 3,5$
  Für die Einwirkungen G+P+S/2

Der Nennsicherheitsfaktor ν ist das Produkt aus den Teilsicherheitsbeiwerten von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit. Genau genommen, ist er nach diesem Normenentwurf gar nicht zu ermitteln, weil die Beanspruchbarkeitsseite zusätzlich mit einem Abminderungsfaktor versehen ist und nicht weiter differenziert wird zwischen Sicherheitsfaktor und Abminderungsfaktor. Vernachlässigt man diese Tatsache und rechnet den Abminderungsfaktor mit in den Nennsicherheitsfaktor ein, ergibt sich ein Nennsicherheitsfaktor zwischen 13,5 und 25.

5.2.2 Bewertung und Übertragbarkeit der E DIN 18204-1

Das Bemessungskonzept dieser Entwurfsnorm zeigt deutlich ein Prinzip, dass im Membranbau Anwendung findet. Es wird auf der einen Seite durch die Sicherheitsfaktoren die Schwankungen bei der Materialherstellung, Abweichungen zwischen statischen Modell und Realität und Bauausführungsabweichungen berücksichtigt. Dies ist hier im nicht näher bezeichneten Faktor 1/5 zu sehen, mit dem die Reißkraft (nach Tabellenwert) multipliziert wird. Auf der anderen Seite gibt es die Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit der Dauer und der Umgebungstemperatur. Diese haben nichts mit dem Sicherheitskonzept nach Versagenswahrscheinlichkeiten zu tun, sondern sind Faktoren, die verminderte Festigkeiten des Materials unter den vorgegebenen Umständen berücksichtigen, damit immer mit dem selben Materialwerten gerechnet werden kann, obwohl diese durch Temperatureinflüsse sich deutlich verändern. Auch das Kriechen des Materials wird hier über Abminderungsfaktoren berücksichtigt.
Um zu überprüfen, inwiefern das Bemessungskonzept für PVC beschichtete PES Membranen übertragbar ist auf ETFE Folien, soll hier zunächst ein Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kurven der Materialien gezeigt werden.
Die folgenden beiden Diagramme Bild 171a und 171b sind Messwerte von Produkten der Firma Heytex. Das dritte Diagramm (Bild 172) stellt die Spannungs-Dehnunglinie einer ETFE Folie dar.

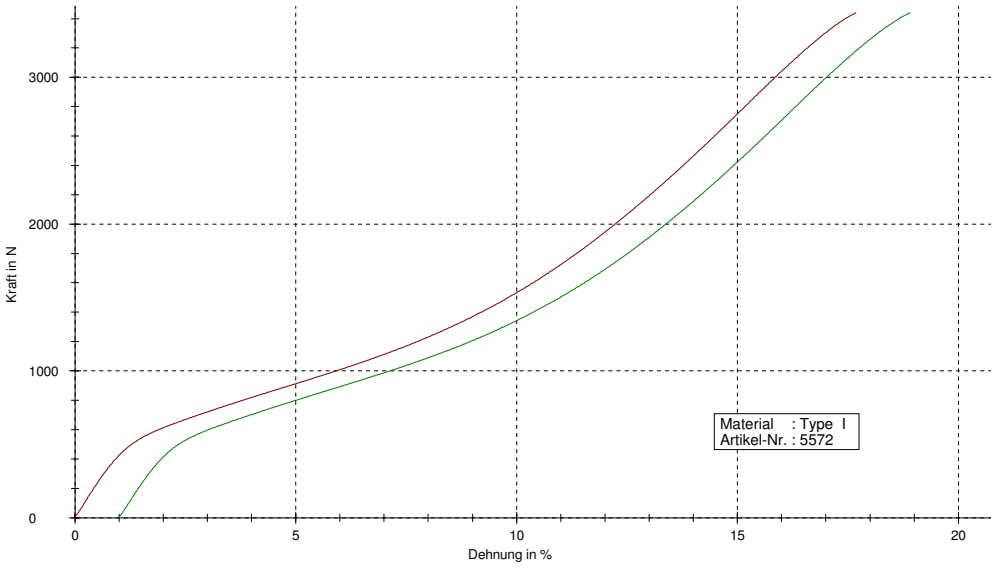


Bild 171a: Spannungs- Dehnungslinie PVC-PES Typ 1 Kettrichtung (Messwerte der Firma Heytex; Julius Heywinkel GmbH; 2007)

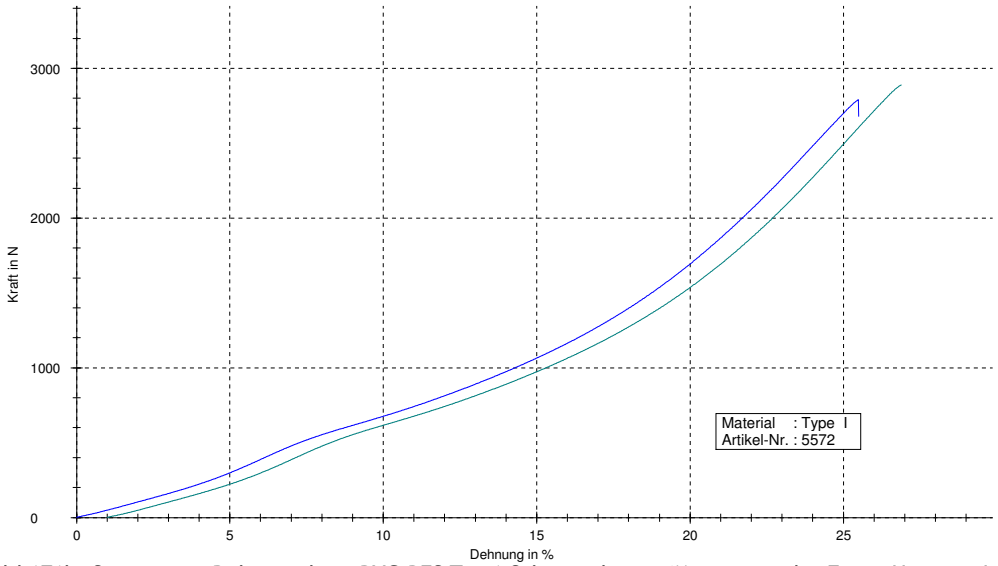


Bild 171b: Spannungs- Dehnungslinie PVC-PES Typ 1 Schussrichtung (Messwerte der Firma Heytex; Julius Heywinkel GmbH; 2007)

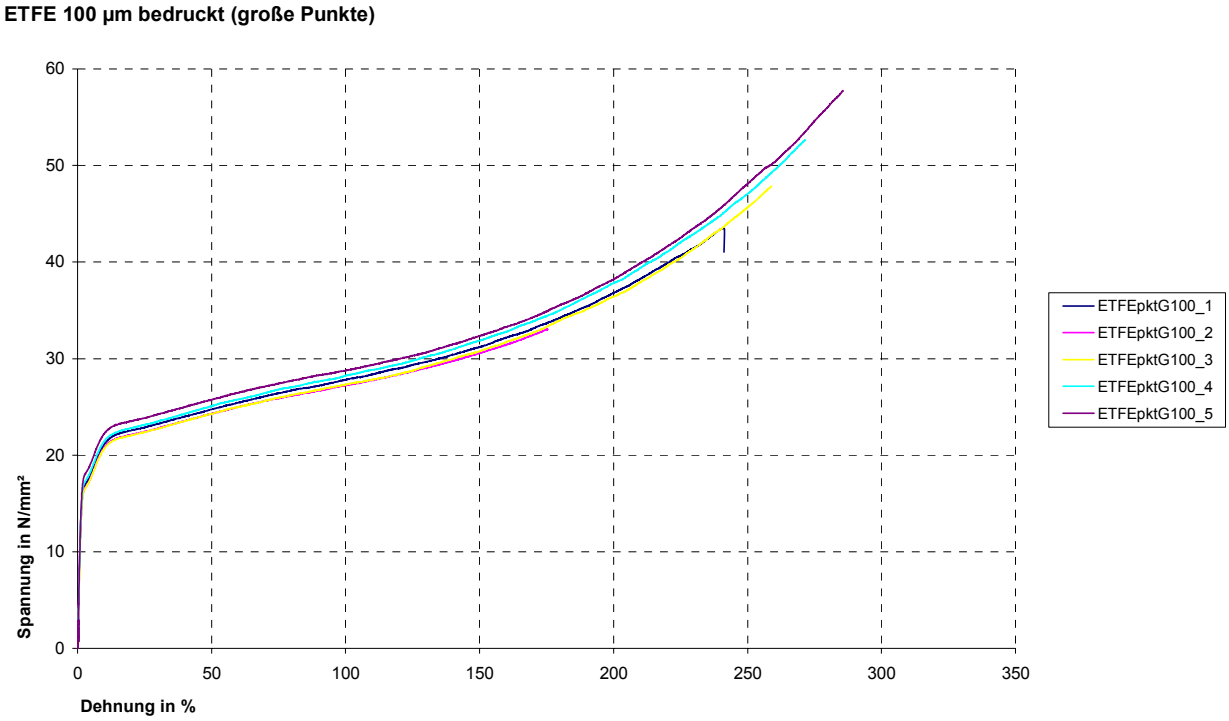


Bild 172: Spannungs- Dehnungslinie von ETFE Folie

Beim Vergleich der Kurvenverläufe wird klar, dass das Materialverhalten des Gewebes ein anderes ist, als das einer Folie. Während das Gewebe ein sprödes Bruchverhalten aufweist, weist ETFE einen sehr ausgeprägten plastischen Bereich auf. Der Grund in den qualitativ stark unterschiedlichen Verhalten liegt bei der sehr unterschiedlichen Glastemperatur der beiden Materialien. Die Glastemperatur ist die Grenze, unterhalb derer eine Versprödung des Materials auftritt. Für PES liegt die Glastemperatur oberhalb von +200°C. Daraus folgt ein sprödes Bruchverhalten bei Raumtemperatur. ETFE hat eine Glastemperatur unter

-60°C, woraus bei Raumtemperatur das duktile Verhalten resultiert.
Durch das deutlich unterschiedlich Materialverhalt wird eine Beurteilung der Höhe der Sicherheits- und Abminderungsfaktoren der E DIN 18204-1 auf Grundlage dieser Arbeit unmöglich.
Die Festlegung von Sicherheitsbeiwerten für Belastungen ist mit der DIN 1055 abgedeckt und bedarf keiner weiteren Festlegung in einer Materialnorm.
Die Berücksichtigung des komplexen Bereichs der Temperaturabhängigkeit des Materialverhaltens von Kunststoffen über Faktoren ist für eine Normung von ETFE unbefriedigend, da die Temperatur mehrere Eigenschaften beeinflusst. Da im Rahmen dieser Arbeit dieser Einfluss nicht versuchstechnisch untersucht wurde, muss bei der Bemessung auf diese Vereinfachung weiterhin zurückgegriffen werden. Für eine Normung ist es aber erforderlich, den Temperatureinfluss auf die Materialsteifigkeit und das Kriech- und Relaxationsverhalten genau zu analysieren.
Das Kriech- und Relaxationsverhalten von Folien und Membranen über einen Abminderungsfaktor zu berücksichtigen, ist aufgrund der Lastabhängigkeit dieses Prozesses eine sehr grobe Vereinfachung, die dem Materialverhalten nur ungenügend gerecht wird.
Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Materialwerte für das Langzeitverhalten und das biaxiale Zugverhalten stellen Bausteine dar, um ein probabilistisches Sicherheitskonzept aufbauen zu können. Sie fehlen aber zu einer vollständigen Wahrscheinlichkeitstheoretischen Bewertung der Beanspruchbarkeitsseite noch weitere entscheidende Faktoren, die in diesem Kapitel beschrieben wurden.
Aus diesem Grund wird weiterhin auf das im Membranbau üblich Verfahren der Abminderungsfaktoren für bestimmte Einflüsse zurückgegriffen, soweit nicht präzisere Aussagen durch die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse möglich sind.

5.2.3 Nachweis der Tragfähigkeit

Durch die große Dehnung kann die Folie die Spannungen erheblich abbauen, da bei größerem Stich und gleicher Last die Spannung im Material sinkt. Am Beispiel eines eben gespannten Fensters soll dies verdeutlicht werden.

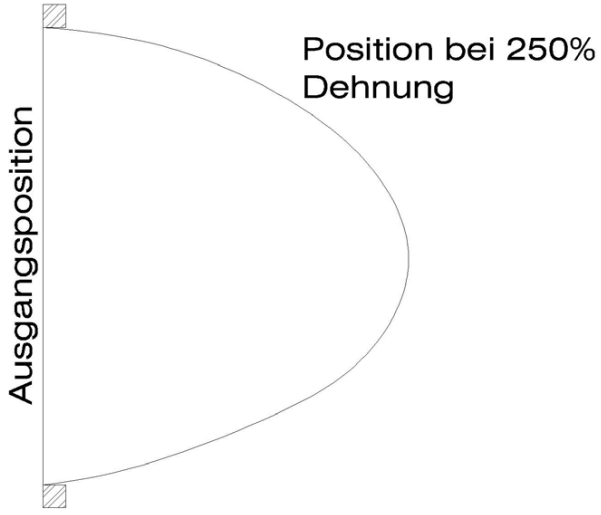


Bild 173: Verformung eines ETFE Fenstermoduls bei Bruchdehnung

Die Folie wird in eine synklastische Form gedrückt. Der Bruch der Folie ist erst ab einer Dehnung von 250% zu erwarten. Das Versagen ist deutlich vorher erkennbar.
Für die folgenden Bemessungen werden auf der Belastungsseite die Sicherheitsfaktoren aus der DIN 1055 übernommen. Auf der Materialseite soll die maximale Belastbarkeit um den Faktor 1,35 unterschritten werden. Dies ist eine Annahme, die nicht wahrscheinlichkeitstheoretisch belegt werden kann, sondern lediglich die Einflussfaktoren

- Modellungenauigkeiten
- Aufbaufehler
- Versagensfolgen

repräsentieren soll.
Für die Beanspruchbarkeit bei kurzzeitigen Einwirkungen gilt somit:

$$f_{u,d} = \frac{f_{u,k}}{\gamma_{M,u}} \text{ mit } \gamma_{M,u} = 1{,}35$$

Bei erhöhter Temperatur ändern sich die Materialwerte der Folie. Der E-Modul fällt ab und die Bruchspannung sinkt. Um mit der gleichen Bruchspannung rechnen zu können, wird diese Abminderungen in den Sicherheitsbeiwert eingerechnet.

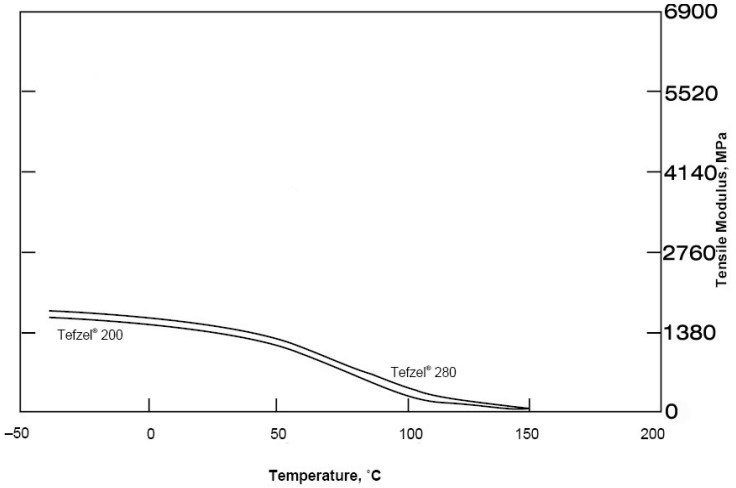


Bild 1744: E-Modul in Abhängigkeit von der Temperatur [Dup03]

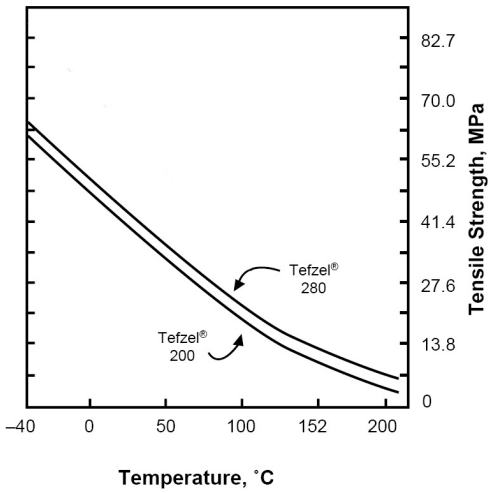


Bild 175: Bruchfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur [Dup03]

Das E-Modul fällt bei einer Temperatursteigerung von +20°C auf +50°C nach Herstellerangaben von Du Pont von 1400 N/mm² auf 1200 N/mm² [Dup03]. Auch wenn diese Zahlen etwas zu hoch erscheinen, wird der qualitative Unterschied diesen Angaben entsprechen. Das entspricht einem Faktor von 1,17. Dieser Faktor geht nicht ins Sicherheitskonzept ein sollte aber bei der Spannungsermittlung berücksichtigt werden, durch eine Abminderung des E-Moduls. Die Bruchspannung sinkt von 41 N/mm² auf 33 N/mm², was einem Faktor von 1,24 entspricht.

Für kurzzeitige Belastungen unter erhöhter Temperatur gilt also somit:

$$f_{u,d,temp} = \frac{f_{u,k}}{\gamma_{M,u,temp}} \text{ mit } \gamma_{M,u,temp} = 1{,}35 \cdot 1{,}24 = 1{,}67$$

Als charakteristische Bruchspannung wird 40 N/mm² angenommen, was den Herstellerangaben von Du Pont bei 20°C etwa entspricht und sich auch mit den Versuchsergebnissen dieser Arbeit deckt.
Bei der Bemessung wird davon ausgegangen, dass in Deutschland die Belastung bei erhöhter Temperatur nicht der Maximalbelastung entspricht. Die maximale Windlast tritt nicht gleichzeitig mit der maximalen Temperatur auf. Die Annahme ist in anderen Ländern auf ihre Richtigkeit zu überprüfen.

5.2.4 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

Bei dem Nachweis der Gebrauchstauglichkeit geht es um die Gewährleistung von Faltenfreiheit. Hierfür wird angenommen, dass die Folie an keiner Stelle spannungslos sein darf. Um zu verhindern, dass sich die Vorspannung in der Folie auf Null abbaut, muss die plastische Verformung der Folie begrenzt werden. Plastische Verformungen können sofort bei Belastung auftreten, aber auch zeitlich verzögert. Beides muss im Nachweis berücksichtigt werden.
Für Kurzzeitbelastungen, also eine sofortige dauerhafte Verformung, ist der erste Knick in der Spannungs-Dehnungslinie eine Grenze, die offensichtlich nicht überschritten werden darf. Ab hier treten, schon ohne Berücksichtigung von zeitlich verzögerten Effekten, irreversible Dehnungen auf. Das Abflachen der Kurve beginnt bei 1,5% Dehnung und einer Spannung von etwa 15 N/mm².

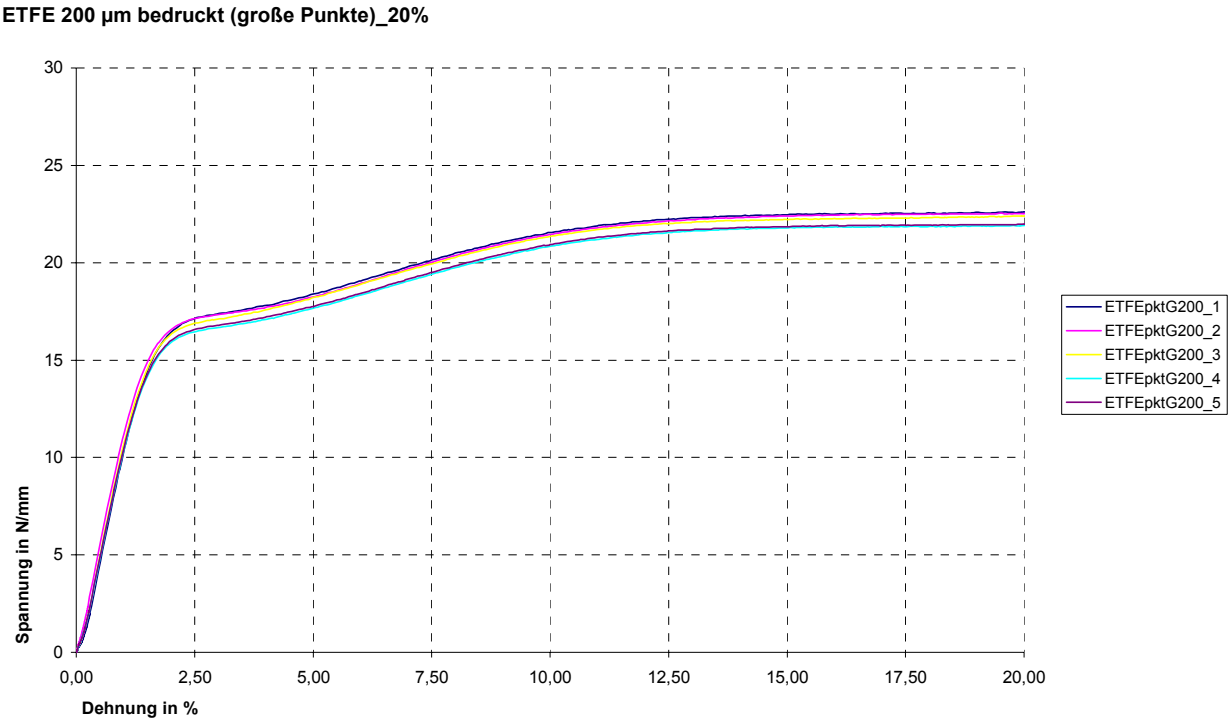


Bild 176: Spannungs- Dehnungslinie von ETFE im Bereich von 0% bis 20% Dehnung

Die maximal zulässige Spannung für den Gebrauchszustand ist also die Grenze des linearen Bereichs. Diese Grenzspannung wird im Folgenden mit der Bezeichnung f_{el} gekennzeichnet. Ein Sicherheitsfaktor, um den diese Grenze unterschritten werden muss, wird nicht angesetzt. Ein Überschreiten dieser Grenze führt nicht zum Versagen der Folie. Es kann lediglich zur Faltenbildung und der Notwendigkeit des Nachspannens führen. Es besteht also bei der Überschreitung keine Gefahr für Leib und Leben der Nutzer.
Für Langzeitbelastungen definiert das Kriech- und Relaxationsverhalten die maßgebende Grenze. Dazu müssen zunächst zwei Dinge geklärt werden:

- Wie groß dürfen Langzeitbeanspruchungen maximal sein
- Was gilt als Langzeitbeanspruchung

Bei der Beurteilung der maximal zulässigen Größe der Langzeitbelastung zeigt das Diagramm aus den Relaxationsversuchen die eindeutige Grenze.

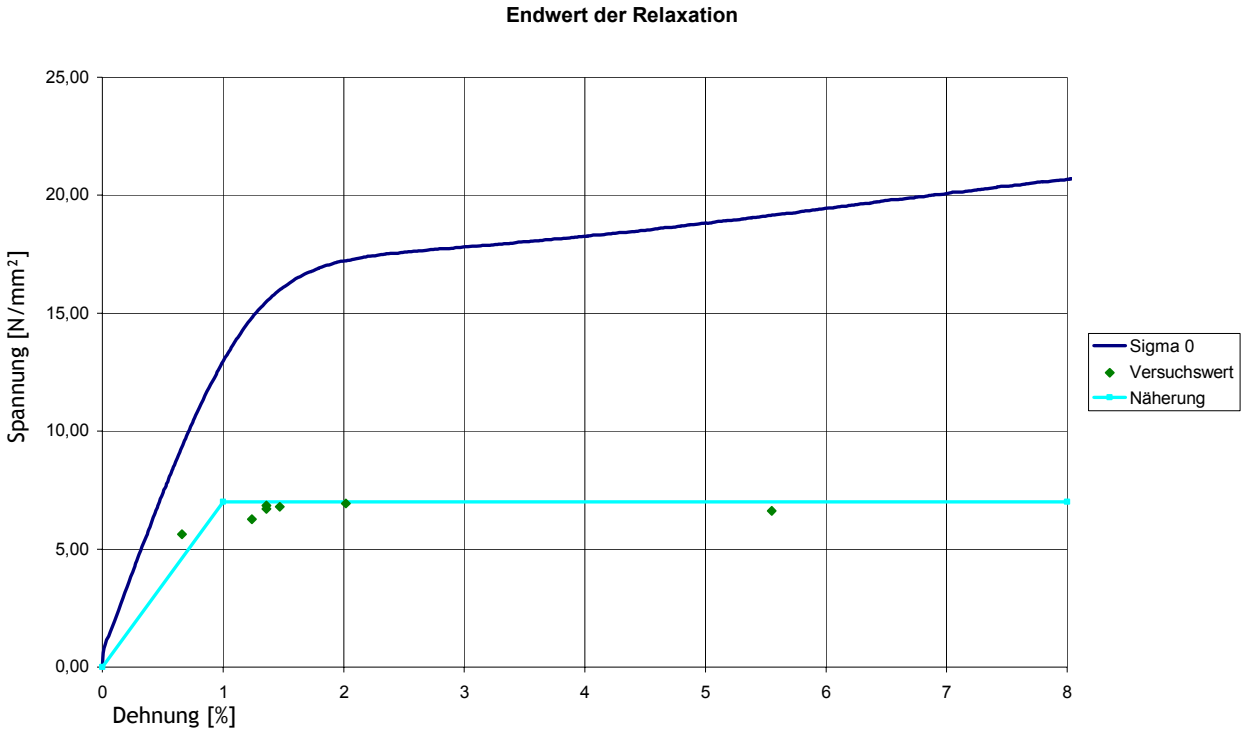


Bild 177: Spannungs- Dehnungsdiagramm für Spannung bei t=0 und t=unendlich

Die Spannungen für Langzeitbelastungen sind auf 7,0 N/mm² begrenzt. Alle Belastungen oberhalb dieser Grenze führen zum Spannungsabbau bzw. zur dauerhaften Dehnungszunahme.
Als Langzeitbelastungen gelten, nach E DIN 18204-1 für PVC beschichtete PES Membrane, Eigengewicht + Vorspannung + halbe Schneelast. Diese Annahme ist für ETFE Folien nicht ausreichend, da für Kriech- und Relaxationsprozesse das Bolzmann´sche Prinzip der Superposition gilt. (siehe Kapitel 4.4.3) Jede Last, die bei einer Aufsummierung der

Wirkungszeiträume länger als 20 Tage auf die Folie eingewirkt hat, ist als Dauerlast zu behandeln. Daraus folgt, dass auch die sehr unstetig auftretenden Windlasten, über den gesamten Lebenszyklus, von Ihren Auswirkungen her, zur Dauerlasten werden. Die Höhe der anzusetzenden Windlast hängt von der geographischen Lage, von den umgebenden Gebäuden und von der kalkulierten Lebenserwartung der Fassade ab. Je länger eine Fassade ohne Nachspannmöglichkeit gebrauchstauglich, also faltenfrei bleiben soll, umso mehr Windlasten summieren sich über die Zeit auf und umso häufiger treten auch größere Windlasten auf. Es ist also notwendig für Dauerlasten den Lastfall Eigengewicht + Vorspannung + Dauerwindlast zu untersuchen:

Die Formel für die Berechnung der Winddruckkraft in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit lautet:

$q = \frac{v^2}{1600}$ in [kN/m²] mit v in m/s [DIN1055-4]

Daraus folgt:

Beaufort	Windgeschwindigkeit		Staudruck q
	m/s	km/h	kN/m²
0	0 - <0,3	0	0
1	0,3 - <1,6	1 - 5	0
2	1,6 - <3,4	6 - 11	0,1
3	3,4 - <5,5	12 - 19	0,1 - 0,2
4	5,5 - <8,0	20 - 28	0,2 - 0,4
5	8,0 - <10,8	29 - 38	0,4 - 0,7
6	10,8 - <13,9	39 - 49	0,7 - 0,12
7	13,9 - <17,2	50 - 61	0,12 - 0,18
8	17,2 - <20,8	62 - 74	0,18 - 0,27
9	20,8 - <24,5	75 - 88	0,27 - 0,38
10	24,5 - <28,5	89 - 102	0,38 - 0,51
11	28,5 - <32,7	103 - 117	0,51 - 0,67
12	>32,7	>118	>0,67

Das temperaturabhängige Langzeitverhalten wurde in dieser Arbeit nicht untersucht, deshalb wird hier mit Annahmen gearbeitet, die sich aus den Werkstoffveränderungen aus Kurzzeitversuchen ableiten. Wie schon aus dem Nachweis der Tragfähigkeit bekannt liegt die Bruchkraft bei 20°C um den Faktor 1,24 höher als die bei 50°C. Für den Nachweis der Gebrauchtauglichkeit wird vorgeschlagen den Grenzwert von 7,0 N/mm² für Langzeitbelastungen bei erhöhter Temperatur durch 1,24 zu teilen und eine maximale Spannung von 5,6 N/mm² zuzulassen. Für Kurzzeitbeanspruchungen wird die maximale Beanspruchbarkeit von 15,0 N/mm² auf 12,1 N/mm² reduziert.

5.2.5 Zusammenfassung des Sicherheitskonzepts für ETFE

5.2.5.1. Tragfähigkeitsnachweis

Zulässige Bruchspannung:
bei kurzzeitigen Einwirkungen ohne erhöhte Temperatur:

$$f_{u,d} = \frac{f_{u,k}}{\gamma_{M,u}} \text{ mit } \gamma_{M,u} = 1{,}35$$

daraus folgt:

$$f_{u,d} = \frac{40 \frac{N}{mm^2}}{1{,}35} = 29{,}6 \frac{N}{mm^2}$$

bei kurzzeitigen Einwirkungen mit erhöhter Temperatur:

$$f_{u,d,temp} = \frac{f_{u,k}}{\gamma_{M,u,temp}} \text{ mit } \gamma_{M,u,temp} = 1{,}67$$

daraus folgt:

$$f_{u,d,temp} = \frac{40 \frac{N}{mm^2}}{1{,}67} = 24{,}0 \frac{N}{mm^2}$$

Lastfälle für Fassaden:
Bei kurzzeitigen Einwirkungen ohne erhöhte Temperatur: G+P+W
Bei kurzzeitigen Einwirkungen mit erhöhter Temperatur: G+P+W/2+T

5.2.5.2 Gebrauchstauglichkeitsnachweis

Teilsicherheitsbeiwert für Beanspruchungen:
$\gamma_F = 1{,}0$

Zulässige Spannungen:
Bei Kurzzeitbeanspruchungen ohne erhöhte Temperatur:

$$f_{el,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M,y}} \text{ mit } \gamma_{M,el} = 1{,}0$$

daraus folgt:

$$f_{y,d} = \frac{15{,}0 \frac{N}{mm^2}}{1{,}0} = 15{,}0 \frac{N}{mm^2}$$

Bei Kurzzeitbeanspruchungen mit erhöhter Temperatur:

$$f_{el,d,temp} = \frac{f_{el,k}}{\gamma_{M,el,temp}} \text{ mit } \gamma_{M,el,temp} = 1{,}24$$

daraus folgt:

$$f_{el,d,temp} = \frac{15{,}0 \frac{N}{mm^2}}{1{,}24} = 12{,}1 \frac{N}{mm^2}$$

Bei Langzeitbeanspruchungen ohne erhöhte Temperatur:

$$f_{el,d,l} = \frac{f_{el,k}}{\gamma_{M,el,l}} \text{ mit } \gamma_{M,el,l} = 2{,}14$$

daraus folgt:

$$f_{el,d,l} = \frac{15{,}0 \frac{N}{mm^2}}{2{,}14} = 7{,}0 \frac{N}{mm^2}$$

Bei Langzeitbeanspruchungen mit erhöhter Temperatur:

$$f_{el,d,l,temp} = \frac{f_{el,k}}{\gamma_{M,el,l,temp}} \text{ mit } \gamma_{M,el,l,temp} = 2{,}68$$

daraus folgt:

$$f_{el,d,l,temp} = \frac{15{,}0 \frac{N}{mm^2}}{2{,}68} = 5{,}6 \frac{N}{mm^2}$$

Lastfälle für Fassaden:

Bei Kurzzeitbeanspruchungen ohne erhöhte Temperatur:	G+P+W
Bei Kurzzeitbeanspruchungen mit erhöhter Temperatur:	G+P+W/2+T
Bei Langzeitbeanspruchungen ohne erhöhte Temperatur:	$G+P+W_{langzeit}$
Bei Langzeitbeanspruchungen mit erhöhter Temperatur:	$G+P+W_{langzeit}/2+T$

5.2.6 Materialwerte für Bemessungsprogramme

Die anzunehmenden Materialdaten, mit denen zu rechnen ist, sind:

Eigengewicht	$17\,\frac{kN}{m^3}$
Temperatur Dehnungskoeffizient	$13 \cdot 10^{-5} K^{-1}$
Querdehnzahl	0,33

Für Kurzzeitbelastungen bei +20°C gelten folgende Moduln:

E-Modul (Elastizitästmodul)	$1000\,\frac{N}{mm^2}$
G-Modul (Schubmodul)	$376\,\frac{N}{mm^2}$
K-Modul (Kompressionsmodul)	$980\,\frac{N}{mm^2}$

Für Kurzzeitbelastungen bei +50°C gelten folgende Moduln:

E-Modul	$860\,\frac{N}{mm^2}$
G-Modul	$323\,\frac{N}{mm^2}$
K-Modul	$843\,\frac{N}{mm^2}$

Für Langzeitbelastungen gelten folgende Moduln:

E-Modul	$700\,\frac{N}{mm^2}$
G-Modul	$263\,\frac{N}{mm^2}$
K-Modul	$686\,\frac{N}{mm^2}$

5.3 Bemessung von Beispielfassadenmodulen

Mit Hilfe der Bemessungsgrundlage für ETFE Folien wird jetzt eine Analyse unterschiedlicher Modulgrößen durchgeführt. In dieser Analyse werden mechanisch vorgespannte und pneumatisch vorgespannte Module untersucht. Es werden zwei verschiedene Randgeometrien untersucht, in denen jeweils mechanisch vorgespannte und pneumatisch vorgespannte Folien analysiert werden. Ziel der Analyse ist es, maximal aufnehmbare Windlasten zu ermitteln. Bei der mechanischen Vorspannung soll die Last so weit begrenzt werden, dass ein vollständiger Abbau der Vorspannung (ohne Nachspannmöglichkeit) vermieden wird. Pneumatisch vorgespannte Module werden so dimensioniert, dass keine dauerhafte Vergrößerung des Pneus auftritt.

Die Maße in der Skizze sind die Seitenverhältnisse der Module.

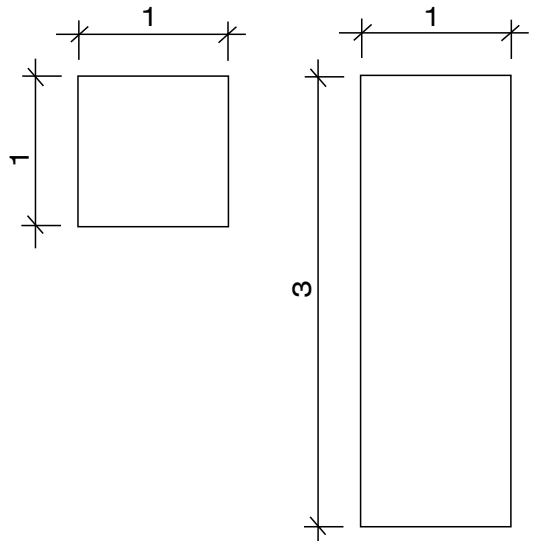


Bild 178: Modulformate für Vergleichsrechnung

Die Folie, die der Berechnung zu Grunde liegt, hat eine Stärke von 250 μm. Die mechanische Vorspannung ist so hoch gewählt, dass die Folie bei einer Temperaturerhöhung um 30K immer noch unter Spannung steht. Dafür ist, bei einem eben gespannten Modul, eine Vorspannung von 1,6 kN/m notwendig, was einer Spannung von 6,4 N/mm^2 entspricht. Bei der pneumatischen Vorspannung wird ein Kisseninnendruck von 300 Pa und ein Stich von 1/5 der kürzeren Seitenlänge gewählt.
Es werden zwei verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Zunächst werden für unterschiedliche Spannweiten die jeweils maximalen Windlasten ermittelt. In einer zweiten Untersuchung werden die verschiedenen Spannweiten mit den Lasten beansprucht, die für das „New Technology“ Projekt in Kapitel 6 ermittelt worden sind und die jeweiligen Spannungen der Lastfälle errechnet, unabhängig davon, wie die jeweilige Modulgröße in das Projekt integriert werden könnte.

Erklärung der Bezeichnungen:

MQ	mechanisch vorgespannt, quadratisch
MR	mechanisch vorgespannt, rechteckig
PQ	pneumatisch vorgespannt, quadratisch
PR	pneumatisch vorgespannt, rechteckig

Als Temperaturdifferenz wurde 30K vorgegeben. Bei dieser Temperaturdifferenz muss bei mechanischer Vorspannung schon mit 1,6 kN/m (6,4 N/mm² bei 0,25 mm dicker Folie) vorgespannt werden. Dieser Wert liegt gerade noch unterhalb der 7N/mm², die für Langzeitbelastungen nicht überschritten werden kann. Es ist also unmöglich eine größere Temperaturdifferenz ohne Faltenbildung aufzunehmen. Damit die pneumatischen und mechanischen Module vergleichbar bleiben, wurde diese maximale Temperaturdifferenz auch für die pneumatischen Module angesetzt, obwohl für diese das Problem der Faltenbildung nicht besteht und die Temperaturdifferenz somit auch größer sein könnte.

5.3.1 Mechanisch vorgespannte Module

Die Formenvielfalt von mechanisch vorgespannten Modulen ist sehr groß. Aus dem Membranbau sind die antiklastisch gekrümmten Formen bekannt. Folien haben ihre Besonderheiten, die sie vom normalen Membranbau unterscheiden. Die geringere Steifigkeit und das isotrope Materialverhalten sind besondere Merkmale von Folien im Vergleich mit Membranen. Durch die geringe Steifigkeit kommt es schnell zu großen Verformungen. Daraus folgt, dass eine eben gespannte Fläche durch die Verformung schnell eine synklastische Form annimmt, die für einen Lastabtrag geeignet ist. Diese synklastische Form hat den großen Vorteil, dass die Last in zwei Richtungen abgetragen werden kann. Die Krümmungen bei ETFE Folien dürfen nicht zu stark sein, oder müssen mit vielen, kleinen Zuschnittsstreifen ausgebildet werden. Im Membranbau wird die Krümmung der Fläche über den Zuschnitt hergestellt. Dadurch entstehen Abschnittsweise ebene Flächen, die aneinander geschweißt werden. Die Krümmung innerhalb der einzelnen, aneinander geschweißten Flächen entsteht anschließend durch das Vorspannen. Die Form, die infolge des Zuschnitts entsteht, kann bei kleinen Krümmungsradien, durch die relativ geringe Vorspannung im Folienbau, teilweise nicht ausgerundet werden. Es ist bei Folien zu empfehlen, nur mit großen Krümmungsradien zu arbeiten. Ein weiteres Problem der antiklastischen Form ist die relativ große Verformung bei äußeren Lasten. Aus dieser Verformung resultiert schon bei geringen Lasten ein vollständiger Spannungsabbau in Spannrichtung. Da die Querdehnung bisher bei ETFE Folien wesentlich zu hoch eingeschätzt wurde, wird dieser Spannungsabbau auch über diesen Einfluss nicht ausreichend abgemindert.

Aus diesen Überlegungen heraus wurde ein eben gespanntes Modul gewählt. Im Fall des quadratischen Moduls kann ein zweiaxialer Lastabtrag stattfinden. Das rechteckige Modul lässt dies nicht zu und soll einen vorwiegend einaxialen Lastabtrag darstellen, wie er bei der antiklastischen Krümmung stattfindet, ohne den Vorteil des Nachlassens der Vorspannung durch die Verkürzung der Spannrichtung.

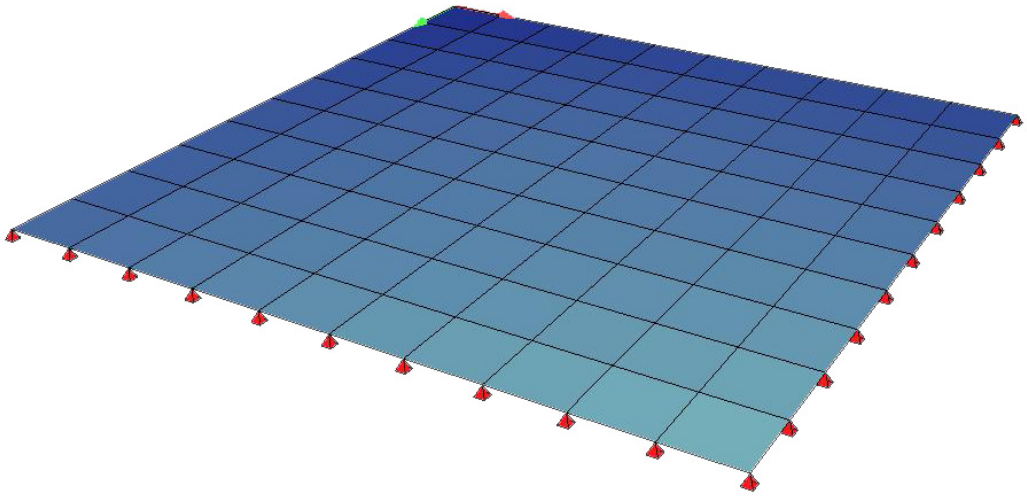


Bild 179: Mechanisch vorgespanntes, quadratisches Modul

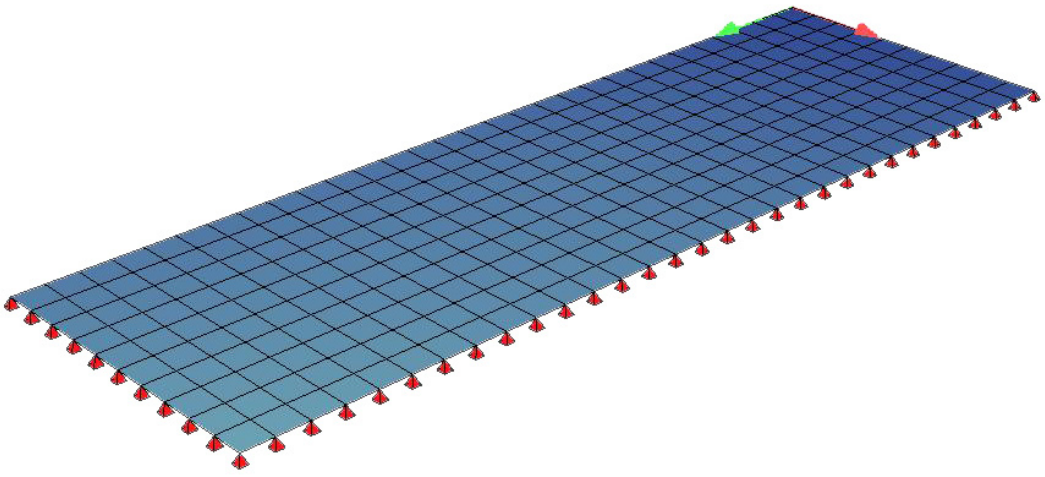


Bild 180: Mechanisch vorgespanntes, rechteckiges Modul

5.3.1.1 Ermittlung der maximal möglichen Windlast

Die folgende Tabelle zeigt die maximal aufnehmbaren Windlasten bei der jeweiligen Spannweite. Die Windlast wird so gewählt, dass sowohl die Tragfähigkeit als auch die Gebrauchstauglichkeit erfüllt ist. Alle Berechnungen wurden mit dem FEM Programm Sofistik Version 23 durchgeführt. Die Materialwerte für ETFE wurden so angenommen, wie im Kapitel „Materialwerte für Bemessungsprogramme“ angegeben.

Untersuchte Lastfälle:

Tragfähigkeit (Nachweis plastisch – plastisch)
LF11 1,35 G+1,35 P+1,5 W
LF12 1,35 G+1,35 P+1,5 W/2+T
Gebrauchstauglichkeit (Nachweis elastisch – elastisch)
LF21 G+P+W
LF22 G+P+W/2+T
LF23 G+P+W_{dauer}+T
LF24 G+P+W_{dauer}/2+T

Modultyp	Größe (kurze Seite) [m]	max. Windlast [kN/m²]	max. Dauerwindlast [kN/m²]
MQ	0,6	3,5	0,4
	0,8	2,6	0,3
	1,0	2,0	0,2
	1,2	1,7	0,2
	1,4	1,5	0,2
	1,6	1,3	0,1
	1,8	1,1	0,1
	2,0	1,0	0,1
MR	0,6	2,2	0,3
	0,8	1,7	0,2
	1,0	1,3	0,2
	1,2	1,1	0,1
	1,4	0,9	0,1
	1,6	0,8	0,1
	1,8	0,7	0,1
	2,0	0,6	0,1

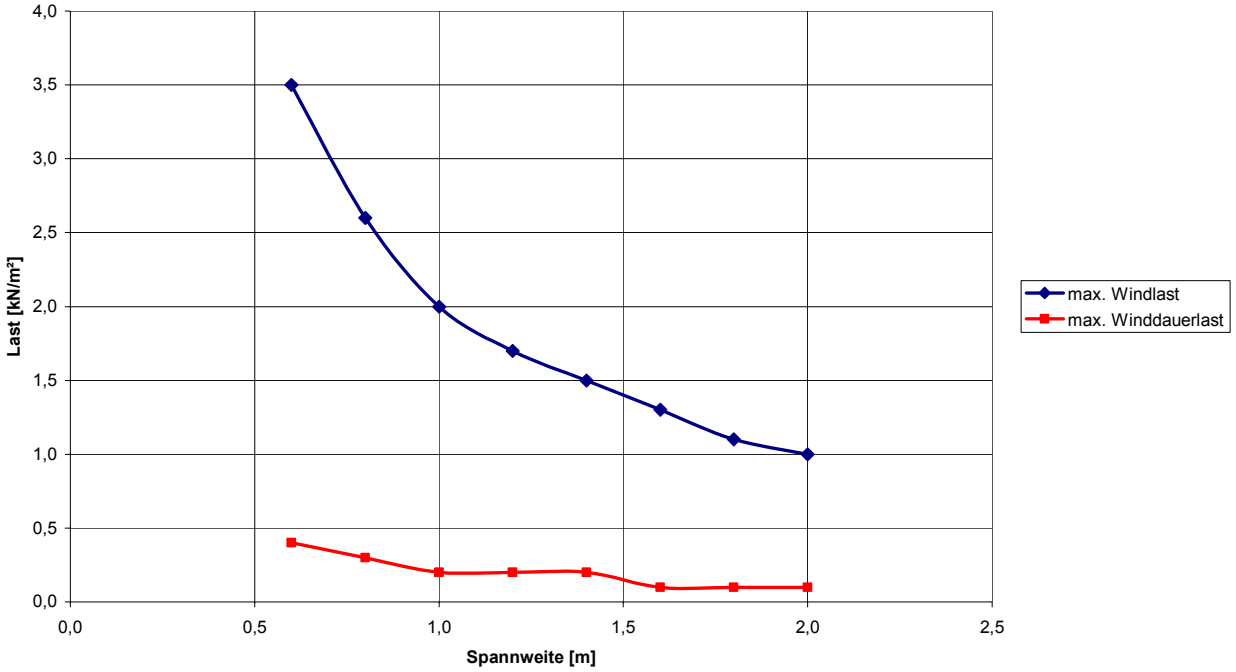


Bild 181: Maximale aufnehmbare Windlasten des mechanisch vorgespannten, quadratischen Moduls

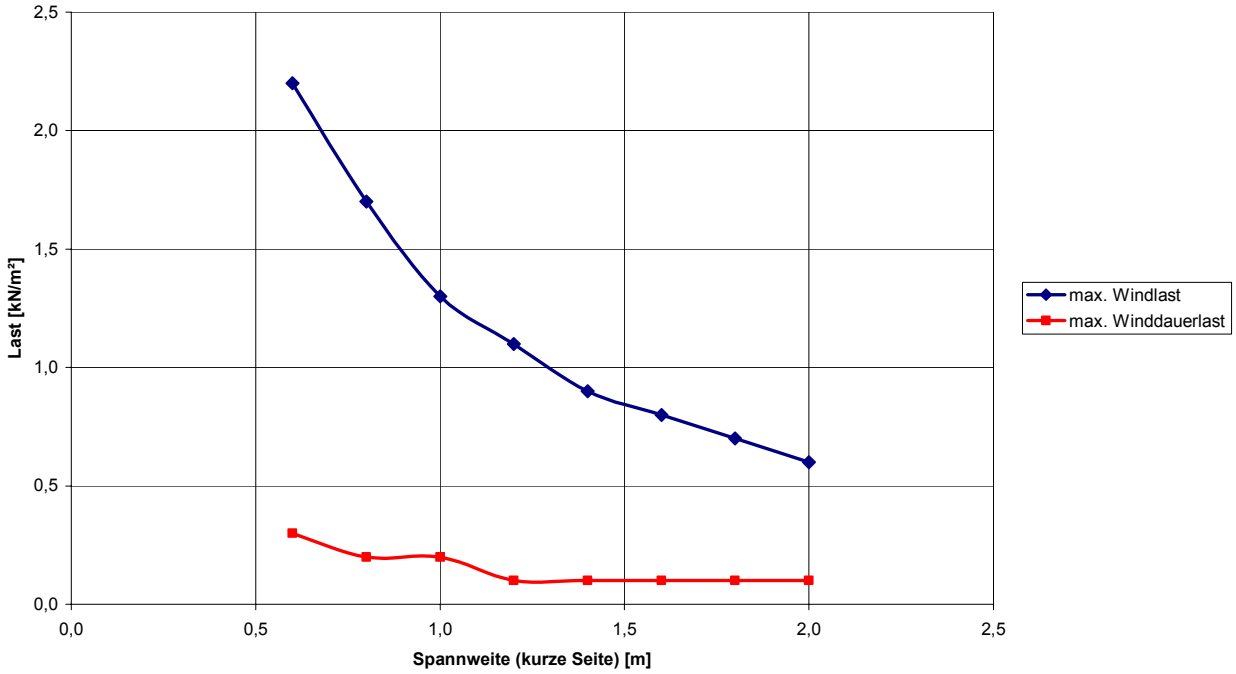


Bild 182: Maximale aufnehmbare Windlasten des mechanisch vorgespannten, rechteckigen Moduls

Die maximalen Membrankräfte in der Folie, bei den angegebenen maximalen Windlasten, sind in den folgenden beiden Tabellen angegeben.

Modultyp	Größe (kurze Seite) [m]	Tragfähigkeit		Gebrauchstauglichkeit			
		LF11 [kN/m]	LF12 [kN/m]	LF21 [kN/m]	LF22 [kN/m]	LF23 [kN/m]	LF24 [kN/m]
MQ	0,6	4,32	2,60	3,76	1,98	1,71	0,46
	0,8	4,32	2,58	3,74	1,96	1,71	0,46
	1,0	4,29	2,51	3,66	1,91	1,68	0,41
	1,2	4,31	2,54	3,70	1,94	1,71	0,46
	1,4	4,32	2,60	3,76	1,98	1,74	0,51
	1,6	4,32	2,58	3,74	1,96	1,65	0,35
	1,8	4,28	2,49	3,63	1,90	1,66	0,38
	2,0	4,29	2,51	3,66	1,91	1,68	0,41
MR	0,6	4,31	2,23	3,44	1,70	1,73	0,45
	0,8	4,31	2,28	3,50	1,74	1,70	0,41
	1,0	4,30	2,21	3,42	1,68	1,75	0,48
	1,2	4,31	2,23	3,44	1,70	1,66	0,34
	1,4	4,29	2,17	3,36	1,65	1,68	0,38
	1,6	4,30	2,19	3,39	1,72	1,70	0,41
	1,8	4,29	2,17	3,36	1,65	1,73	0,45
	2,0	4,27	2,10	3,28	1,48	1,75	0,48
zul. F		7,40	6,00	3,80	3,00	1,75	1,40

Die Auswertung zeigt, dass die Gebrauchstauglichkeit die maßgebende Beschränkung der Spannweiten darstellt, während die Tragfähigkeit maximal zu 58% ausgenutzt wird. Die maximale Dauerwindlast ist bei mechanisch vorgespannten Modulen sehr gering. Wenn das Gebäude nicht gerade an einem sehr windgeschützten Standort errichtet wird, ist eine Nachspannvorrichtung unbedingt notwendig.

5.3.1.2 Ermittlung der Membrankräfte infolge der Lasten aus dem „New Technology" Projekt

Untersuchte Lastfälle:

Tragfähigkeit	LF11	1,35 G+1,35 P+1,5 W_D
	LF12	1,35 G+1,35 P+1,5 W_S
	LF13	1,35 G+1,35 P+1,5 W_D/2+T
	LF14	1,35 G+1,35 P+1,5 W_S/2+T
Gebrauchstauglichkeit	LF21	G+P+W_D
	LF22	G+P+W_S
	LF23	G+P+W_D/2+T
	LF24	G+P+W_S/2+T
	LF25	G+P+W_{Ddauer}
	LF26	G+P+W_{Sdauer}
	LF27	G+P+W_{Ddauer}/2+T
	LF28	G+P+W_{Sdauer}/2+T

W_S = -0,79 kN/m²
W_{Ddauer} = 0,21 kN/m²
W_{Sdauer} = -0,33 kN/m²
T = 20 K
(Herleitung siehe Kapitel 6.7 „Bemessung New Technology Modul")

Im „New Technology" Projekt wird die halbe maximale Windlast als Dauerlast angesetzt, was einer mittleren Windstärke 4 entspricht.
In den folgenden Tabellen sind die maximalen Membrankräfte dargestellt.

Modultyp	Größe (kurze Seite) [m]	Tragfähigkeit			
		LF11 [kN/m]	LF12 [kN/m]	LF13 [kN/m]	LF14 [kN/m]
MQ	0,6	2,45	2,76	0,81	1,10
	0,8	2,62	3,06	0,99	1,34
	1,0	2,81	3,36	1,14	1,55
	1,2	3,00	3,65	1,29	1,76
	1,4	3,19	3,94	1,43	1,95
	1,6	3,38	4,20	1,57	2,13
	1,8	3,56	4,27	1,70	2,31
	2,0	3,75	4,28	1,82	2,48
MR	0,6	2,68	3,13	0,95	1,30
	0,8	2,95	3,55	1,17	1,59
	1,0	3,20	3,92	1,34	1,83
	1,2	3,45	4,26	1,52	2,07
	1,4	3,70	4,31	1,69	2,29
	1,6	3,94	4,33	1,84	2,51
	1,8	4,18	4,33	2,00	2,72
	2,0	4,29	4,39	2,14	2,92
zul. F		7,40	7,40	6,00	6,00

Modul-typ	Größe (kurze Seite) [m]	Gebrauchstauglichkeit							
		LF21 [kN/m]	LF22 [kN/m]	LF23 [kN/m]	LF24 [kN/m]	LF25 [kN/m]	LF26 [kN/m]	LF27 [kN/m]	LF28 [kN/m]
MQ	0,6	1,83	2,07	0,62	0,84	1,67	1,75	0,39	0,53
	0,8	1,97	2,30	0,75	1,02	1,71	1,85	0,47	0,64
	1,0	2,11	2,53	0,87	1,18	1,77	1,96	0,55	0,75
	1,2	2,26	2,76	0,99	1,34	1,83	2,07	0,62	0,84
	1,4	2,40	2,98	1,09	1,48	1,90	2,19	0,69	0,93
	1,6	2,55	3,20	1,19	1,62	1,97	2,30	0,75	1,02
	1,8	2,69	3,41	1,29	1,76	2,04	2,42	0,81	1,10
	2,0	2,83	3,61	1,39	1,89	2,11	2,53	0,87	1,18
MR	0,6	2,01	2,36	0,73	0,99	1,73	1,89	0,46	0,62
	0,8	2,22	2,68	0,90	1,21	1,82	2,05	0,56	0,76
	1,0	2,41	2,96	1,02	1,39	1,91	2,20	0,64	0,88
	1,2	2,60	3,24	1,16	1,57	2,01	2,36	0,73	0,99
	1,4	2,79	3,52	1,28	1,75	2,11	2,51	0,81	1,10
	1,6	2,98	3,78	1,40	1,91	2,21	2,66	0,82	1,20
	1,8	3,16	4,02	1,52	2,07	2,31	2,81	0,95	1,30
	2,0	3,33	4,28	1,63	2,22	2,41	2,96	1,02	1,39
zul F.		3,80	3,80	3,00	3,00	1,75	1,75	1,40	1,40

Aus den Lasten des „New Technology“ Projektes resultiert eindeutig für die mechanisch vorgespannten Module die Notwendigkeit einer Nachspannvorrichtung. Schon bei Spannweiten unter 1,0m treten Dauerwindlasten auf, die die Vorspannung vollständig abbauen können.

Je weiter man die maximal mögliche Spannung überschreitet, umso größer muss der Weg sein, den die Nachspannmöglichkeit bietet, um das System wieder zu straffen.

Es wird also bei mechanisch vorgespannten Modulen, auch mit Nachspannvorrichtung, nur eine begrenzte Lebenserwartung der Folie geben, weil der Nachspannweg nicht unbegrenzt vorgesehen werden kann.

5.3.2 Pneumatisch vorgespannte Module

Für die pneumatisch vorgespannten Module wird die gleiche Randgeometrie gewählt. Dadurch wird auch hier der zweiaxiale Lastabtrag bei der quadratischen Geometrie untersucht und der vorwiegend einaxiale Lastabtrag bei der rechteckigen Geometrie. Außerdem sind die Ergebnisse so am besten miteinander zu vergleichen und die Vorteile einer pneumatischen Konstruktion werden sehr deutlich.

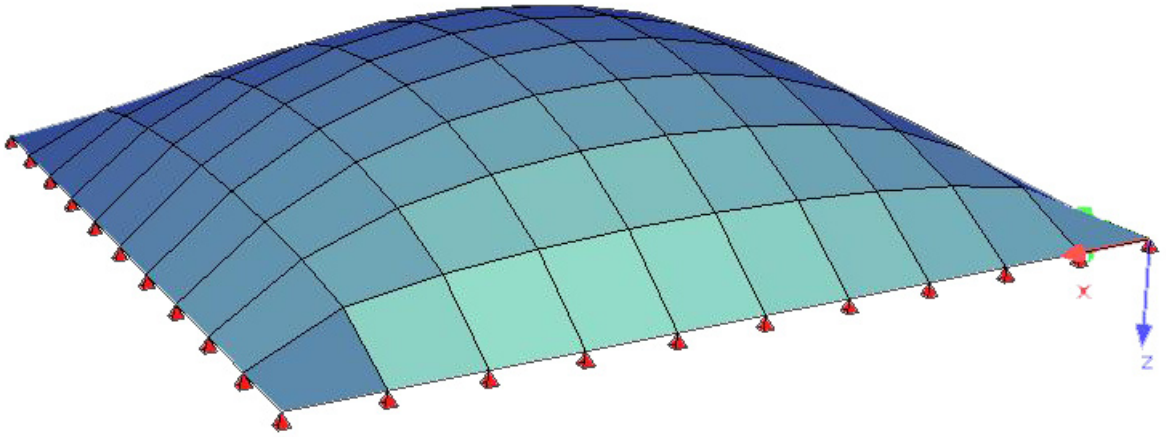


Bild 183: Pneumatisch vorgespanntes, quadratisches Modul

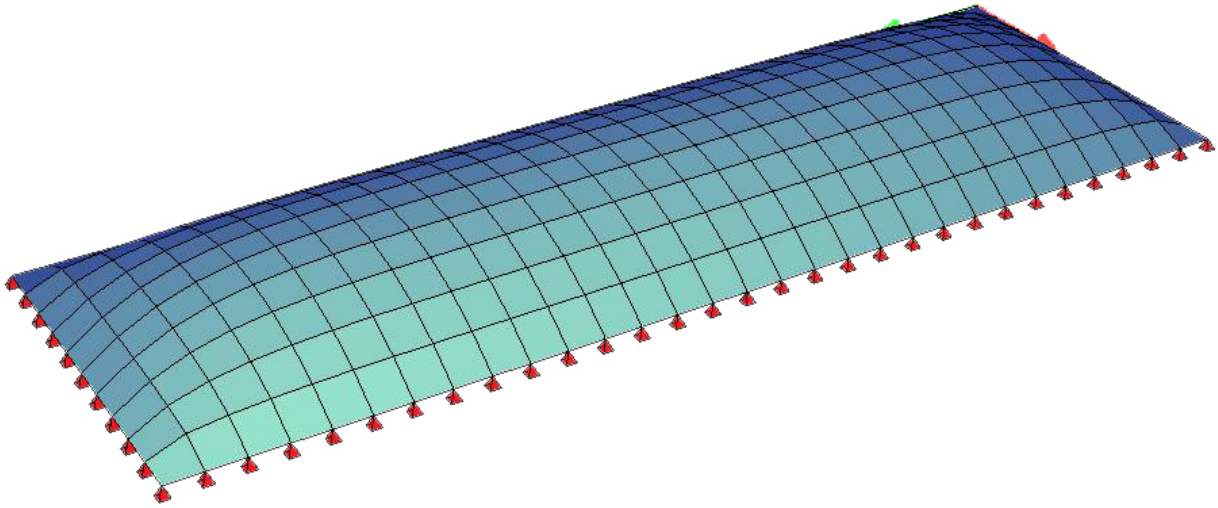


Bild 184: Pneumatisch vorgespanntes, rechteckiges Modul

5.3.2.1 Ermittlung der maximal möglichen Windlast

Untersuchte Lastfälle:

LF11 1,35 G+1,35 P+1,5 W
LF12 1,35 G+1,35 P+1,5 W/2+T
LF21 G+P+W
LF22 G+P+W/2+T
LF23 G+P+W_{dauer}+T
LF24 G+P+W_{dauer}/2+T

Modultyp	Größe (kurze Seite)	max. Windlast [kN/m²]	max. Dauerwindlast [kN/m²]
PQ	1,0	6,3	2,7
	1,5	4,1	1,7
	2,0	3,0	1,2
	2,5	2,3	0,9
	3,0	1,9	0,7
	3,5	1,6	0,5
	4,0	1,3	0,4
	4,5	1,1	0,3
	5,0	1,0	0,3
	5,5	0,9	0,2
	6,0	0,8	0,2
	6,5	0,7	0,1
	7,0	0,6	-
PR	1,0	4,4	1,8
	1,5	2,8	1,1
	2,0	2,0	0,7
	2,5	1,6	0,5
	3,0	1,2	0,4
	3,5	1,0	0,3
	4,0	0,8	0,2
	4,5	0,7	0,1
	5,0	0,6	-
	5,5	0,5	-
	6,0	0,4	-

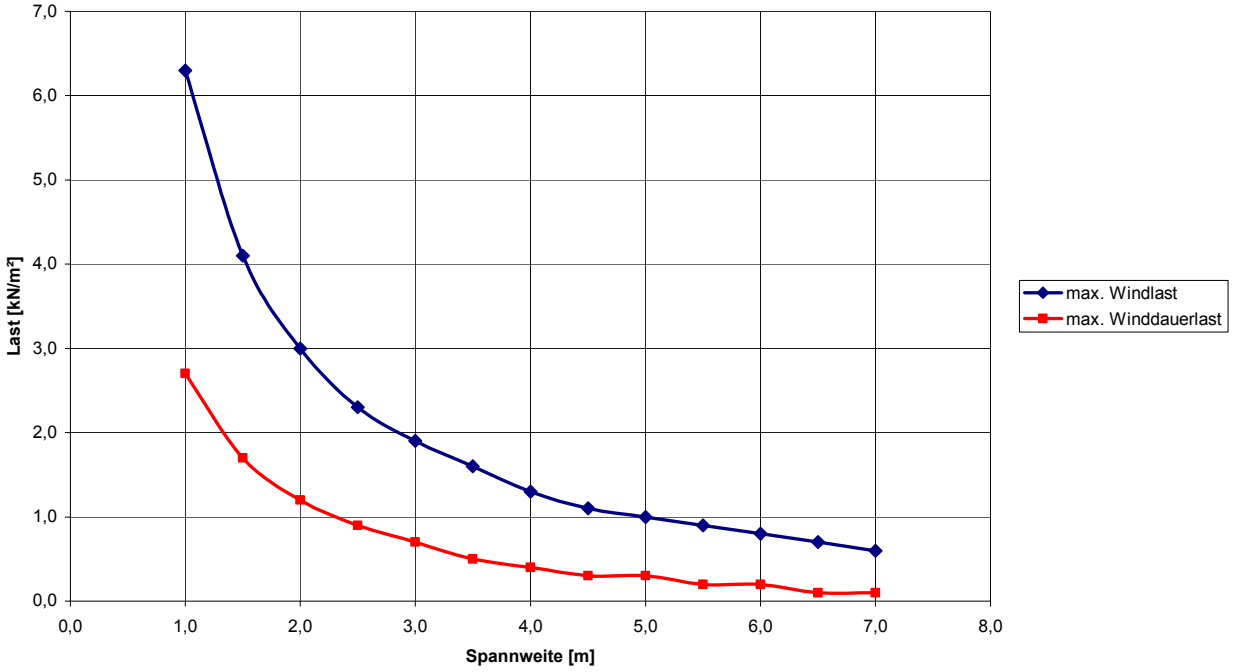


Bild 185: Maximale aufnehmbare Windlasten des pneumatisch vorgespannten, quadratischen Moduls

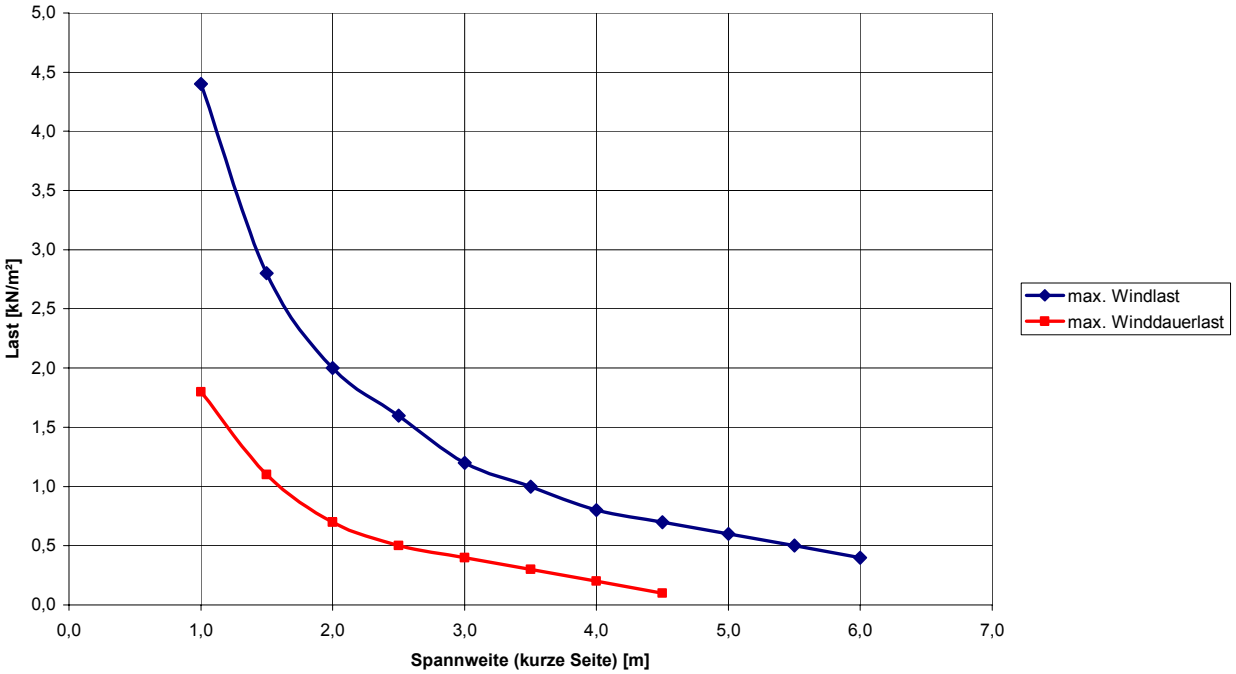


Bild 186: Maximale aufnehmbare Windlasten des pneumatisch vorgespannten, rechteckigen Moduls

Die maximalen Kräfte in der Folie bei den angegebenen maximalen Windlasten sind in den folgenden beiden Tabellen angegeben.

Modultyp	Größe (kurze Seite) [m]	Tragfähigkeit		Gebrauchstauglichkeit			
		LF11 [kN/m]	LF12 [kN/m]	LF21 [kN/m]	LF22 [kN/m]	LF23 [kN/m]	LF24 [kN/m]
PQ	1,0	4,30	2,93	3,75	1,99	1,75	0,97
	1,5	4,30	2,97	3,75	2,03	1,74	1,01
	2,0	4,30	3,03	3,75	2,08	1,75	1,06
	2,5	4,32	3,03	3,69	2,09	1,74	1,10
	3,0	4,30	3,13	3,76	2,17	1,75	1,14
	3,5	4,30	3,20	3,78	2,22	1,63	1,13
	4,0	4,41	3,14	3,64	2,19	1,63	1,17
	4,5	4,40	3,15	3,59	2,20	1,57	1,18
	5,0	4,37	3,28	3,69	2,30	1,74	1,31
	5,5	4,31	3,37	3,75	2,37	1,60	1,28
	6,0	4,32	3,41	3,75	2,41	1,74	1,39
	6,5	4,40	3,41	3,68	2,41	1,50	1,32
	7,0	4,31	3,36	3,55	2,39	1,61	1,41
PR	1,0	4,50	2,96	3,74	2,02	1,71	0,98
	1,5	4,37	3,00	3,70	2,06	1,71	1,04
	2,0	4,33	3,04	3,66	2,10	1,63	1,06
	2,5	4,52	3,19	3,78	2,22	1,63	1,12
	3,0	4,32	3,12	3,59	2,18	1,71	1,22
	3,5	4,31	3,22	3,63	2,25	1,71	1,28
	4,0	4,32	3,20	3,51	2,25	1,63	1,30
	4,5	4,31	3,33	3,59	2,35	1,47	1,28
	5,0	4,31	3,39	3,59	2,41	1,63	1,43
	5,5	4,38	3,43	-	-	-	-
	6,0	4,31	3,36	-	-	-	-
zul. F		7,40	6,00	3,80	3,00	1,75	1,40

Auch bei der pneumatischen Vorspannung ist, wie erwartet, die Gebrauchstauglichkeit der begrenzende Faktor. Die Überschreitung der angegebenen Höchstwerte ist hier unproblematischer als bei der mechanischen Vorspannung, da die Vorspannung durch den Luftdruck konstant bleibt und keine Falten entstehen. Die zusätzliche Dehnung des Kissens erfolgt in der Regel zur Gebäudeaußenseite, da auf dieser Seite der Windsog angreift. Wenn keine angrenzenden Bauteile diese Ausdehnung behindern, ist diese Überlastung unkritisch.

5.3.2.2 Ermittlung der Membrankräfte infolge der Lasten aus dem „New Technology" Projekt

Lastfälle:

Tragfähigkeit	LF11	1,35 G+1,35 P+1,5 W_S
	LF12	1,35 G+1,35 P+1,5 W_S/2+T
Gebrauchstauglichkeit	LF21	G+P+W_S
	LF22	G+P+W_S/2+T
	LF23	G+P+W_{Sdauer}
	LF24	G+P+W_{Sdauer}/2+T

Der Winddruck wird deshalb in den Lastfällen nicht berücksichtigt, weil er für die Folie keine Spannungserhöhung darstellt, sondern eine Entspannung. In den folgenden Tabellen sind wieder die maximal auftretenden Membrankräfte aufgelistet.

Modultyp	Größe (kurze Seite) [m]	Tragfähigkeit		Gebrauchstauglichkeit			
		LF11 [kN/m]	LF12 [kN/m]	LF21 [kN/m]	LF22 [kN/m]	LF23 [kN/m]	LF24 [kN/m]
PQ	1,0	1,10	0,68	0,76	0,48	0,48	0,33
	1,5	1,60	0,99	1,12	0,70	0,70	0,49
	2,0	2,10	1,31	1,47	0,92	0,92	0,65
	2,5	2,59	1,61	1,81	1,14	1,14	0,80
	3,0	3,06	1,91	2,14	1,35	1,35	0,95
	3,5	3,54	2,22	2,49	1,57	1,57	1,11
	4,0	4,01	2,52	2,81	1,78	1,80	1,26
	4,5	4,32	2,81	3,14	1,99	2,01	1,41
	5,0	4,36	3,10	3,46	2,20	2,20	1,56
	5,5	4,51	3,39	3,78	2,40	2,40	1,70
	6,0	4,45	3,67	4,10	2,61	2,64	1,85
PR	1,0	1,42	0,88	0,98	0,62	0,62	0,43
	1,5	2,10	1,31	1,45	0,92	0,92	0,65
	2,0	2,77	1,73	1,92	1,21	1,21	0,86
	2,5	3,44	2,15	2,39	1,51	1,51	1,07
	3,0	4,08	2,55	2,84	1,80	1,80	1,27
	3,5	4,32	2,96	3,29	2,09	2,09	1,48
	4,0	4,37	3,36	3,74	2,37	2,37	1,69
	4,5	4,44	3,76	4,18	2,66	2,66	1,89
	5,0	4,37	4,17	4,31	2,95	2,95	2,10
	5,5	4,56	4,34	4,33	3,22	3,22	2,29
	6,0	4,85	4,40	4,51	3,50	3,50	2,50
zul. F		7,40	6,00	3,80	3,00	1,75	1,40

5.3.3 Vergleich pneumatischer und mechanischer Vorspannung

Zum Vergleich der beiden Vorspannmethoden wird die Untersuchung der maximalen Windbelastung herangezogen.

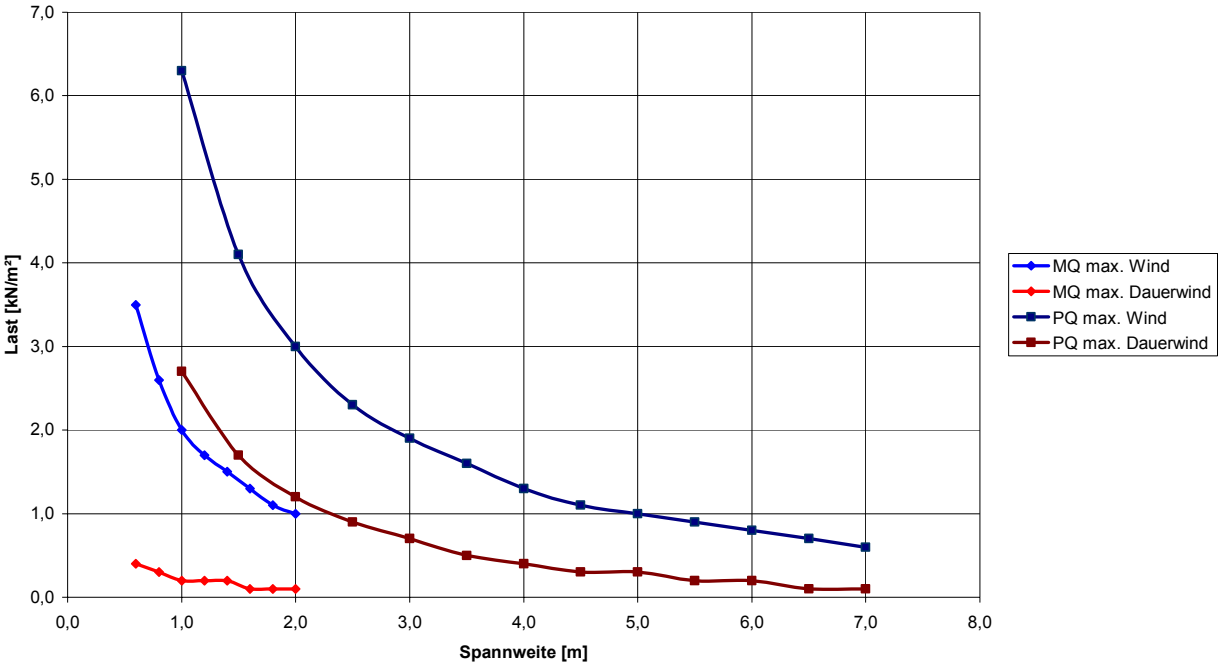


Bild 187: Vergleich der maximal aufnehmbaren Windlasten des mechanisch und des pneumatisch vorgespannten, quadratischen Moduls

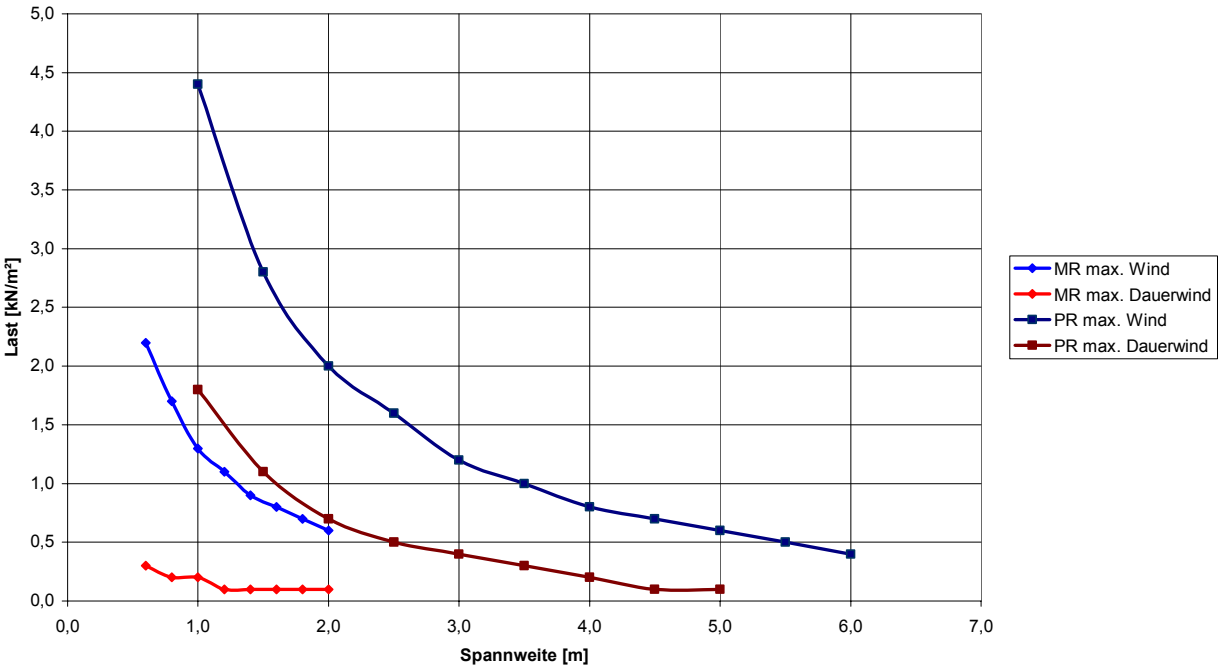


Bild 188: Vergleich der maximal aufnehmbaren Windlasten des mechanisch und des pneumatisch vorgespannten, rechteckigen Moduls

Der direkte Vergleich zeigt deutlich die Unterlegenheit der mechanischen Vorspannung gegenüber der pneumatischen.

5.3.4 Ergebnisbewertung der Beispielfassadenmodule

Bei keinem der Module besteht unter der angegebenen Last eine Bruchgefahr. Spätestens wenn die Spannung von 15 N/mm ² überschritten wird, kommt es zu großen Verformungen und nur noch zu einem unwesentlichen Anstieg der Spannung in der Folie. Die Folie weicht der Last quasi aus.
Wird die angegebene Maximallast der Gebrauchstauglichkeit überschritten, muss bei der mechanisch vorgespannten Folie ein Nachspannmechanismus vorgesehen werden. Bei der pneumatischen Konstruktion wird, bei einer Überschreitung der angegebenen Werte, der Stich zunehmen. Durch die Vergrößerung reduzieren sich die Lasten bei einem Lastangriff. Das Kissen wird somit belastbarer. Diese Vergrößerung wird solange stattfinden, bis keine Lasten über 7N/mm² auftreten. Sollte dies nie der Fall sein, wird es immer weiter anwachsen, bis es aus ästhetischen Gründen oder weil es an angrenzende Bauteile anstößt, ausgetauscht werden muss.
Die Möglichkeiten mit mechanisch vorgespannten Konstruktionen zu arbeiten, sind stark eingeschränkt. Diese Einschränkung hat zwei Gründe. Der erste Grund ist die niedrige Spannungsgrenze für Dauerlasten. Der Zweite ist die extreme Temperaturdehnung mit einem Temperaturausdehnungskoeffizienten von α_T = 0,00013 K^{-1} . Um die angenommene Temperaturdifferenz von 30K zu überspannen, ist bei 20°C eine Vorspannung notwendig, die mit 6,4 N/mm² schon sehr nahe an der Grenze für die maximal zulässige Dauerlast von 7 N/mm² heranreicht. Eine Überschreitung der in der Tabelle aufgeführten Lasten führt also, vor allem bei hohen Temperaturen, sehr schnell zu einem vollständigen Abbau der Vorspannung.
Pneumatische Konstruktionen bauen bei Temperaturerhöhung ihre Vorspannung nicht ab, da eine permanente Luftversorgung die Volumenvergrößerung sofort ausgleicht. Auch Überlastungen, die dauerhafte Dehnungen hinterlassen, führen nicht unmittelbar zu einem optisch wahrnehmbaren Mangel.
Die Vorspannart und die Nachspannmöglichkeiten spielen also die entscheidende Rolle für die Dauerhaftigkeit einer ETFE Konstruktion.
Die Untersuchung hat ergeben, dass der maßgebende Lastfall die Dauerwindbeanspruchung ohne erhöhte Temperatur darstellt. Die erhöhte Temperatur spielt hier deshalb keine entscheidende Rolle, weil im dem hier verwendeten Bemessungskonzept davon ausgegangen wird, dass nur die halbe Windlast bei maximaler Temperatur angreift. Dies kann beispielsweise in Wüstenregionen eine unzutreffende Annahme sein und müsste dann an die Standortbedingungen angepasst werden. Es ist aber in ariden und semiariden Regionen prinzipiell davon abzuraten, mechanisch vorgespannte Systeme zu verwenden. Der Gewächshausbau kann von diesem Grundsatz ausgenommen werden, da hier die ästhetischen Anforderungen an eine faltenfreie Folie deutlich im Hintergrund stehen.
Die Dauerhaftigkeit der Folie hängt also maßgeblich von der richtigen Einschätzung der Windverhältnisse, zur Berechnung der anzunehmenden Winddauerlast, des jeweiligen

Standortes ab. Die Höhe der Vorspannung bei mechanisch vorgespannten Systemen kann beim Einbau nicht zu hoch ausgeführt werden. Sie wird ohnehin durch Relaxation wieder auf maximal 7 N/mm² zurück gehen und durch äußere Lasten noch weiter abgebaut werden. Eine nennenswerte Veränderung der Materialeigenschaften tritt durch ein Überspannen nicht ein. Das E-Modul für Kurzzeitbelastungen nimmt nur leicht ab, wie in den biaxialen Zugversuchen zu sehen war. Außerdem findet der Spannungsabbau sehr schnell statt, wie die Relaxationsversuche gezeigt haben.

6 Praxisprojekt „New Technology” Bürogebäude in Teheran

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Young Cities – New Towns“, gefördert vom BMBF, war es die Aufgabe, ein zweigeschossiges Bürogebäude in Teheran zu planen und zu bauen. Dieses Bürogebäude sollte sich durch eine innovative Fassadentechnologie, moderne Methoden der Klimatisierung unter Verwendung regenerativer Energien und eine hohe Erdbebensicherheit auszeichnen. Das Gebäude war zunächst als Experimentalgebäude gedacht, dass mit Messsensoren bestückt werden sollte, um die klimatischen und energetischen Qualitäten zu überprüfen. Im Laufe der Planung entschied der Bauherr, das Gebäude nicht nur zu Testzwecken zu errichten, sondern auch als Gebäude für Büronutzung und Konferenzen zu nutzen.

6.1 Entwurfsgrundlagen

Das Gebäude sollte auf dem Gelände des Building and Housing Research Centers (BHRC) aufgestellt werden. Das liegt am nördlichen Rand Teherans in unmittelbarer Nähe zum neuen Wahrzeichen der Stadt, dem Fernsehturm. Es steht auf einem Hügel und ist weithin sichtbar. Es ist somit als Aushängeschild für das BHRC zu verstehen, womit sich der schlichte Bau eines Experimentalgebäudes verbietet, da sowohl der Nutzer als auch der Betrachter die Institution BHRC mit diesem Gebäude in Verbindung bringen wird. Die Grundfläche sollte ursprünglich 250m² betragen und wurde im Laufe des Entwurfsprozesses auf 350m² vergrößert. Behindertengerechtes Planen ist seit dem Irakkrieg (1982-1988) im Iran ein wichtiger Faktor, da in jeder größeren Einrichtung Rollstuhlfahrer angestellt sind. Das Gebäude ist als Prototyp zu verstehen, der Konstruktions- und Bauweisen verwendet, die teilweise auch außerhalb der besonderen Bedingungen im BHRC anwendbar sind. Zum großen Teil sind es aber Produkte und Bauweisen, die in der iranischen Bauwirtschaft nicht bekannt sind und somit auch nur unter Anleitung, bzw. nach Schulung, verbaut werden können. Als Prototyp sollte der Grundriss auch die Möglichkeit bieten, das Gebäude beliebig oft aneinander zu reihen und übereinander zu stapeln, um Gebäude mit größeren Grundflächen und/oder mehr Geschossen zu bauen.

6.2 Entwurf

Der erstellte Entwurf sieht eine Grundfläche von 13,75m x 25,00 m vor. Um eine flexible Nutzung zu gewährleisten, gibt es zwei stützenfreie Bereiche von 10,00 m x 13,50 m die durch den Erschließungskern voneinander getrennt sind. In diesem Funktionskern sind Sanitärbereich, Teeküche, Fahrstuhl und Treppenhaus angeordnet. Die Erschließung innerhalb eines Geschosses funktioniert über einen mittleren Gang entlang der Längsachse

des Gebäudes. Dieser Gang ist ganz im Sinne der maximalen Flexibilität nur durch einen Wechsel im Fußbodenbelag zu erkennen. Nur bei der Anordnung von Einzelbüros ergibt sich ein Gang im klassischen Sinn. Diese mittlere Erschließungsachse drückt sich auch durch die Fassadengestaltung an der Ost- und Westfassade aus. Die mit opaken Fassadenpaneelen versehende Ost- und Westseite des Gebäudes wird auf einer Breite von 3,75 m von einer Verglasung unterbrochen, was der Breite des Erschließungsbereichs entspricht. Hier befindet sich auch der Eingang zum Gebäude. Die Nord- und Südfassade sind als transparente Doppelfassade ausgeführt. Nur im Bereich des Funktionskerns sind opake Fassadenpaneele angeordnet.

Die Fassade des Gebäudes sollte den innovativen Charakter unterstreichen. Aus diesem Grund wurde eine Doppelfassade aus Folien gewählt. Die Formensprache des konstruktiven Folienbaus passt zu dem innovativen Charakter und bringt konstruktive und bauphysikalische Vorteile mit sich. Da ein Gebäude nicht über den Bauherren hinweg, sondern nur mit ihm gebaut werden kann, musste die ursprüngliche Idee einer reinen Folienfassade aufgegeben werden. Stattdessen wurde eine Glas-Folienkonstruktion gewählt, um nach innen ein eher konservatives Fassadenbild zu erreichen, nach außen hingegen die Formensprache des konstruktiven Folienbaus abzubilden.

Bild 189: „New Technology“ Bürogebäude in Teheran (Bild von Dipl. Ing. Philipp Derksen)

Außerdem musste natürlich berücksichtigt werden, dass in heißen Ländern eine vollständig transparente Fassade für ein zukunftweisendes Haus schwer vorstellbar ist, da die benötigten Energien zur Klimatisierung kaum unseren modernen Vorstellungen von Emissionsreduzierungen, Umwelt- und Klimaschutz entsprechen. Simulationen einer voll verglasten Außenhaut haben ergeben, dass die solare Strahlung im Januar ausreicht, bei Temperaturen zwischen 0°C und 10°C, das Gebäude auf über 40°C aufzuheizen. Es ist offensichtlich, dass ein Gebäude, das schon im Winter nicht ohne Klimaanlage auskommt im Sommerfall Innentraumtemperaturen aufweist, die nicht auf ein erträgliches Maß durch Klimaanlagen zu konditionieren sind. Aus diesem Grund sind die Ost- und Westfassade weitestgehend mit opaken Paneelen ausgestattet und auch im Kernbereich der Süd- und Nordfassade sind opake Paneele angeordnet.

Bild 190: Innenansicht des „New Technology“ Bürogebäudes (Bild von Dipl. Ing. Philipp Derksen)

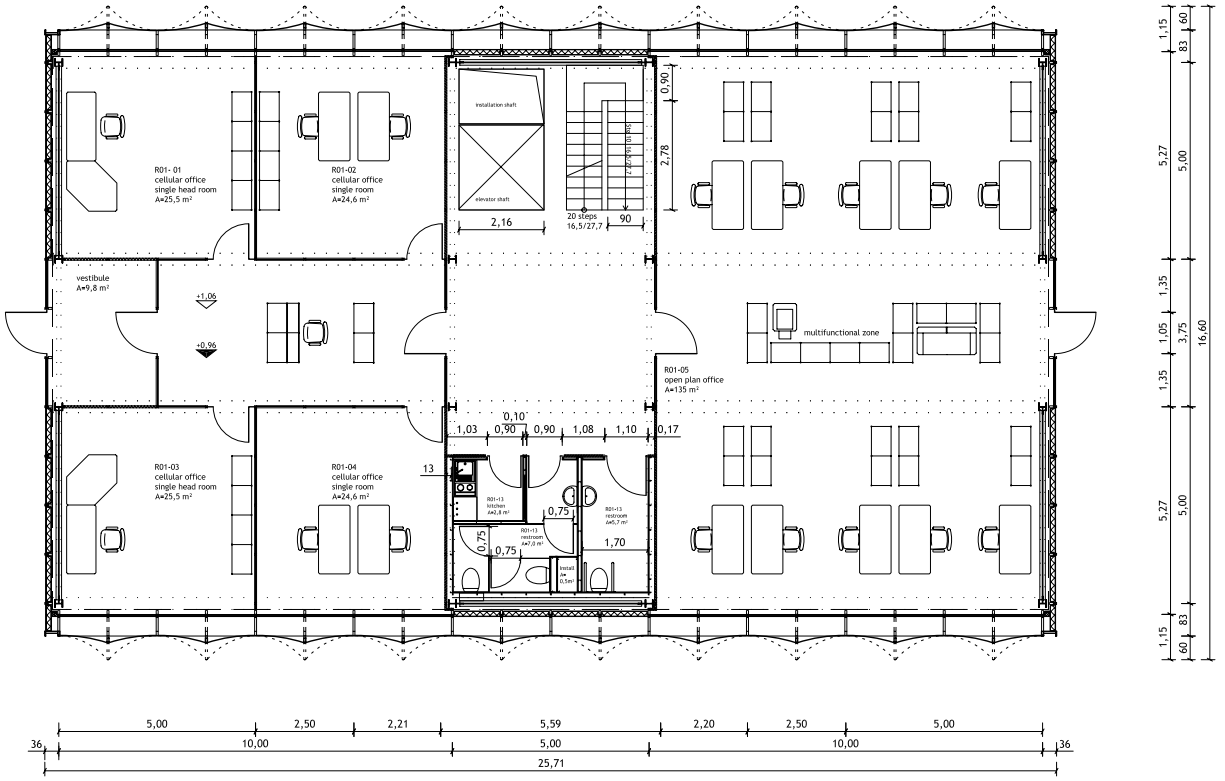


Bild 191: Grundriss Erdgeschoss des „New Technology“ Bürogebäudes

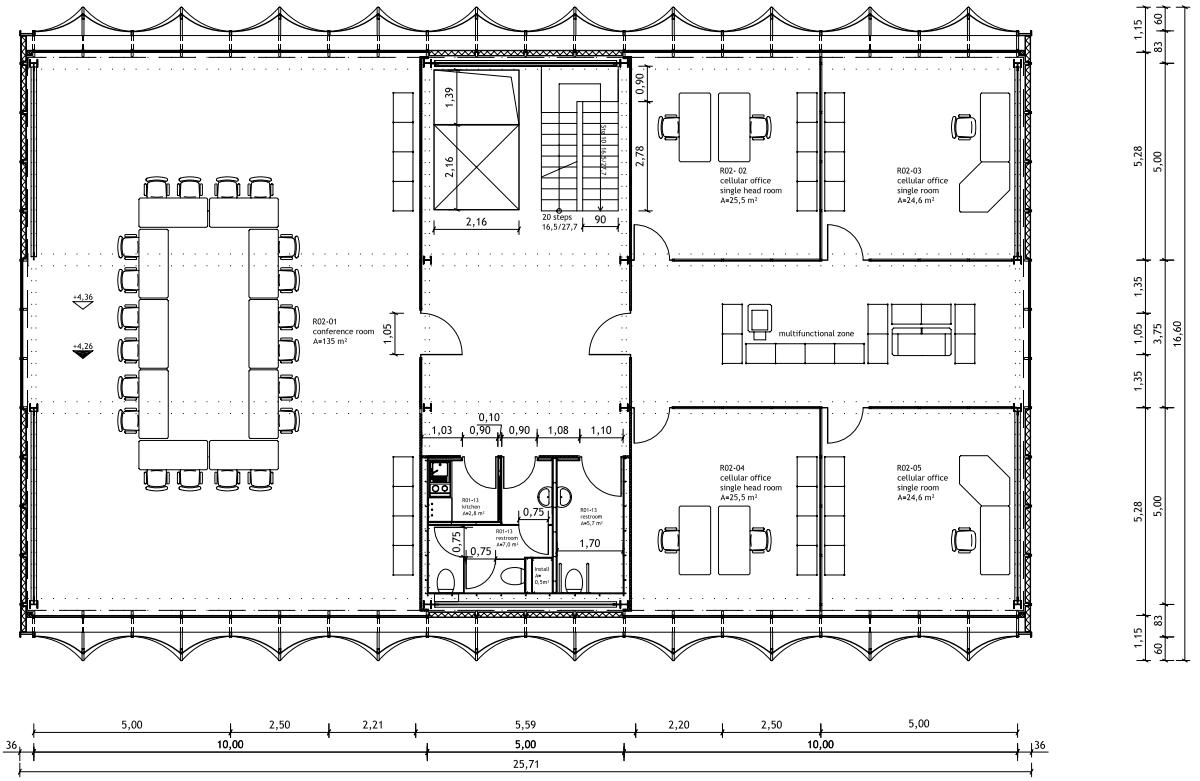


Bild 192: Grundriss 1. OG des „New Technology“ Bürogebäudes

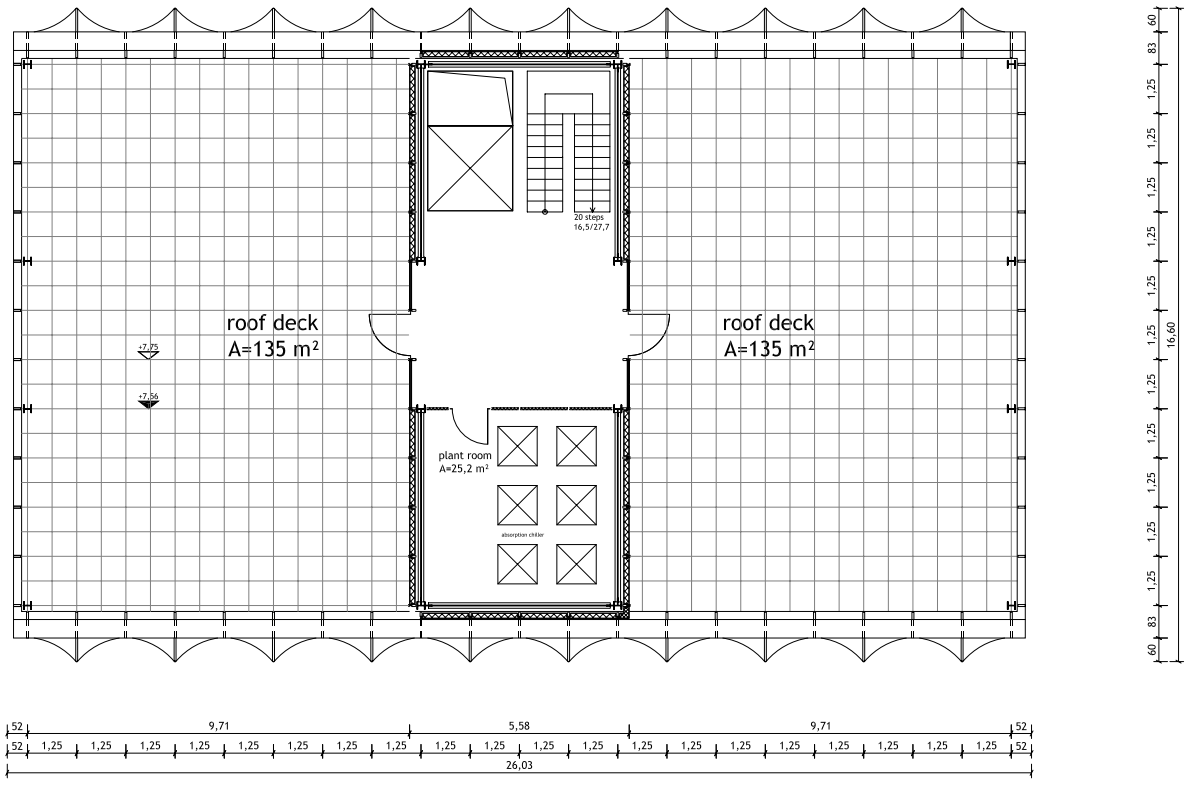


Bild 193: Grundriss Dachgeschoss des „New Technology“ Bürogebäudes

Für den Prototyp sind zwei Vollgeschosse ohne Unterkellerung geplant. Der Gebäudekern wird noch ein Stockwerk weitergeführt. In diesem zweiten Obergeschoss wird die Gebäudetechnik untergebracht. Von hier aus kann man außerdem auf die Dachterrasse heraustreten, die von einer Stahlkonstruktion überdacht wird. Auf dieser Stahlkonstruktion liegen Photovoltaikmodule und Sonnenkollektoren zur Nutzung der Sonnenenergie und zur Verschattung des Gebäudes. Durch die Auskragung des Stahldaches von 3,75 m über den Gebäuderand wird auch die Fassade teilweise verschattet.

6.3 Konstruktion

Der Rohbau des Gebäudes besteht aus einem Stahlskelett und Verbunddecken. Die Verbunddecken werden mit Holoribblechen ausgeführt, die als verlorene Schalung und untere Bewehrungslage dienen. Diese liegen auf Stahlunterzügen auf, die als Verbundträger über Kopfbolzendübel mit der Stahlbetondecke verbunden sind. Als Horizontalaussteifung werden Auskreuzungen mit Zugstäben eingebaut. Die Auskreuzungen sind jeweils hinter den opaken Fassadenpaneelen angeordnet. Im zweiten Obergeschoss verspringt die Auskreuzung, da die Außenfassade auf der Ost- und Westseite fehlt, bzw. sich in diesem Geschoss am Funktionskern befindet. Dieser Versprung ist aber im oberen Bereich des Gebäudes statisch unproblematisch.

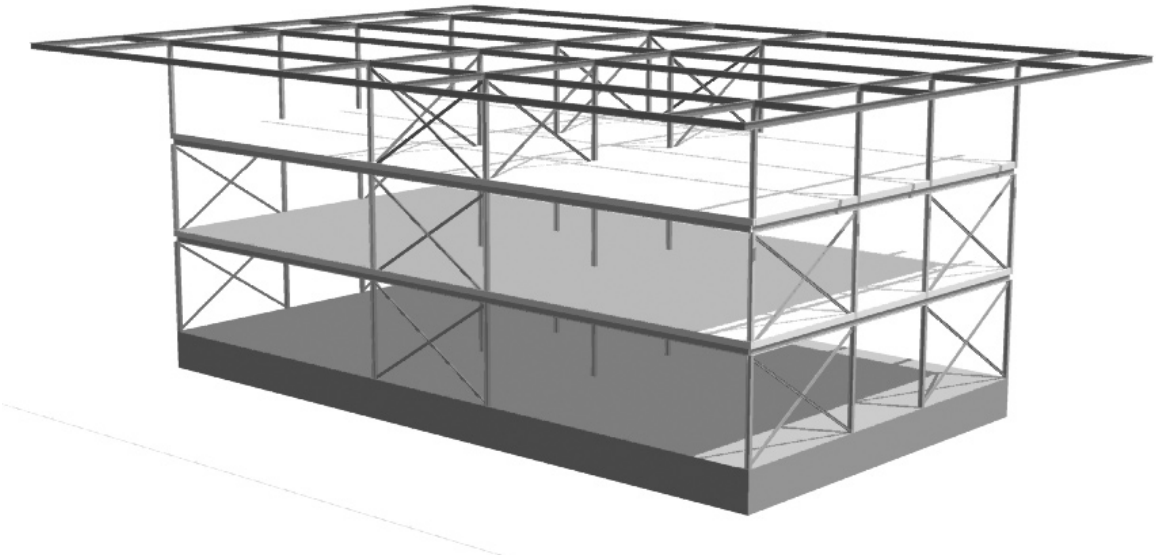


Bild 194: Rohbau des „New Technology“ Bürogebäudes

6.4 Nord- Südfassade

Die Nord- und Südfassade wird als Doppelfassade konzipiert. Die äußere Schicht der Fassade besteht aus einer ETFE Folie auf einer Stahlunterkonstruktion. Direkt dahinter ist ein Folienrollo installiert. Es handelt sich hierbei um eine UV-stabilisierte PET Folie mit einer einseitigen Metallbedampfung.
Auf den Kragarmen, an denen die Folienfassade angebracht ist, liegen Stahlgitterroste auf, die den Fassadenzwischenraum (FZR) begehbar machen. Die Breite dieses Laufstegs und somit des FZRs beträgt 60 cm.
Die innere Fassade besteht aus einer Pfosten-Riegel-Konstruktion, die im Bürobereich mit Isolierverglasung gefüllt ist und im Kernbereich mit wärmegedämmten Aluminiumpanelen. Im Bereich der Verglasungen sind Türelemente vorgesehen, die zur Lüftung und zum erschließen des FZRs dienen sollen.
Hinter der Verglasung sind Folienrollos aus PET vorgesehen, die zur vollständigen Verdunklung des Raumes dienen sollen. Die Folie ist schwarz und einseitig metallbedampft.
Nach den im Kapitel Fassadenprinzipien aufgeführten Definitionen handelt es sich bei dieser Doppelfassade um eine Mischform. Die Lüftungsklappen am oberen und unteren Ende des FZR sind regulierbar. Der FZR kann also mit Außenluft durchströmt werden oder vollständig verschlossen werden. Im hinterlüfteten Zustand handelt es sich somit um eine Zweite-Haut-Fassade, im geschlossenen um eine Pufferfassade.
Der gesamte FZR ist lediglich in horizontaler Richtung durch Laufstege aus Gitterrosten unterteilt. Diese behindern aber nur unwesentlich die Luftströmung und sind deshalb im Sinne der Fassadenkategorisierung nicht relevant, da die Kategorisierung nach Luftströmung und nicht nach Wegeführung zu beurteilen ist. Vom Entlüftungsprinzip ist es der

Schachtfassade zuzuordnen, weil der Vorteil der Schachtfassade mit dem höheren FZR und der somit verbesserten Kaminwirkung maßgebend für die Luftströmung ist. Eigenschaften einer Korridorfassade, wie beispielsweise der Luftaustausch zwischen der Nord- und Südfassade können hier nicht angewandt werden, da die Doppelfassade nicht umlaufend ist. Der Zwischenraum kann aber einseitig, im Sinne einer Verkehrsfläche, also eines Korridors, als Gebäudeerschließung genutzt werden.

Die Lüftungsöffnungen für den FZR sind auf der gesamten Gebäudebreite angeordnet. Da es keine übereinanderliegenden FZRs gibt, kann es zu keinem Eintrag von verbrauchter Luft eines FZRs in einen darüberliegenden kommen. Die möglichst großen Öffnungsflächen für den FZR sind insbesondere in heißen Ländern sehr wichtig, um der Überhitzung entgegen zu wirken.

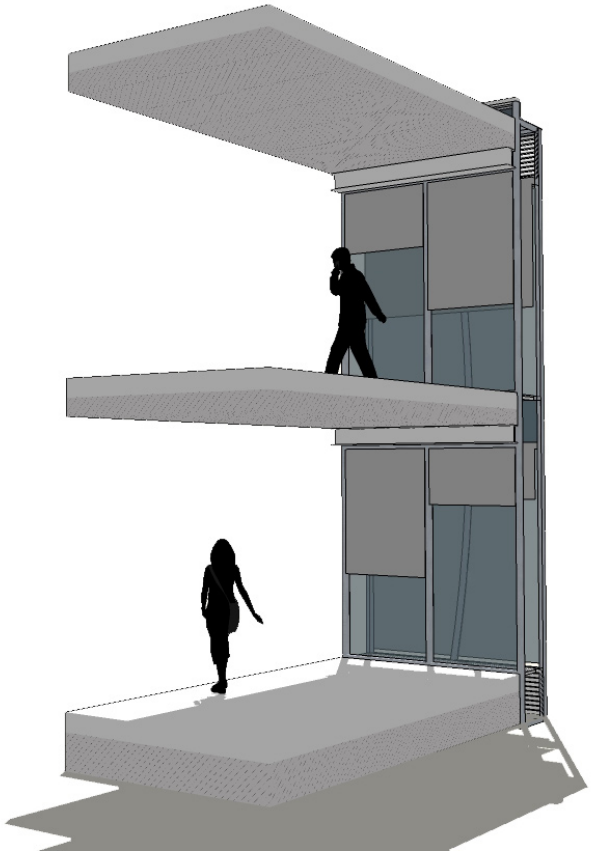


Bild 195: „New Technology“ Fassadenmodul Innenansicht

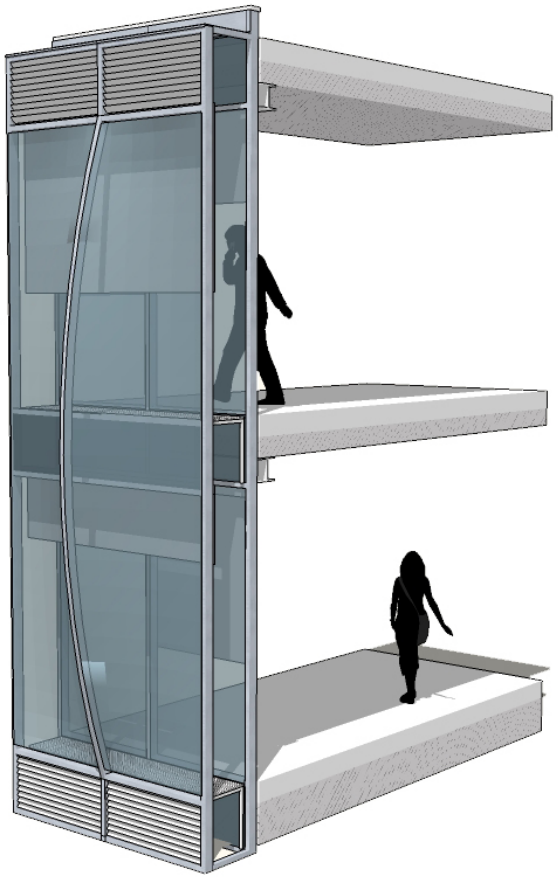


Bild 196: „New Technology“ Fassadenmodul Außenansicht

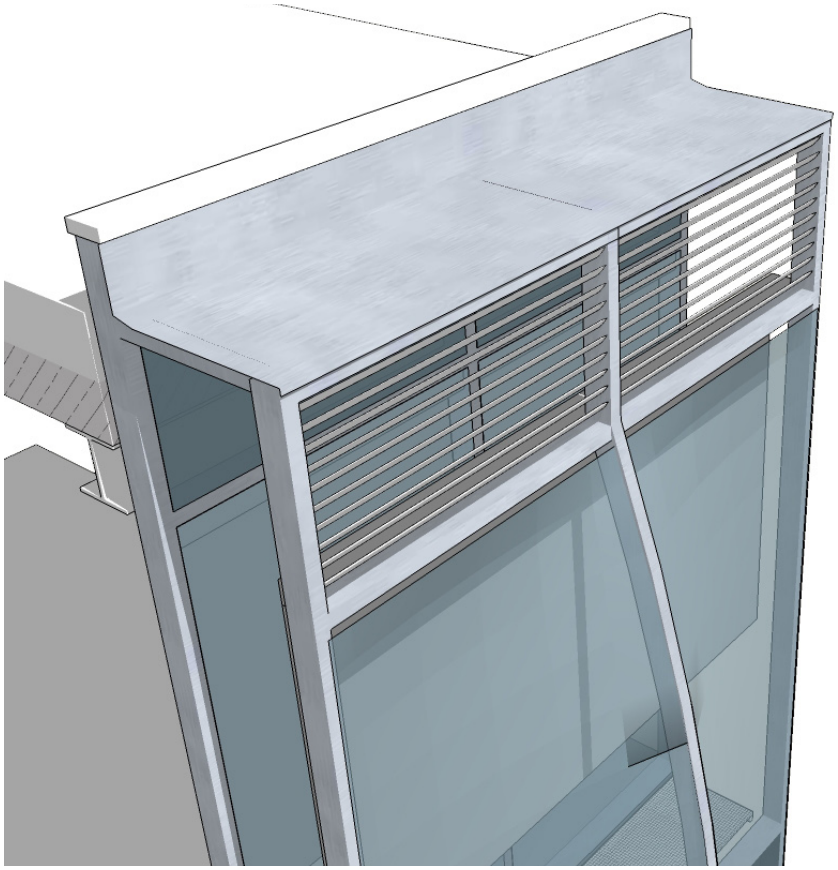


Bild 197: „New Technology“ Fassadenmodul oberer Abschluss

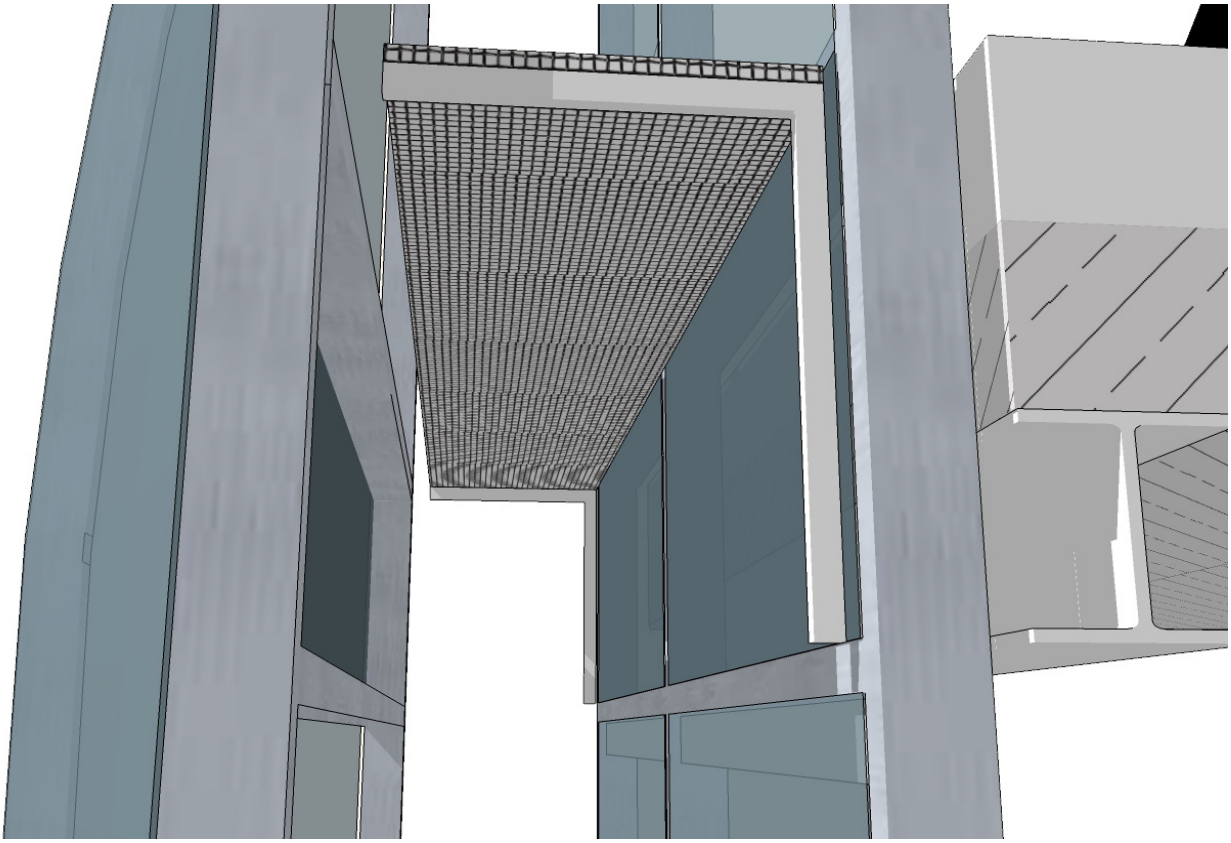


Bild 198: „New Technology“ Fassadenmodul Fassadenzwischenraum in Höhe Decke über EG

Bild 199: „New Technology“ Fassadenmodul in Höhe Decke über EG Außenansicht

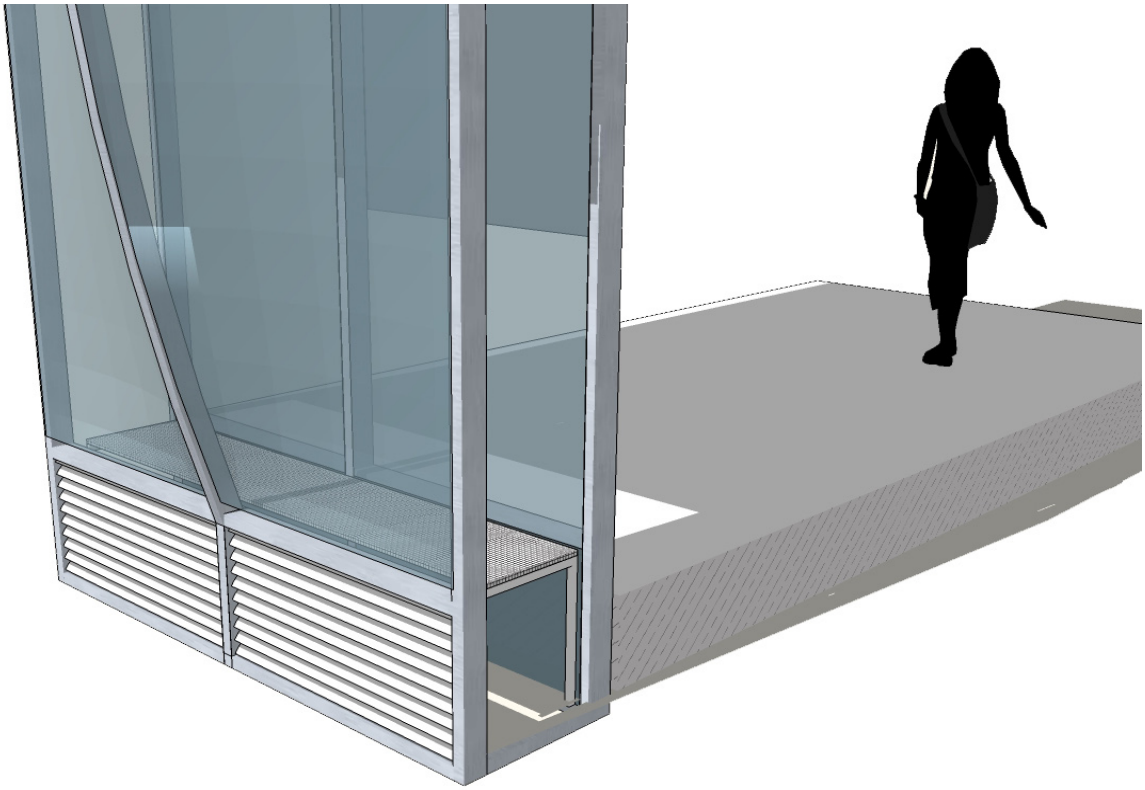


Bild 200: „New Technology“ Fassadenmodul unterer Abschluss

6.4.1 ETFE Folie

Die ETFE Folie bildet den äußeren Abschluss der Nord- und der Südfassade. Sie hat damit die Aufgabe Witterungseinflüsse wie Wind, Regen, Schnee usw. von FZR und dem dahinter liegenden Gebäudeinneren fern zu halten. Außerdem soll sie dem Gebäude durch ihre Formgebung ein individuelles Äußeres verleihen und die Fassade als Aushängeschild für das Gebäude einmalig werden lassen. Die Folie wird mechanisch vorgespannt und in einer zweifach gekrümmten Form eingebaut. Um diese zweifache Krümmung zu erzeugen, wird die Folie auf einen ebenen Rahmen mit den Außenmaßen h=6,00 m und b=2,50 m gespannt. Innerhalb dieses Moduls steht mittig, senkrecht ein Bogen, der die Folie nach außen, aus der Ebene, drückt und somit die zweifach gekrümmte Fläche erzeugt.
Die Folie wird konfektioniert und am Rand mit einer Kederschnur versehen. Diese Kederschnur wird in ein Stahlteil eingeklemmt und über einen Schraubmechanismus innerhalb der Randprofile gespannt. Die Folie hat eine Stärke von 250 μm und ist vollständig transparent.
In der Mitte des 6,00 m hohen und 2,50m breiten Stahlrahmens sind quer, in Geschossdeckenhöhe, zwei Riegel eingefügt, zwischen denen ein opakes Fassadenpaneel eingebaut ist. Diese Riegel sollen die Momente, die aus der Spannung der Folie in den senkrechten Stahlpfosten resultieren, reduzieren. Zu diesem Zweck hätte auch ein Riegel in Höhe des Gitterrostlaufstegs genügt. Der Grund für den zweiten Riegel und das Fassadenpaneel ist die Gleichbehandlung der beiden Geschosse in Hinsicht auf die solare Einstrahlung. Das Obergeschoss hat durch die Lüftungsklappen und den oberen Doppelfassadenabschluss einen konstruktiven Sonnenschutz. Das Erdgeschoss hätte ohne das Fassadenpaneel nur den konstruktiven Sonnenschutz durch den Gitterrostlaufsteg. Durch diese Maßnahme ist die solare Einstrahlung und somit auch der klimatische Komfort, in beiden Geschossen nahezu identisch.

6.4.2 Folienrollo im FZR

Das Folienrollo im FZR befindet sich innerhalb des Rahmens der ETFE Folie. Das Material des Rollos muss ausreichend UV stabil sein, da die ETFE Folie keinen Schutz vor der Strahlung bietet. Die Anforderungen sind also höher als hinter einer Verglasung. Man könnte hier auch eine ETFE Folie verwenden, die entsprechend Pigmentiert und metallbedampft ist. Die mechanischen Anforderungen an ein Folierollo sind aber weit geringer als die an eine Fassade, die Windlasten abtragen können muss. Das Material könnte also mechanisch weit schwächer sein als ETFE. Die Wahl fiel deshalb auf eine UV-Stabilisierte PET Folie. Das Rollo wird aus zwei Folien hergestellt, die zusammenlaminiert werden, zwischen den beiden Folien ist die Alu Metallisierung geschützt. Durch die hochreflektierende Metallisierung liegt der g-Wert der Folie g < 0,2. Um zu verhindern, dass künstliches Licht aus dem Innenraum an der Folie reflektiert wird, wird die innere Folie eingefärbt. Dieser Folienaufbau gewährleistet trotz seines effektiven Blend- und Hitzeschutzes eine Durchsicht von innen nach außen. Der Folie

wird außerdem eine Struktur eingeprägt, damit sich auf der reflektierenden Außenseite kein erkennbares Spiegelbild ergibt. Diese Spiegelbilder wären durch Wölbungen in der Folie verzerrt und würden dem ganzen Erscheinungsbild schaden.

6.4.3 Pfosten-Riegel-Fassade

Die Pfosten-Riegel-Fassade ist ein Produkt der Firma Schüco. Die Fassade wird vor den Betondecken geführt. Die Fassade ist weitestgehend mit Glaselementen bestückt, nur in der Mitte des Gebäudes, im Bereich des Kerns, sind Aluminiumpaneele eingesetzt. Außerdem sind die Paneele in Höhe der Betondecken und Stahlunterzüge opak gewählt. In Höhe der Unterzüge wird das opake Fassadenpaneel alle 2,50m von einem Kragträger durchstoßen, der die Last der äußeren Fassade und des Laufstegs in das Tragwerk einleitet. Dieser Durchstoßpunkt ist mit einem speziellen Einbauteil realisiert, das die Wärmebrücke auf vier punktförmige Durchstoßpunkte reduziert. Im Bereich der Büros bzw. Konferenzräume sind Glaselemente eingebaut, von denen jedes zweite Glaselement zu öffnen ist. Über diese Glastür Elemente kann gelüftet und der FZR erschlossen werden. Die Lüftung zum FZR über die Glasfassade ist im Hochsommer nicht sinnvoll, wobei sich im Iran bei 40°C Außentemperatur dieser Sachverhalt von selbst erklärt. Außerdem ist die Lüftung im Winter, wenn die Fassade als Pufferfassade dient, also die Lüftungslamellen des FZRs geschlossen sind, auch nicht sinnvoll. Fensterlüftung zur Frischluftzufuhr ist demzufolge maximal 6 Monate des Jahres möglich, wurde aber vom Bauherrn ausdrücklich gewünscht. Die Pfosten-Riegel-Fassade umschließt das Gebäude an allen vier Seiten. Die Aluminiumpaneele haben eine vertikale Struktur eingeprägt, um die großen Flächen an der Ost- und Westseite und im Kernbereich optisch zu gliedern.

6.4.4 Folienrollo im Innenraum

Die innere Folie ist eine sogenannte Verdunklungsfolie. Sie lässt kein Licht durch und hat in erster Linie die Aufgabe bei Präsentationen den Raum vollständig zu verdunkeln.

6.5 Konstruktiver Sonnenschutz

Durch die sehr intensive Sonnenstrahlung würde bei einem voll verglasten Gebäude die Heizung nur nachts und in den frühen Morgenstunden in Betrieb sein. Tagsüber würde die solare Einstrahlung ausreichen, um selbst bei Minusgraden ein komfortables Innenraumklima zu erreichen. Im Winter ist also eine hohe Transparenz energetisch von Vorteil. Der energetisch aufwendigere Lastfall ist die sommerliche Kühlung des Gebäudes. Es gilt zunächst durch konstruktive Maßnahmen und sinnvolle Anordnung transparenter Fassadenelemente die direkte Sonneneinstrahlung zu begrenzen oder sogar zu verhindern und dann über weitere Sonnenschutzelemente auch die diffuse Strahlung abzumindern. Die direkte Sonneneinstrahlung zur Mittagszeit ist zwar von den Werten her die strahlungsintensivste, kommt aber durch den hohen Sonnenstand in Äquatornähe kaum ins Gebäudeinnere.

Die hauptsächliche Belastung aus direkter Strahlung entsteht also in den Morgen- und Abendstunden, wenn die Sonne tief steht. Somit sind transparente Fassadenelemente an der Südfassade auch unproblematischer als an der Ost- und Westfassade. Durch die hohe diffuse Strahlung ist die Mittagszeit trotzdem die energetisch maßgebende, wobei die Ausrichtung der Fenster bei der diffusen Strahlung keine Rolle spielt. Die direkte Sonnenstrahlung wird auch durch das weit auskragende Dach verhindert. Dieser konstruktive Sonnenschutz verhindert die direkte Sonneneinstrahlung auf die Fassade und auf das raumangrenzende Dach. Somit wird auch das Aufheizen der obersten Decke deutlich reduziert.

6.6 Detailzeichnungen der Fassade

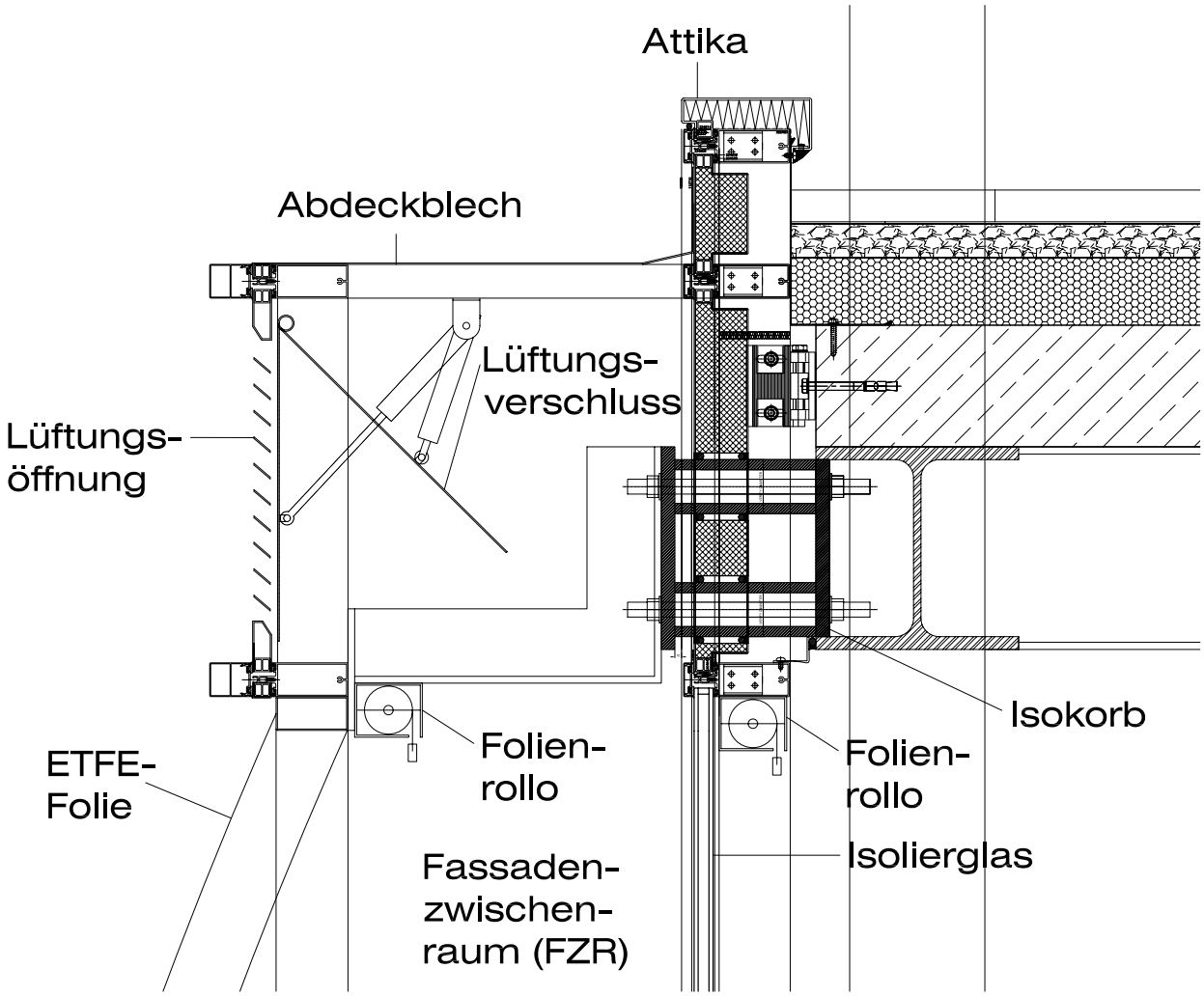


Bild 201: Detail oberer Abschluss „New Technology“ Fassade

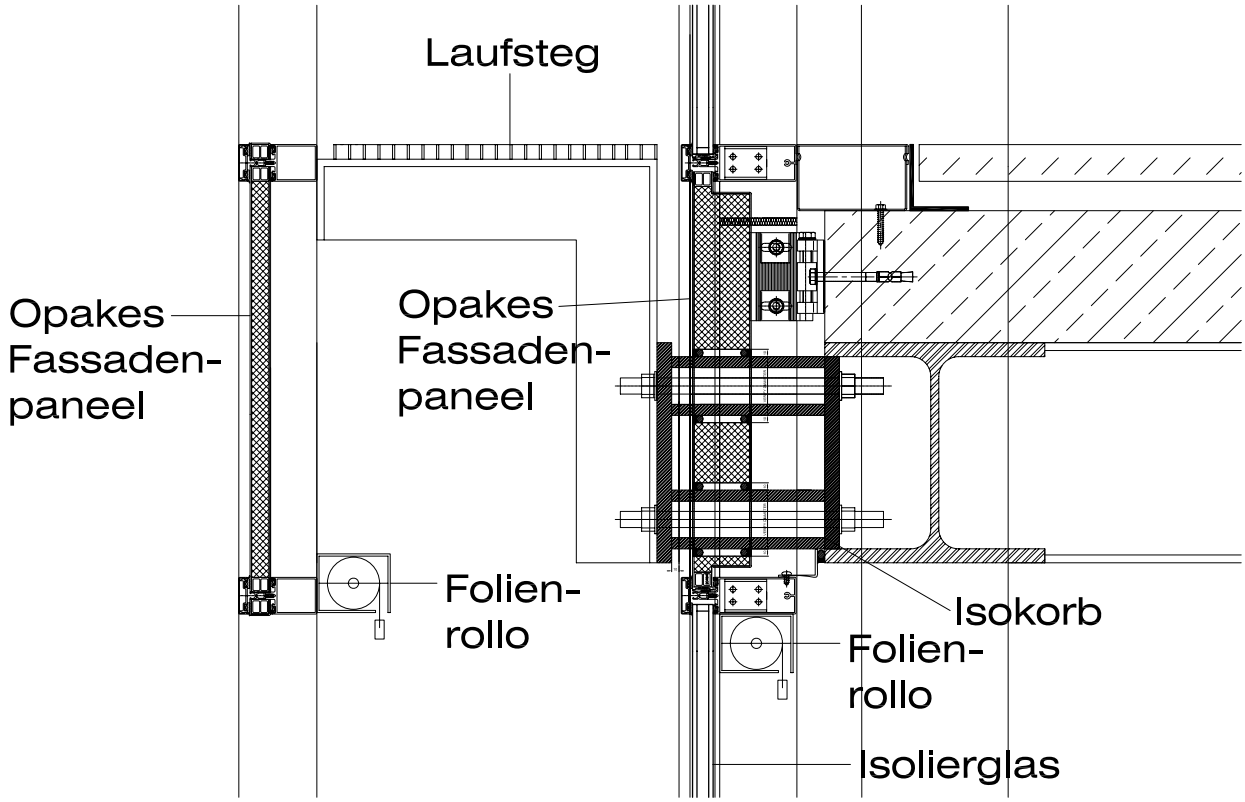


Bild 202: Detail Anschluss an Decke über EG „New Technology“ Fassade

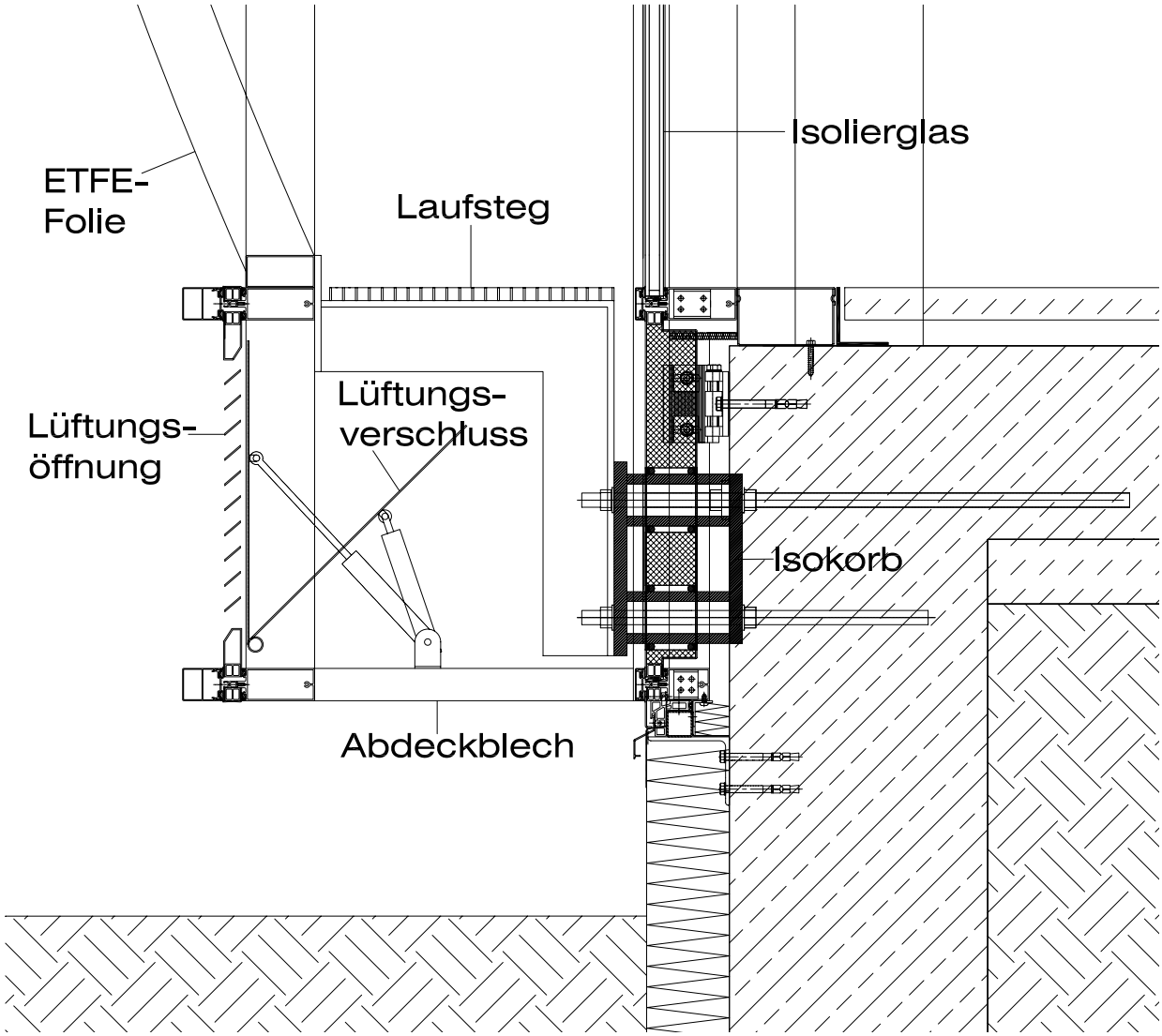


Bild 203: Detail unterer Abschluss „New Technology“ Fassade

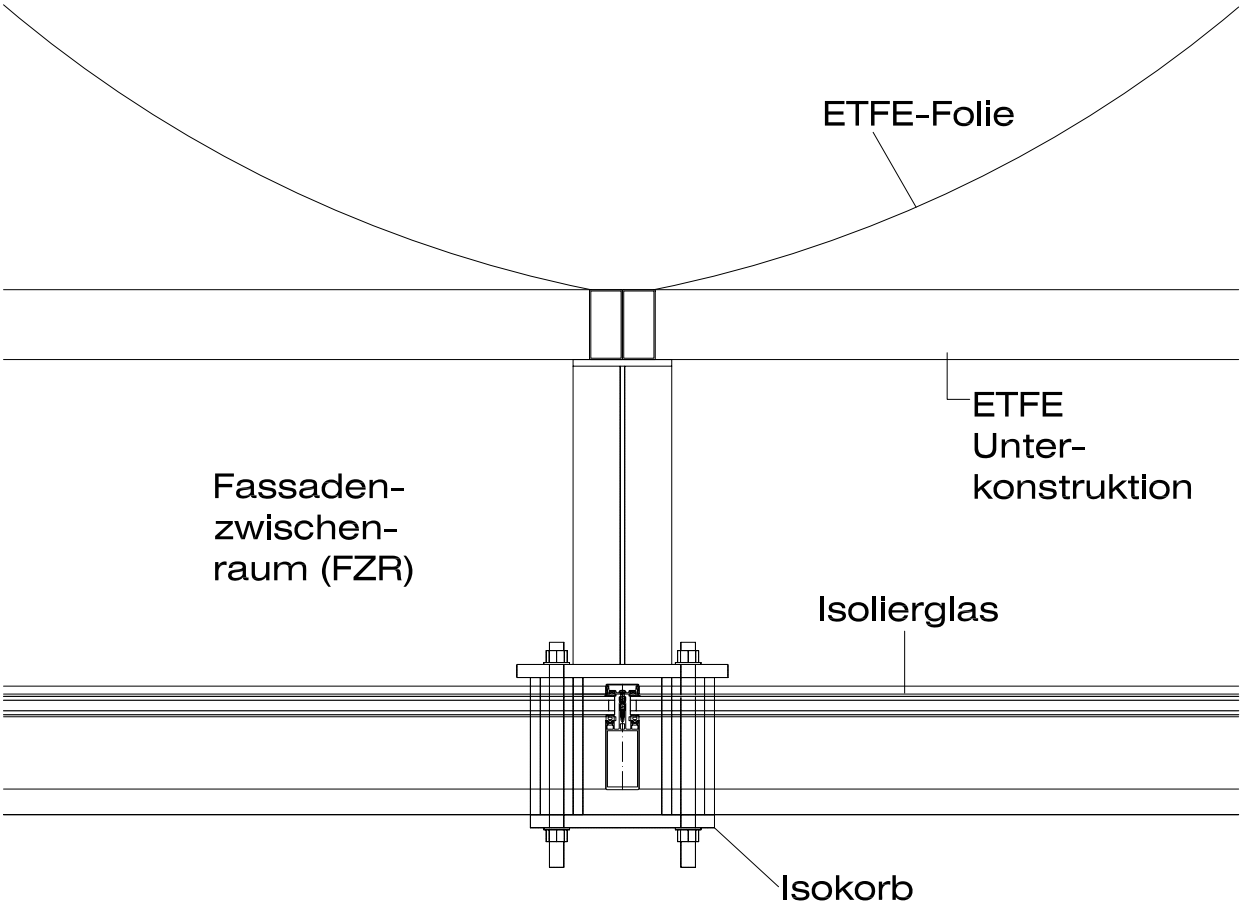


Bild 204: Detail im Grundriss Anschluss an Decke über EG „New Technology“ Fassade

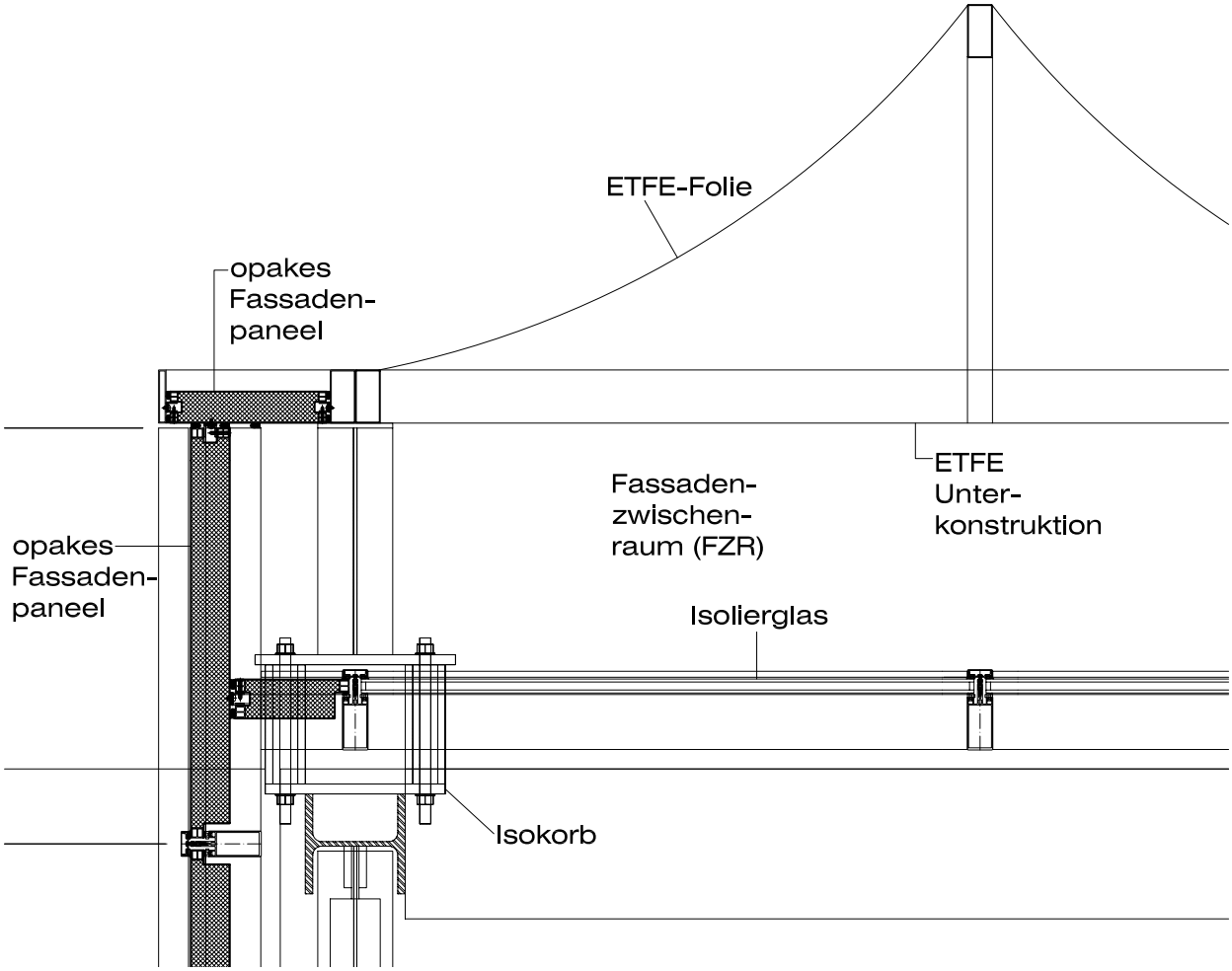


Bild 205: Detail Eckanschluss im Grundriss Anschluss an Decke über EG „New Technology“ Fassade

6.7 Bemessung „New Technology“ Folienmodul

Ein Folienmodul hat eine Breite von 2,50 m und eine Höhe von 6,00 m. Der senkrechte Bogen in der Mitte des Moduls hat einen Stich von 40 cm. Die Fläche wird in 25cm x 25 cm große Elemente unterteilt. Alle Punkte, die auf dem Rand und auf dem Bogen liegen, werden in allen Richtungen festgehalten und gelenkig gelagert.

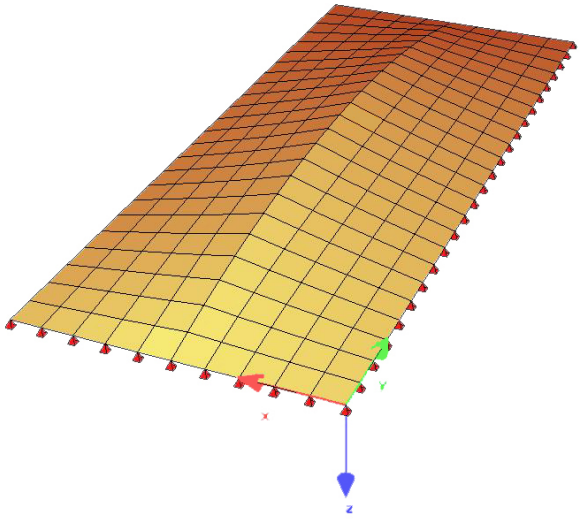


Bild 206: Folienmodul der „New Technology“ Fassade aus SOFISTIK

Es wird eine 250 μm starke ETFE Folie eingesetzt, die in der Fassade durch Vorspannung, Wind und Temperatur belastet wird. Zur Lastermittlung werden deutsche Normen verwendet.

6.7.1 Windlasten

Die Ermittlung der Windlasten ist in Deutschland in der DIN 1055-4 geregelt. Diese wurde in der Ausgabe 3.2005 grundlegend überarbeitet und an die europäische Normung angepasst. Für die Ermittlung des Geschwindigkeitsdrucks gibt es drei Möglichkeiten:
Die erste Möglichkeit ist der vereinfachte Ansatz eines über die Geländehöhe konstanten Geschwindigkeitsdrucks. Dies ist nur möglich bei Gebäuden <25m.
Die zweite Möglichkeit besteht darin, einen von der Höhe über dem Gelände abhängigen Geschwindigkeitsdruck in Abhängigkeit von der Geländekategorie zu ermitteln. Bei Gebäudehöhen >25m ist dies zwingend erforderlich.
Die letzte Alternative besteht in der genauen Erfassung des Einflusses von Geländerauhigkeit, Topographie und Höhe über Gelände auf den Geschwindigkeitsdruck. [Wid07]
Ist der Geschwindigkeitsdruck ermittelt, wird der Staudruck mit der Formel:
$w_e = c_{pe} \cdot q(z_e)$

Wobei gilt:

w_e	Winddruck auf Außenflächen
c_{pe}	Aerodynamischer Beiwert
$q(z_e)$	Geschwindigkeitsdruck
z_e	Höhe über Gelände

Die Norm gibt Winddruck- und –sogbeiwerte für quer zur Windrichtung stehende Wände und parallel dazu stehende Wände an. Außerdem hat die Größe der betrachteten Fläche einen Einfluss auf den c_{pe}-Wert. So gibt es den Wert $c_{pe,1}$ und den Wert $c_{pe,10}$.

Zur entsprechenden Lasteinzugsfläche A besteht folgender Zusammenhang:

$c_{pe} = c_{pe,1}$	für $A \leq 1\ m^2$
$c_{pe} = c_{pe,1} + (c_{pe,10} - c_{pe,1}) \cdot lg\ A$	für $1\ m^2 < A \leq 10\ m^2$
$c_{pe} = c_{pe,10}$	für $A > 10\ m^2$

[Hol05]
Es wird angenommen, dass das Gebäude eine Windlast erfährt, die der Windlastzone 2 / Binnenland entspricht.

Gebäudegeometrie:

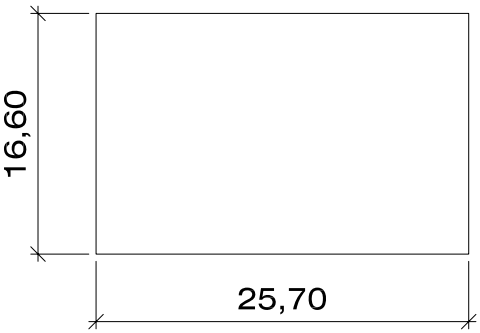


Bild 207: „New Technology“ Grundriss schematisch

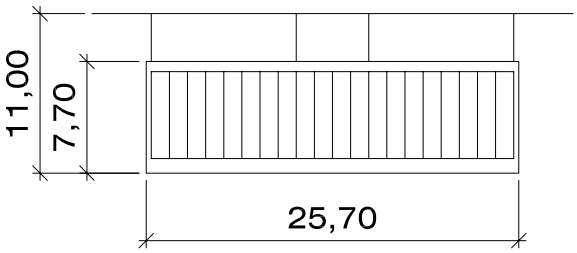


Bild 208: „New Technology“ Süd- / Nordansicht schematisch

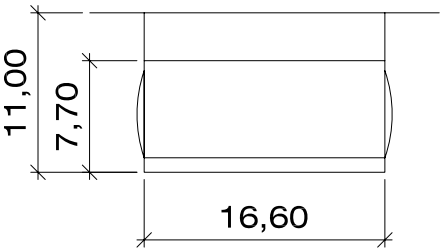


Bild 209: „New Technology“ Ost- / Westansicht schematisch

Die Gebäudehöheliegt bei 11,00 m. Das zu bemessende Bauteil endet bei einer Höhe von 7,70 m. Daraus folgt ein Windgeschwindigkeitsdruck von:

$$q = 0{,}65 \frac{kN}{m^2}$$

Die Folie ist auf dem Mittelbogen fixiert, deshalb ist die zu berechnende Einzelfläche nur 7,5 m² groß.

Südwind:

$$\frac{h}{d} = \frac{11{,}00m}{16{,}60m} = 0{,}66$$

$$e = \min\begin{cases} b \\ 2 \cdot h \end{cases} \Rightarrow e = \min\begin{cases} 25{,}70m \\ 2 \cdot 11{,}00m \end{cases} \Rightarrow 22{,}00m$$

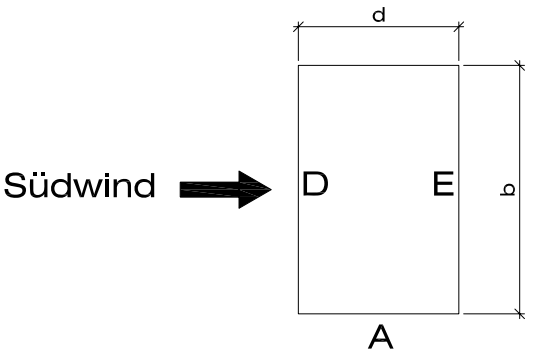


Bild 210: Wandbereiche bei Windanströmrichtung Nord – Süd Grundriss

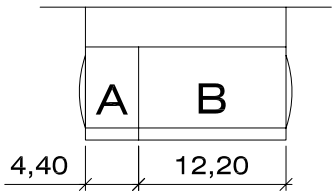


Bild 211: Wandbereiche bei Windanströmrichtung Nord - Süd Ansicht

Der Wert für $c_{pe,7,5}$ wird berechnet mit der Formel:

$c_{pe} = c_{pe,1} + (c_{pe,10} - c_{pe,1}) \cdot lgA$

[Hol05]

Darin bedeutet:

$c_{pe,1}$	Aerodynamischer Beiwert für eine 1m² große Fläche und kleiner
$c_{pe,10}$	Aerodynanischer Beiwert für eine 10m² große Fläche und größer
A	Fläche

	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,7,5}$
A	-1,2	-1,4	-1,22
B	-0,8	-1,1	-0,83
D	+0,75	+1,0	+0,78
E	-0,31	-0,5	-0,33

Maßgebende Windlasten für die Folienelemente bei Südwind:

Zone D: $w_D = +0{,}78 \cdot 0{,}65 \frac{kN}{m^2} = 0{,}51 \frac{kN}{m^2}$

Zone E: $w_S = -0{,}33 \cdot 0{,}65 \frac{kN}{m^2} = -0{,}21 \frac{kN}{m^2}$

Ostwind:

$$\frac{h}{d} = \frac{11{,}00m}{25{,}70m} = 0{,}43$$

$$e = \min\begin{cases} b \\ 2 \cdot h \end{cases} \Rightarrow e = \min\begin{cases} 16{,}60m \\ 2 \cdot 11{,}00m \end{cases} \Rightarrow 16{,}60m$$

$$\frac{e}{5} = \frac{16{,}60m}{5} \approx 3{,}30m$$

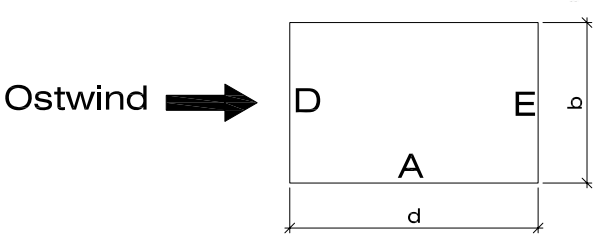


Bild 212: Wandbereiche bei Windanströmrichtung Ost - West Grundriss

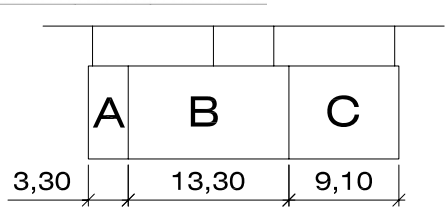


Bild 213: Wandbereiche bei Windanströmrichtung Ost - West Ansicht

	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,7,5}$
A	-1,2	-1,4	-1,22
B	-0,8	-1,1	-0,83
C	-0,5	-0,5	-0,5
D	+0,72	+1,0	+0,75
E	-0,35	-0,5	-0,36

Maßgebende Windlasten für die Folienelemente bei Südwind:

Zone A: $w_S = -1{,}22 \cdot 0{,}65 \frac{kN}{m^2} = -0{,}79 \frac{kN}{m^2}$

Als Dauerlast wird eine Windstärke von 8 Beaufort angesetzt. Die Richtigkeit dieser Größe kann nicht belegt werden, da für den Bauplatz keine Unterlagen über Windverhältnisse vorlagen und die statistische Auswertung von Windgeschwindigkeiten auch nicht Teil dieser Arbeit sein soll. Es handelt sich dabei um einen Annahme. Diese entspricht einem Staudruck von q=0,27 kN/m². Daraus folgen die Bemessungswerte:

$$w_{Ddauer} = +0{,}78 \cdot 0{,}27 \frac{kN}{m^2} = 0{,}21 \frac{kN}{m^2}$$

$$w_{Sdauer} = -1{,}22 \cdot 0{,}27 \frac{kN}{m^2} = -0{,}33 \frac{kN}{m^2}$$

6.7.2 Temperatur und Vorspannung

Die Bemessung wird zeigen, dass Temperaturdifferenzen von mehr als 20 K nicht ohne einen lokal begrenzten Spannungsausfall der Folie zu gewährleisten sind. Dafür wird die notwendige Vorspannung dimensioniert und wird mit 1,6 / 1,7 kN/m angesetzt.

6.7.3 Bemessungsergebnisse

Die Folie wurde mit dem Programm Sofistik berechnet. Es wurden die folgenden Lastfälle berücksichtigt:

	LF8	G+P
	LF9	G+P+T
Tragfähigkeit	LF11	1,35 G+1,35 P+1,5 W_D
	LF12	1,35 G+1,35 P+1,5 W_S
	LF13	1,35 G+1,35 P+1,5 W_D/2+T
	LF14	1,35 G+1,35 P+1,5 W_S/2+T
Gebrauchstauglichkeit	LF21	G+P+W_D
	LF22	G+P+W_S
	LF23	G+P+W_D/2+T
	LF24	G+P+W_S/2+T
	LF25	G+P+W_{Ddauer}
	LF26	G+P+W_{Sdauer}
	LF27	G+P+W_{Ddauer}/2+T
	LF28	G+P+W_{Sdauer}/2+T

Die Eingabedatei und die FEM Ergebnisse sind im Anhang abgedruckt.
Auswertung der Ergebnisse in tabellarischer Form:
Die Gebrauchstauglichkeit ist im Lastfall 25 nicht mehr gewährleistet. Das bedeutet, dass der Bemessungswind zu hoch angesetzt ist. Eine geringere Dauerwindlast bedeutet einen kürzeren Zeitraum, in dem die Folie faltenfrei bleibt. Oder aber, es wird eine Nachspannmöglichkeit eingebaut. Die zweite Lösung ist im Sinne der Dauerhaftigkeit der Fassade unbedingt zu empfehlen.

	Tragfähigkeit			
Lastfall	11	12	13	14
Vorh. Spannung [kN/m]	3,90	4,34	1,72	2,29
Zul. Spannung [kN/m]	7,40	7,40	6,00	6,00

	Gebrauchstauglichkeit							
Lastfall	21	22	23	24	25	26	27	28
Vor. Spannung [kN/m]	2,96	3,48	1,33	1,75	1,81	1,75	0,23	0,16
Zul. Spannung [kN/m]	3,80	3,80	3,00	3,00	1,75	1,75	1,40	1,40
Max. Verformung [mm]	53,2	57,2	57,4	61,8	12,3	5,28	23,8	15,4

Bei allen Lastfällen mit erhöhter Temperatur kommt es zu lokal begrenzten Spannungsausfällen. Bei hohen Windlasten und hoher Temperatur muss dies in Kauf genommen werden. Dies kann auch durch eine höhere Vorspannung nicht verhindert werden.

6.7.4 Modulbewertung

Im Kapitel Beispielmodulbemessung war schon ersichtlich, dass mechanisch vorgespannte Module starken Einschränkungen unterworfen sind. Dies bestätigt sich auch in dieser Bemessung. Die zulässigen Werte für Dauerbelastungen sind überschritten. Es ist also unbedingt eine Nachspannmöglichkeit vorzusehen, was die Konstruktion deutlich aufwendiger und kostenintensiver werden lässt. Außerdem bedeutet diese Maßnahme regelmäßige Wartungsintervalle von qualifiziertem Personal.
Hinzu kommt die Tatsache, dass Nachspannmechanismen nur einen bestimmten Nachspannweg vorsehen können, was eine begrenzte Lebenserwartung der Fassade zur Folge hat. Die Annahme einer Temperaturdifferenz von 20 K für eine Region wie den Iran ist sehr niedrig eingeschätzt. Somit kann es an extrem heißen Tagen, allein durch die Ausdehnung des Materials, zum Spannungsausfall kommen.

Die antiklastische Form führt dazu, dass bei Windlasten die Spannrichtung schnell spannungslos wird. Die antiklastische Form ist also in diesem Fall als problematisch zu bewerten. Die eben gespannten Module haben dieses Problem nicht, bergen aber im Randbereich der Fassade, an dem es zu Verwirbelungen kommen kann, die Gefahr des Flatterns.

Aus all den genannten Argumenten ist die Dauerhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit einer solchen mechanisch vorgespannten Fassade zu bezweifeln. Eine pneumatische Konstruktion ist gerade für heiße Länder empfehlenswert, denn trotz des höheren technischen Aufwands, durch die notwendige Luftversorgung, ist die Dauerhaftigkeit der Konstruktion nur auf diesem Weg sinnvoll zu gewährleisten.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Kapitel 1: Folienmaterial
Kunststoffe werden unterschieden in Elastomere, Thermoplaste und Duroplaste. Die für den Folienbau verwendeten Folien gehören zu der Gruppe der Thermoplaste. Diese sind schmelzbar und können somit durch Aufschmelzen geformt und aneinandergefügt werden. Die Kunststoffe, die für den konstruktiven Folienbau in Frage kommen, sind ETFE und EFEP, wobei ETFE durch Großprojekte, wie Beispielsweise die Allianzarena in München schon einen großen Bekanntheitsgrad hat, während EFEP gerade neu entwickelt wurde. EFEP hat eine ähnlich hohe Festigkeit und Steifigkeit wie ETFE und gewährt eine weit bessere Durchsicht. Bei der Recherche hat sich aber herausgestellt, dass EFEP beim Abbrennen toxische Gase entwickelt, was es für den Einsatz in der Architektur ausschließt. ETFE ist ein teilkristallines Thermoplast. Es hat eine höhere Transparenz als Glas, ist aber ganz leicht milchig. Die optischen Eigenschaften können durch Zugabe von Pigmenten, durch Bedruckung und durch Metallbedampfung verändert werden. Es ist ohne Zugabe von UV-Stabilisatoren sehr langlebig und ändert seine mechanischen und optischen Eigenschaften auch über einen Zeitraum von 20 Jahren kaum.

Kapitel 2: Fassadenkonstruktion
Die Vielfalt an Funktionen, die eine Fassade zu erfüllen hat, bringt es mit sich, dass sich gewisse Funktionen entgegenstehen, wie z.B. Sichtschutz und natürliche Belichtung und andere sich begünstigen können, wie z.B. Schutz vor unbefugtem Zutritt und Sonnenschutz. Die Vielzahl an Aufgaben, deren Gewichtung stark von der Umgebung und der Nutzung des Gebäudes abhängt, hat zur Folge, dass es nicht die optimale Fassade für alle Anwendungen gibt. Die Fassade sollte immer eine Individuallösung für die jeweilige Aufgabe darstellen. Hierfür wurden verschiedenste Fassadentypen entwickelt. Während bei einschaligen Fassadensystemen die Folie einfach die Isolierverglasung ersetzen kann, gibt es bei Doppelfassaden eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten verschiedener Folienlagen aber auch Folie – Glas Kombinationen. Wobei die Vorteile der Folie mit ihrer höheren Transparenz, besseren Fügbarkeit und daraus resultierenden größeren Formenvielfalt und dem geringeren Konstruktionseigengewicht optimal Glaskonstruktionen ergänzen können. Auf der anderen Seite ist die Folie gerade in den Aufgabenfeldern unbefugter Zutritt und Schallschutz auf die sinnvolle Kombination mit anderen Materialien angewiesen.
Die Doppelfassaden können in Kategorien eingeteilt werden, die unterschiedliche Anforderungen an verschiedenen Fassadenschichten stellen. Es gibt Abluftfassaden, Zweite-Haut-Fassaden und Pufferfassaden. Um zu analysieren, welche Einsatzmöglichkeiten es für die Folie in den unterschiedlichen Fassadentypen gibt, wurden ihre Eigenschaften in den Kapiteln „Bauphysik“ und „mechanische Eigenschaften“ untersucht.
Ein großes Feld im Fassadenbau ist die Adaptivität der Fassade. Um Fassadeneigenschaften an Umweltbedingungen anpassen zu können, werden Manipulatoren eingesetzt. Diese sollen

optische und thermische Eigenschaften der Fassade an die jeweiligen Bedürfnisse des Nutzers anpassen können.
Folien können pigmentiert, bedruckt, metallbedampft und geprägt werden. Dadurch entsteht eine große Vielfalt an optischen Eigenschaften. Wird die Folie als Rollo eingesetzt, entsteht aufgrund der genannten Bearbeitungsmöglichkeiten eine optimal den Nutzerbedürfnissen angepasste Fassade. Die Bandbreite der Folienrollos reicht von einer völligen Verdunkelung bis zu einem Sonnenschutz mit hoher Transparenz.
Die optische Manipulation kann aber nicht nur mit Rollos realisiert werden, sondern auch mit einer, in pneumatischen Konstruktionen, luftdruckgesteuerten Mittellage, deren Bedruckung die Negativbedruckung der Außenfolie darstellt. Durch eine Steuerung kann die Mittellage an die Innen- oder Außenfolie angedrückt werden, was dann zu einer Varianz in der Verschattung führt.
Die thermische Manipulation ist aufgrund immer weiter optimierter U-Werte interessant geworden. Die hoch gedämmten Fassaden verhindern im Sommer, dass der tagsüber aufgewärmte Innenraum die Wärme nachts wieder nach außen abgeben kann. Ein Folienelement, was dies ermöglichen würde, könnte Wärmelasten im Sommer reduzieren. Eine Möglichkeit könnte sein, einen Überdruckpneu in einen Unterdruckpneu umschalten zu können. Eine andere Möglichkeit könnte sein, mechanisch vorgespannte Folien innerhalb eines Überdruckpneus als Rollos auszuführen, um sie nachts aufrollen zu können und den U-Wert für die nächtliche Auskühlung zu erhöhen.

Kapitel 3: Bauphysik
Die bauphysikalischen Untersuchungen der Folie konzentrierten sich auf die U-Wertermittlung mit Hilfe von Rechenverfahren aus DIN Normen, Versuchen zur U-Wertermittlung in einem Fassadenprüfstand und der rechnerischen Analyse der Kondensatbildung in Folienfassaden.
Normative Vorgaben zur Berechnung eines U-Wertes sind:
DIN EN ISO 6946 Juni 2005: Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren
DIN EN 673 Juni 2003: Glas im Bauwesen – Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert)
Obwohl beide Normen Einschränkungen im Anwendungsbereich treffen, die Folienkonstruktionen im Wesentlichen ausschließen, soll zunächst mit Hilfe dieser Normen ein Folienmodul mit zwei Folien und einer dazwischen liegenden Luftschicht berechnet werden. Das soll die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung zeigen und die Normen miteinander vergleichen. Außerdem soll es im Vergleich mit den durchgeführten Versuchen zur U-Wertermittlung zeigen, ob eine der beiden Normen näherungsweise zur Ermittlung der U-Werte von Folienkonstruktionen verwendet werden kann.
Im Fassadenprüfstand des Hermann-Rietschel-Instituts an der TU Berlin wurden sieben Folienmodule untersucht, wobei vier davon mechanisch vorgespannte Module waren und

drei pneumatisch vorgespannt. Der Prüfstand misst die Energie, die benötigt wird, einen warmen Raum, der durch den Probekörper von einem kalten Raum getrennt ist, auf einer bestimmten Temperatur zu halten. Es wurden fünf Temperatursensoren jeweils auf die Warm- und die Kaltseite des Probekörpers geklebt und die Raumluft über jeweils drei Sensoren im Kalt- und im Warmraum aufgenommen.
Die mechanisch vorgespannten Elemente wurden mit unterschiedlichen Folienmaterialien ausgeführt und die pneumatisch vorgespannten Elemente mit unterschiedlichen Kissenstärken. Der Vergleich der mechanisch vorgespannten Module ergab, dass die Folie offensichtlich den U-Wert beeinflusst. Aufgrund der sehr geringen Materialstärke der Folie ist davon auszugehen, dass diese U-Wertdifferenz nicht auf die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit der Folien zurück zu führen ist, sondern auf ein unterschiedliches Strahlungsvermögen. Die Werte lagen zwischen 3,3 und 4,2 W/m^2K. Der Vergleich der pneumatisch vorgespannten Elemente ergab, dass sich der U-Wert mit steigender Kissendicke verschlechterte, was der Berechnung nach den Normen widerspricht. Die Werte lagen bei den Pneus zwischen 3,2 und 4,1 W/m^2K. Der Grund für die Verschlechterung des U-Wertes bei größerer Luftschicht liegt in der Luftzirkulation im Pneu. Diese kann offensichtlich bei größerer Luftschicht besser stattfinden und die Wärme effektiver transportieren. Die Normen zur Berechnung des U-Wertes ergaben deutlich andere Werte, als die Versuchsreihe und können somit auch nicht näherungsweise für Folienkonstruktionen Anwendung finden.
Die Berechnung des Tauwasseranfalls nach DIN 4108-3:2001 an zweilagigen Folienelementen ergab, dass im Folienzwischenraum eine Kondensatbildung ohne Zuhilfenahme technischer Hilfsmittel (Lufttrocknung) nicht vermieden werden kann. Es kann unter Umständen sogar zur Tauwasserbildung auf der Raumseite des Elementes kommen.

Kapitel 4: Mechanische Eigenschaften
Es gibt keine Norm und auch keine Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung, die für das Material ETFE mechanische Eigenschaften vorgibt. Jeder Hersteller kann also durch Zugabe unterschiedlicher Zusatzmittel die mechanischen Eigenschaften beeinflussen. Es wurde zunächst ein einaxialer Zugversuch durchgeführt, der Aufschluss darüber bringen sollte, wie sich die Materialproben mehrerer Hersteller mit verschiedenen Materialstärken und Modifikationen in ihrem mechanischen Kurzzeitverhalten voneinander unterscheiden. Hierzu wurden aus zehn verschiedenen Proben jeweils fünf Teststreifen entnommen, mit denen ein einaxialer Zugversuch bis zum Bruch mit einer Zuggeschwindigkeit von 100 mm/min durchgeführt wurde.
Die Spannungen wurden bei einer Dehnung von 2,5% und 15% miteinander verglichen. Obwohl acht der zehn Folien nur sehr geringe Abweichungen aufwiesen, lag der Maximalwert bei 2,5% Dehnung 31% über dem Minimalwert. Weder die Materialstärke, noch irgendwelche Modifikationen haben das Materialverhalten beeinflusst. Lediglich zwei Produktchargen, die von anderen Folien optisch nicht zu unterscheiden waren, wichen deutlich ab.
Im einaxialen Zugversuch wurde außerdem der Einfluss der Zuggeschwindigkeit auf die

Materialsteifigkeit untersucht. Hierfür wurde eine Folie mit 50 mm/min, 100 mm/min und 500 mm/min bis zum Bruch belastet. Die Untersuchung ergab ein typisches Materialverhalten für Thermoplaste. Das Material wurde mit zunehmender Geschwindigkeit steifer. Der Spannungswert bei 2,5% Dehnung war bei der maximalen Geschwindigkeit um 19% höher als bei 50 mm/min.
Zur Untersuchung des Landzeitverhaltens von ETFE wurden Relaxationsversuche durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurde eine 0,2 mm starke ETFE Folie einaxial auf eine vorgegebene Länge gedehnt. Diese Dehnung wurde dann über einen Zeitraum von 1000h konstant gehalten. Gemessen wurde die Spannungsänderung über diesen Zeitraum. Nach zwei Versuchen wurde die Versuchszeit auf 500h reduziert, da sich zeigte, dass nach diesem Zeitraum keine weitere Veränderung stattfindet. Insgesamt wurden sieben Relaxationsversuche durchgeführt. Das Ergebnis war unerwartet und hoch interessant: während es bei Kurzzeitversuchen einen scheinbar elastischen Bereich bis zu einer Spannung von 15 N/mm² gibt und ab dieser Spannung die Spannungs- Dehnungslinie deutlich abflacht, die Spannungen aber trotzdem weiter leicht zunehmen, ist im Langzeitversuch schon wesentlich früher, nämlich bei 7 N/mm² die maximale Spannung erreicht und es findet absolut keine weitere Spannungserhöhung statt.
Zur Ermittlung der E-Moduln und der Querdehnzahl wurden biaxiale Tests gefahren. Zu diesem Zweck wurde zunächst eine Maschine an der TU- Berlin konstruiert. Bei den Versuchen zur Ermittlung der Querdehnzahl wird die Probe zunächst in beiden Richtungen etwas vorgespannt, dann wird die Dehnung in einer Richtung erhöht, während sie in der anderen Richtung konstant gehalten wird. Die Versuche ergaben etwas Unerwartetes. Die in der Literatur angegebene Querdehnzahl von 0,45 konnte nicht bestätigt werden [Bar03a; Schö07], sondern es ergab sich in drei Versuchen eindeutig eine Querdehnzahl von 0,33. Des Weiteren wurden Versuche zur Ermittlung der E-Moduln unter biaxialer Belastung durchgeführt, wobei sich ergab, dass das Materialverhalten in Bahnrichtung und quer dazu identisch ist und das E-Modul, wenn das Material einmal in den plastische verformt wurde, bei anschließender zyklischer Belastung einen geringeren E-Modul aufweist, als im elastischen Bereich.

Kapitel 5: Bemessung
Bei der Bemessung wurde zunächst die rechtliche und normative Grundlage von ETFE - Konstruktionen dargestellt. Da es keine Norm und keine Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung gibt, muss die Bemessung immer über eine Zulassung im Einzelfall geregelt werden. Der Vergleich mit der Norm für PVC beschichtete PES Membrane E DIN 18204-1 ist aufgrund des stark unterschiedlichen Materialverhaltens ungeeignet. Während die PVC beschichtete PES Membran ein sprödes Bruchverhalten aufweist, hat ETFE einen sehr ausgeprägten plastischen Verformungsbereich. Es ist also sinnvoller die Folie mit Stahl zu vergleichen. Die Steifigkeiten und Festigkeiten unterscheiden sich zwar gravierend, durch die Möglichkeit der plastischen Verformung von Stahl können aber Vergleiche in Berechnungsmethoden

gezogen werden. Bei der Bemessung der Folie wurde eine Untersuchung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit differenziert. Die Bemessung der Tragfähigkeit wurde nach dem aus dem Stahlbau bekannten Verfahren plastisch-plastisch durchgeführt. Dieses Verfahren hat zur Folge, dass sehr große Verformungen entstehen können und die Folie sehr große Lasten aufnehmen kann. Durch die großen Verformungen entsteht eine synklastische Form, deren Stich soweit anwächst, bis die Last abgetragen werden kann. Die Folie wird quasi geometrisch ertüchtigt. Die weit größeren Einschränkungen für das Material bringt die Gebrauchstauglichkeit. Hier soll die Gewährleistung von Faltenfreiheit bei mechanisch vorgespannten Konstruktionen berechnet werden und die Vermeidung einer dauerhaften Kissenvergrößerung bei pneumatischen Konstruktionen. Die Gebrauchstauglichkeit muss für kurzzeitige Belastungen und Langzeitbelastungen gegeben sein und außerdem Temperaturerhöhungen berücksichtigen. Bei der Bewertung des Langzeitverhaltens von ETFE muss berücksichtigt werden, dass hier das Bolzmannsche Superpositionsprinzip gilt, was besagt, dass eine Last, die mehrere Male kurz angreift, die gleiche Kriechverformung hervorruft, wie eine gleich große Last, die nur einmal angreift für einen Zeitraum, der der Summe der kurzen Zeitintervalle entspricht. Daraus folgt, dass nicht nur Eigengewicht, Vorspannung und Schneelasten, sondern auch die sehr unstetige Windlast zu einer Dauerlast wird.
Mit Hilfe dieses Bemessungskonzepts wurden vier verschiedene Modulformen untersucht und miteinander verglichen. Es wurden ein quadratisches und ein rechteckiges Modul mit einem Seitenverhältnis von 1/3 gewählt und diese jeweils mit mechanisch und pneumatisch vorgespannter ETFE Folie berechnet. In einer ersten Untersuchung wurden die Größen der Module variiert und die maximalen Windlasten ermittelt. In einer zweiten Untersuchung wurden die Module mit Lasten aus dem „New Technology“ Praxisprojekt aus Kapitel 6 bemessen und auf ihre Tauglichkeit überprüft.
Die Untersuchungen haben ergeben, dass es kaum möglich ist, mechanisch vorgespannte Module ohne Nachspannvorrichtung zu bauen. Außerdem muss die mechanische Vorspannung aufgrund des sehr hohen Temperaturausdehnungskoeffizienten von $\alpha_T = 0{,}00013\ K^{-1}$ so hoch gewählt werden, dass die Spannung sehr nahe an der maximal möglichen Dauerspannung von 7 N/mm^2 liegt. Dieses Problem entsteht bei pneumatischen Konstruktionen nicht, was sich dann auch in den weit größeren Spannweiten der Pneus gegenüber den mechanisch vorgespannten Modulen widerspiegelt.

Kapitel 6: Praxisprojekt
Im Rahmen des Forschungsprojektes „Young Cities – New Towns in Iran“ ist ein Bürogebäude unter dem Projekttitel „New Technology“ geplant worden. Die Fassade dieses Projektes ist eine Doppelfassade mit innen liegender Isolierverglasung und außenliegender mechanisch vorgespannter ETFE Folie. Die Fassade ist hinterlüftet, wobei die Lüftungsklappen auch geschlossen werden können, sodass die Fassade von einer Zweite- Haut- Fassade zu einer Pufferfassade umgeschaltet werden kann. Im Fassadenzwischenraum ist ein pigmentiertes

metallbedampftes Folienrollo als außen liegender Sonnenschutz installiert. Im Innenraum ist ein weiteres Folienrollo zur Verdunklung geplant. Ein Fassadenmodul ist 2,50m breit und 6,00 m hoch. Die Folie wird in Elementmitte durch einen senkrecht angeordneten Bogen nach außen gedrückt und ist somit antiklastisch gekrümmt.
Dieses Modul wurde mit dem im vorangegangen Kapitel erarbeiteten Bemessungskonzept berechnet. Als Ergebnis kann man sagen, dass gerade in heißen Regionen, wie dem Iran, eine mechanisch vorgespannte ETFE Fassade nicht zu empfehlen ist. Bei extremen Temperaturschwankungen kann die Faltenfreiheit an Sommertagen nicht garantiert werden. Die antiklastische Krümmung bringt keine Vorteile, weil die Verformungen der Folie so groß sind, dass die Spannrichtung schnell erschlafft. Bisher wurde angenommen, dass dies durch die extreme Querdehnzahl von 0,45 nicht geschieht, sondern auch die Spannrichtung durch die zusätzliche Belastung aus der Querdehnung gespannt bleibt. Mithilfe der biaxialen Versuche konnte aber eindeutig gezeigt werden, dass dies nicht der Fall ist, da die Querdehnzahl weit kleiner ist. Das Modul würde nicht zerstört werden, würde aber an sehr heißen Tagen Falten bilden. Auch unter hoher Windlast kann eine Faltenbildung nicht ausgeschlossen werden. Eine Nachspannmöglichkeit wäre unbedingt erforderlich. In solchen Regionen ist es daher zu empfehlen, statt mechanisch vorgespannter Folien, pneumatische Konstruktionen einzusetzen.

Ausblick
Die Fassade muss in Zukunft weiter entwickelt werden, um unsere Gebäude umweltfreundlicher bauen zu können, wobei, wie schon in der Einleitung erwähnt, dies in der Praxis nichts mit dem hohen Ziel der Bewahrung von Gottes Schöpfung zu tun hat, sondern dem hohen Energiepreis zu verdanken ist. Auf diesem Weg der Weiterentwicklung wird es die Folienfassade schwer haben, da sie gegenüber der Glasfassade mehrere Jahrzehnte Entwicklung aufholen muss.
Die Folie wird aufgrund ihrer, mit der Membrantragwirkung verbundenen Formensprache, ihrer mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften nie eine Standardlösung für transparente Flächen werden, wie es Glas ist. Es wird aber für besondere Anforderungen an Form oder Funktion immer wieder Fälle geben, in denen sie Glas überlegen ist und zur Anwendung kommen wird.
Es muss weiter an der Spezifizierung der bauphysikalischen Eigenschaften gearbeitet werden. Wenn Folien als Gebäudehülle eingesetzt werden sollen, müssen Möglichkeiten geschaffen werden U-Werte sinnvoll mit Hilfe von Abmaßen und Anzahl der Folienlagen zu ermitteln. Pauschale Aussagen über U-Werte nur anhand der Anzahl der Folienlagen sind hierbei etwa so sinnvoll, wie eine pauschale Aussage über Verglasungen anhand der Anzahl der Scheiben.
Die mechanischen Eigenschaften der ETFE Folie sind stark temperaturabhängig. Hersteller machen zwar Angaben über bestimmte Werte in Abhängigkeit der Temperatur, es fehlen allerdings Informationen über das temperaturabhängige Kriech- und Relaxationsverhalten. Diese Informationen werden erheblichen Einfluss auf die zulässigen Spannungen bei der Bemessung von Folien haben.

Ein weiterer Punkt, der noch dringend umfangreich bearbeitet werden muss, ist die Unterkonstruktion. Während bei Fenstern zwischen den U-Werten für Rahmen und Glas unterschieden wird, spielt der „Rahmen“ bei Folien in der aktuellen Diskussion kaum eine Rolle. Zwar ist der Rahmen bei großen Modulen vom Flächenanteil klein, die Kondensatbildung kann aber zu erheblichen Baumängeln führen. Die weitere Optimierung der Folienanordnung und der Modifikationen zur Minimierung des Wärmedurchgangs bedeutet außerdem einen immer größeren Anteil der verlorenen Energie durch die Unterkonstruktion. Beides sollte im gleichen Maß entwickelt werden, um ein schlechtes Image der Folie durch Baumängel oder hohen Energieverbrauch zu vermeiden.
Die Entwicklung muss auch beim Grundmaterial selbst weiter gehen. ETFE ist im Moment die einzige Folie, die für konstruktiven Folienbau angewendet wird. Die Anwendung von EFEP Folie ist wegen der toxischen Gase im Brandfall keine Alternative.
Der Hauptmangel, der ETFE-Folie für den Einsatz im Fassadenbereich so stark einschränkt, ist die leicht milchige Durchsicht, was mit der teilkristallinen Struktur zusammenhängt. Sollte es gelingen, eine mechanisch belastbare, wirklich durchsichtige Folie herzustellen, würde einem ungebremsten Siegeszug der Folie im Bauwesen nichts mehr im Wege stehen.
Für Sonderlösungen ist die Folie im Bauwesen schon jetzt nicht mehr weg zu denken. Die Forschung in der Industrie bei kleinen Produktmargen ist aus wirtschaftlichen Gründen nur begrenzt möglich. Die Universitäten sind hier gefragt, Wissen zu schaffen und Entwicklung zu unterstützen.

Die Folie ist ein spannendes Material, das als Thema, im Gegensatz zur mechanisch vorgespannten Folie, nicht an Spannung verliert.

Literaturverzeichnis

Bücher:

[Bie77] Prof. K. Biederbick; Kunststoffe kurz und bündig; Vogel Verlag; 4. neubearbeitete und erweiterte Auflage; 1977

[Blä02] W. Bläsi; Bauphysik; Verlag Europa-Lehrmittel; 4. Auflage 2002

[Blu01] Blum, Compagno, Fitzner, Heusler, Hortmanns, Hosser, Müller, Nolte, Schwarzkopf, Sedlacek, Thiel, Ziller; Doppelfassaden; Ernst & Sohn Verlag 2001

[Bög04] H. Bögner; Vorgespannte Konstruktionen aus beschichteten Geweben und die Rolle des Schubverhaltens bei der Bildung von zweifach gekrümmten Flächen aus ebenen Streifen; Dissertation am Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart 2004

[Com99] A. Compagno; Intelligente Glasfassaden; Birkhäuser Verlag; 4. Auflage 1999

[Czi95] Univ.-Prof. Dr. Erich Cziesielski; Bauphysik II Tauwasserschutz Vorlesungsskript; 4. Auflage 1995

[Die96] P. Diem; Bauphysik im Zusammenhang; Bauverlag; 2. Auflage 1996

[Fra96] Dr. rer. nat. Dipl.-Chem. A. Franck; Kunststoff – Kompendium; Vogel Buchverlag; 4. Auflage 1996

[Eur04] European Design Guide for Tensile Surface Structures, herausgegeben von B. Forster und M. Mollaert, 2004

[Gla06] Glasbau Atlas, Schittich, Staib, Schuler, Balkow, Sobek, Birkhäuser Verlag für Architekten, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, 2006

[Gre03] M. Gressmann, H.-J. Pahl, Fenster-, Türen- und Fassadentechnik, Europa-Lehrmittel Verlag, 2003

[Haa13] Dr.-Ing. R. Haas; Stoffdehnung und Hüllenform, Beitrag zur Konstruktion von Ballonhüllen; Springer Verlag 1913

[Hol05] Prof. Dr.-Ing. K. Holschemacher (Hrsg.), Entwurfs- und Berechnungstafeln für Bauingenieure, Bauwerk Verlag, 2. aktualisierte und erweiterte Auflage, 2005

[Ing96] Der Ingenieurbau, Grundwissen, Werkstoffe, Elastizität, Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Mehlhorn, Ernst & Sohn Verlag 1996

[KLi92] O. Klingmüller, U. Bourgund; Sicherheit und Risiko im Konstruktiven Ingenieurbau; Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, 1992

[Leo80] F. Leonhardt; Vorlesung über Massivbau Teil 5; Springer-Verlag 1980

[Man04] H. Mang, G. Hofstetter, Festigkeitslehre, Springer-Verlag, 2. Auflage 2004

[Ott54] F. Otto; Das hängende Dach; Bauwelt Verlag 1954

[Ott62] F. Otto; Zugbeanspruchte Konstruktionen, Band 1 und 2; Ullstein Verlag 1962

[Pott04] Dr.-Ing. U. Pottgießer; Fassadenschichtungen – Glas Mehrschalige Glaskonstruktionen; Bauwerkverlag 2004

[Pül02] G. Pültz; Bauklimatischer Entwurf für moderne Glasarchitektur; Ernst & Sohn 2002

[Sax03] K. Saxe; Zum Einsatz von ETFE-Folien für einlagige Membrankonstruktionen am Beispiel des Konferenzzentrums der DBU in Osnarbrück; Tagungsband zum Symposium Transparenz und Leichtigkeit; Essen 2003

[Schi07] L.Schiemann, R. Barthel, S. Hinz and M. Stephani; Bursting Tests of ETFE-Foils; International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures; STRUCTURAL MEMBRANES 2007

[Schw90] F. R. Schwarzl; Polymermechanik – Struktur und mechanisches Verhalten von Polymeren; Springer – Verlag 1990

[SGM03] Stahl, Glas und Membrane im Industriebau, Herausgeber: Arbeitsgemeinschaft Industriebau, Callwey Verlag, 2003

[Spa87] Prof. Dr. sc. techn. G. Spaethe; Die Sicherheit tragender Baukonstruktion; VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1987

[Wid07] Dr.-Ing. E. Widjaja; Lastannahmen nach neuen Normen; Bauwerkverlag 2007

Zeitschriften- und Internetartikel:

[Bar03] R. Barthel, N. Burger, K. Saxe; Dachkonstruktionen mit ETFE; DBZ Deutsche Bauzeitschrift 4/2003; S. 72 ff.

[Bar01] R. Barthel, H. Markert; Große Spannweiten – Tragstrukturen weit gespannter Dächer; Detail 5/2001

[Bon71] R. Bonart, F. Schultze-Gebhardt; Struktur und Eigenschaften von verstreckten polymeren (fasern); Angewandte Makromolekulare Chemie Volume 22, Issue 1, 30. März 1972, Seite 41-86

[Bri04] B.N. Bridgens, P.D. Gosling, M.J.S. Brichall; Membran Material behavior concepts, practice and developments; The Structural Engineer 20 Juli 2004 Seite 30

[Cap07] http://capricenter.cwru.edu; Center for Applied Polymer Research; 2007

[Kle03] Dr.-Ing. M. Klein; Baurechtliche Behandlung von Membranbauten; DBZ 4/2003; S. 84 ff.

[Leh06] Dr.-Ing. S. Lehnert, Dr.-Ing. T. Schween; Bauen mit Folienkissen; Bauingenieur Band 81, Juni 2006

[Mon04] E. Moncrieff, R. Houtman, J. L. Coenders; Report Appropiate modelling of textile for the design of surface stressed structures; IASS Symposium Montpellier 2004

[Mor07] K. Moritz; Bauweisen der ETFE-Foliensysteme; Stahlbau 76 (2007), Heft 5; S. 336 ff.

[Mor03] K. Moritz; Stahl, Glas und Membranen im Industriebau Kapitel Membranbau – Transparente Gebäudehüllen aus ETFE-Folie; Callwey 2003

[Mor02] K. Moritz, R. Barthel; Transparente Architektur – Bauen mit ETFE-Folien; Detail 12/2002; S. 1616 ff.

[Mün95] R. Münsch, H.-W. Reinhardt; Zur Berechnung von Membrantragwerken aus beschichteten Geweben mit Hilfe genährter elastischer Materialparameter; Bauingenieur 70 1995; S. 271 ff.

[Nau03] Dr. W. Naumer; Meilensteine der Entwicklung von transparenten Membrandächern; Glas Architektur und Technik 1/2003 Transparente Dächer

[NRC07] http://imi.cnrc-nrc.gc.ca/Carrefour_d_informations/Factsheets/films_e.html; National Research Council Canada (NRC); 2007

[Rei76] Dr.-Ing. H.-W. Reinhardt; Zweiachsige Prüfung und Festigkeit von textilen Baustoffen; Die Bautechnik 4/1976; S. 138 ff.

[Schl00] Dr.-Ing. M. Schlaich; Stierkampfarena-Dach in Madrid, Kuppel und Kissen; db Deutsche Bauzeitung 9/2000; S. 59 ff.

[Schö07] L. Schöne; Bauen mit ETFE-Folien – Ein Praxisbericht; Stahlbau 76 (2007), Heft 5; S. 305 ff.

[Schö04] L. Schöne; Florale Transparenz: Das neue Dach über dem Innenhof der IHK in Würzburg; Stahlbau Heft 11 73. Jahrgang November 2004

[Schu04] H. C. Schulitz; Das Niedersachsenstadion, die AWD Arena; Stahlbau 73 (2004) Heft 4; Ernst & Sohn

[Wag96] Dr.-Ing. R. Wagner, T. Raible; Wann trägt Luft wirklich? ; Detail 8/96

[Wet05] M. Wetzel, A. Scharlau; Das Orang-Utan-Haus im Tierpark Hagenbeck in Hamburg; Stahlbau 74 (2005), Heft 4; S. 229 ff.

[Hag04] Transparente Außenhülle für das Orang-Utan-Haus im Tierpark Hagenbeck; Stahlbau Heft 11 73. Jahrgang November 2004

[Lei02] Raumfahrtmuseum in Leicester; Detail 12/2002

[Dre01] Solargarten Afrikahaus im Zoo Dresden; DBZ Deutsche Bauzeitschrift 8/2001; S. 56 ff.

[Koc03] Bayrische Spannungsbogen Informationszentrum in Kochel; DBZ Deutsche Bauzeitschrift 4/2003; S. 58 ff.

[Cor00] Eden-Project in Cornwall; Detail 6/2000; S. 987 ff.

[Don00] Pavillon im Earth Centre in Doncaster; Detail 6/2000; S. 1002 ff.

[Koc02] Informationszentrum in Kochel am See; Detail 12/2002; S. 1570 ff.

[Pri00] Strandgut Freizeitbad in Prien/Chiemsee; DBZ Deutsche Bauzeitschrift 7/2000; S. 52 ff.

[Sta01] Eden Project in St Austell; Detail 5/2001; S. 868 ff.

[Wdr03] Internetartikel Urteil gegen Hitze im Büro; wdr.de; 07.05.03; http://www.wdr.de/themen/wirtschaft/1/arbeitsplatz_temperatur/ index. jhtml? rubrikenstyle = wirtschaft

[Tex01] http://www.textile-roofs.de; Bericht zur Textile Roofs 2001; Dr. J.I. de LLORENS

[Tex06] http://www.textile-roofs.de; Bericht zur Textile Roofs 2006; Dr. J.I. de LLORENS

[Str07] L. Schiemann, R. Barthel, S.Hinz, M. Stephanie; Bursting Tests Of ETFE-Foils; Structural Membranes 2007; International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures

[Lig07] Elektrolumineszensfolie als neues Leuchtmedium http://lightec.com/downloads/Vortrag_Leuchtfolien.pdf

[TUD07] TU-Delft Homepage (Prüfmaschinen) http://labs.tudelft.nl/ index.php? action =instrument&id=132

Produktinformationen:

[Mul04] Produktinformation Multifilm 2004

[Age06] Produktinformation Agero 2006

[Now04] Produktinformation Nowofol 01/2004

[Dup03] Du Pont Tefzel, Properties Handbook 04/2003

[Flu07] http://www.fluon.jp/fluon/english/products/etfe_film/apply_01.html; Eigenschaften von ETFE; Aasahi Glass Co.,Ltd.

[Orp05] Produktinformation, Panzerfilm Be Safe Behind Glass, Orpro Company GmbH 05/2005

[Sou07] http://www.southwall.com/southwall/Home/ Residential/Products/ HeatMirrorInsulatingGlass.html; Southwall Technologies

Normen, Zulassungen und Verordnungen:

[DIN527] DIN EN ISO 527-1: 1996 Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften

[DIN673] DIN EN 673: 2003 Glas im Bauwesen, Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert)

[DIN1055] DIN 1055:2005 Einwirkungen auf Tragwerke

[DIN4108] DIN 4108 Wärmeschutz im Hochbau

[DIN4134] DIN 4134:1983 Tragluftbauten, Berechnung, Ausführung und Betrieb

[DIN6946] DIN EN ISO 6946:2005 (Entwurf) Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient

[DIN18204] DIN 18204-1 2003 (Entwurf) Raumabschließende Bauteile aus textilen Flächengebilden und Folien (Zeltplanen) für Hallen und Zelte

[DIN53354] DIN 53354: 1981 Prüfung von Kunstleder; Zugversuch

[DIN53363] DIN 53363:2003 Weiterreißversuch an trapezförmigen Proben mit Einschnitt

[DIN899-1] DIN EN ISO 899-1 Kunststoffe, Bestimmung des Kriechverhaltens, Teil 1: Zeitstand-Zugversuch (ISO 899-1:2003)

[ABP03] Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis, Transparente oder weiße oder bedruckte ETFE-Folie „NOWOFOL ET-Folie 6235“ als schwerentflammbarer Baustoff (Baustoffklasse DIN 4102-B1), Prüfzeugnis Nummer: P-BWU03-I-16.5.107, MPA Stuttgart 11/2003

[VüA04] Verordnung über Arbeitsstätten vom 12.08.2004; Bundesgesetzblatt Jahrgang 2004 Teil 1 Nr. 44, ausgegeben zu Bonn am 24.08.2004

[Enev07] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung EnEV); Bundesgesetzblatt 2007 Teil I Nr. 34 ausgegeben zu Bonn am 26. Juli 2007

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Temperaturabhängiger Zustand amorpher Thermoplaste [Bie77]..... 19
Bild 2: Temperaturabhängiger Zustand teilkristalliner Thermoplaste [Bie77]..... 19
Bild 3: Lichtdurchlässigkeit von ETFE im Vergleich [Flu07]..... 22
Bild 4: Abluftfassade..... 27
Bild 5: Pufferfassade..... 28
Bild 6: Korridorfassade..... 29
Bild 7: Schachtfassade..... 30
Bild 8: Seilverformung unter Auflast..... 34
Bild 9: Verformung eines vorgespannten Seils unter Auflast..... 35
Bild 10: Trag- und Spannrichtung bei mechanisch vorgespannten Membranen [Ott54]..... 35
Bild 11: Belastung auf einen Pneu..... 36
Bild 12: Luftmatratzen..... 36
Bild 13: Beispiele für Hochpunktkonstruktionen..... 38
Bild 14: Beispiele für bogengestützte Membranformen..... 39
Bild 15: Membranvorspannung durch Bogenverlängerung..... 40
Bild 16: Membranvorspannung mit Randseilen..... 41
Bild 17: Traglufthalle (Nutzer im Überdruckbereich)..... 42
Bild 18: Pneu als Dach (Nutzer außerhalb des Überdruckbereiches)..... 42
Bild 19: Gebäude mir pneumatisch vorgespannten Elementen..... 43
Bild 20: Überdruckpneu..... 45
Bild 21: Unterdruckpneu..... 45
Bild 22: 2-lagig mechanisch vorgespanntes Modul..... 45
Bild 23: Überdruckpneu + mechanisch vorgespannter Folie außenliegend..... 45
Bild 24: Überdruckpneu + mechanisch vorgespannter Folie innenliegend..... 45
Bild 25: Unterdruckpneu + mechanisch vorgespannter Folie außenliegend..... 45
Bild 26: Unterdruckpneu + mechanisch vorgespannter Folie innenliegend..... 46
Bild 27: 3-lagiges mechanisch vorgespanntes Modul..... 46
Bild 28: Überdruckpneu + mechanisch vorgespannte Folie innen- und außenliegend 46
Bild 29: Überdruckpneu + 2 mechanisch vorgespannte Folien innenliegend..... 46
Bild 30: Unterdruckpneu + mechanisch vorgespannte Folie innen- und außenliegend 47
Bild 31: Unterdruckpneu + 2 mechanisch vorgespannte Folien innenliegend..... 47
Bild 32: Streckmetall als Schutzmaßnahme (Schnitt)..... 48
Bild 33: Streckmetall als Schutzmaßnahme (Ansicht)..... 48
Bild 34: Senkrechte Aluminiumlamellen als Schutzmaßnahme (Schnitt)..... 49
Bild 35: Senkrechte Aluminiumlamellen als Schutzmaßnahme (Ansicht)..... 49
Bild 36: Senkrechte Natursteinlamellen als Schutzmaßnahme (Schnitt)..... 49
Bild 37: Senkrechte Natursteinlamellen als Schutzmaßnahme (Ansicht)..... 49
Bild 38: Holzlamellen als Schutzmaßnahme (Schnitt)..... 50

Bild 39: Holzlamellen als Schutzmaßnahme (Ansicht)..... 50
Bild 40: Photovoltaiklamellen als Schutzmaßnahme (Schnitt)..... 50
Bild 41: Photovoltaiklamellen als Schutzmaßnahme (Ansicht)..... 50
Bild 42: Pavillon mit Doppelfassade..... 52
Bild 43: Bürogebäude mit Doppelfassade..... 52
Bild 44: Werbeaufdruck auf Folienfassade..... 53
Bild 45: Isolierverglasung mit Folien im Scheibenzwischenraum [Sou07]..... 54
Bild 46: Lichtspektrum..... 56
Bild 47: Sonnenschutz mit luftdruckgesteuerter Mittellage..... 57
Bild 48: Pneumatischer U-Wertmanipulator..... 58
Bild 49: mechanischer U-Wertmanipulator..... 59
Bild 50: Folienrolloproben..... 60
Bild 51: 2-lagige Folienmodule..... 61
Bild 52: 3-lagige Folienmodule..... 62
Bild 53: 4-lagige Folienmodule..... 62
Bild 54: Wärmefluss im 2-lagigen Folienmodul..... 64
Bild 55: Erwartete Luftbewegung im Überdruckpneu..... 64
Bild 56: Nach Versuchsauswertung modifizierter Wärmefluss..... 64
Bild 57: Schematische Luftbewegung im 3-lagigen Überdruckpneu..... 65
Bild 58: Schematische Luftbewegung im Unterdruckpneu..... 65
Bild 59: Schematische Luftbewegung in 2-lagig mechanisch vorgespannten Modul... 65
Bild 60: Schematische Luftbewegung in 3-lagig mechanisch vorgespannten Modul mit schräger Mittelfolie..... 65
Bild 61: Grundriss Fassadenprüfstand..... 71
Bild 62: Versuchsstand Schutzraumseite..... 72
Bild 63: Versuchstand Kaltraumseite..... 72
Bild 64: Versuchstand Draufsicht..... 73
Bild 65:Versuchsstand mit abgerücktem Heizkasten..... 73
Bild 66: Innenansicht Heizkasten mit Wärmequelle..... 74
Bild 67: Innenansicht Heizkasten..... 74
Bild 68: Versuchsstand mit transparentem Heizkasten..... 74
Bild 69: Gemessener Wärmefluss im Versuchsstand..... 75
Bild 70: Sensoranordnung Kaltseite (Zeichnung)..... 76
Bild 71: Sensoranordnung auf Probekörper (Kaltseite)..... 76
Bild 72: Sensoranordnung im Kaltraum..... 76
Bild 73: Sensoranordnung Warmseite (Zeichnung)..... 77
Bild 74: Sensoranordnung auf Probekörper (Warmseite)..... 77
Bild 75: Sensoranordnung im Warmraum..... 77
Bild 76: Versuchsergebnis der Styroporplatte..... 78
Bild 77: Probekörper links U1 (ETFE) rechts U2 (PE)..... 80

Bild 78: Versuch U1 Probekörper eingebaut und mit Sensoren bestückt..... 80
Bild 79: Versuch U6 Probekörper eingebaut, Ansicht Kühlraumseite..... 80
Bild 80: Versuch U6 Eingebaut, Ansicht Warmseite..... 81
Bild 81: Versuchsergebnis U1..... 82
Bild 82: Versuchsergebnis U2..... 83
Bild 83: Versuchsergebnis U3..... 84
Bild 84: Versuchsergebnis U4..... 85
Bild 85: Versuchsergebnis U5..... 86
Bild 86: Versuchsergebnis U6..... 87
Bild 87: Versuchsergebnis U7..... 88
Bild 88: U-Wert Ergebnisse (Diagramm)..... 89
Bild 89: Versuchsergebnis Wärmedurchgangwiderstand (Diagramm)..... 90
Bild 90: U-Wertvergleich Glas - Folie (Diagramm)..... 91
Bild 91: Glaserdiagramm für Folienfester mit 6 cm Luftschicht..... 96
Bild 92: Glaserdiagramm für Folienfenster mit 0,194 m^2K/W Wärmeübergangswiderstand..... 97
Bild 93: Weiterreißversuch nach DIN 53356..... 100
Bild 94: Weiterreißversuch nach DIN 53363..... 100
Bild 95: DSC Analyse Versuchsergebnis..... 102
Bild 96: Versuchsmaschine für einaxiale Zugversuche..... 103
Bild 97: Folienprobe Versuch M1.1..... 105
Bild 98: Spannungs- Dehnungsdiagramm Versuch M1.1..... 105
Bild 99: Folienprobe Versuch M1.2..... 106
Bild 100: Spannungs- Dehnungsdiagramm Versuch M1.2..... 106
Bild 101: Folienprobe Versuch M1.3..... 107
Bild 102: Spannungs- Dehnungsdiagramm Versuch M1.3..... 107
Bild 103: Folienprobe Versuch M1.4..... 108
Bild 104: Spannungs- Dehnungs Diagramm Versuch M1.4..... 108
Bild 105: Folienprobe Versuch M1.5..... 109
Bild 106: Spannungs- dehnungsdiagramm Versuch M1.5..... 109
Bild 107: Folienprobe Versuch M1.6..... 110
Bild 108: Spannungs- Dehnungsdiagramm Versuch M1.6..... 110
Bild 109: Folienprobe Versuch M1.7..... 111
Bild 110: Spannungs- Dehnungsdiagramm Versuch M1.7..... 111
Bild 111: Folienprobe Versuch M1.8..... 112
Bild 112: Spannungs- Dehnungsdiagramm Versuch M1.8..... 112
Bild 113: Folienprobe Versuch M1.9..... 113
Bild 114: Spannungs- Dehnungsdiagramm Versuch M1.9..... 113
Bild 115: Folienprobe Versuch M1.10..... 114
Bild 116: Spannungs- Dehnungsdiagramm Versuch M1.10..... 114

Bild 117: Spannungsvergleich bei 2,5% Dehnung..... 115
Bild 118: Spannungsvergleich bei 15% Dehnung..... 115
Bild 119: Ausgangszustand eines teilkristallinen Thermoplasts..... 116
Bild 120: Teilkristallines Thermoplast nach Umkristallisation..... 116
Bild 121: Vergleich von Prüfgeschwindigkeiten bei ETFE d=0,2mm..... 117
Bild 122: Verlauf der Kriechverformung [Leo80]..... 120
Bild 123: Entwicklung der Dehnungen und der Rückdehnungen in Abhängigkeit vom Lastniveau und der Lasteinwirkungsdauer [Bar03]..... 121
Bild 124: Kriechzahl in Abhängigkeit von der Spannung..... 122
Bild 125: Dehnung nach 1000h konstanter Spannung..... 123
Bild 126: Relaxationsversuch RV1 zeitabhängiger Spannungsverlauf..... 124
Bild 127: Relaxationsversuch RV2 zeitabhängiger Spannungsverlauf..... 125
Bild 128: Relaxationsversuch RV3 zeitabhängiger Spannungsverlauf..... 125
Bild 129: Relaxationsversuch RV4 zeitabhängiger Spannungsverlauf..... 126
Bild 130: Relaxationsversuch RV5 zeitabhängiger Spannungsverlauf..... 126
Bild 131: Relaxationsversuch RV6 zeitabhängiger Spannungsverlauf..... 127
Bild 132: Relaxationsversuch RV7 zeitabhängiger Spannungsverlauf..... 127
Bild 133: Spannungs- Dehnungsdiagramm für Spannung bei t=0 und t=unendlich..... 128
Bild 134: Berstversuch [Str07]..... 131
Bild 135: Biaxialer Zugversuch mit zylindrischem Probekörper [Haa13]..... 131
Bild 136: Biaxialer Zugversuch mit zylindrischem Probekörper unter Last [Haa13].... 131
Bild 137: Probekörper von ebenem biaxialem Zugversuch mit Einschnürung der Zuglaschen [Haa13]..... 132
Bild 138: Probekörper von ebenen biaxialen Zugversuch in Ausgangsposition..... 132
Bild 139: Probekörper von ebenen biaxialen Zugversuch im verformten Zustand, wenn in jeder Zugrichtung nur jeweils eine Klemme fahrbar ist..... 132
Bild 140: Biaxiale Prüfmaschine von Dipl.-Ing. Rudolf Haas an der Königlichen Technischen Hochschule zu Berlin [Haa13]..... 133
Bild 141: Ebener biaxialer Probekörper mit Hilfsspannern [Haa13]..... 133
Bild 142: Ebener biaxialer Versuchsaufbau mit Hilfsspannern [Haa13]..... 133
Bild 143: Biaxiale Prüfmaschine von Laboratorium Blum [Tex06]..... 134
Bild 144: Kraftmessung an der biaxialen Prüfmaschine von Laboratorium Blum [Bög04] 134
Bild 145: Probekörper der biaxialen Zugmaschine Universität Duisburg Essen..... 135
Bild 146: Probekörper der biaxialen Zugmaschine Universität Duisburg Essen im verformten Zustand..... 135
Bild 147: Biaxiale Zugmaschine der University of Newcastle [Bri04]..... 136
Bild 148: Biaxiale Zugmaschine der Firma Brückner mit Prüffeldansicht [NRC07]..... 137
Bild 149: Biaxiale Zugmaschine der Firma Brückner Seitenansicht [Cap07]..... 137
Bild 150: Biaxiale Zugmaschine der Universität Delft [TUD07]..... 138

Bild 151: Biaxiale Zugmaschine von Dr.-Ing. Trompette [Tex01]..... 139
Bild 152: Biaxiale Zugmaschine von L. S. Rasch und Bradatsch [Tex01]..... 139
Bild 153: Klemmkonstruktion der biaxialen Zugmaschine der TU-Berlin..... 142
Bild 154: Klemmvorrichtung der biaxialen Zugmaschine der TU-Berlin mit auseinandergezogenen Klemmbacken..... 142
Bild 155: Biaxiale Zugmaschine der TU-Berlin..... 143
Bild 156: Probekörper für die biaxiale Zugmaschine der TU-Berlin..... 143
Bild 157: Biaxiale Zugmaschine mit Probekörper noch nicht fixiert..... 144
Bild 158: Biaxiale Zugmaschine mit eingespanntem Probekörper..... 145
Bild 159: Biaxiale Zugmaschine mir Probekörper in gedehntem Zustand..... 145
Bild 160: Spannungen am Flächenelement..... 146
Bild 161: Spannungs- Dehnungsverlauf eines biaxialen Zugversuchs zur Ermittlung der Querdehnzahl [Eur04]..... 147
Bild 162: Koordinatensystem auf der Folienprobe 149
Bild 163: Dehnungsverlauf eines biaxialen Zugversuchs zur Ermittlung der Querdehnzahl an der TU-Berlin..... 150
Bild 164: Spannungsverlauf eines biaxialen Zugversuchs zur Ermittlung der Querdehnzahl an der TU-Berlin..... 150
Bild 165: Spannungs- Dehnungsdiagramm von Versuch BE1..... 153
Bild 166: Spannungs- Dehnungsdiagramm von Versuch BE2..... 154
Bild 167: Spannungs- Dehnungsdiagramm von Versuch BE3..... 155
Bild 168: Spannungs- Dehnungsdiagramm von Versuch BE4..... 156
Bild 169: Spannungs- Dehnungsdiagramm von Versuch BE5..... 157
Bild 170a: Häufigkeitsfunktion [Spa87].....
Bild 170b: Dichtefunktion [Spa87].....
Bild 170c: Schematische Darstellung der Sicherheitszonen [Kli92].....
Bild 171a: Spannungs- Dehnungslinie PVC-PES Typ 1 Kettrichtung (Messwerte der Firma Heytex; Julius Heywinkel GmbH; 2007)..... 160
Bild 171b: Spannungs- Dehnungslinie PVC-PES Typ 1 Schussrichtung (Messwerte der Firma Heytex; Julius Heywinkel GmbH; 2007)..... 160
Bild 172: Spannungs- Dehnungslinie von ETFE Folie..... 161
Bild 173: Verformung eines ETFE Fenstermoduls bei Bruchdehnung..... 162
Bild 174: E-Modul in Abhängigkeit von der Temperatur [Dup03]..... 163
Bild 175: Bruchfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur [Dup03]..... 163
Bild 176: Spannungs- Dehnungslinie von ETFE im Bereich von 0% bis 20% Dehnung.... 164
Bild 177: Spannungs- Dehnungsdiagramm für Spannung bei t=0 und t=unendlich..... 165
Bild 178: Modulformate für Vergleichsrechnung..... 170
Bild 179: Mechanisch vorgespanntes, quadratisches Modul..... 172
Bild 180: Mechanisch vorgespanntes, rechteckiges Modul..... 172
Bild 181: Maximale aufnehmbare Windlasten des mechanisch vorgespannten,

quadratischen Moduls..... 174
Bild 182: Maximale aufnehmbare Windlasten des mechanisch vorgespannten, rechteckigen Moduls..... 174
Bild 183: Pneumatisch vorgespanntes, quadratisches Modul..... 178
Bild 184: Pneumatisch vorgespanntes, rechteckiges Modul..... 178
Bild 185: Maximale aufnehmbare Windlasten des pneumatisch vorgespannten, quadratischen Moduls..... 180
Bild 186: Maximale aufnehmbare Windlasten des pneumatisch vorgespannten, rechteckigen Moduls..... 180
Bild 187: Vergleich der maximal aufnehmbaren Windlasten des mechanisch und des pneumatisch vorgespannten, quadratischen Moduls..... 183
Bild 188: Vergleich der maximal aufnehmbaren Windlasten des mechanisch und des pneumatisch vorgespannten, rechteckigen Moduls..... 183
Bild 189: „New Technology“ Bürogebäude in Teheran (Bild von Dipl. Ing. Philipp Derksen)..... 187
Bild 190: Innenansicht des „New Technology“ Bürogebäudes (Bild von Dipl. Ing. Philipp Derksen)..... 188
Bild 191: Grundriss Erdgeschoss des „New Technology“ Bürogebäudes..... 189
Bild 192: Grundriss 1. OG des „New Technology“ Bürogebäudes..... 189
Bild 193: Grundriss Dachgeschoss des „New Technology“ Bürogebäudes..... 190
Bild 194: Rohbau des „New Technology“ Bürogebäudes..... 191
Bild 195: „New Technology“ Fassadenmodul Innenansicht..... 192
Bild 196: „New Technology“ Fassadenmodul Außenansicht..... 192
Bild 197: „New Technology“ Fassadenmodul oberer Abschluss..... 193
Bild 198: „New Technology“ Fassadenmodul Fassadenzwischenraum in Höhe Decke über EG..... 193
Bild 199: „New Technology“ Fassadenmodul in Höhe Decke über EG Außenansicht... 194
Bild 200: „New Technology“ Fassadenmodul unterer Abschluss..... 194
Bild 201: Detail oberer Abschluss „New Technology“ Fassade..... 197
Bild 202: Detail Anschluss an Decke über EG „New Technology“ Fassade..... 198
Bild 203: Detail unterer Abschluss „New Technology“ Fassade..... 199
Bild 204: Detail im Grundriss Anschluss an Decke über EG „New Technology“ Fassade..... 200
Bild 205: Detail Eckanschluss im Grundriss Anschluss an Decke über EG „New Technology“ Fassade..... 201
Bild 206: Folienmodul der „New Technology“ Fassade aus SOFISTIK..... 202
Bild 207: „New Technology“ Grundriss schematisch..... 204
Bild 208: „New Technology“ Süd- / Nordansicht schematisch..... 204
Bild 209: „New Technology“ Ost- / Westansicht schematisch..... 204
Bild 210: Wandbereiche bei Windanströmrichtung Nord – Süd Grundriss..... 205
Bild 211: Wandbereiche bei Windanströmrichtung Nord - Süd Ansicht..... 205
Bild 212: Wandbereiche bei Windanströmrichtung Ost - West Grundriss..... 206
Bild 213: Wandbereiche bei Windanströmrichtung Ost - West Ansicht..... 206

Anhang

Eingabedatei Sofistik quadratisches Modul mechanisch vorgespannt
Geometrie:

```
PROG SOFIMSHA urs:1
KOPF Quadratmodul
SEIT UNIE 0
SYST RAUM GDIV 10000 POSZ XREF 0 0 0 T11 1 0 0 T12 0 -1 0

$Breite in Metern
let#breite 0.6
let#x #breite/10

let#y #breite/10

loop#1 11
  knot (1+#1*100 11+#1*100 1) x (0 #x) y #1*#y z 0
endloop

grup 0
loop#1 10
  QUAD   (1+#1*100 10+#1*100 1)   (1+#1*100 1) (2+#1*100 1) (102+#1*100 1) (101+#1*100 1)
MNR  1  NRA 2 MITT T 2.50000E-04
endloop
knot (   1   11   1) fix pp
knot ( 101  901 100) fix pp
knot ( 111  911 100) fix pp
knot (1001 1011   1) fix pp
ende
```

Eingabedatei Sofistik rechteckiges Modul mechanisch vorgespannt
Geometrie:

```
PROG SOFIMSHA urs:1
KOPF Rechteckmodul 1/3
SEIT UNIE 0
SYST RAUM GDIV 10000 POSZ XREF 0 0 0 T11 1 0 0 T12 0 -1 0
```

```
$Breite in Metern
let#breite 0.6
let#x #breite/10

let#y #breite/10

loop#1 31
  knot (1+#1*100 11+#1*100 1) x (0 #x) y #1*#y z 0
endloop

grup 0
loop#1 30
  QUAD   (1+#1*100 10+#1*100 1)   (1+#1*100 1) (2+#1*100 1) (102+#1*100 1) (101+#1*100 1)
MNR  1  NRA 2 MITT T 2.50000E-04
endloop
knot (   1   11   1) fix pp
knot ( 101 2901 100) fix pp
knot ( 111 2911 100) fix pp
knot (3001 3011   1) fix pp
ende
```

Eingabedatei Sofistik quadratisches Modul pneumatisch vorgespannt
Geometrie:

```
PROG SOFIMSHA urs:1
KOPF Quadratmodul
SEIT UNIE 0
SYST RAUM GDIV 10000 POSZ XREF 0 0 0 T11 1 0 0 T12 0 -1 0

$Breite in Metern
let#breite 1
let#x #breite/10

let#y #breite/10

loop#1 11
  knot (1+#1*100 11+#1*100 1) x (0 #x) y #1*#y z 0
endloop

grup 0
```

```
loop#1 10
  QUAD   (1+#1*100 10+#1*100 1)   (1+#1*100 1) (2+#1*100 1) (102+#1*100 1) (101+#1*100 1)
MNR  1  NRA 2 MITT T 2.50000E-04
endloop
knot (   1   11   1) fix pp
knot ( 101  901 100) fix pp
knot ( 111  911 100) fix pp
knot (1001 1011   1) fix pp
ende
```

Eingabedatei Sofistik rechteckiges Modul pneumatisch vorgespannt
Geometrie:

```
+PROG SOFIMSHA urs:1
KOPF Rechteckmodul 1/3
SEIT UNIE 0
SYST RAUM GDIV 10000 POSZ XREF 0 0 0 T11 1 0 0 T12 0 -1 0

$Breite in Metern
let#breite 1
let#x #breite/10

let#y #breite/10

loop#1 31
  knot (1+#1*100 11+#1*100 1) x (0 #x) y #1*#y z 0
endloop

grup 0
loop#1 30
  QUAD   (1+#1*100 10+#1*100 1)   (1+#1*100 1) (2+#1*100 1) (102+#1*100 1) (101+#1*100 1)
MNR  1  NRA 2 MITT T 2.50000E-04
endloop
knot (   1   11   1) fix pp
knot ( 101 2901 100) fix pp
knot ( 111 2911 100) fix pp
knot (3001 3011   1) fix pp
ende
```

Lastfälle für mechanisch vorgespannte Standardmodule:

```
+prog sofiload urs:13
kopf  Vorspannung
lf 1 typ p bez ‚Vorspannung‘
quad  1 3000 typ pnxx p 1.6
quad  1 3000 typ pnyy p 1.6
ende
+prog sofiload urs:14
kopf  Wind
lf 2 typ w  bez ‚Wind‘
quad 1 3000 typ pz p 3.5
ende
+prog sofiload urs:14
kopf  Dauerwind
lf 3 typ w  bez ‚Dauerwind‘
quad 1 3000 typ pz p 0.4
ende
+prog sofiload urs:16
kopf Temperatur
lf 4 typ temp bez ‚Temperatur‘
quad 1 3000 typ temp p 30
ende

$ Vorspannung

+prog ase urs:18
kopf ‚lastfall P‘
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
lf 5
LC 1
ende

+prog ase urs:18
kopf ‚lastfall P+T‘
steu warn 387
```

```
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1

syst prob th3 iter 50 nmat ja
lf 6
LC 1
LC 4
ende


$ Nachweis der Tragfähigkeit

+prog ase urs:19
kopf ,lastfall P+W‘
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
lf 11
lc 1 fakt 1.35
lc 2 fakt 1.5
ende

+prog ase urs:19
kopf ,lastfall P+W/2+T‘
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
grup 0 faks 1/1.17  fakl 0 $ Membran
lf 12
lc 1 fakt 1.35
lc 2 fakt 1.5*0.5
LC 4
ende
```

$Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

```
+prog ase urs:21
kopf ‚lastfall P+W‘
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
lf 21
lc 1
lc 2
ende

+prog ase urs:23
kopf ‚lastfall P+W/2+T‘
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
grup 0 faks 1/1.17  fakl 0 $ Membran
lf 22
lc 1
lc 2 fakt 0.5
lc 4
ende

+prog ase urs:19
kopf ‚lastfall P+Wdauer‘
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
lf 23
lc 1
lc 3
ende
```

```
+prog ase urs:19
kopf ‚lastfall P+Wdauer/2+T‘
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
grup 0 faks 1/1.17  fakl 0 $ Membran
lf 24
lc 1
lc 3 fakt 0.5
lc 4
ende
```

Lastfälle für pneumatisch vorgespannte Standardmodule:

```
+prog sofiload urs:13
kopf  Vorspannung
lf 1 typ p bez ‚Vorspannung‘
quad  1 3000 typ pzz p -0.3
ende
+prog sofiload urs:14
kopf  Wind
lf 2 typ w  bez ‚Wind‘
quad 1 3000 typ pzz p -6.3
ende
+prog sofiload urs:14
kopf  Dauerwind
lf 3 typ w  bez ‚Dauerwind‘
quad 1 3000 typ pzz p -2.7
ende
+prog sofiload urs:16
kopf Temperatur
lf 4 typ temp bez ‚Temperatur‘
quad 1 3000 typ temp p 30
ende
+prog sofiload urs:14
kopf  Fofi
lf 5 typ w  bez ‚z-last‘
```

```
quad 1 3000 typ pzz p -2
ende


$ Formfindung

+prog ase urs:18
kopf ‘Formfindung’
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
lf 6
LC 5
ende

+prog ase urs:5
kopf Koordinaten-Update
syst PLF 6 vmax 0.2 SPEI ja nmat ja
ende


$Vorspannung

+prog ase urs:18
kopf ‚lastfall P‘
steu warn 351
steu warn 352
steu warn 353
steu warn 354
steu warn 355
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
lf 7
LC 1
ende
```

```
$ Nachweis der Tragfähigkeit

+prog ase urs:19
kopf ‚lastfall P+W‘
steu warn 351
steu warn 352
steu warn 353
steu warn 354
steu warn 355
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
$steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
lf 11
lc 1 fakt 1.35
lc 2 fakt 1.5
ende
+prog ase urs:19
kopf ‚lastfall P+W/2+T‘
steu warn 351
steu warn 352
steu warn 353
steu warn 354
steu warn 355
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
grup 0 faks 1/1.17  fakl 0 $ Membran
lf 12
lc 1 fakt 1.35
lc 2 fakt 1.5*0.5
LC 4
ende

$Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

+prog ase urs:21
```

```
kopf ‚lastfall P+W‘
steu warn 351
steu warn 352
steu warn 353
steu warn 354
steu warn 355
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
lf 21
lc 1
lc 2
ende

+prog ase urs:23
kopf ‚lastfall P+W/2+T‘
steu warn 351
steu warn 353
steu warn 352
steu warn 354
steu warn 355
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
grup 0 faks 1/1.17  fakl 0 $ Membran
lf 22
lc 1
lc 2 fakt 0.5
lc 4
ende

+prog ase urs:19
kopf ‚lastfall P+Wdauer‘
steu warn 351
steu warn 352
steu warn 353
```

```
steu warn 354
steu warn 355
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
lf 23
lc 1
lc 3
ende

+prog ase urs:19
kopf ‚lastfall P+Wdauer/2+T‘
steu warn 351
steu warn 352
steu warn 353
steu warn 354
steu warn 355
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
grup 0 faks 1/1.17  fakl 0 $ Membran
lf 24
lc 1
lc 3 fakt 0.5
lc 4
ende
```

Eingabedatei Sofistik „New Technology“ Modul
Lastfälle:

```
+prog sofiload urs:11
kopf  Formfindung1
act p
lf 1 typ p  bez ‚Formfindung‘
quad 1 999 typ pnxx p 0.008
```

```
quad 1 999 typ pnyy p 0.011
ende

+prog sofiload urs:12
kopf  Vorspannung
act p
lf 2 typ p bez ‚Vorspannung‘
quad  1 999 typ pnxx p 1.6
quad  1 999 typ pnyy p 1.7
ende
+prog sofiload urs:13
kopf  Winddruck
act w
lf 3 typ w  bez ‚Winddruck‘
quad 1 999 typ pz p 0.62
ende
+prog sofiload urs:14
kopf  Windsog
act w
lf 4 typ w  bez ‚Windsog‘
quad 1 999 typ pz p -0.98
ende
+prog sofiload urs:14
kopf  Dauerwind
lf 5 typ w  bez ‘Dauerwinddruck’
quad 1 3000 typ pz p 0.03
ende
+prog sofiload urs:14
kopf  Dauerwind
lf 6 typ w  bez ‘Dauerwindsog’
quad 1 3000 typ pz p -0.03
ende
+prog sofiload urs:14
kopf Temperatur
act temp gamu 1.0 gamf 1.0
lf 7 typ temp bez ‘Temperatur’
quad 1 999 typ temp p 30
ende
```

```
prog ase urs:15
KOPF Formfindung
ECHO schn,nost,vers,reak NEIN
syst prob thii iter 30 nmat ja
steu warn 197
grup 0 faks 1E-2   fakl 0 $ Membran
lf 1 bez 'Formfindung'
ende

+prog ase urs:5
kopf Koordinaten-Update
syst PLF 1 SPEI ja nmat ja
ende

$ Vorspannung
+prog ase urs:16
kopf 'lastfall P'
syst prob thii iter 30 nmat ja plf 1
lf 8
LC 2
ende
+prog ase urs:16
kopf 'lastfall P+T'
syst prob thii iter 30 nmat ja plf 1
lf 9
LC 2
LC 7
ende

$ Nachweis der Tragfähigkeit
+prog ase urs:19
kopf ,lastfall P+WD'
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
lf 11
lc 2 fakt 1.35
lc 3 fakt 1.5
```

```
ende
+prog ase urs:19
kopf ,lastfall P+WS‘
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
lf 12
lc 2 fakt 1.35
lc 4 fakt 1.5
ende

+prog ase urs:19
kopf ,lastfall P+WD/2+T‘
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
grup 0 faks 1/1.17  fakl 0 $ Membran
lf 13
lc 2 fakt 1.35
lc 3 fakt 1.5*0.5
LC 7
ende
+prog ase urs:19
kopf ,lastfall P+WS/2+T‘
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
grup 0 faks 1/1.17  fakl 0 $ Membran
lf 14
lc 2 fakt 1.35
lc 4 fakt 1.5*0.5
LC 7
ende
```

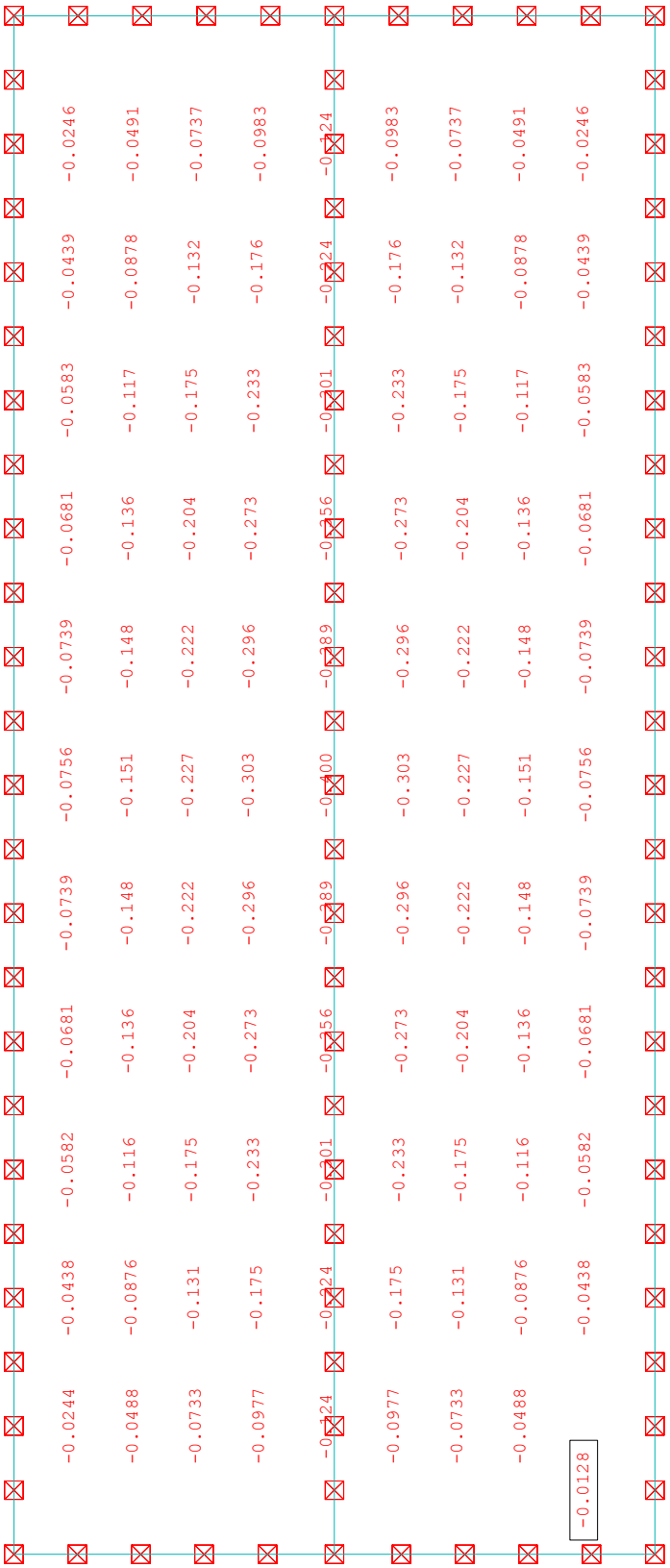
$Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

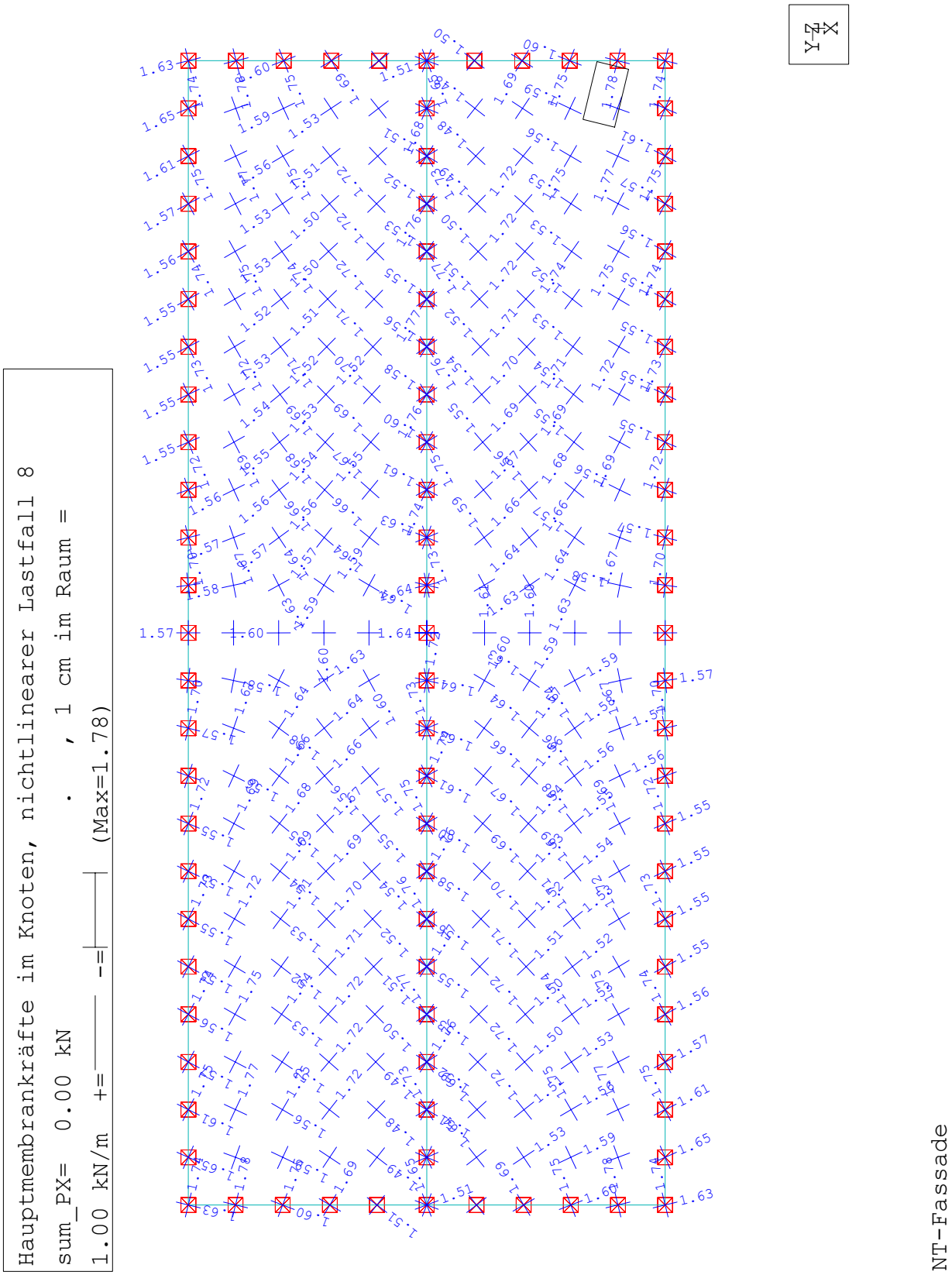
```
+prog ase urs:21
kopf ,lastfall P+WD‘
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
lf 21
lc 2
lc 3
ende
+prog ase urs:21
kopf ,lastfall P+WS‘
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
lf 22
lc 2
lc 4
ende

+prog ase urs:23
kopf ,lastfall P+WD/2+T‘
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
grup 0 faks 1/1.17  fakl 0 $ Membran
lf 23
lc 2
lc 3 fakt 0.5
lc 7
ende
+prog ase urs:23
kopf ,lastfall P+WS/2+T‘
```

```
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
grup 0 faks 1/1.17  fakl 0 $ Membran
lf 24
lc 2
lc 4 fakt 0.5
lc 7
ende

+prog ase urs:19
kopf ‚lastfall P+WDdauer‘
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
lf 25
lc 2
lc 5
ende
+prog ase urs:19
kopf ‚lastfall P+WSdauer‘
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
lf 26
lc 2
lc 6
ende

+prog ase urs:19
kopf ‚lastfall P+WDdauer/2+T‘
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
```

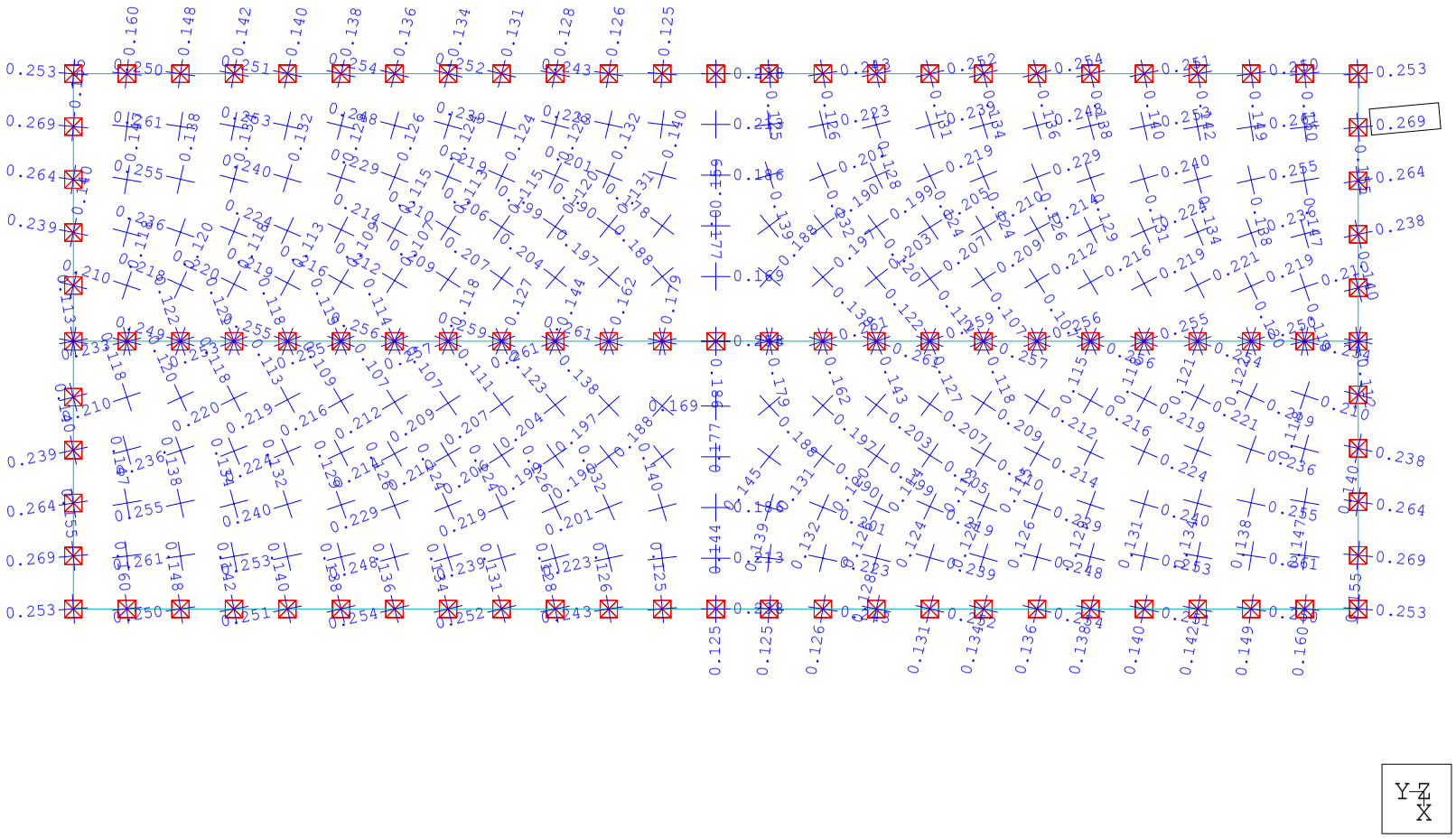
```
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
grup 0 faks 1/1.17  fakl 0 $ Membran
lf 27
lc 2
lc 5 fakt 0.5
lc 7
ende
+prog ase urs:19
kopf ‚lastfall P+WSdauer/2+T‘
steu warn 387
steu warn 197
steu warn 183
steu solv 1
syst prob th3 iter 50 nmat ja
grup 0 faks 1/1.17  fakl 0 $ Membran
lf 28
lc 2
lc 6 fakt 0.5
lc 7
ende
```

Ergebnisse Sofistik „New Technology“ Modul



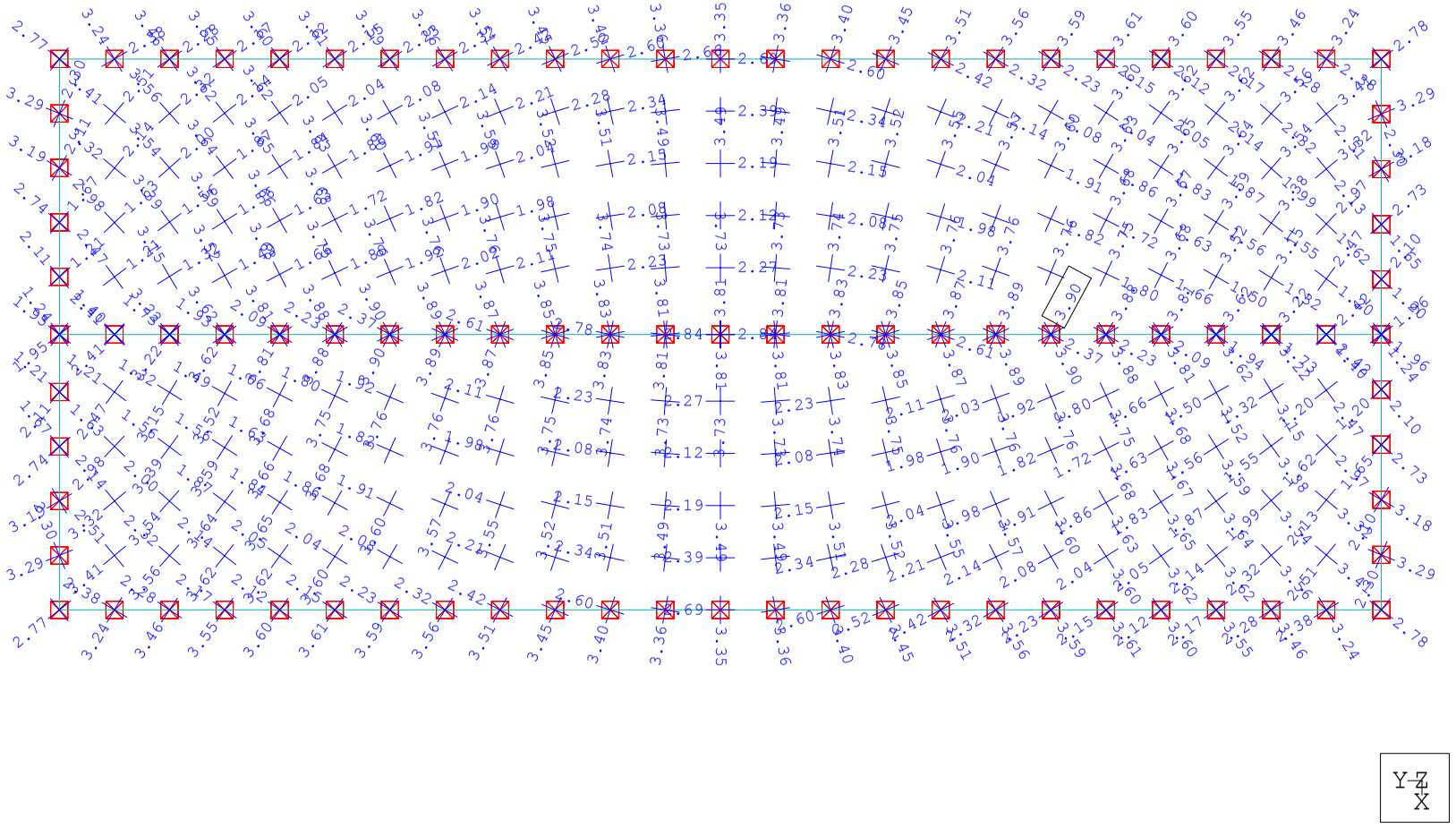

Hauptmembrankräfte im Knoten, nichtlinearer Lastfall 8
sum_PX= 0.00 kN . , 1 cm im Raum =
1.00 kN/m += -= (Max=1.78)
NT-Fassade

Hauptmembrankräfte im Knoten, nichtlinearer Lastfall 9
sum_PY= 0.00 kN . , 1 cm im Raum =
0.200 kN/m +=——— -=|——— (Max=0.269)



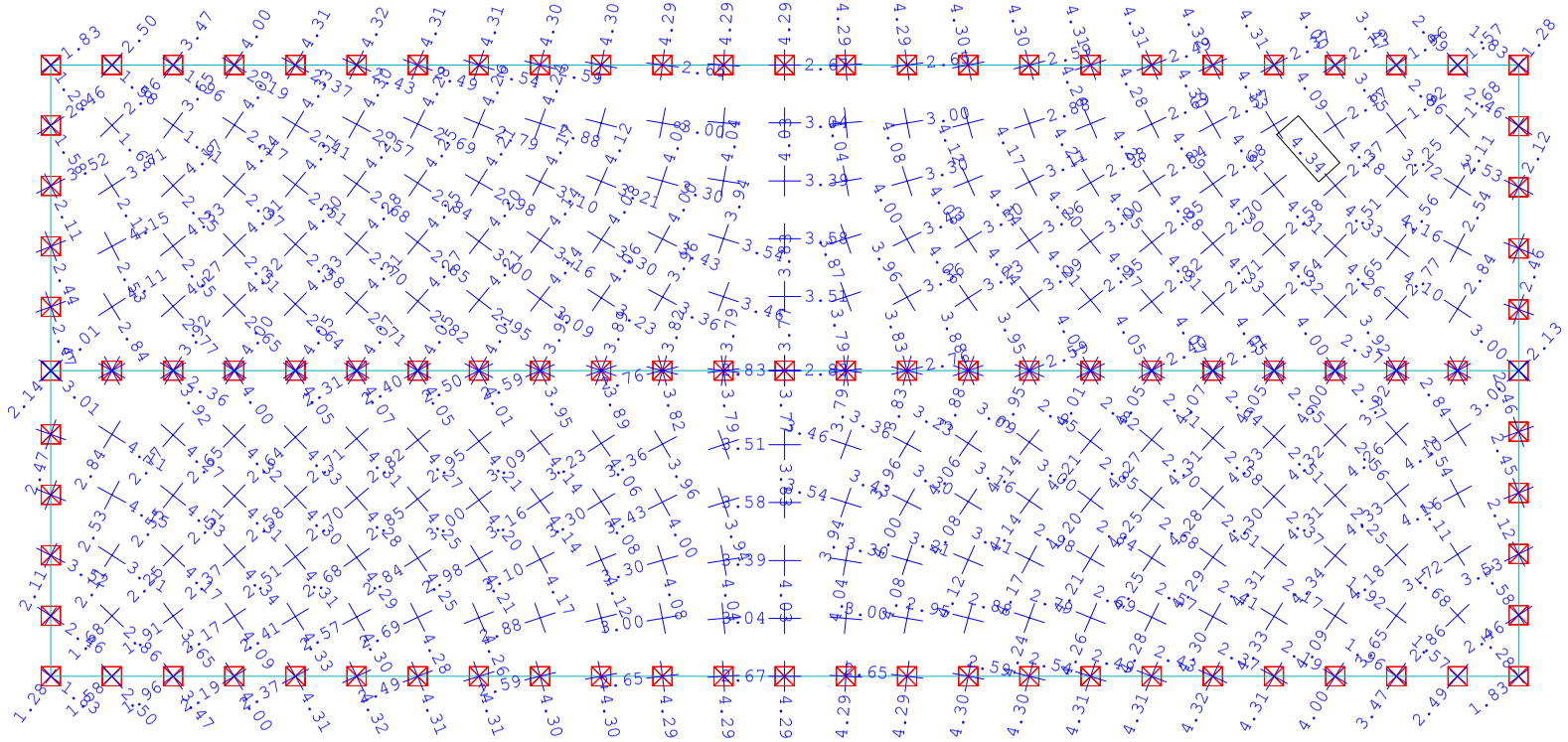
NT-Fassade

Hauptmembrankräfte im Knoten, nichtlinearer Lastfall
11 sum_PZ= 13.95 kN . , 1 cm im Raum =
2.00 kN/m +=——— -=|——— (Max=3.90)



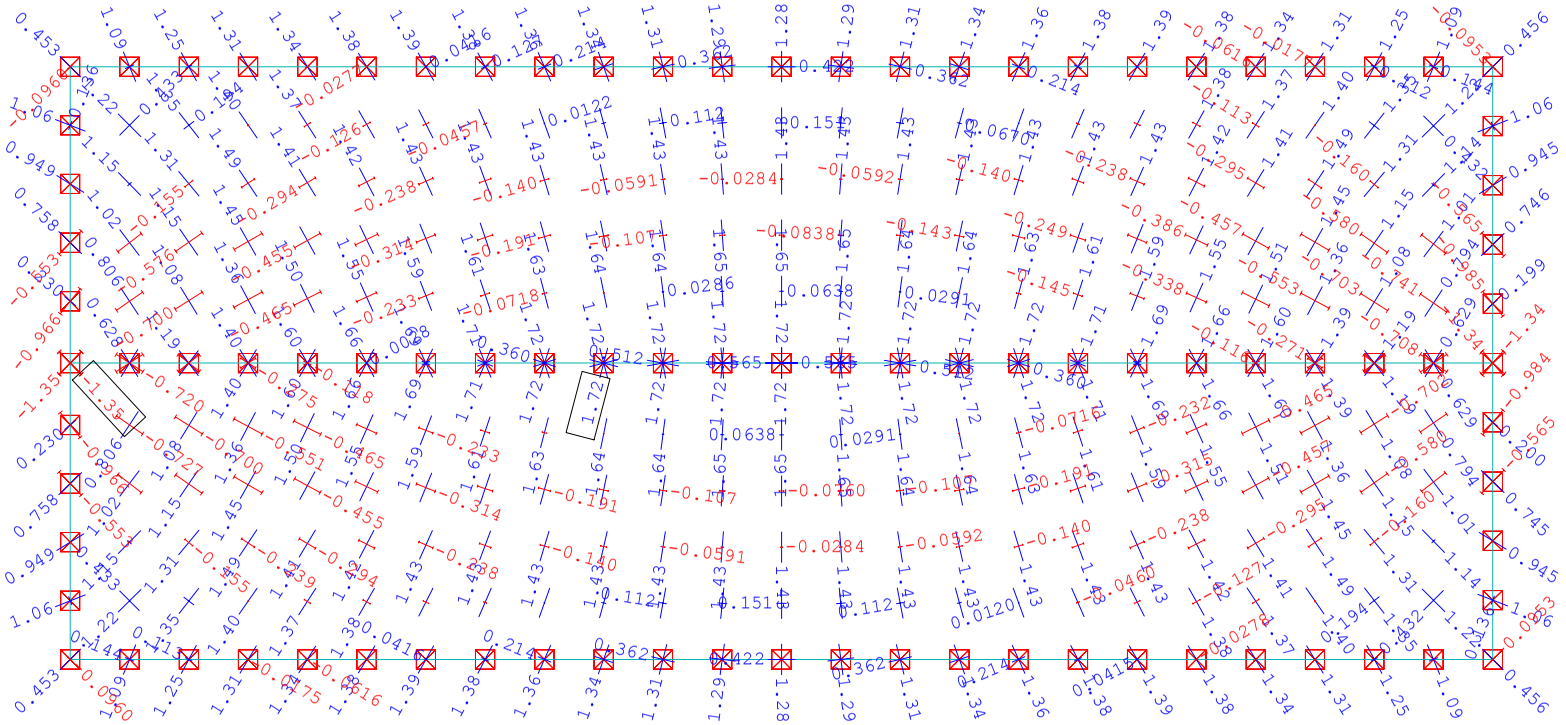
NT-Fassade

Hauptmembrankräfte im Knoten, nichtlinearer Lastfall
12 sum_PZ=-22.05 kN . , 1 cm im Raum =
5.00 kN/m +=——— -=|——— (Max=4.34)



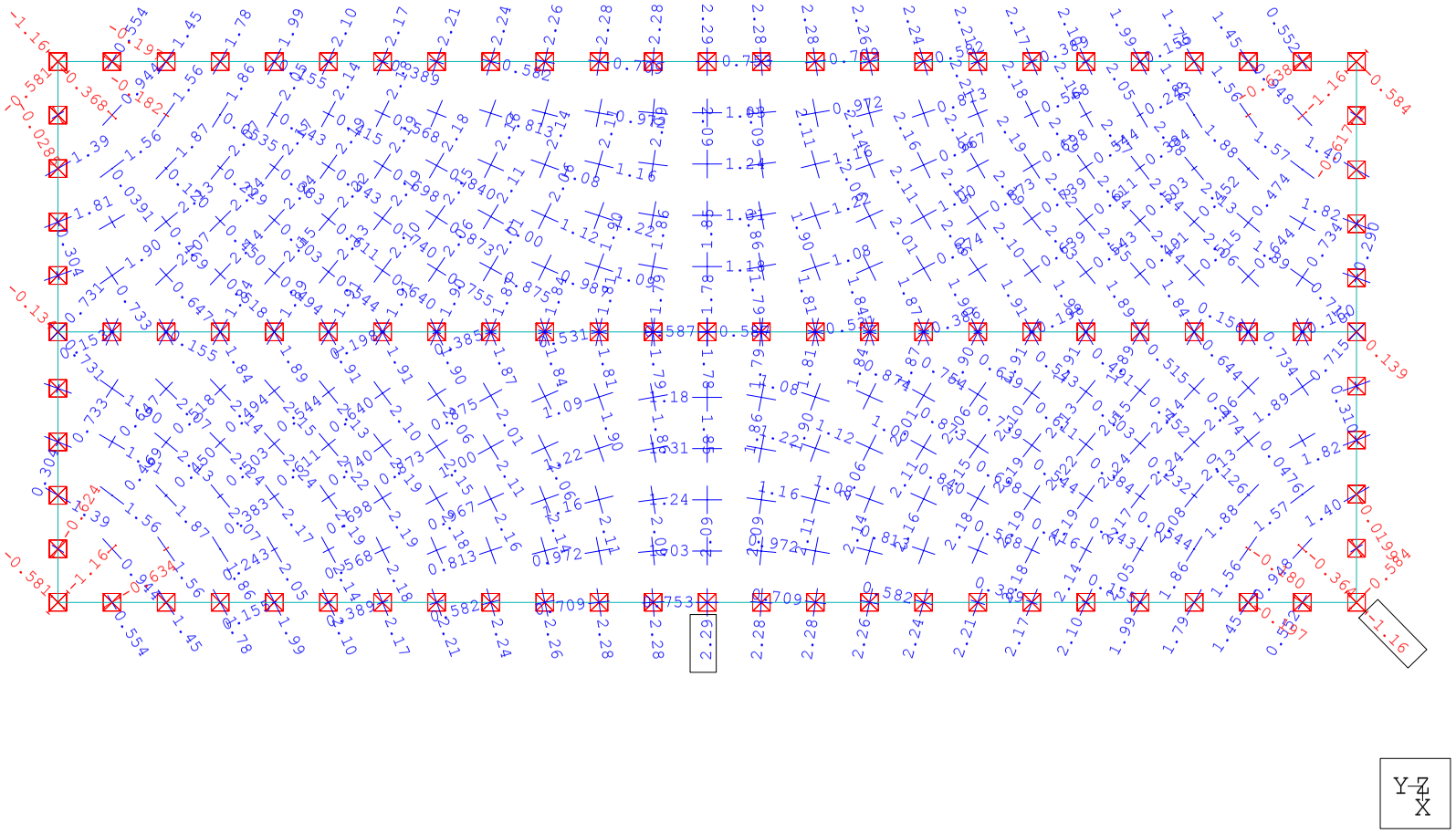
NT-Fassade

Hauptmembrankräfte im Knoten, nichtlinearer Lastfall
13 sum_PZ= 6.97 kN . , 1 cm im Raum =
1.00 kN/m +=——— -=|——— (Min=-1.35) (Max=1.72)



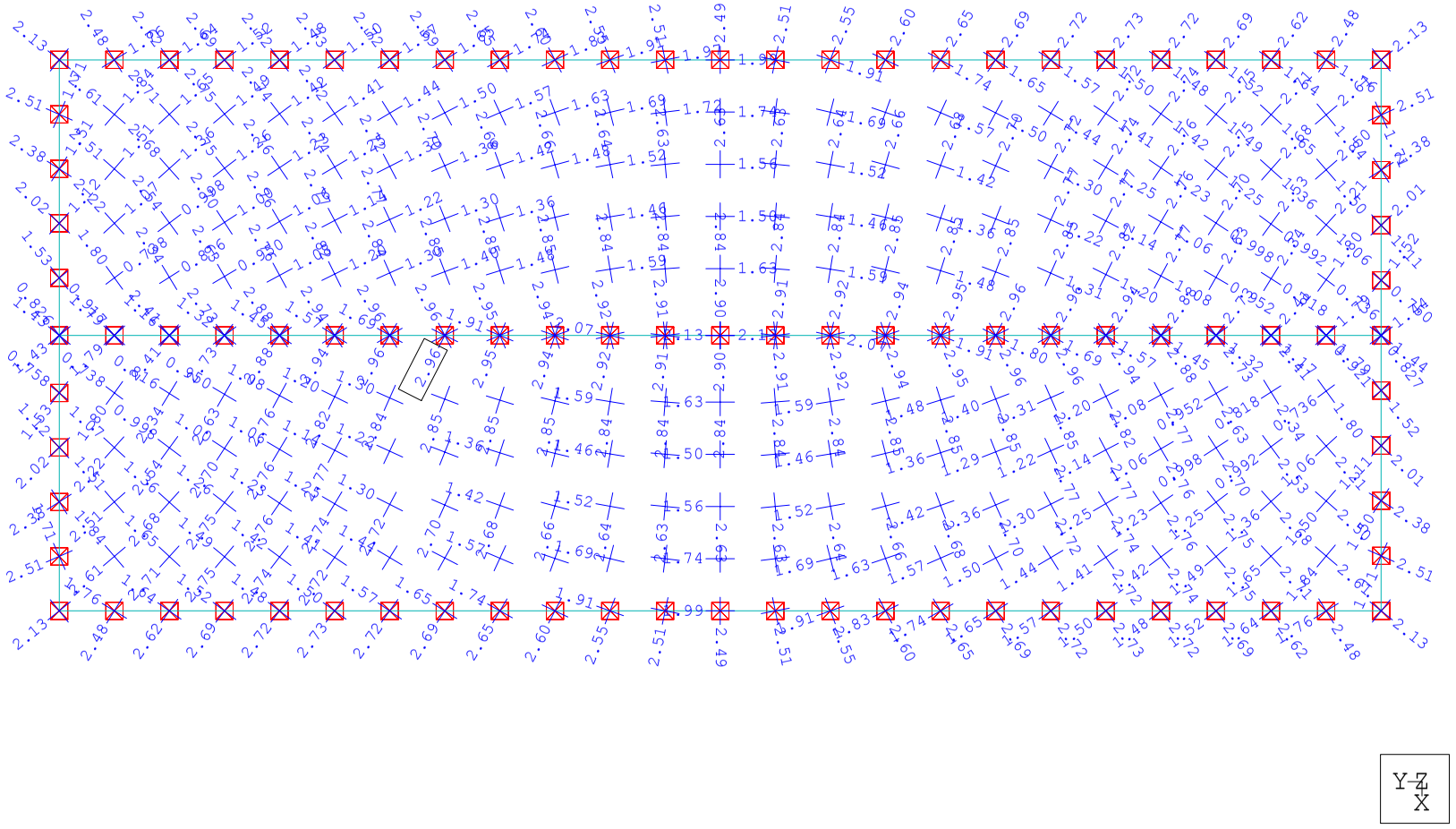
NT-Fassade

Hauptmembrankräfte im Knoten, nichtlinearer Lastfall
14 sum_PZ=-11.03 kN . , 1 cm im Raum =
2.00 kN/m +=——— -=|——— (Min=-1.16) (Max=2.29)

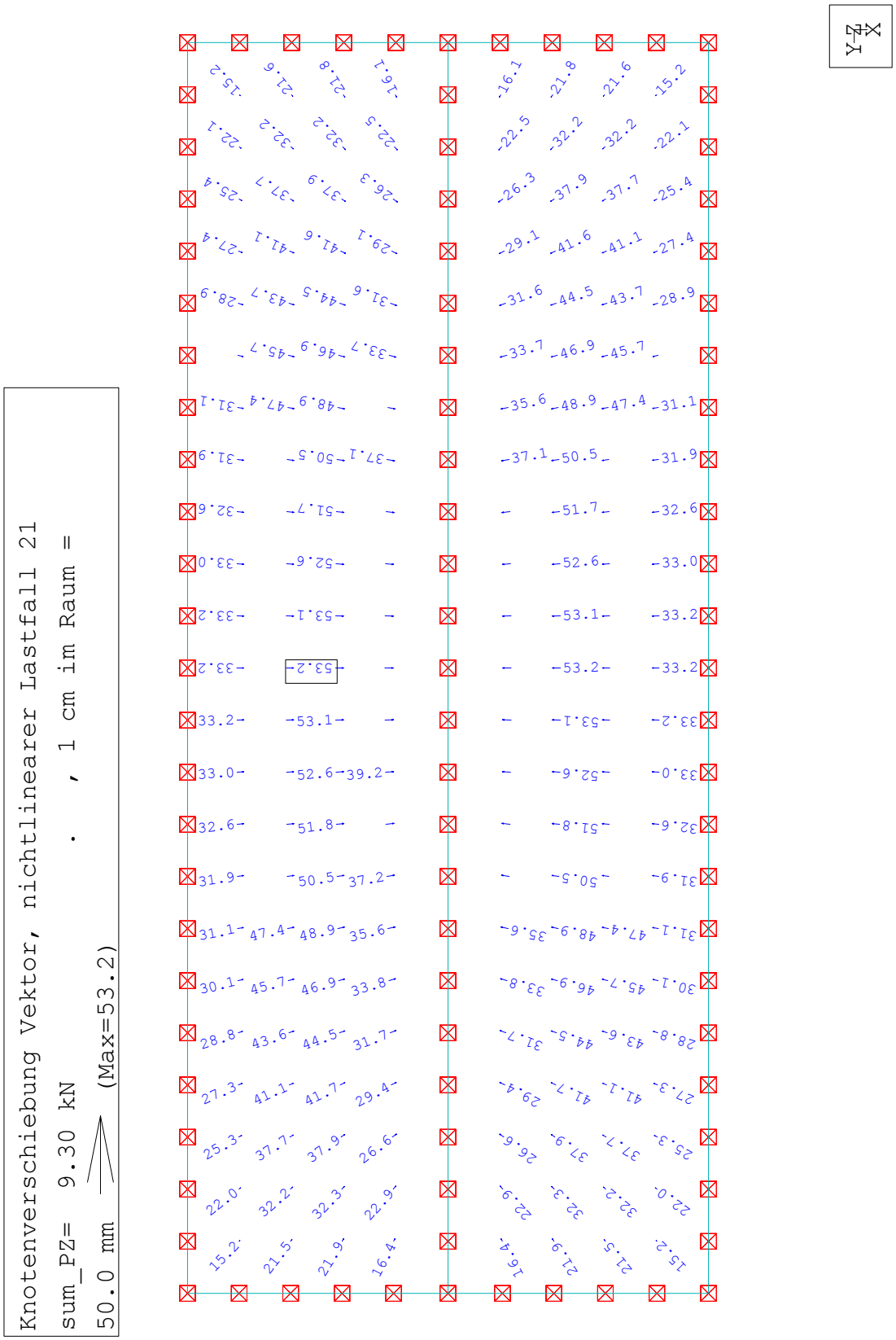


NT-Fassade

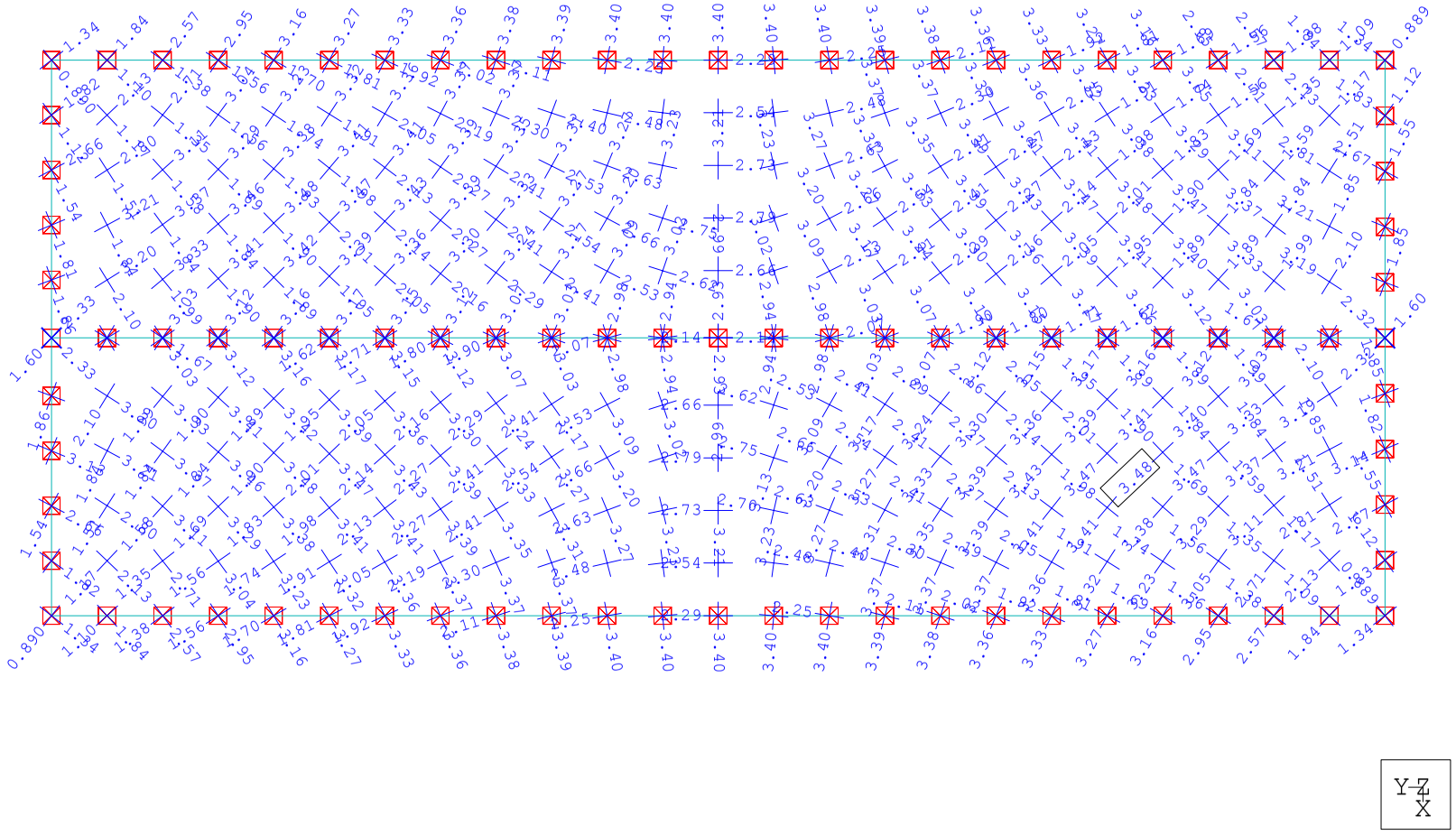
Hauptmembrankräfte im Knoten, nichtlinearer Lastfall
21 sum_PZ= 9.30 kN . , 1 cm im Raum =
2.00 kN/m +=——— -=|——— (Max=2.96)



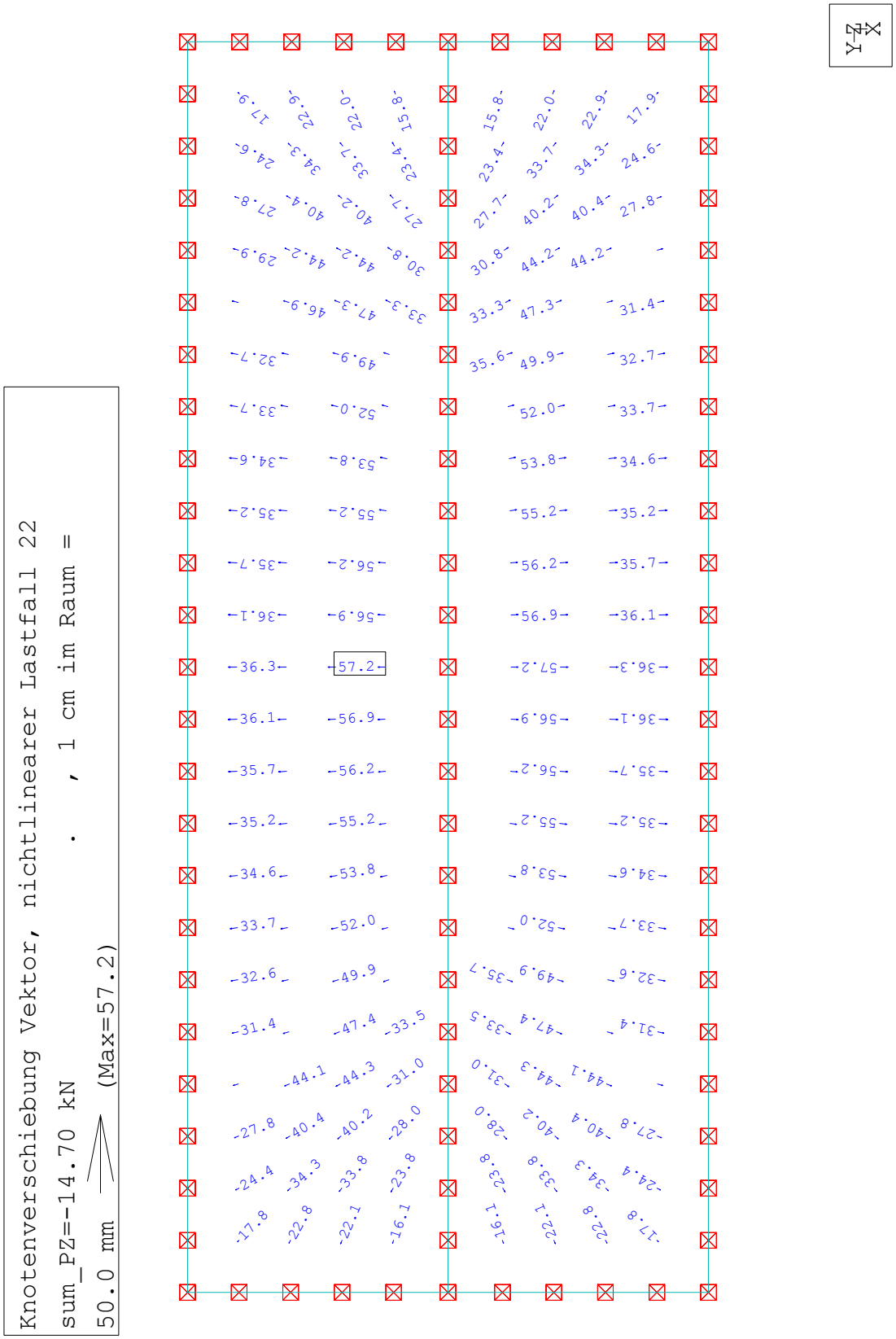
NT-Fassade


Knotenverschiebung Vektor, nichtlinearer Lastfall 21
sum_PZ= 9.30 kN
50.0 mm
(Max=53.2)
Y
Z
X

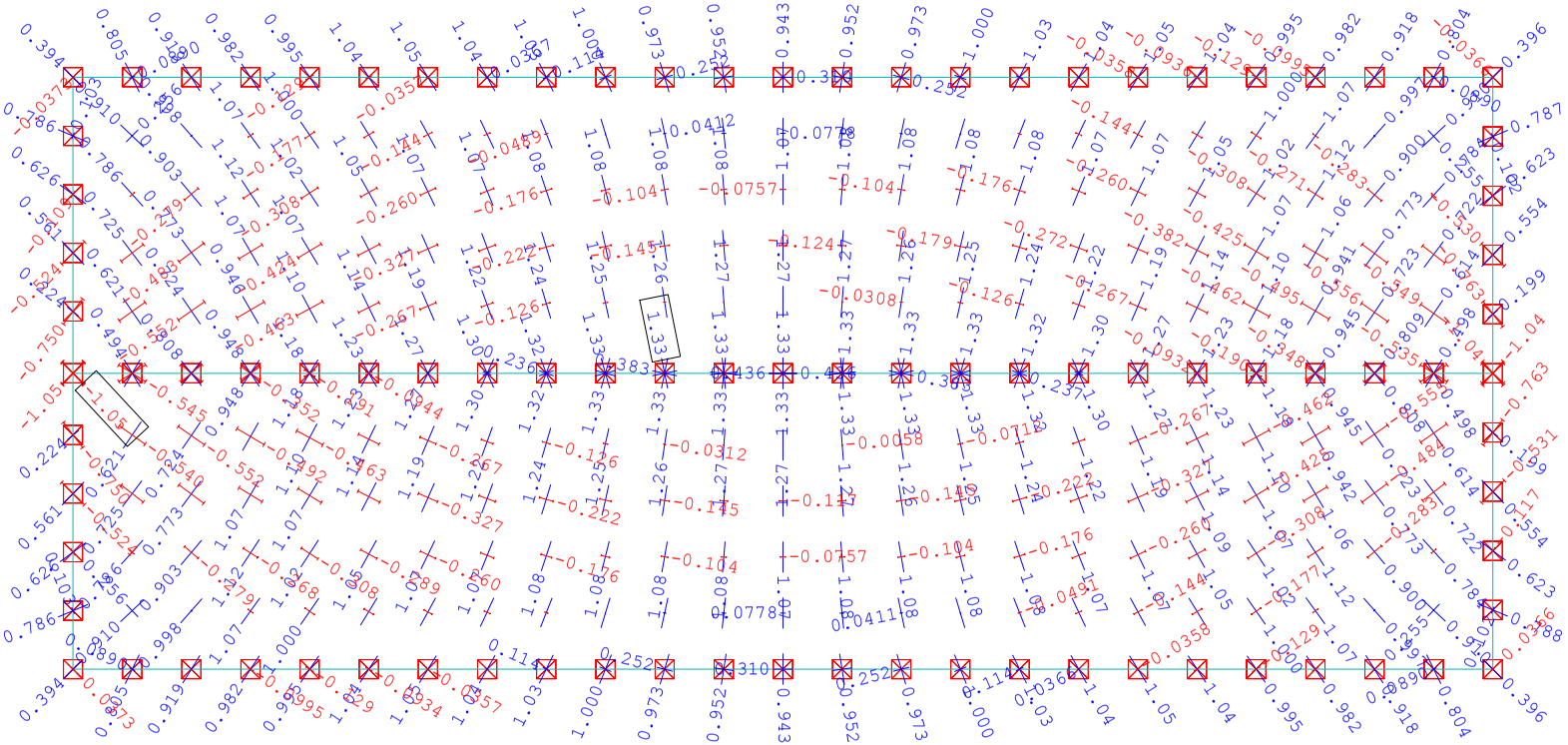
Hauptmembrankräfte im Knoten, nichtlinearer Lastfall
22 sum_PZ=-14.70 kN . , 1 cm im Raum =
2.00 kN/m +=——— -=|——— (Max=3.48)



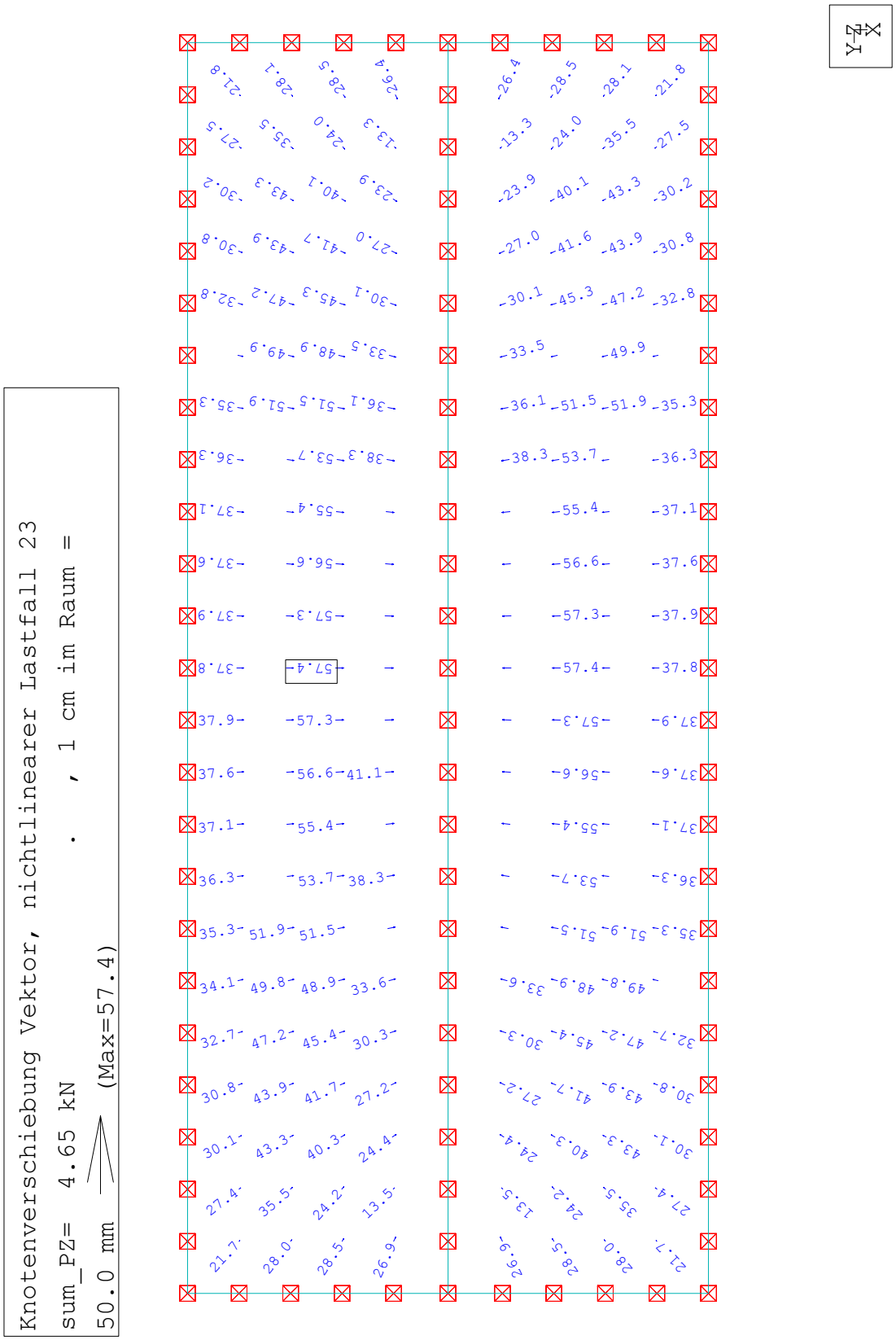
NT-Fassade


Knotenverschiebung Vektor, nichtlinearer Lastfall 22
sum_PZ=-14.70 kN
50.0 mm
(Max=57.2)
1 cm im Raum =
Y
Z
X

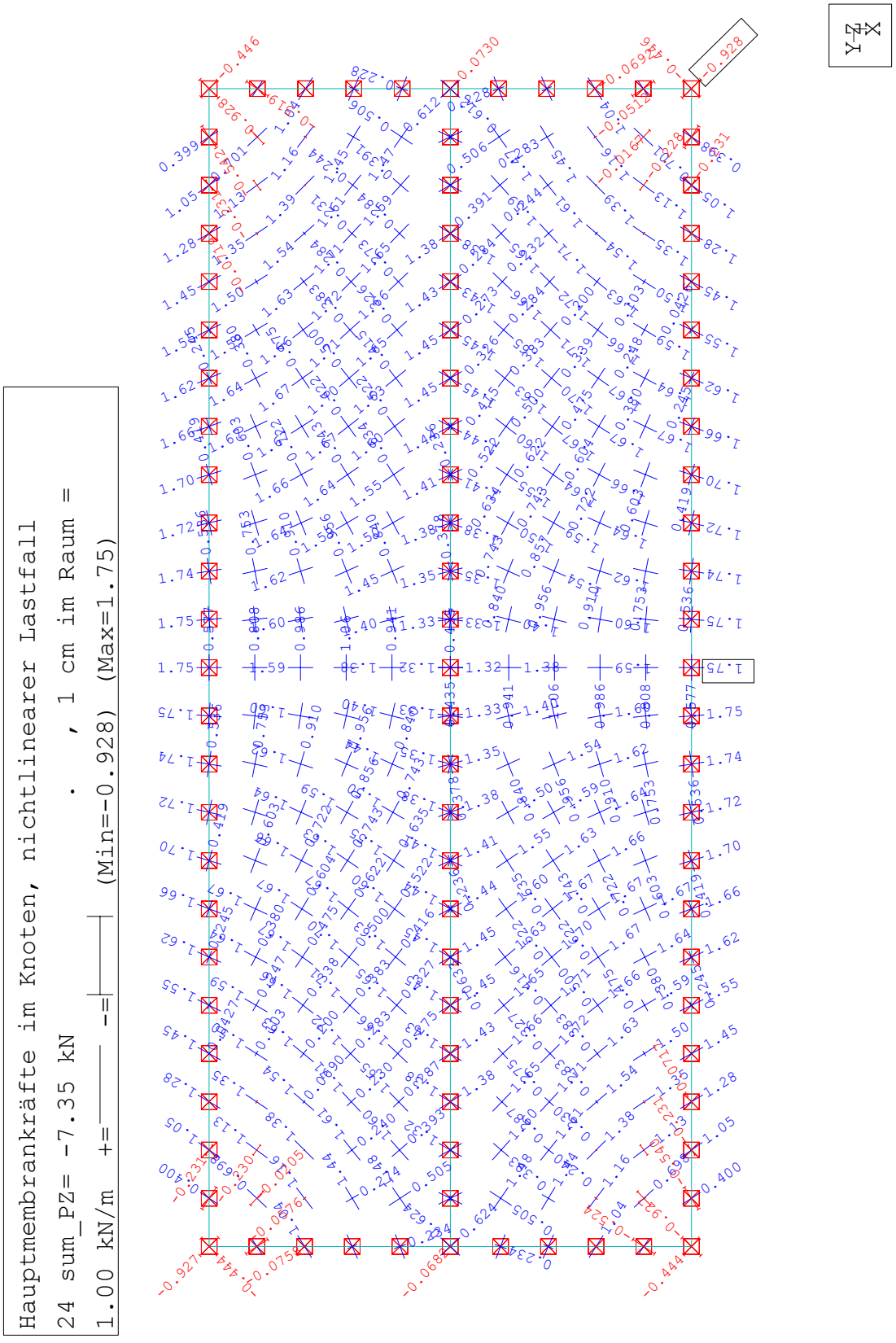
Hauptmembrankräfte im Knoten, nichtlinearer Lastfall
23 sum_PZ= 4.65 kN . , 1 cm im Raum =
1.00 kN/m +=——— -=|——— (Min=-1.05) (Max=1.33)

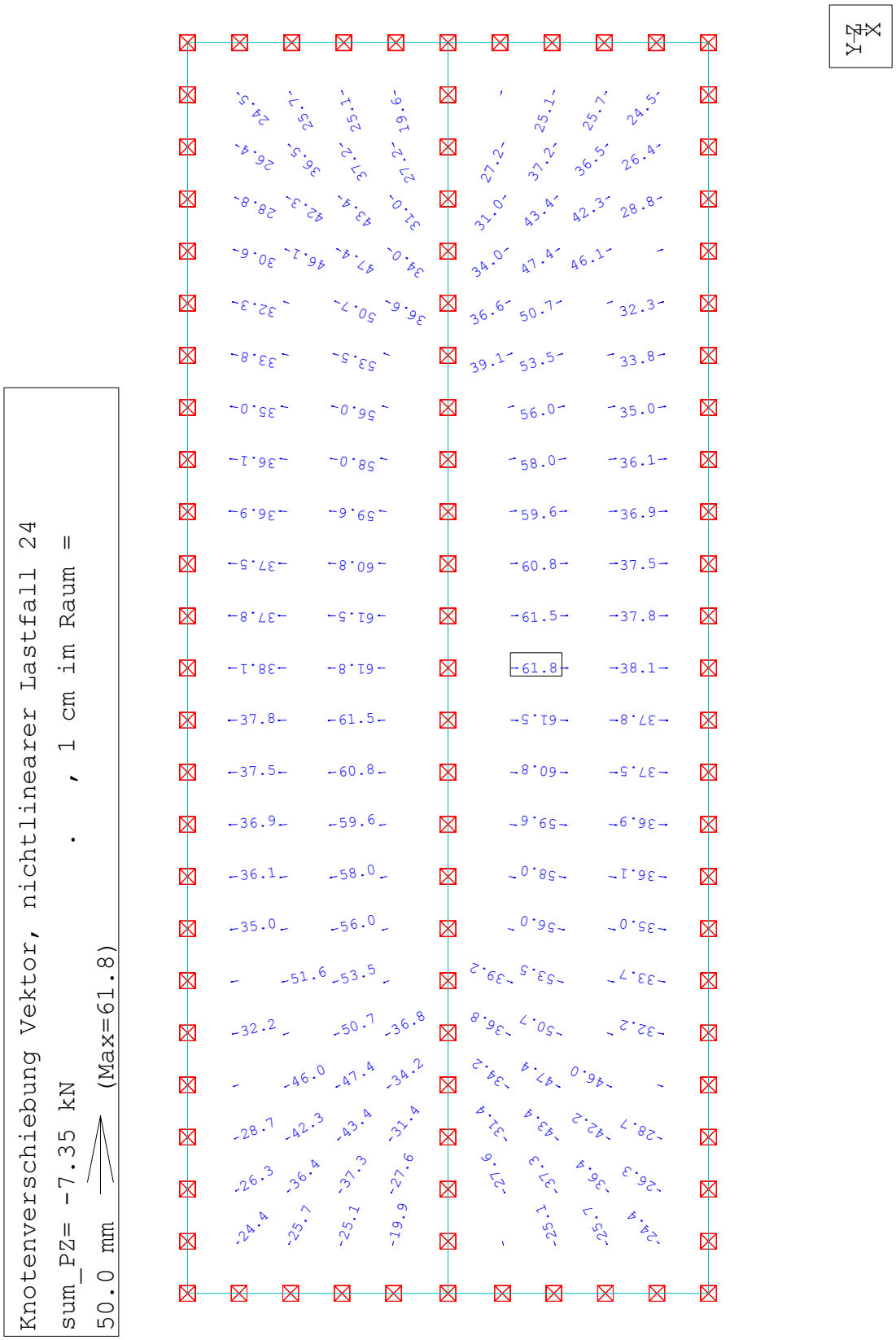


NT-Fassade


Knotenverschiebung Vektor, nichtlinearer Lastfall 23
sum_PZ= 4.65 kN
50.0 mm
(Max=57.4)
Y
Z
X

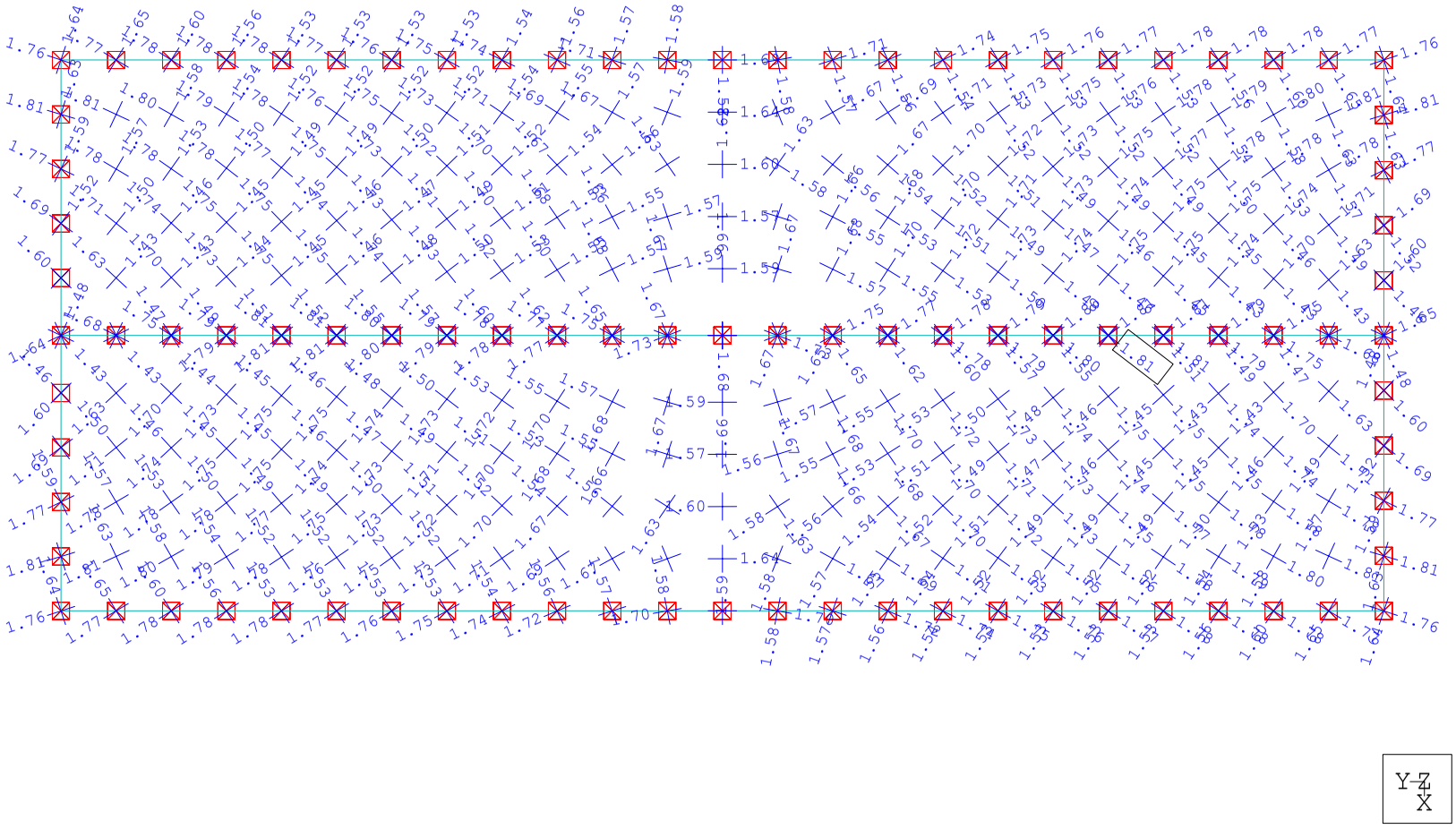
NT-Fassade


Hauptmembrankräfte im Knoten, nichtlinearer Lastfall
24 sum_PZ= -7.35 kN , 1 cm im Raum =
1.00 kN/m +=——— -=——— (Min=-0.928) (Max=1.75)
Z-X
NT-Fassade

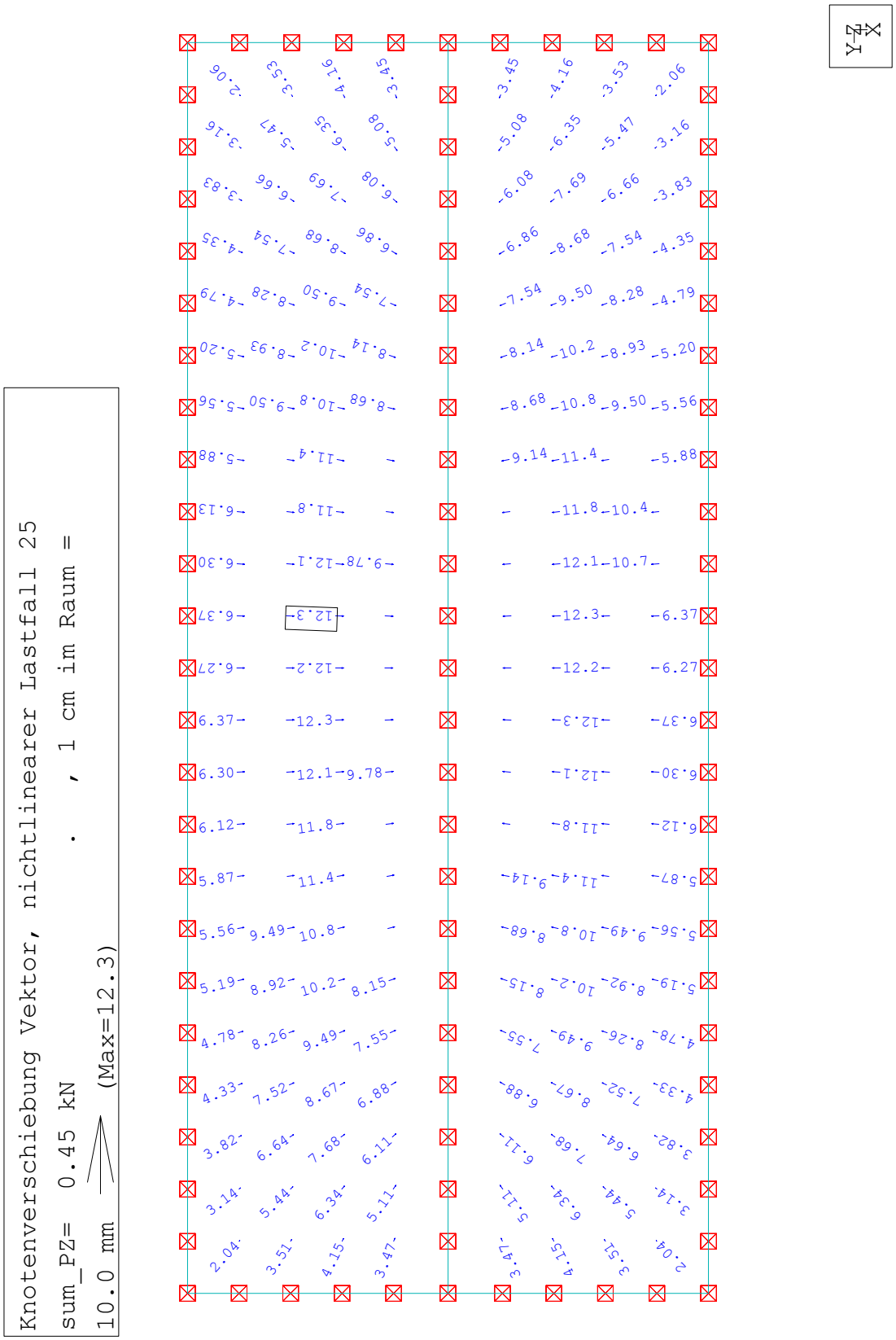

Knotenverschiebung Vektor, nichtlinearer Lastfall 24
sum_PZ= -7.35 kN
50.0 mm
(Max=61.8)
1 cm im Raum =
Y-Z
X

NT-Fassade

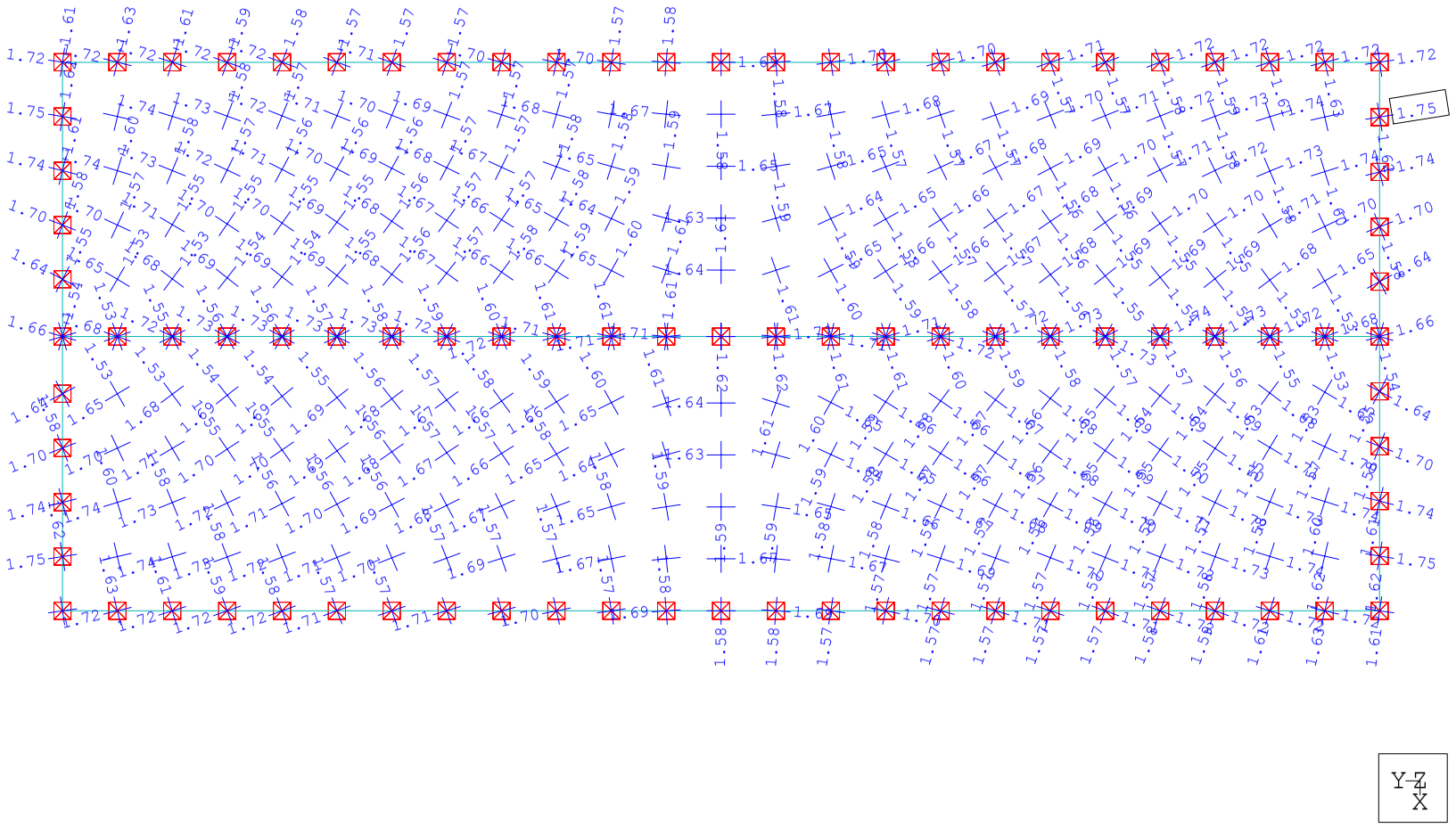
Hauptmembrankräfte im Knoten, nichtlinearer Lastfall
25 sum_PZ= 0.45 kN . , 1 cm im Raum =
1.00 kN/m +=——— -=———| (Max=1.81)



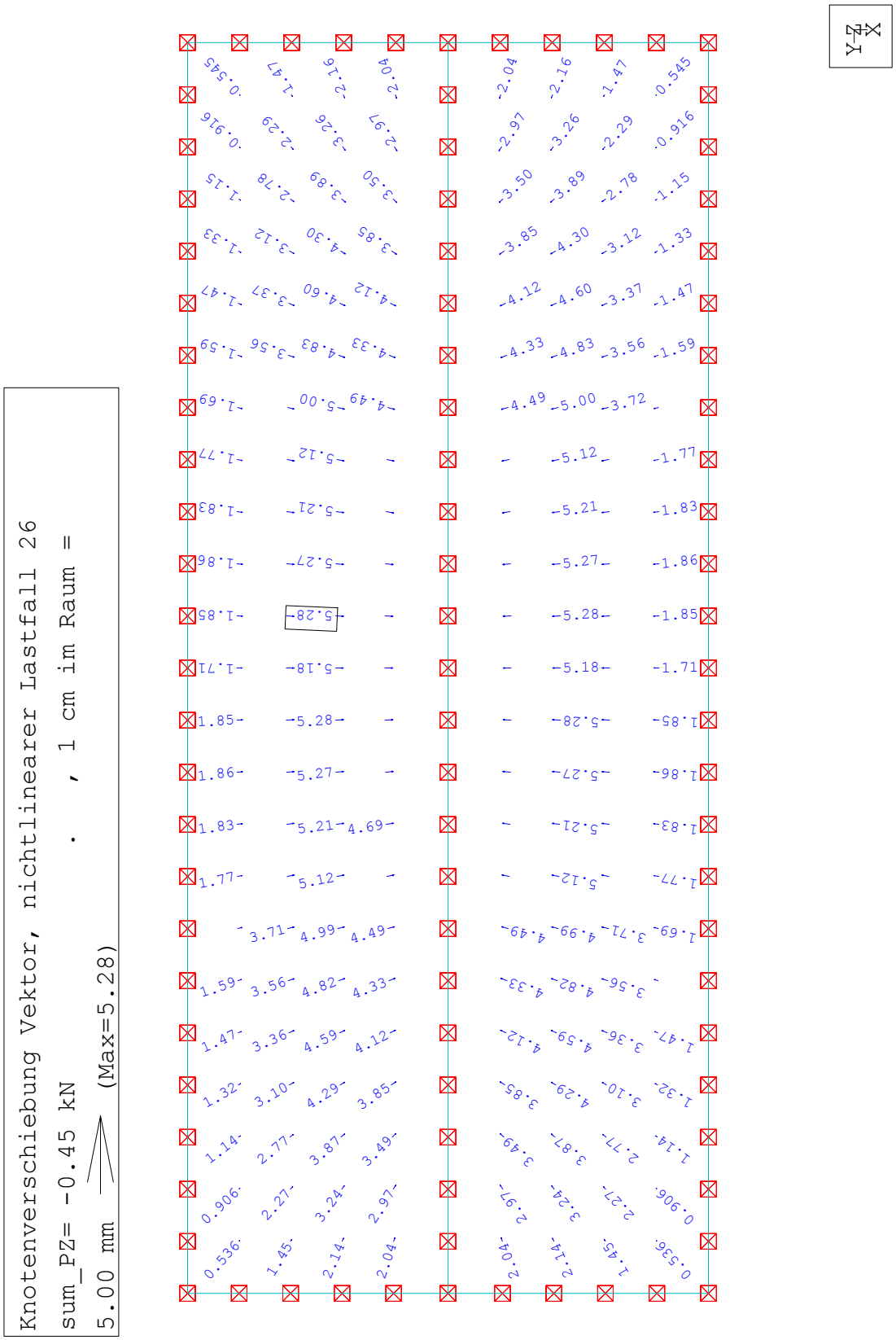
NT-Fassade


Knotenverschiebung Vektor, nichtlinearer Lastfall 25
sum_PZ= 0.45 kN
10.0 mm (Max=12.3)
1 cm im Raum =
Y-Z
X

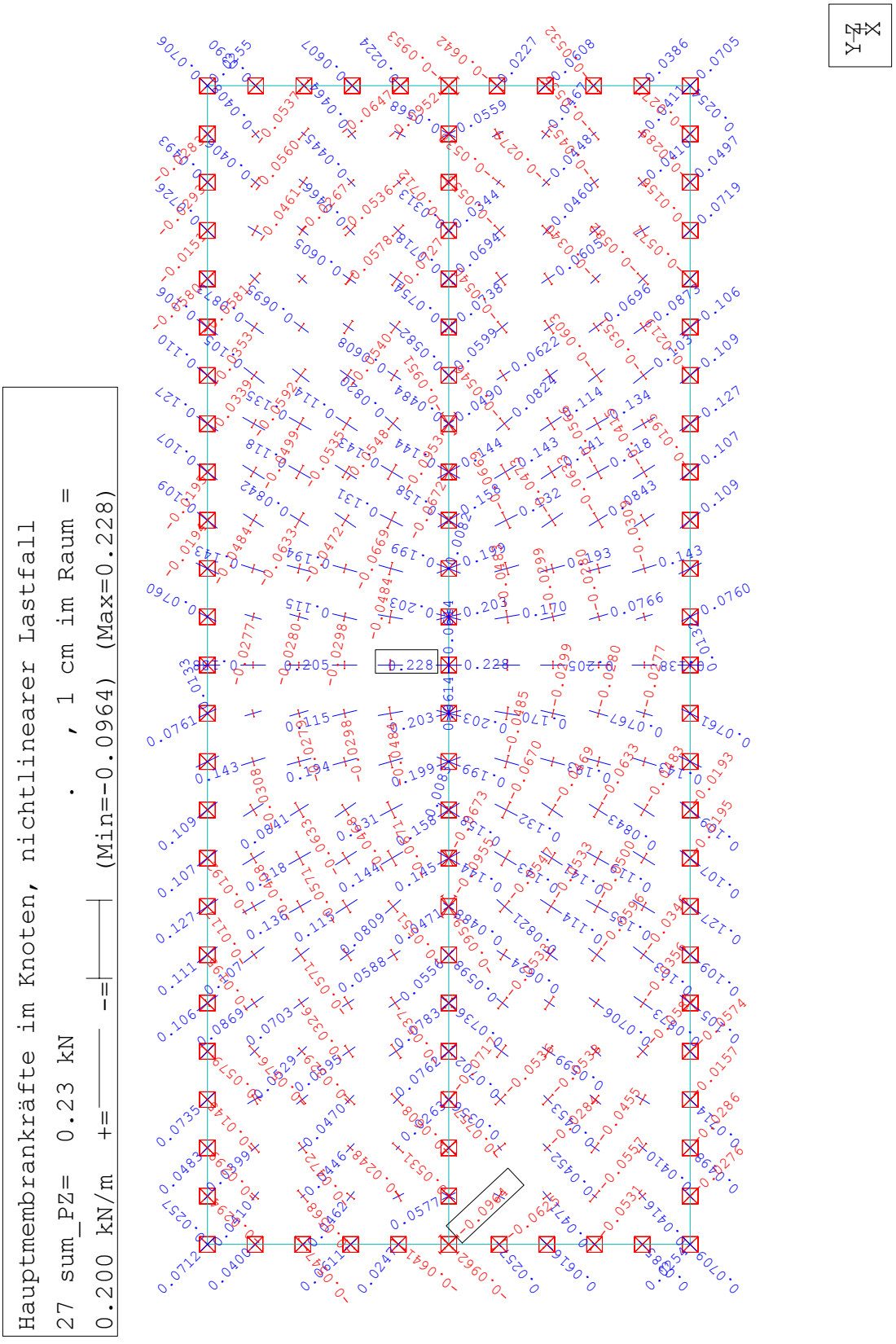
Hauptmembrankräfte im Knoten, nichtlinearer Lastfall
26 sum_PZ= -0.45 kN . , 1 cm im Raum =
1.00 kN/m +=——— -=|——— (Max=1.75)

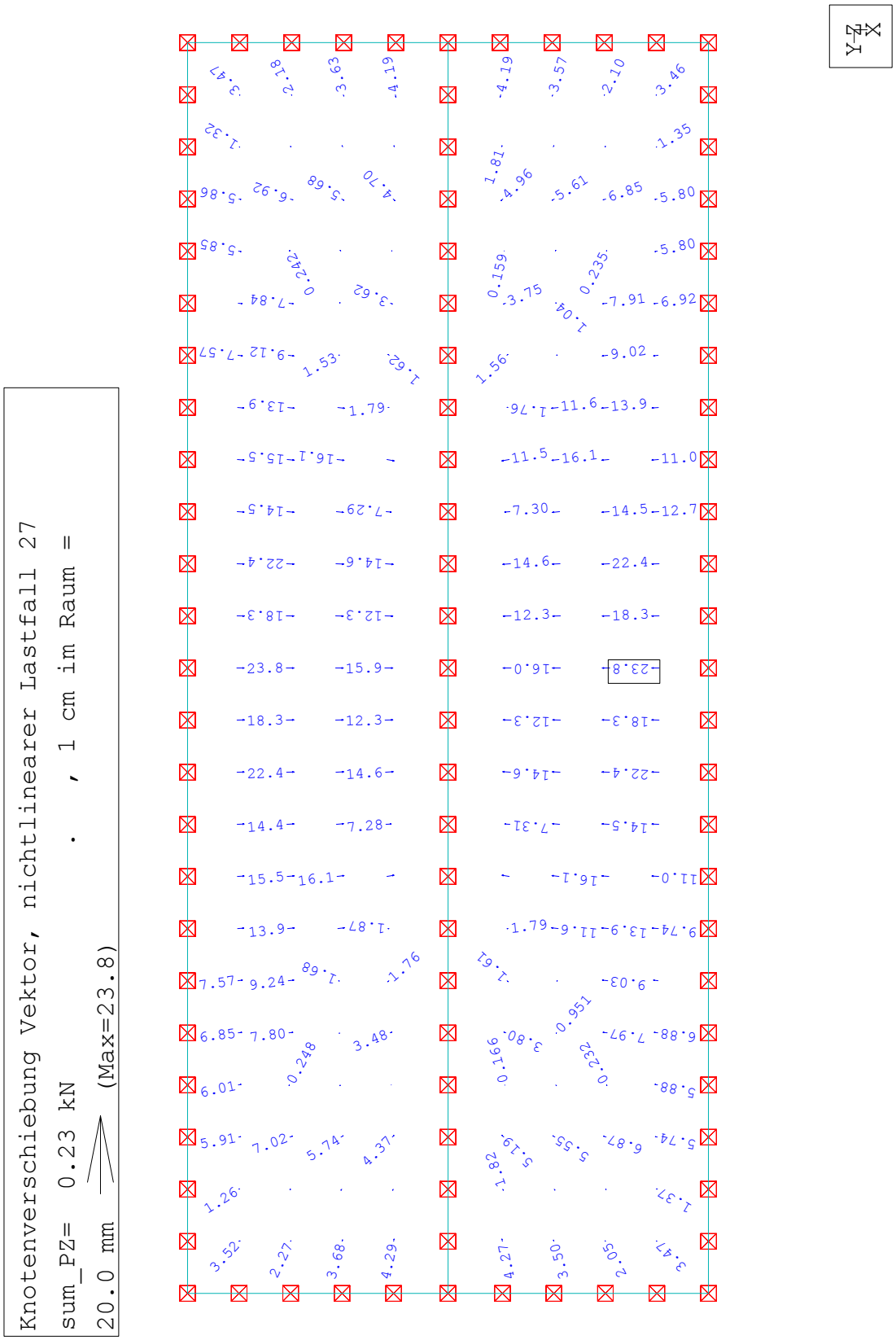


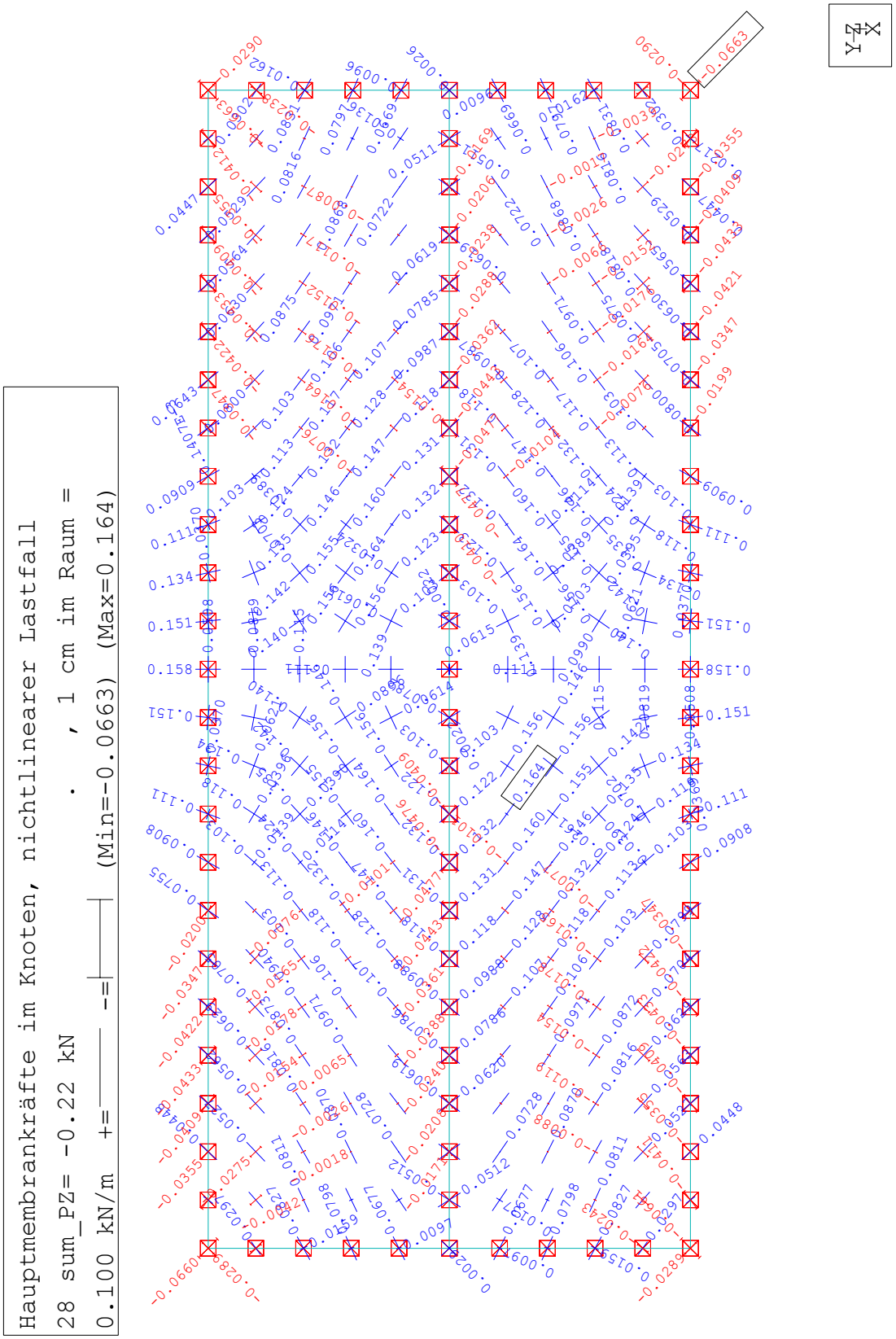
NT-Fassade


Knotenverschiebung Vektor, nichtlinearer Lastfall 26
sum_PZ= -0.45 kN
5.00 mm
(Max=5.28)
1 cm im Raum =
Y
Z
X

NT-Fassade


Hauptmembrankräfte im Knoten, nichtlinearer Lastfall
27 sum_PZ= 0.23 kN , 1 cm im Raum =
0.200 kN/m +=——— -=——— (Min=-0.0964) (Max=0.228)
NT-Fassade
Z
X
Y-A


Knotenverschiebung Vektor, nichtlinearer Lastfall 27
sum_PZ= 0.23 kN
20.0 mm (Max=23.8)
1 cm im Raum =
Y-Z
X


Hauptmembrankräfte im Knoten, nichtlinearer Lastfall
28 sum_PZ= -0.22 kN
0.100 kN/m
(Min=-0.0663) (Max=0.164)
Z-A
NT-Fassade

Knotenverschiebung Vektor, nichtlinearer Lastfall 28
sum_PZ= -0.22 kN
10.0 mm
(Max=15.4)
1 cm im Raum =
Y
Z
X

NT-Fassade