

Rimsting, 9. Juni 2009

DBU- Forschungsprojekt

Entwicklung von ressourcenschonenden Bausystemen mit Membran

Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Bereich von Membrankonstruktionen zum Einsatz bei Gebäudehüllen.

DBU-Forschungsprojekt - Vorphase

Antragstitel: Entwicklung von ressourcenschonenden Bausystemen mit Membranen

Aktenzeichen 26410

Referat: 25

durchgeführt von:

Hightex GmbH
Nordstrasse 10
83253 Rimsting

in Kooperation mit

HERZOGDESIGN
Imhofstrasse 8
80805 München

Projektbeginn: 13. Mai 2008

Projektende: 13. Mai 2009

Laufzeit: 12 Monate

Projektbeteiligte:

Hightex: Barbara Rief- Mentil, Dr.-Ing. Mike Sieder, Dipl.-Ing. Said Elsayad,
Prof. Dr.-Ing. Jan Cremers (Projektleitung), Dr.-Ing. Gregor Grunwald

Herzogdesign: Dipl.-Designer Verena Herzog-Loibl, Dipl.-Ing. Lavinia Herzog, Dr.-Ing. Lingyun
Zhang, Prof. Dr. Dr. h.c. O. Prof. (em.) Thomas Herzog; MS Cassian Herzog

Autoren:

Dr.-Ing. Gregor Grunwald

in Zusammenarbeit mit:

Prof. Dr. Dr. h.c. O. Prof. (em.) Thomas Herzog, S.9, 13-15, 25-27, 29-30, 71, 77-78

Dr.-Ing. Mike Sieder, S.42, 43

Dipl.-Ing. Said Elsayad, Anhang A

Gestalterische Beratung

Dipl.-Designer Verena Herzog Loibl

Layout und Durchsicht

MS Cassian Herzog,

Literaturverweise sind im Text mit Nummern [1] gekennzeichnet und verweisen auf die am Schluss aufgeführten Quellen.

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Das Material Membran stellt einen Hochleistungsbaustoff dar, der bisher nur für kostenintensive Sonderbauten Anwendung fand. Durch ausschließliche Zugbelastung des Werkstoffs kann die Membran mit minimaler Materialstärke über große Spannweiten sich selbst und äußere Lasten tragen, wie sonst kein anderer Baustoff. In dieser Effizienz liegt das große Potential der Einsparung von Ressourcen, das durch diese Forschung auf dem Gebiet der Modularisierung von Membranbausystemen einem deutlich erweiterten Anwendungsspektrum zu wirtschaftlicheren Konditionen zugänglich gemacht werden soll.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die Entwicklung modularer, membranbespannter Rahmenmodule als standardisiertes Bauprodukt steht im Vordergrund dieser industriellen Forschung. Erste Grundlagen hierfür konnten aus dem Projekt Bergwacht Bad Tölz gesammelt werden und stellen den Ausgangspunkt dieser Forschung dar. Folgende Untersuchungen und Weiterentwicklungen zur bestehenden Technologie sollen in Zeichnungen, Plänen und Berechnungen entwickelt werden: Rahmenprofilentwicklung, rahmenintegrierte Vorspannmechanik, Optimierung der Montage, Thermische Trennung des Rahmenprofils, Mehrlagigkeit der Rahmenmodule sowie die Optimierung des hybriden Tragverhaltens zwischen Rahmenkonstruktion und Membran. Unter Einbeziehung der Designstudien zur Gestaltung der Rahmenmodule, in Form von Zeichnungen, Skizzen und Modellen, durchgeführt von dem Kooperationspartner HERZOGDESIGN, soll aus diesen Ergebnissen ein Membranrahmenmodul entwickelt werden, das die primären Ansprüche einer geeigneten Tragkonstruktion für Membrane erfüllt. Mit dem Bau einer Testanwendung schließt die Vorprojektphase ab. Die Erfahrungen an einem 1:1 Modell werden aufschlussreiche Ergebnisse zur Konstruktion, Montageabläufe, Wirtschaftlichkeit und das Maß der Ressourcenschonung liefern und damit eine wertvolle Grundlage für die sich anschließende Hauptphase darstellen

In der Hauptphase des Forschungsprojekts sollen dann darauf aufbauend Zu- und Aufsätze für die Rahmenmodule entwickelt werden, um eine bauphysikalische Optimierung der Rahmenmodule zu entwickeln, die eine Anwendung der Rahmenmodule als leistungsfähige und intelligente Fassade ermöglicht.

Inhalt

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | Einleitung | 5 |
| 1.1. | Beschreibung des Vorhabens | 6 |
| 1.2. | Anforderungen | 7 |
| 1.3. | Anwendungsmöglichkeiten | 7 |
| 1.5. | Stand der Technik..... | 9 |
| 2. | Modulare Membranfassaden | 12 |
| 2.1. | Ausbildung der flächenbildenden Membran | 16 |
| 2.1.1. | Formenkanon der mechanisch vorgespannten Rahmenmodule | 16 |
| 2.1.2. | Potenzial der Formen | 17 |
| 2.1.3. | Die modulare Ordnung | 24 |
| 2.1.4. | Festlegung von Dimension und Membranauslenkung | 26 |
| 2.2. | Ausbildung des Rahmens | 27 |
| 2.2.1. | Folie..... | 28 |
| 2.2.2. | Vorspannung | 30 |
| 2.2.3. | Nachspannbarkeit | 34 |
| 2.2.4. | Thermische Trennung | 41 |
| 2.2.6. | Das Rahmenprofil | 50 |
| 2.2.6. | Entwässerung, Dichtigkeit und Kondensat | 59 |
| 2.2.9. | UV-, Brand- und Korrosionsschutz..... | 61 |
| 2.2.9. | Tragverhalten | 62 |
| 2.3. | Ausbildung der Fugen | 65 |
| 2.3.1. | Fugenausbildung zwischen Rahmen und Rahmen..... | 65 |
| 2.3.2. | Fugenausbildung zwischen Rahmen und anderen angrenzenden Bauteilen..... | 66 |
| 3. | Zeichnungen, Pläne, Umsetzung | 67 |
| 3.1. | Zuschnitt Folie..... | 67 |
| 3.2. | Stahlrahmen..... | 68 |
| 3.3. | Bogenkonstruktion | 70 |
| 3.4. | Datenblatt | 71 |
| 3.4. | Prototyp | 72 |
| 4. | Wirtschaftlichkeits- und Ressourcenberechnung | 74 |
| 5. | Zusammenfassung, Bewertung | 77 |
| 5.1. | Resümee | 77 |
| 5.2. | Ausblick auf die Hauptphase..... | 77 |
| | Literatur | 79 |
| | Anhang | 80 |
| A: | Statik des Rahmenmoduls | 80 |
| B: | Produktdatenblatt ETFE-Folie NOWOFLON..... | 103 |

1. Einleitung

Die Verwendung von Membranen im industriellen Bauwesen ist bereits seit mehr als einem halben Jahrhundert üblich, doch handelt es sich dabei fast durchwegs um großformatige Flächen zum Zweck der Überdachungen von Großbauten wie Stadien, Messehallen und ähnlichem. Merkmale solcher Konstruktionen sind neben der zugbeanspruchten Membrane auch eine Reihe von formalen Eigenheiten, die sich aus dem Prinzip der gespannten Haut ergeben, wie Randseile zur Aufnahme der Zugkräfte und ihre Krümmung in Richtung der Einleitung der Lasten. Aufgrund dieser Eigenheiten verblieb diese Bauweise bisher nahezu ausschließlich auf Sonderanfertigungen beschränkt.

Erst in jüngster Zeit wurden zunehmend Membranen bei Gebäuden auch für Fassadenkonstruktionen eingesetzt. Bekannt sind z.B. die pneumatischen, durch Überdruck stabilisierten, doppellagigen Membrankonstruktionen für die Allianz-Arena in München, für das Projekt „Eden“ in Südenland oder den „Watercube“ in Peking. Nachteilig in allen drei genannten Projekten ist, dass jeweils die Kissen individuelle Abmessungen haben und kein Ansatz des modularen Bauens verfolgt wurde. Dies hat enormen Aufwand in Planung, Engineering, in der Konfektion und in der Montage zur Folge, erhöht die Kosten und reduziert die Anwendung der Membran auf dem Markt auf bisher wenige Großbauprojekte.

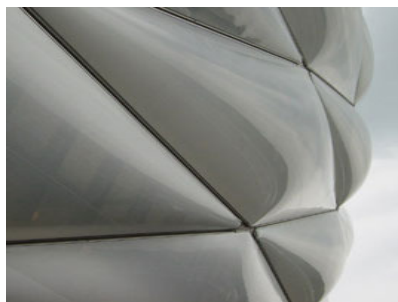


Abb.1 Watercube



Abb.2 Allianzarena

Dabei stellt das Material Membran einen Hochleistungsbaustoff dar, der auf einzigartige Weise die Ressourcen auf ein Minimum reduziert. Durch ausschließliche Zugbelastung im Werkstoff kann die Membran mit minimaler Materialstärke über große Spannweiten sich selbst und äußere Lasten tragen und abtragen, wie sonst kein anderer Baustoff. In dieser Effizienz liegt das große Potential der Einsparung von Ressourcen, die durch unsere nachfolgend dargestellte Forschung auf dem Gebiet der

Modularisierung von Membranbausystemen einem deutlich erweiterten Anwendungsspektrum zugänglich gemacht werden soll.

1.1. Beschreibung des Vorhabens

Bisher ist es nicht gelungen, die Vorteile der Membranbauweise als ein standardisiertes, modulares Bauprodukt, dem Membranrahmenmodul (MRM) zu entwickeln und damit den kostenintensiven Sonderanfertigungsbereich zu verlassen. Standardisierte Konstruktionen könnten die Qualitäten des Membranbaus, ihre transluzente Ästhetik, Leichtigkeit und Dynamik, aufgreifen und darüber hinaus von weiteren positiven Eigenschaften profitieren:

- Einsparung von Energie
- Einsparung von Material-Ressourcen
- Universalität bezüglich der Einsatzbereiche
- architektonisch-gestalterische Vielfalt
- gesicherte Qualität durch kontrollierte Fertigung im Werk
- einfache Montage
- erweitertes Anwendungsspektrum durch Steigerung der Wirtschaftlichkeit

Diese Qualitäten sollen das zu entwickelnde Bausystem auszeichnen. Darüber hinaus verfolgt dieses Forschungsprojekt das Ziel anstelle der Druckluft gestützten Vorspannung der Membran eine mechanisch vorgespannte Membran in die Rahmenmodule zu integrieren. Der entscheidende Vorteil besteht in der Einsparung des Betriebens von Gebläselüftung und damit von Energieressourcen, die bei pneumatischen Kissenkonstruktionen permanent verbraucht werden.

Die Entwicklung der beschriebenen Rahmenmodule führt zu einem innovativen Bauprodukt, das dem Material Membran zu einer wesentlich höheren Verbreitung und Anwendung verhelfen kann.

Unterstützt durch die serienbedingte Kostensenkung im Engineering und in der Herstellung wäre die Verwendung des Membranelements als ein im Werk vorgefertigtes, qualitätsgesichertes Produkt erhältlich und könnte somit deutlich zur Ressourcen- und Energieschonung beitragen. Dabei liegt der

Vorteil nicht nur in der Minimierung des Eigengewichts der Bauteile, sondern auch in erheblichen Einsparungen bei der tragenden Unterkonstruktion.

Das Bausystem kann in weiteren Entwicklungsschritten mit Ergänzungen erweitert werden, die das Fassadenmodul zum Träger von transluzenter Hochleistungsdämmung, Photovoltaik-elementen, oder schaltbaren, oder starren Verschattungselementen macht. Diese Funktionalitäten vereinen sich mit der transluzenten Ästhetik der Systemmodule und stellen einen wertvollen Beitrag zu einer zeitgemäßen und nachhaltigen Architektur dar.

1.2. Anforderungen

Die Anforderungen an das mechanisch vorgespannte MRM sind für die erste Projektphase beschränkt auf die primären Ansprüche einer geeigneten Tragkonstruktion für Membrane. So konzentriert sich die aktuelle Entwicklung in Kapitel 2.1. auf Form und Gestaltung der Module, um anschließend die Konstruktion und den Montageablauf der Rahmen zu entwerfen und den Einbau der vorgespannten Membran zu optimieren (2.2 -2.4.). Weitere untersuchte Themen sind thermische Trennung des Rahmenprofils, Vorspannmechanik, Anschlüsse der Rahmen an die Unterkonstruktion u.a..

In der zweiten Phase des Forschungsprojekts sollen darauf aufbauend Zu- und Aufsätze für die MRM entwickelt werden, die eine bauphysikalische Aktivierung der Rahmenmodule leisten. So wird die Integration von transluzenter Hochleistungsdämmung zu entwickeln sein, um Anforderungen des Wärmeschutzes erfüllen zu können sowie Lösungen für Feuchte-, Schallschutz, Akustik und Vandalismus zu liefern. Die Zu- und Aufsätze sind ebenfalls modular zu planen und können optional an die MRM gekoppelt werden.

1.3. Anwendungsmöglichkeiten

Aus diesen Anforderungen heraus können die MRM für unterschiedlichste Anwendungen Verwendung finden. Ausführungen der ersten Entwicklungsphase bieten einfachen Wetterschutz. Sie können als Fassadenmodul beispielsweise in Werkhallen Verwendung finden. Sie sind als Fassadenelemente für nicht beheizte Räume oder Erschließungszonen zu verwenden, sie können horizontal in Überdachungen

von Wegen, für Unterstände, als Windschutz, oder als Fassade von beispielsweise Autowaschanlagen oder Gewächshäusern Anwendung finden.

Sobald bauphysikalische Zusatzelemente an das MRM gekoppelt werden, erweitert sich das Anwendungsspektrum enorm. Das MRM kann als hochwertige Fassade in Büro- und Geschäftsgebäuden, Wohngebäuden, Industriehallen oder Ausstellungshallen Anwendung finden. Die Entwicklung beschränkt sich vorerst auf den vertikalen Einbau in der Fassade, wobei auch im Dachbereich die Anwendung der MRM realisierbar ist. Die nachfolgende Tabelle listet mögliche Anwendungsbereiche dieser bauphysikalisch aktiven Module auf.

Anwendungsbereiche für elementierte Membrankonstruktionen - Nutzungsprognose (Prof. Thomas Herzog)

x = wahrscheinlich - = unwahrscheinlich

| Lokalisierung | Dach | Fassade | Vordach | Hofüberdachung | Ganze Form |
|-------------------------|------|---------|---------|----------------|------------|
| Nutzungsart | | | | | |
| Verwaltung | X | -- | X | X | -- |
| Bildung / Erziehung | X | -- | X | X | -- |
| Kultur | X | X | X | X | X |
| Ausstellungen / Messen | X | -- | X | X | X |
| Sport | X | X | X | -- | X |
| Verkauf | X | -- | X | X | X |
| Produktion / Industrie | X | X | X | -- | X |
| Forschung / Entwicklung | X | -- | X | -- | X |
| Lager | X | X | X | -- | X |
| Verkehr / Parken | X | -- | X | -- | X |
| Behausung / Wohnen | X | -- | X | X | X |
| Beherbergung / Hotels | X | X | X | X | X |

1.5. Stand der Technik

Die Entwicklung modularer, membranbespannter Bauelemente als standardisiertes Bauprodukt steht im Vordergrund dieser industriellen Forschung. Als Grundlage hierfür dienen die Erfahrungen, die aus dem laufenden Projekt Bergwacht Bad Tölz entstehen. Ihre Technologie stellt den Ausgangspunkt der Entwicklung dieses Forschungsprojektes dar und wird deshalb im Folgenden kurz beschrieben werden.

Das Rahmenmodul der Bergwacht ist ETFE- Folien bespannt. Es wird einlagig über den äußeren rechteckigen Rahmen gezogen und ist in der Membranfläche über zwei Bogenkonstruktionen ausgelenkt, um die notwendige gegenseitige Krümmung und damit ausreichende geometrische Steifigkeit in die Folie zu bekommen. Die Rahmenseitenmaße betragen 3,75m x 2,50m, der Bogenstich liegt bei 34cm. Befestigt werden die MRM über vier Löcher im Rahmenprofil, die eine Bolzenverbindung mit der Unterkonstruktion ermöglichen.



Abb. 3-5: montiertes MRM am Stahlbau der Bergwacht Bad Tölz

Das Rahmenprofil ist in Z Form ausgebildet und bietet auf der Innenseite die Möglichkeit der Aufnahme der Bögen. Hierfür sind auf die Profilstege keilförmigen Stahlblöcke aufgeschweißt, die über Gewinde eine Verbindungsmöglichkeit der Bögen ermöglichen.



Abb. 6-8: Konstruktionselemente der MRM

Vor dem Einfügen der Bögen wird das Rahmenmodul zuerst mit der fertig konfektionierten ETFE Folie überspannt. Sie wird über die Z-Profilkante gezogen, umgeschlagen und auf dem äußeren Profilstege durch Klemmleiste und EPDM Dichtung an den Rahmen befestigt. Schrauben in einem Abstand von 20cm ermöglichen die Klemmung. Nachdem alle Seiten befestigt wurden, werden anschließend die Bögen von oben in die Folie gepresst bis die Bogenaufleger mit den entsprechenden Keilen verschraubt werden können. Die Bögen drücken die Folie in ihre endgültige Form und spannen sie somit vor.

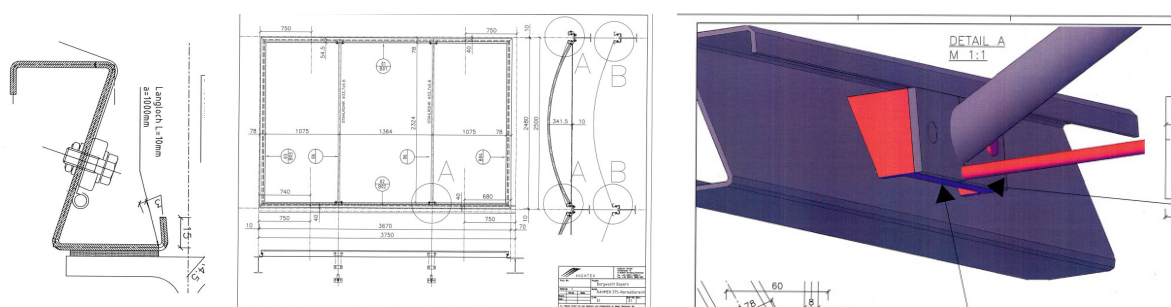


Abb. 9-11: Profilschnitt, Grundriss, Ansichten und Isometrie der Bergwacht Rahmenmodule.

Die Rahmenkonstruktion ist getestet und ist für über 400 Einzelelemente im Projekt Bergwacht zum Einsatz gekommen. Gerade deshalb lohnt sich eine weitere Optimierung der Technologie für zukünftige Projekte, um Material, Zeit und Energie zu schonen, die Wirtschaftlichkeit der Rahmenmodule zu steigern und eine Möglichkeit der Qualitätssicherung zu erreichen. Nur so kann diese Bauweise zu einem Bausystem entwickelt werden, mit dem ein breites Anwendungsspektrum abgedeckt werden kann.

Das im Rahmen dieses Forschungsprojekts entwickelte Rahmenmodul wird also auf den Erfahrungen der Rahmenmodule von Bad Tölz aufbauen und auf verschiedenen Gebieten Untersuchungen und Weiterentwicklungen zur bestehenden Technologien bieten:

1. Untersuchung einer rahmenintegrierten Vorspannmechanik, die ein individuelles Nachspannen auch im montierten Zustand ermöglicht.
2. Kontrolle der Vorspannungszuständen während und nach der Montage.
3. Entwicklung einer thermischen Trennung des Profils, um die Wärmebrücken im Fassadenbereich zu minimieren. Diese Technologie ist aus dem konventionellen Fensterbau bekannt und soll im Zuge dieses Forschungsvorhabens auf den Bereich der biegeweichen

Membrankonstruktionen angewendet werden.

4. Die mögliche Mehrlagigkeit der MRM stellt einen weiteren Entwicklungsschritt in der Konstruktion der Rahmenmodule dar.
5. Optimierung des hybriden Tragverhaltens zwischen Rahmenkonstruktion und Membran. Durch die direkte Anbindung der Membran an den Rahmen beeinflussen sich beide Tragelemente wechselseitig. Membranvorspannung führt zur Belastung des Rahmens und seiner Verformung, dies wiederum zu einer Entlastung der Membranvorspannung.

2. Modulare Membranfassaden

Überlegungen im Zusammenhang mit Konstruktion, Fertigung, Einsatzmöglichkeiten, Wirtschaftlichkeit (Prof. Thomas Herzog)

Üblicherweise werden mit Membranen bedeckte Flächen der Gebäudehülle am Rand durch die Einbringung von Seilen, welche die angreifenden Zugkräfte übernehmen, ausgebildet. Als grundlegender Vorteil von zugbeanspruchten Flächen, können dabei große zusammenhängende, nicht durch Fugen unterbrochene Oberflächen hergestellt werden. Wenn man im Bereich der Gebäudehüllen - speziell der Fassaden - Membranen für die Herstellung der Flächen, die dem Wetterschutz dienen, einsetzen möchte, so ist zweierlei von Nöten:

- a. Es sind kleinere Flächen in ihrer Dimension zu definieren, so wie Maßnahmen zur Stabilisierung dieser biegeweichen Flächen gegen von außen einwirkende Kräfte und
- b. die Ausbildung der Ränder muss so erfolgen, dass sowohl in vertikaler wie in horizontaler Richtung Rahmen gebildet werden, die nach innen hin die Zugkräfte der Membran aufnehmen und die zu seitlich angrenzenden Konstruktionen technisch, funktional und gestalterisch stimmige Anschlüsse haben. Diese angrenzenden Konstruktionen können entweder gleichartige oder anders geartete Bauteile sein. Dabei sind zu lösen: Konstruktive, bauphysikalische, montagetechnische, statische und mechanische Fragestellungen.

Es gibt demnach zwei grundsätzliche Einsatzbereiche solcher Membranbauteile in Gebäudefassaden:

a. Sog. "nichttragende Außenwände" als Systeme

Hier besteht zunächst eine gewisse Nähe zu den "Vorhangfassaden" oder bei Skelettkonstruktionen "eingestellten Fassaden". Merkmal dessen ist in aller Regel ein orthogonales System von Profilen, welche die aus der Hüllfläche eingeleiteten Kräfte über Biegung in die Geschoßdecken abtragen. In einem solchen System mit durchlaufenden Profilen gelten also analoge Spezifika, wie man sie unterscheidet im Fall sog. "Pfosten-Riegel-Konstruktionen" bzw. "Element-Konstruktionen". In solchen Systemen gibt es insgesamt mehr als 25 mögliche Grunddetails [1] (Seite 29), die zum Teil mit Zusatzkonstruktionen zu beherrschen sind. Unverzichtbar ist jedoch in jedem Fall, dass in Form von einwandfrei funktionierenden

Regeldetails geklärt sein muss: Die Ausbildung von Normalstoß in der Horizontalen und der Vertikalen, so wie Außenecken, Innenecken, Vor- und Rücksprünge, Gebäudefuß und Dachanschluss. Für all diese Details ist es notwendig und sinnvoll, Standardausführungen zu entwickeln entsprechend den Kategorien möglicher Relation zum Tragwerk und auf Basis der DIN 18000 (Modulordnung mit Vorzugsmaßen). Gefragt ist hier also durchwegs das Know-how der Fassadenbauer, so wie die Ergänzung um die bei Membranen spezifischen Gegebenheiten, wie die Einleitung der Membrankräfte in den Rand des einzelnen Bauteils. Es gibt hier dimensionale Unterschiede je nach Gebäude in großer Varianz als ein Anwendungsspezifikum; das heißt, weil im Fall von ganzen Fassaden, die auf diese Weise durchgängig konstruiert sind, deren Elemente quasi "lückenlos" in horizontaler und vertikaler Richtung addiert werden, dass die Rahmenabmessung gleicher oder unterschiedlicher Einzeldimension von zentraler Bedeutung ist. Für die Entwicklung eines Fassadensystemes mit Membranflächen ist die Befassung mit Vorzugsmaßen deshalb von Bedeutung, weil je nach Größe und Art der aus der Fläche in den Rand einzuleitenden Kräfte (die sich grundlegend von denen im Fall verglaster Fassaden unterscheiden) sowohl die Randausbildung entsprechend erfolgen muss, als auch die Punkte zu gestalten sind, wo solche Kräfte eingeleitet werden müssen, welche durch zusätzliche Maßnahmen (wie Bögen oder ring-, stern-, kugelförmige Unterstützungen) die Vorspannung der Membranen bewirken. Im Vergleich zu großflächigen Glasfassaden wirken sich nachfolgende Punkte - gerade bei mehrgeschossigen und hohen Bauten im Fall von Membrankonstruktionen vorteilhaft aus:

- erheblich geringeres Gewicht der Flächen - schwächere Querschnitte der Rahmenkonstruktion bei optimierter Auslegung der Größen
- Auswirkung des geringeren Eigengewichts aus Fläche und Randkonstruktion auf die Dimensionierung des Tragwerks (Deckenränder u. a.)
- Möglichkeit ästhetischer Differenzierung durch die Art der Sekundärelemente zur Spannung der Membranen
- Verwendungsmöglichkeit von "selbstreinigendem" Material (keine Reinigungsanlagen, Betriebskostensparnis)
- weitere Vorteile des Leichtbaus bei Produktion, Transport und Montage

b. Einzelbauteile

Die Außenabmessungen der Rahmen können in einigen Vorzugsmaßen festgelegt sein können, wobei davon ausgegangen werden kann, dass diese für unterschiedliche Anwendungsfälle deshalb "passen", weil solche Bauteile in andersgeartete Wandkonstruktionen integriert werden, welche eher homogen sind, d. h. die nicht aus dem gleichen System von Modulen bestehen. (Dies verhält sich ähnlich, wie beispielsweise Fertighenster, Fertigtüren, Lichtschächte, Dachflächenfenster, Oberlichter in Flachdächern und dergleichen.) Produkte solcher Art, die aus ganz unterschiedlichen Materialien bestehen können, werden bekanntlich in großen Stückzahlen in Baumärkten verkauft. Sie haben durchwegs auch im Gegensatz zu den Bauteilen nach Ziffer 1 standardisierte Abmessungen, Gewichte, Randanschlüsse und Ähnliches. Dabei ist zwingende Voraussetzung, dass die auf die einzelne Bauaufgabe bezogene maßliche Anpassung durch die angrenzenden Konstruktionen aufgenommen werden - wie beispielsweise gemauerte oder betonierte Wände, Ziegeldächer oder Ähnliches. Standardisierung bedeutet also im Fall durchgängiger, großer Fassadenkonstruktionen die konstruktive Klärung und Vereinheitlichung der Anschlüsse zwischen Membranfläche und umgebendem Rand, so wie zwischen diesem Rand und benachbarten Bauteilen gleicher oder verwandter Art. Sie bedeutet nicht eine Standardisierung von Abmessungen. Diese müssen vielmehr innerhalb definierter Grenzwerte variabel bleiben, um universelle Anwendung zu ermöglichen. Hieraus resultiert die Möglichkeit, der Standardisierung von Details, Membranflächen, Randprofilen, Dichtungsleisten, Befestigungspunkten u. a. und somit die Möglichkeit einer schnellen technischen Bearbeitung und Arbeitsvorbereitung für die auf das einzelne Projekt bezogene Produktion.

Für die Gestaltung des Einzelbauwerkes bleiben die Optionen im Bereich der Aufteilung von Fassadenfläche offen! Im Fall der Einzelbauwerke jedoch, wie unter 2. beschrieben, handelt es sich um in sich geschlossene Komponenten, die auch intern unterschiedliche Funktionen haben können (wie beispielsweise unterschiedliche Transparenz, Wärmedämmwerte, Verschattungs-, Blendschutz-, Öffnungs-, Lüftungsmöglichkeiten und dergleichen). Extern ist hier zu klären, wie die Anschlüsse an mögliche umgebende Konstruktionen auszusehen haben, um die für Fassaden generell gültigen Anforderungen z. B. in Sachen Krafteinleitung, Dichtigkeit gegen Niederschläge, Wärmedurchgang und Dampfdiffusion speziell im Randbereich zu bewältigen.

Im Vordergrund dieses Projektes stehen die unter Ziffer 1 angeführten, so genannten „nichttragenden Außenwände“ als System. Da die „nichttragenden Außenwände“ als modulare Rahmenbauteile entwickelt werden, entstehen grundsätzlich vier Standardbereiche, die für sich zu bearbeiten sind.

1. Ausbildung der flächenbildenden Membran
2. Ausbildung der Rahmenränder
3. zwischen Rahmen und Rahmen
4. zwischen Rahmen und anderen Bauteilen, an welche diese angrenzen.

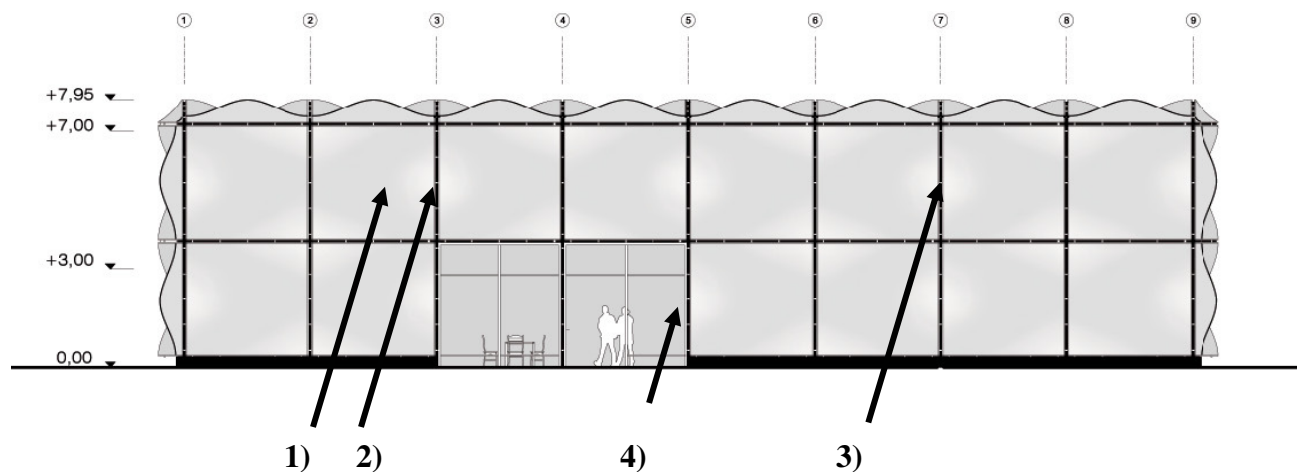


Abb. 9 Standardbereiche [2]

2.1. Ausbildung der flächenbildenden Membran

Membrankonstruktionen sind Formen, die das Abbild des Kraftverlaufes des Tragwerks darstellen. Die doppelte Krümmung der Membran in Verbindung mit dem Einbringen einer Vorspannung ist zur Ertüchtigung des Tragwerks unerlässlich, da die Membrankonstruktionen verformungsaktiv sind und ihre Form sich nach der Einwirkung der Lasten richtet. Diese Formenbestimmung durch Kräfte charakterisiert den Membranbau. Sie kann mittels physikalischer Gesetzmäßigkeiten erklärt und simuliert werden, ein Prozess der als Formfindung bezeichnet wird.

Diese unabdingbar notwendige Krümmung der Membranfläche steht jedoch einer stärkeren Verbreitung der Bauweise entgegen. Auch wenn eben diese Krümmung im hohen Maße zur Expressivität der Bauwerke beiträgt, so erfordert sie geometrisch erhöhten Flächenanspruch, führt zu unwirtschaftlichen Flächenausnutzungen und komplizierten Verbindungsdetails. Ihre Anbindung an Gebäudegeometrien, die dem rechten Winkel folgen gestaltet sich schwierig.

Mit der Entwicklung eines modularen Bausystems soll genau diese Problematik untersucht und Lösungsansätze für geometrisch gekrümmte, aber flächenschonende Module gesucht werden, die in ihrer Grundgeometrie dem rechten Winkel folgen. Das System wäre so mit herkömmlich rechtwinkligen Gebäudestrukturen zu verbinden, was eine notwendige Voraussetzung für steigende Anwendungszahlen darstellt.

2.1.1. Formenkanon der mechanisch vorgespannten Rahmenmodule

Die Ausführungen zum Thema Formfindung [Höllner, Ralf: Formfindung, Mähringen: Verlag Dr. Thomas Balistier, 1999, Forster B., Mollaert, M.: European Design Guide for Tensile Surface Structures, TensiNet, Brüssel, 2004] machen deutlich, dass Ausgleichsflächen physikalischen Bedingungen unterliegen, die ihre Form prägen und bedingen. Trotz dieser Bindung an doppelte Krümmung und einem Ausgleich der Kräfte ist die Variation der Formen unendlich groß. Um diese Vielzahl an Formen zu strukturieren und zu ordnen ist eine Klassifizierung in Abhängigkeit ihrer Randbedingungen sinnvoll. Dabei haben vor allem zwei Faktoren maßgeblichen Einfluss auf die Gestalt der Membranform: Die Stützung der Fläche sowie die des Randes (Abb.10).



Abb.10 Membranstützung [2]

Nach Ausbildung dieser beiden Randparameter können unter den mechanisch vorgespannten Konstruktionen vier Grundformen unterschieden werden, die Sattel- und Buckelform, Grat- und Kehlform sowie die Bogenform. Über die Differenzierung nach Flächenstützung hinaus, unterscheidet Tabelle xx die vier Grundtypen noch nach Art ihrer Randstützung. Sie kann biegeweich in Form von Randseilen ausgebildet (1-4) oder durch biegesteife Randelemente umfasst sein (I-IV).


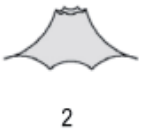






| | | Stützung der Fläche | | | |
|---------------------|--------------|--|---|---|---|
| | | keine | punktuell | linear | |
| | | | | biegeweich | biegesteif |
| Stützung des Randes | biegeweich |  1 |  2 |  3 |  4 |
| | biegesteif |  I |  II |  III |  IV |
| Typ | Sattelfläche | Trichter-Buckelfläche | Grat- und Kehlfläche | Bogenfläche | |

Abb 11. Schematabelle Stützung [2]

2.1.2. Potenzial der Formen

Die Formenvielfalt der mechanisch vorgespannten Membrankonstruktionen ist groß. Jede der Grundformen ist in einer unbeschränkten Anzahl von Formgestaltung variiert. Die nachstehenden Tabellen geben einen Überblick über ihr Potenzial als Gebäudehülle Verwendung zu finden.


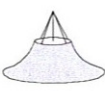

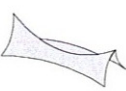




| Form | Sattelform | Buckelform | Bogenform | Grat- und Kehlflächenform |
|----------------|---|---|--|---|
| singuläre Form |  |  |  |  |
| modulare Form |  |  |  |  |

Abb.12 singuläre / modulare Form [2]

Mit einer Großform ist es nur schwer möglich effizient eine Gebäudehülle zu bilden. Die gekrümmte Form der Membran kann konstruktiv nur unter großem Aufwand an eine rechteckige Gebäudekubatur herkömmlicher Architektur angeschlossen werden, formal kommt es zu unbefriedigenden Ergebnissen. Die Addition von vielen Kleinformen ergibt hingegen eine modulare Flächenbildung der Membran, die deutlich einfacher mit rechteckiger Geometrie korrespondiert. Ihre Anwendung im Fassaden und Dachbereich wird in der nachstehenden Tabelle aufgezeigt.

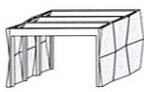
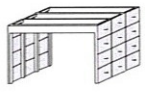
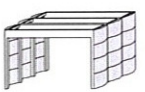
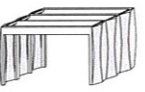




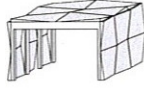
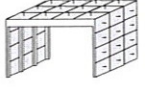
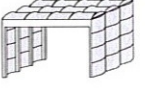
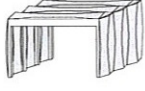


| Lage | | Sattelform | Buckelform | Bogenform | Grat- und Kehlflächenform |
|-----------------------|------------------|---|---|--|---|
| zweidimensional, eben | Fassade |  |  |  |  |
| | Dach |  |  |  |  |
| | Dach und Fassade |  |  |  |  |
| räumlich | Hülle | |  |  | |

Abb.13 Schema addierter Flächen [2]

Die modularen Kleinformen zeichnen sich also durch flexible geometrische Anpassungsfähigkeit aus und bilden die Formengrundlage der in diesem Forschungsprojekt zu entwickelnden MRM.

Der erste Standardbereich, die flächenbildende Membran wird maßgeblich durch die gewählte Vorspannungsform geprägt. Sie kann aus einer der folgenden Grundformen bestehen:

Sattelform

Ein sattelförmig gespanntes Rahmenmodul kann erzeugt werden, indem zwei gegenüberliegende Ecken des Rahmens aus der Ebene heraus ausgelenkt werden. So entsteht aus vier ebenen Rahmenseiten und der dazwischen gespannten Membran ein hyperbolisches Paraboloid.

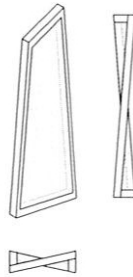


Abb. 13 Sattelform [2]

Vorteile der Sattelform: Die eingezogene Membran bedarf keiner flächenmittigen Auslenkung. Dadurch weisen sattelförmig gespannte Membranen eine homogene Spannungsverteilung in ihrer Fläche auf, was zu einer sehr wirtschaftlichen und schonenden Ausnutzung der Membran und ihrer Rahmenkonstruktion führt.

Nachteile der Sattelform: Durch das Auslenken der Rahmenecken ist der Herstellungsaufwand der sattelförmigen Rahmenmodule höher als der ebener Konstruktionen. Eck- und Randmodule müssen durch zusätzliche Sonderbauteile abgedichtet werden.

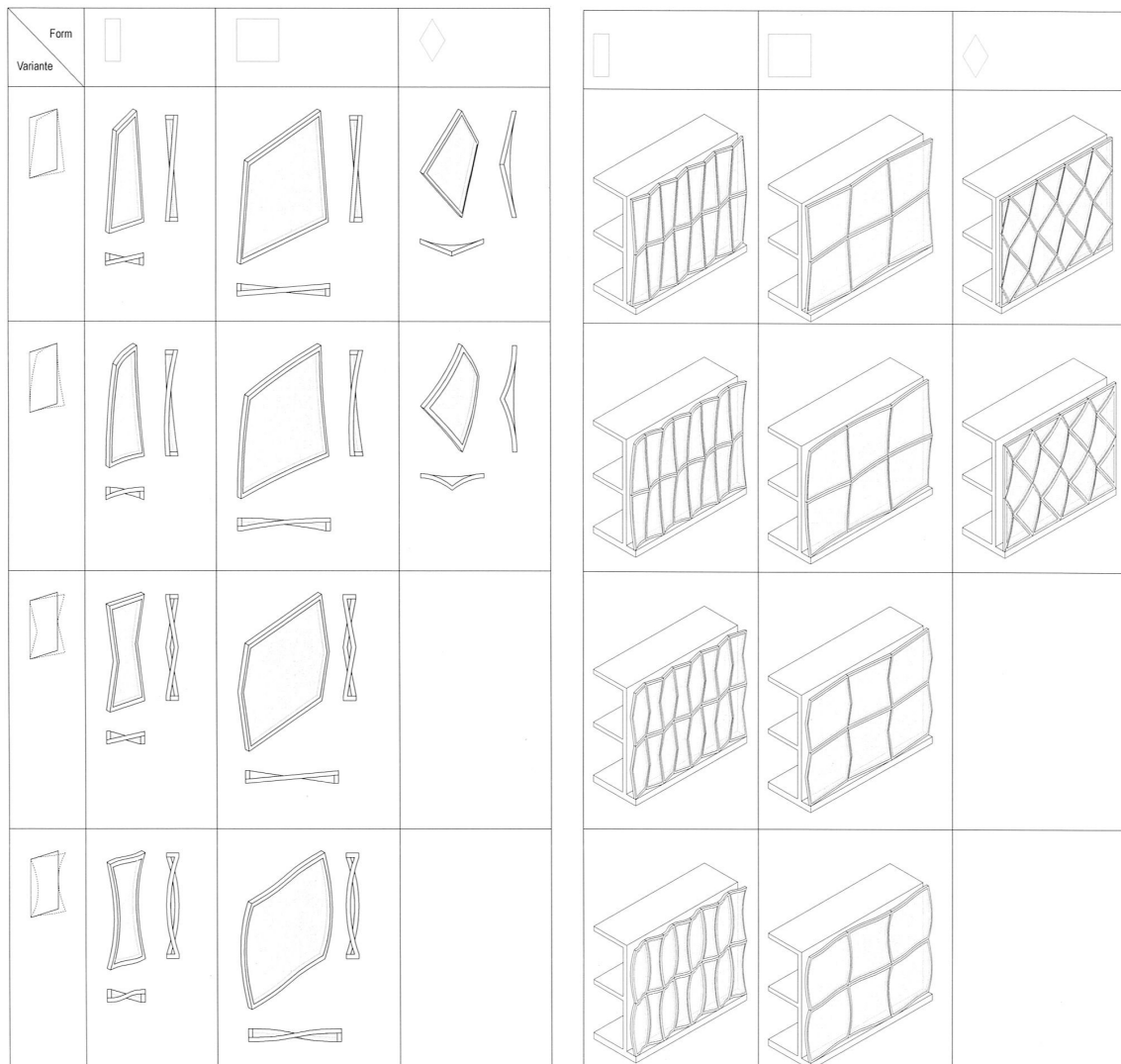


Abb. 14 Fassadenstudien einfacher Sattelformen [2]

Buckelform

Buckelförmige Membranen werden innerhalb einer ebenen Rahmenkonstruktion gespannt und mittels punktueller Spreizen in der Flächenmitte ausgelenkt. So entstehen Hochpunkte innerhalb der Membran, die ihre notwendige gegenseitige Krümmung erzeugen.

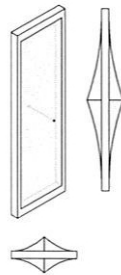


Abb.15 Buckelform [2]

Vorteile der Buckelform: Der Vorteil dieser Vorspannungsform liegt in der ebenen Ausführung des Rahmens. Die Anbindung an Unterkonstruktionen gestaltet sich einfach.

Nachteile der Buckelform: Die punktuelle Flächenstützung der Membran führt zu hohen lokalen Spannungskonzentrationen in der Membran und damit zu einer unhomogenen Spannungsverteilung. Das Material ist für singuläre Lasteinleitungen nicht ausgelegt, sodass in den Hochpunkten über Materialaufdopplung eine Verstärkung anzubringen ist. Die punktuelle Flächenauslenkung muss konstruktiv durch verstellbare Schraubspannen realisiert werden und erscheint aufwändig.

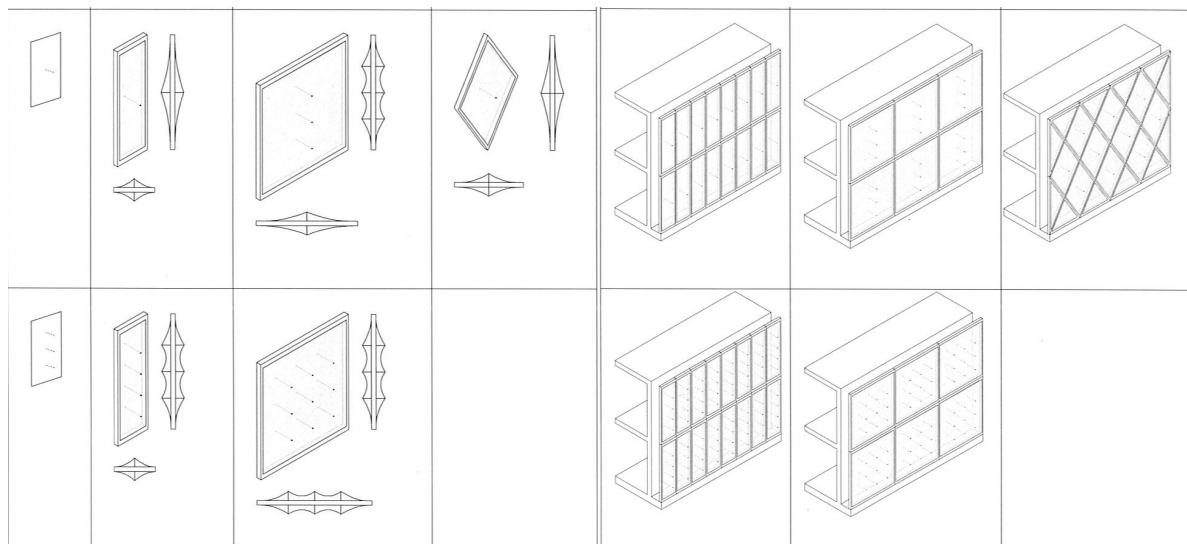


Abb. 16 Variation Buckelformen [2]

Bogenform

Diese Konstruktion zeichnet sich durch einen ebenen Rahmen aus der durch ein oder mehrere Bögen die eingespannte Membran mittig auslenkt. Der Bogen benötigt eine feste Verbindung mit der Rahmenkonstruktion und erzielt die gegensinnige Krümmung der Membran.

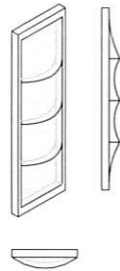


Abb. 17 Bogenform [2]

Vorteile der Bogenform: Durch das Einfügen des Bogens, kann die äußere Rahmenkonstruktion eben ausgeführt werden. Die Rahmenmontage ist deshalb relativ einfach. Die Anbindung an rechtwinklige Unterkonstruktionen gestaltet sich problemlos.

Nachteile der Bogenform: Im Gegensatz zur Sattelfläche wird auch bei der Bogenkonstruktion die Membran unhomogen beansprucht. Über den Bogen wird die Membran linear ausgelenkt. Im Vergleich zur Buckelfläche verteilt sich die Last allerdings auf die gesamte Bogenlänge, sodass die Lastkonzentration unter den Extremwerten, die bei Buckelflächen auftreten, liegt.

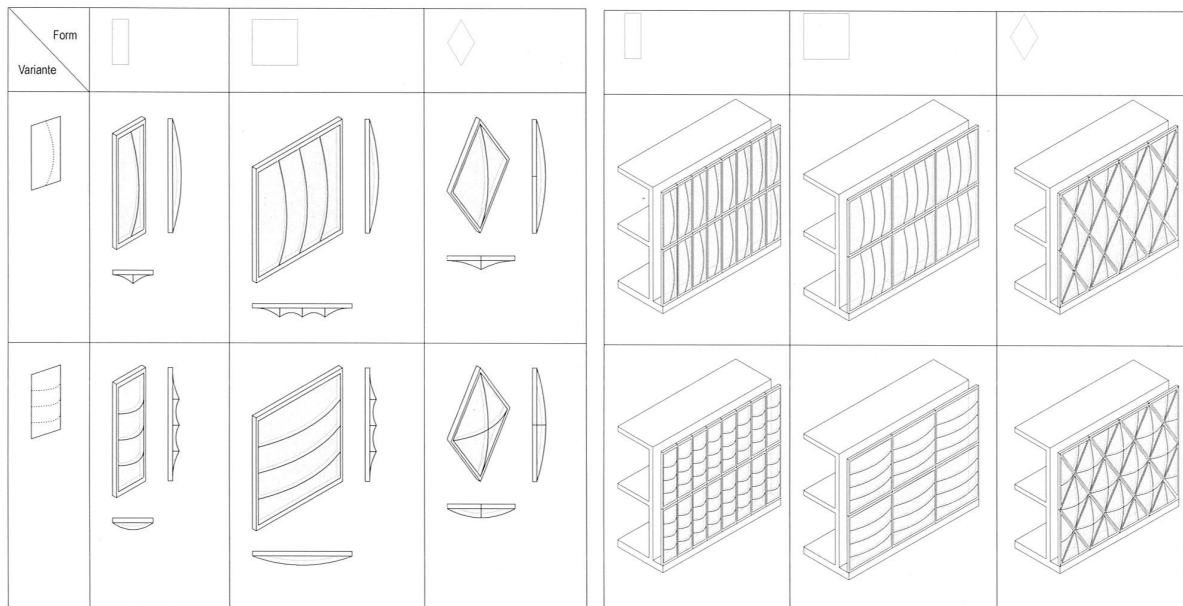


Abb. 18 Variationen Buckelformen [2]

Grat- und Kehlflächenform

Grat- und Kehlflächen werden ähnlich wie die Bogenflächen in der Membranfläche linear ausgelenkt. Die Flächenunterstützung wird in diesem Fall jedoch durch biegeeweiche Seile hergestellt, die abwechselnd hängend den Membrangrat formen und als stehendes Seil die Kehlfläche bilden.



Abb. 19 Grat- und Kehlfläche [2]

Vorteile der Grat- und Kehlflächen: Vorteilhaft im Vergleich zu den Bogenflächen ist die Gewichtsminimierung der Seile im Vergleich zu den biegesteifen Druckbögen. Die membranauslenkenden Elemente können also wesentlich schlanker ausgeführt werden.

Nachteile der Grat- und Kehlflächen: Der Randabschluss der Membran an die Rahmenkonstruktion kann nicht innerhalb eines Profils aufgenommen werden, weil hier die Geometrie der Grat- und Kehlflächen eine Differenz in der Anbindung des stehenden und hängenden Seils erfordern.

Gestalterische Wirkung der Rahmenmodule.

Die gekrümmte, ausgelenkte Oberfläche der MRM ist das gestalterisch entscheidende Merkmal dieser Konstruktion. Sie überführt die eigentlich ebene Fassadenfläche in eine räumliche Struktur und bringt plastische Tiefe und bewegte Struktur in die Fassade. Das Licht wird gebrochen oder reflektiert und ermöglicht unterschiedliche Ein-, Ausblicke und Reflexionen. Die gestalterische Wirkung dieser Konstruktionen ist im vollen Umfang nur an 1:1 Modellen ausreichend zu studieren, beispielhaft sollen in dieser Ausführung die folgenden Modellstudien einen Einblick in ihren Ausdruck schaffen.

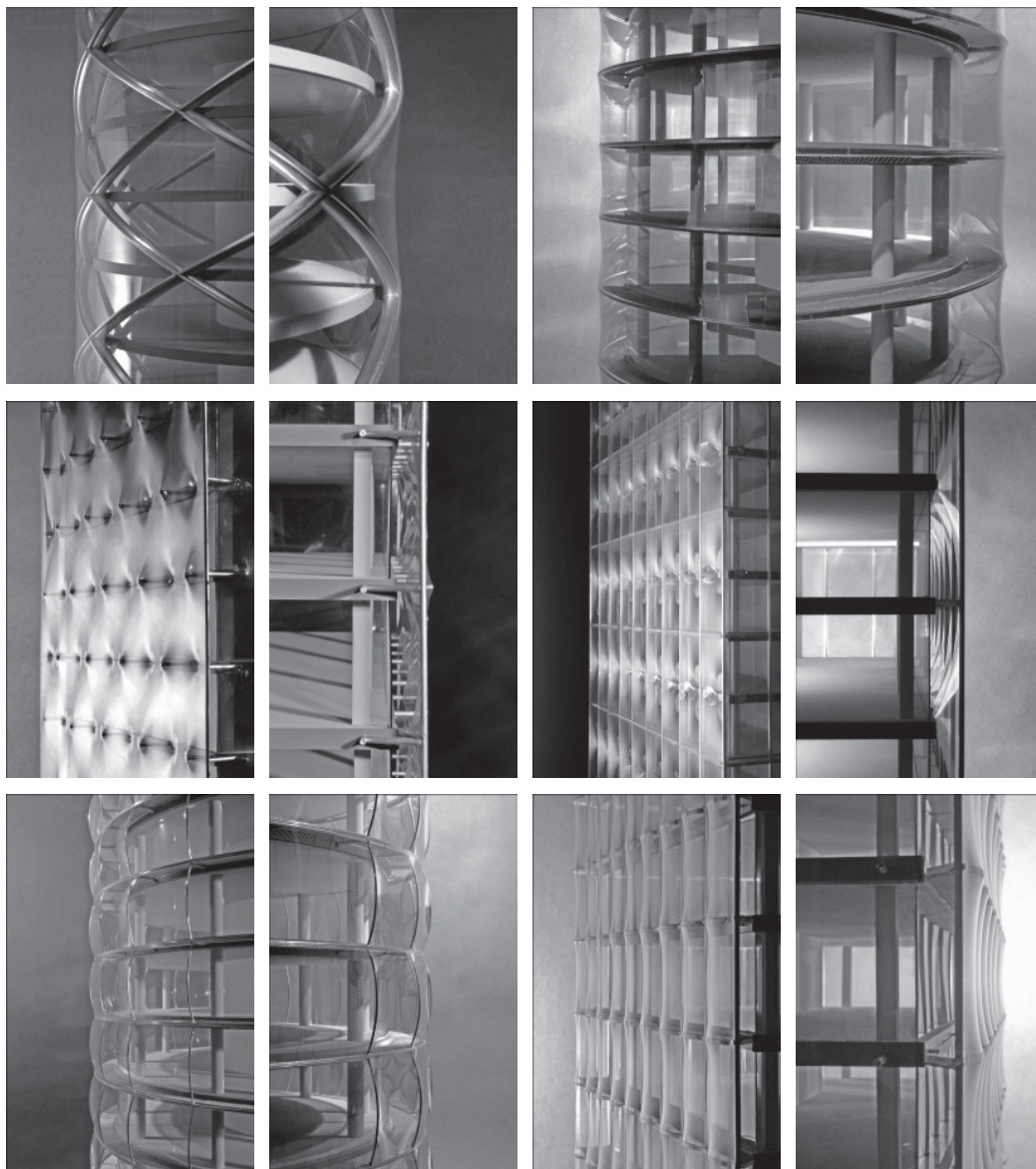


Abb.20-32 Modellstudien [3]

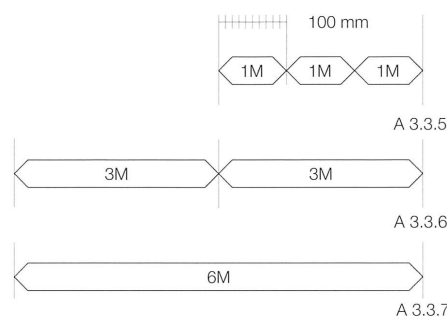
2.1.3. Die modulare Ordnung (Prof. Thomas Herzog)

Die maßliche / modulare Ordnung ist eine Grundbedingung für jede Art von vorgefertigten Bauteilen. Die geometrische Ordnung muss demnach auch für Rahmenmodule durchlaufen werden. Ihre endgültige Bauteilabmessung hängt jedoch von der Ausbildung der Details ab.

Da maßgebliche Beteiligte des Projektes am “Fassadenatlas“, der auch international als das wichtigste einschlägige Standardwerk gilt, entsprechende Ausarbeitungen vorgenommen haben, wurden Beiträge zu diesen Fragestellungen dort entnommen. [1]

Zur Eingrenzung der großen Vielfalt möglicher Bauteilgrößen und zur sinnvollen Auslegung von modularer Größe und Bauteilfunktion werden Vorzugsmaße, die Multimoduln, d. h. ein Vielfaches von M ($M = n \cdot M$) definiert. Multi oder Planungsmoduln sind bestimmende Größen für den systematischen Aufbau des Entwurfs (Abb. 33). In der DIN 18 000 Modulordnung im Bauwesen [9] sind aufbauend auf dem Grundmodul verschiedene Planungsmoduln vorgeschlagen: 3M, 6M, 12M.

Aus dem Vielfachen von Planungsmoduln resultiert der Strukturmodul, der den Aufbau und die Koordination der Baukonstruktion bestimmt. Nach Nutzungsart werden gängige Strukturmoduln unterschieden, wie 36 M, 54 M, 72 M etc. Aus solchen Strukturmoduln ergeben sich durch Addition bzw. Subtraktion Teile oder Vielfache, die nach DIN 18000 auch als Vorzugsmaße bezeichnet werden. Aus praktischen Erwägungen sollten Vorzugsmaße auf eine bestimmte Anzahl von Vielfachen begrenzt werden. Sehr anwendungsbezogene und vielfach nutzbare Vorzugsmaße sind durch mehrere Unterteilungsmöglichkeiten gekennzeichnet. Auf der Basis von Vorzugsmaßen bzw. den Multimoduln lassen sich funktionale modulare Größen definieren.



- A 3.3.5 Grundmodul
Der Grundmodul ist die Größeneinheit, die als Maßsprung in Maßordnungen verwendet wird. Der EU-weit vereinbarte Grundmodul von M beträgt 100 mm.
- A 3.3.6 Multimodul
Der Multimodul ist das genormte Vielfache des Moduls mit einem ganzzahligen Multiplikator. Multimoduln sind z. B. 3M, 6M, 12M
- A 3.3.7 Strukturmodul
Der sog. Strukturmodul ist das Vielfache der Multimoduln und legt als Zahlenwert die Koordinationsmaße für das Tragwerk fest.

Abb.33 Modulordnung [1]

2.1.4. Festlegung von Dimension und Membranauslenkung

Sattel- und Bogenform stellen nach grundlegender Untersuchung der möglichen Formen die leistungsstärksten Konstruktionen der MRM dar. Die Sattelform ist unter statischen Gesichtspunkten optimiert, weist hingegen in der konstruktiven Ausführung Schwierigkeiten auf. Die ebene Rahmenausführung der Bogenformen ermöglicht hingegen eine einfache Anbindung an Unterkonstruktionen. Nachteilig in dieser Konstruktion ist jedoch die inhomogenere Membranspannungsverteilung durch ihre lineare Membranauslenkung.

Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten wiegt das konstruktive Problem der Sattelformen stärker als der Nachteil unhomogener Membranspannungsverteilung der Bogenform. Aus diesem Grund erscheint die Bogenform die wirtschaftlichste Grundgeometrie für Fassadenapplikationen zu sein. Das Forschungsprojekt wird sich in seinen Ausführungen auf diese Form konzentrieren.

Die konstruktiven Ausführungen des Rahmenprofils könnte jedoch ebenso für andere Modulformen übertragen werden.

In der Dimensionierung des Grundmoduls dieses Forschungsprojekts wird aus den Vorzugsmaßen, durch ein Vielfaches von $M = 0,30\text{m}$ Länge und Breite des Rahmens festgelegt. Für die Breite wird durch $M = 12 \times M$ ein Maß von $3,60\text{m}$ festgelegt, die Höhe ergibt sich aus $M = 8 \times M$ zu $2,40\text{m}$.

Der Stich der Bögen wird mit 10% ihrer Spannweite festgelegt, was zu einem wirtschaftlichen Krümmungsradius der Membran im Bezug auf den Lastabtrag führt. Es werden zwei Bögen innerhalb des Rahmens angeordnet, wobei aus gestalterischen Gründen das entstehende Mittelfeld zwischen den Bögen etwas größer ausfallen soll als die Randfelder.

2.2. Ausbildung des Rahmens

Der Rahmen ist das Grundgerüst des Membranmoduls. Er nimmt die Vorspannkraft der Membran auf und leitet sie in die Unterkonstruktionen weiter. Aufgabe des Rahmens ist es, den Einbau der Folie in einem vorgespannten Zustand zu ermöglichen und eine Vorspannmechanik vorzuhalten, die gewährleistet die Folie im eingebauten Zustand nachzuspannen. Die Vorspannung erhöht die Steifigkeit der Folie und ermöglicht das Aufnehmen äußerer Lasten. Der Rahmen muss sie und die Vorspannkraft der Folie an die Tragkonstruktion des Gebäudes weiterleiten. Die Vorspannung wird hauptsächlich durch seitliches Dehnen der Folie erzielt. Die Rahmengeometrie muss diese Längenänderung der Membran ermöglichen.

Als Material eignen sich Holz, Stahl, oder Aluminiumwerkstoffe für den Rahmen, auch Kunststoffe sind möglich. Innerhalb dieses Forschungsprojektes wird die Entwicklung der Rahmenmodule in Stahlausführung fokussiert, da sie ein breites und wirtschaftliches Anwendungsspektrum eröffnet und schlanke Profile bei großen Spannweiten ermöglicht.

Ausbildung der Rahmen (Prof. Thomas Herzog)

Die Konstruktion der umlaufenden Rahmen ist nach Innen und nach Außen hin zu definieren. Das heißt, daß nach Innen alle mit den Randanschlüssen der Membran relevanten Aspekte berücksichtigt sein müssen (also z.B. -Aufnahme von Membranspannungen unter wechselndem Anstellwinkel, die aus der erforderlichen Vorspannung und deren Erhöhung oder Minderung aus Windkräften kommen, -Aufnahme singulärer Kräfte in der Rahmenebene aus den Anschlüssen der Zusatzbauteile für die Membranflächenstabilisierung, -Dichtung gegen Niederschläge, -evtl. Ableitung von Kondensat, -Reduktion von Wärmebrücken...). Nach außen hin sind die bei modularen Fassadenkonstruktionen generell geltenden funktionalen und technischen Merkmale bestimmend, also z.B.: -Normalstoß vertikal und horizontal, -Innen- und Außenecken, -Aufnahme von Verformung bewirkendem Winddruck- und -sog, -Fertigungstoleranzen des Tragwerks, -unterschiedliche Durchbiegung unter Maximal- und Minimallast der Geschoßdecken, -Aufnahme von Dilatationsbewegungen aus Temperaturwechsel, -Fugendichtung unter jeder Art von Horizontal- und Vertikalbewegung, -Anschlussmöglichkeit von Trennwänden- und Decken bei Vermeidung von Schallübertragung...). All dies ist Thema von technischen Entwicklungen seit über 150 Jahren. Diese haben zu ausgereiften, vielfach differenzierten Bausystemen für leichte Außenwandkonstruktionen geführt, die durch eine Vielzahl von Patenten

abgesichert sind. Große, international tätige Firmen als Hersteller bestimmen weitgehend den Markt. In den großen technischen Entwicklungsbüros wurden und werden nach wie vor umfangreiche Untersuchungen und Berechnungen in den Bereichen Bauphysik, Thermodynamik, Aerodynamik durchgeführt. Das setzt sich fort in Tests an Fassadenprüfständen durch Dauerbelastungen. Die Herstellungstechnologie, der Zuschnitt, die Konfektionierung und weitgehend durch Roboter erfolgreicher Zusammenbau, entspricht produktionstechnisch und bezüglich der Qualitätsüberwachung, Steuerung sowie der Meß- und Regeltechnik dem vom Fahrzeugbau bekannten Niveau. Für modulare Membranfassaden müssten im Zuge einer marktnahen Produktionsentwicklung Komponenten mit regendichten Randausbildungen schrittweise entwickelt werden, die an der Schnittstelle: Rand des Membranbauteils und Rahmen des Fassadenelementes in technisch-konstruktiver Hinsicht einer Anpassungsentwicklung bedürfen. Dies gilt für mehrgeschossige Bauten. Anders kann dies allerdings gesehen werden, wenn es sich z.B. um Fassaden für Hallen handelt (für Sport, Versammlungen, Kultur, Produktion, Ausstellung, Lager...), wo die Detailpunkte der komplexeren Anschlüsse kaum vorkommen, d.h. der Normalstoß und die Außenecke konstruktiv zu lösen sind, und allenfalls noch ein Stoß von gleichen Bauteilen in der Vertikalen. In einem solchem Fall ist die Universalität der komplexen Fassadenkonstruktion nicht von Nöten, und es ist demnach möglich, durch Aufwertung der Membran- Randkonstruktion in Richtung der Wetterschutzfunktionen bei Vermeidung von Wärmebrücken größeren Umfangs ein selbständiges Bausystem modularer Fassaden zu entwickeln. Jedes vom normalen Fassadenfeld abweichende Element bedarf jedoch eingehender, konstruktiv umfänglicher Entwicklung, produktionstechnischer Optimierung und gestalterischer Kontrolle mit eigenen Formen der Prototypenentwicklung.

2.2.1. Folie

Das Forschungsprojekt konzentriert sich bei der Wahl des Membranmaterials der Rahmenmodule auf die ETFE Folie. Mit ihrer Transparenz bietet sie für den Einsatzbereich der Fassade eine entscheidende Eigenschaft, die von transluzenten Gewebemembranen nicht erfüllt werden kann. Zudem führt der Ansatz der Fassadenmodularisierung und der sich daraus ergebenden kleinmaßstäblichen Rahmenkonstruktionen zu geringen Spannweiten, für die die ETFE Folie prädestiniert ist. Als notwendige theoretische Grundlage für die konstruktive Entwicklung des Bausystems werden im

Folgenden die wichtigsten Eigenschaften der ETFE Folie zusammengefasst, die ausführlich in [4] nachzulesen sind.

ETFE ist die Kurzform für den thermoplastisch verarbeitbaren Fluorpolymerwerkstoff Ethylen/Tetrafluorethylen-Copolymer. In einem Extrusionsverfahren wird daraus die Folie hergestellt, die sich vor allem durch extreme Leichtigkeit auszeichnet. Bei Folienstärken zwischen 0,05 bis 0,3mm erreichen die Folien in der dicksten Ausführung ein Flächengewicht von nur 528g/m². Die Folie ist transparent (Einfärbungen sind möglich) und lässt neben dem sichtbaren Spektrum auch einen Großteil der ultravioletten Strahlung passieren. Sie ist UV beständig und weist einen hohen Widerstand gegenüber Witterungseinflüssen und biologischen und chemischen Einwirkungen auf. Die Oberfläche der Folie ist selbstreinigend. Sie haben eine sehr hohe Weiterreißfestigkeit nach DIN 53363. Beschädigungen führen zu keiner schnellen Rissausbreitung unter Last. Für viele Regionen wird eine ausreichende Beständigkeit gegenüber simuliertem Hagelschlag nach der Schweizer Norm SIA 280 erreicht. Die Folie ist als schwerentflammbarer Baustoff in die Brandklasse DIN 4102-B1 eingestuft. Sie öffnet sich über heißen Brandgasen durch Aufschmelzen, ist selbst verlöschend und gilt nach o.g. DIN als nicht brennend abtropfend. Ihre Brandlast ist aufgrund der geringen Foliendicke und Masse extrem klein.

ETFE Folien sind erst seit 1970 verfügbar. Gegenüber den etablierten Baustoffen stellen sie somit eine recht junge Bauart dar. Das mechanische Verhalten der viskoelastischen, temperaturabhängigen und relativ schubsteifen ETFE Folie ist komplex und es gibt nur wenige Ergebnisse mechanischer Werkstoffprüfungen. Einige wichtige Ergebnisse sind zusammenfassend in [4] zusammengestellt.

In diesem Forschungsprojekt wird als Folienmaterial die 250 µm starke Folie NOWOFLON ET 6235 der Firma Nowofol Verwendung finden. Das Produktdatenblatt mit entsprechenden Materialkenngrößen ist im Anhang beigefügt. Die Folie wird wie in Kapitel x.x beschrieben an ihren Rändern mit einem Kunststoffkeder konfektioniert und kann so durch entsprechende Kederschiene gehalten und gespannt werden. Zwischen den Rahmen gestützte Bogenkonstruktionen lenken die Folie aus und erzeugen ihre notwendige geometrische Steifigkeit. Diese Geometrie muss in der Folie durch einen entsprechenden Zuschnitt berücksichtigt werden.

2.2.2. Vorspannung

Das entscheidende Kriterium der Tragfähigkeit und Lebensdauer der MRM ist direkt abhängig von der richtigen Wahl der Folienvorspannung. Zu hoch gewählte Vorspannungen führen zu unwirtschaftlicher Dimensionierung des Rahmens und schwächen das Material selber. Zu schwach gewählte Folienspannungen haben Faltenbildung und Flattererscheinungen zur Folge. Materialschwächung und letztlich Materialversagen resultieren hieraus. Insofern ist während des Bespannens der Folie ein exaktes, messbares Einstellen der Folienvorspannung unabdingbar. Hierfür muss bei der Montage zum einen Vorspannwerkzeug vorhanden sein, das das Spannen der Folie ermöglicht, zum anderen muss eine Vorspannungskontrolle möglich sein.

Es gibt verschiedene Lösungen für den spannungsgerechten Einbau der Membran. Prinzipiell kann zwischen dem Kraft- und dem Weg gesteuerten Ansatz unterschieden werden.

Kraft gesteuerte Einbringung der Vorspannung

Die Kraft gesteuerte Einbringung der Vorspannung ermöglicht durch das Anschließen von Kraftmessgeräten an die Membran eine exakte Einstellung der gewünschten Vorspannung. Dabei wird die Membran über Spanngurte an einen äußeren Montagerahmen gezogen. Zwischen Spanngurt und Membran werden Kraftmesser geschaltet, die die Vorspannung im System messen. Ist die gewünschte Vorspannung aufgebracht kann die Membran in das Rahmenprofil geklemmt werden. Nach dem Anziehen der Klemmschrauben, dem Verkleben oder anderer Arten der Befestigung kann die Membran von dem Montagerahmen gelöst werden. Die exakt eingestellte Vorspannung wird nun durch die Klemmung im Profil über den biegesteifen Rahmen aufrechterhalten.

Es sei bereits hier darauf hingewiesen, dass es sich beim Tragverhalten der MRM um ein hybrides Verhalten handelt: Die Vorspannung der Membran wird den Rahmen verformen, was wiederum zu einer Reduzierung der Membranvorspannung führt. Genauere Untersuchungen hierzu werden im Anhang A „Statik“ aufgezeigt.

Abb. 34 Der Aufbau der Montageeinrichtung: [G]

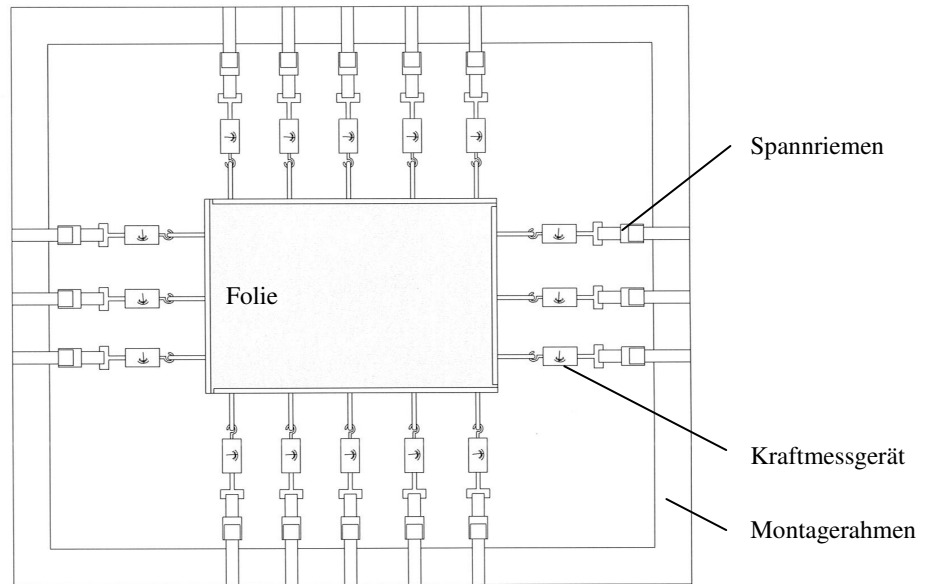


Abb 35. Abfolge der eingesetzten Werkzeuge [G]

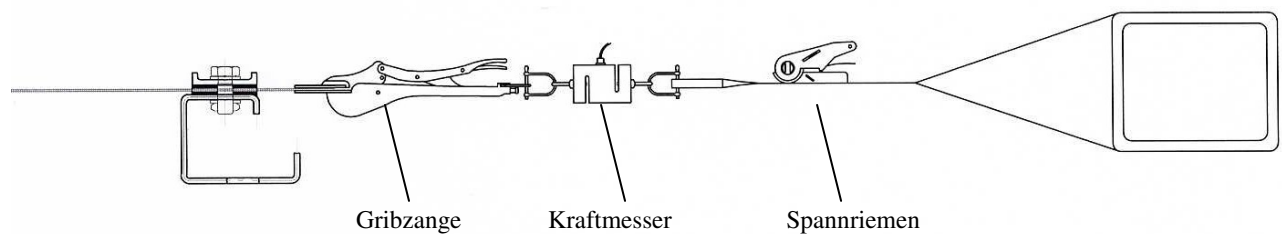
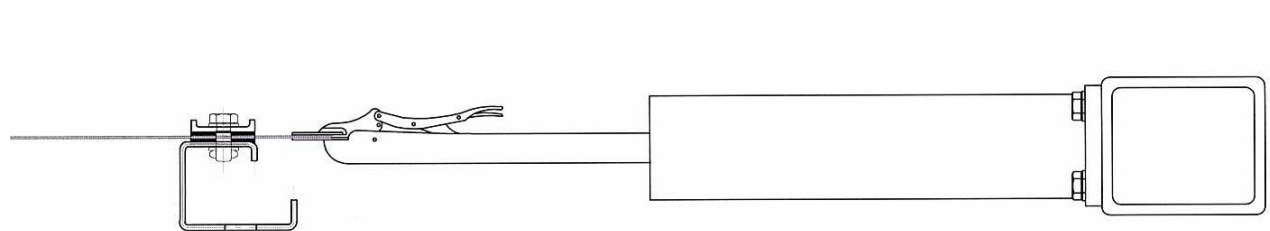


Abb. 36 Bei Serienfertigung und hohen Fertigungszahlen lohnt es die Bespannung in einer entsprechenden Hydraulikanlage durchzuführen. [G]



Das Rahmenprofil ist dabei ein einfaches C Stahlprofil, auf dessen oberen Flansch die Membran mittels einer verschraubten Klemmschiene aufgedrückt wird. Zwischen liegende Kunststoff Profile (EPDM) dichten die Klemmung ab.

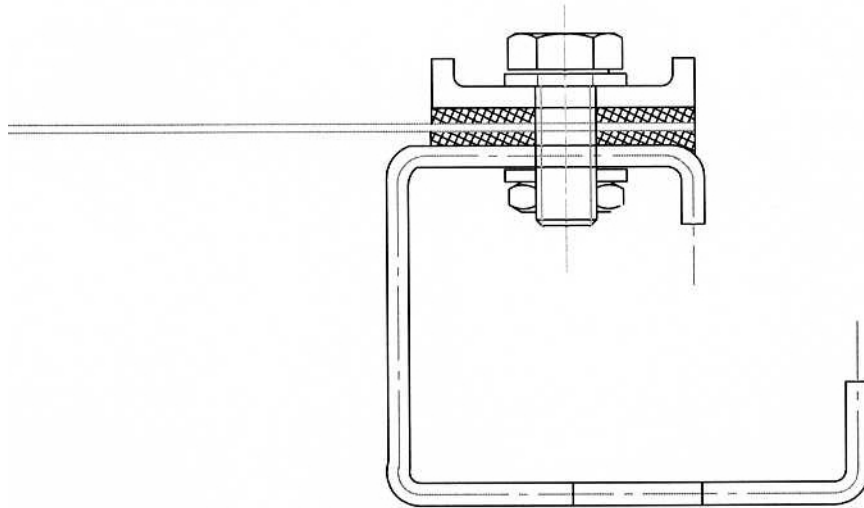


Abb. 37 Rahmenprofil mit Klemmschiene Maßstab 1:1 [G]

Zweigeteiltes Rahmenprofil

Für das Kraft gesteuerte Einbringen der Vorspannung ist das zweigeteilte Rahmenprofil eine weiterführende Entwicklung, die mit ähnlichem Montageablauf, wie bereits beschrieben, zwei Membranlagen innerhalb eines Profils vorspannt und klemmt.

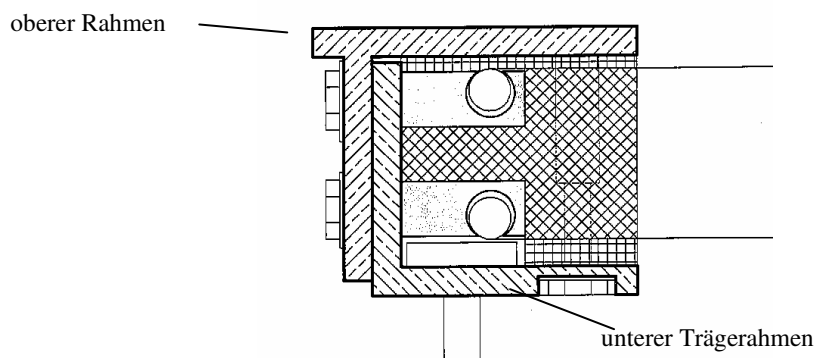


Abb. 38 [G]

In einen unteren Trägerrahmen wird die an eine äußere Rahmenkonstruktion vorgespannte Folie von oben eingelegt. (vgl. Abb.34 Der Aufbau der Montageeinrichtung)

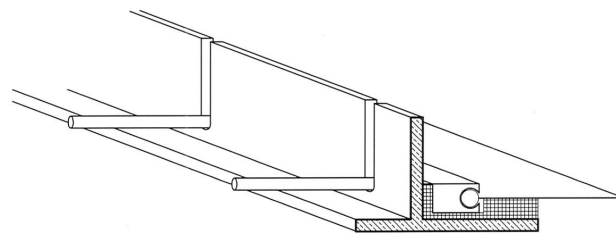


Abb 39 [G]

Im weiteren Verlauf der Montage wird nun der Abstandsblock eingelegt, danach die zweite Folie. Das obere Rahmenprofil schließt die Konstruktion und über das Anziehen der Schrauben kann die Membran zwischen den Kunststoffblöcken geklemmt werden. Die Membranvorspannung wird jetzt vom Rahmen aufgenommen, sodass die Anbindung an den Montagerahmen gelöst werden kann.

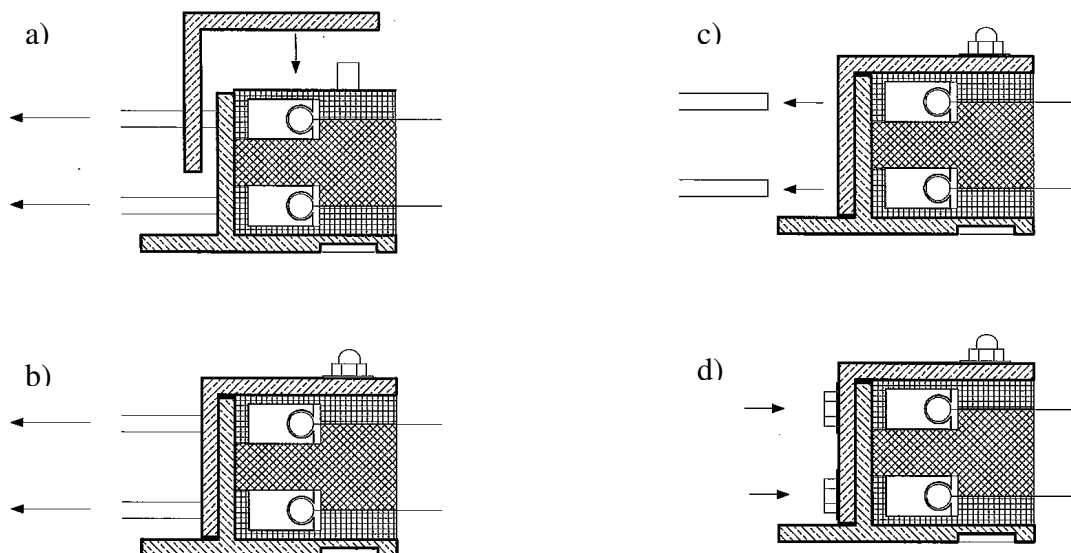


Abb 40 a) – d) [G]

Weg- / Strecken gesteuerte Einbringung der Vorspannung

Alternativ kann die Vorspannungskontrolle auch Weg bzw. Strecken gesteuert durchgeführt werden. Hierbei wird die Membran um eine vorher exakt bestimmte Länge gedehnt, um die gewünschte Vorspannung zu erreichen. Unter Berücksichtigung der Materialkennwerte kann Vorspannung in Materialdehnung umgerechnet werden. Das Messen der Längenänderung birgt zwar größere Ungenauigkeiten, als das direkte Messen der Kraft, erfordert aber wesentlich geringeren Aufwand und ist daher die gängigere Praxis beim Einbringen der Vorspannung.

Membranvorspannung

Für die Ansprüche der Membranfassade aus ETFE Folie wird für das hier untersuchte Rahmenmodul eine Folienvorspannung von 0,5 kN/m angesetzt. Genauere Ausführungen finden sich im Anhang A.

2.2.3. Nachspannbarkeit

Durch Relaxation und Kriechen der Folie kommt es nach dem Einbau des MRM zu einer allmählichen Reduktion der Vorspannung. Solange diese Abminderung zu keinem Spannungsausfall in der Folie führt, ist die Reduktion unproblematisch. Ein Ausfall der Zugspannung hingegen kann über Faltenbildung und Flattererscheinungen zum Versagen der Konstruktion führen. Zwei Strategien können Abhilfe schaffen.

Die Folienspannung kann so hoch gewählt werden, dass Relaxation und Kriechen die Vorspannung nicht völlig abbauen. Diese Vorspannungsreserve führt jedoch zu einer unwirtschaftlichen Überdimensionierung der Rahmenkonstruktion.

Die zweite Möglichkeit auf nachlassende Vorspannung zu reagieren ist der Einbau einer Nachspannmechanik. Seine prinzipielle Funktionsweise wird nachfolgend erläutert. Durch das Eindrehen der Schrauben in die Kederschiene wird der Rahmen mit der Folie verbunden. Ist das Gewinde innerhalb der Kederschiene lang genug, kann durch weiteres Anziehen der Schraube die Kederschiene dichter an den Rahmen gezogen werden und damit eine Erhöhung der Folienspannung erreicht werden. Hierfür muss hinter der Kederschiene entsprechend Freiraum vorgehalten werden.

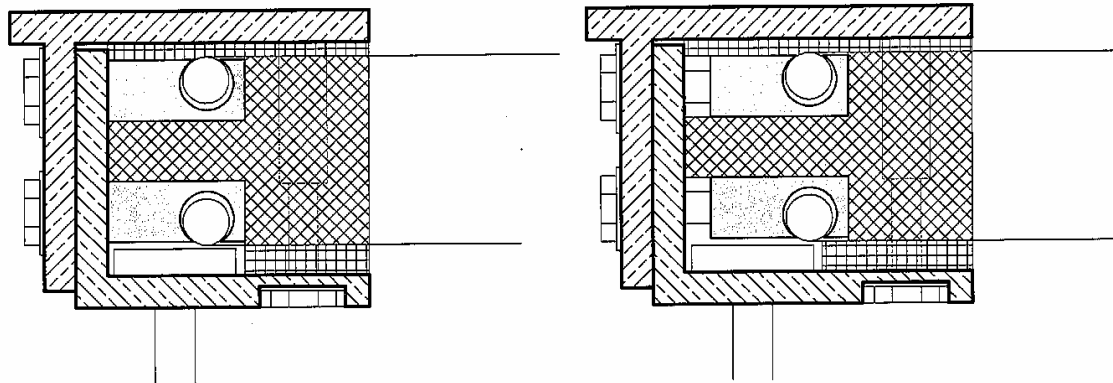


Abb. 41 Profil hier bereits mit seitlichen Kederschien und Schraubbolzen ohne Mutterkopf [G]

Das rechts abgebildete Profil sieht durch den Freiraum hinter der Kederschiene eine mögliche Nachspannbarkeit der Membran durch Anziehen der Schrauben vor. (Vor dem Nachspannen muss der Klemmbolzen gelöst werden) Darüber hinaus erfordert das Nachspannen ein Langloch in der Folie, das in jedem Vorspannungszustand komplett innerhalb des Profils abgedeckt sein muss (Abb.42).

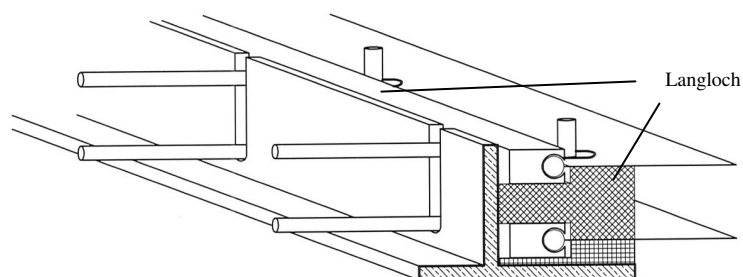


Abb. 42 Langloch in der Folie [G]

Die Rahmenprofile mit integrierter Nachspannmechanik sind im Rahmen des Forschungsvorhabens weiterentwickelt worden. Nachstehend eine kurze Dokumentation dieser Entwicklung. Sie zeichnet sich darin aus, dass die Vielzahl von notwendigen Funktionen die sowohl bauphysikalisch als auch

konstruktiv für den materialgerechten Einbau von vorgespannten Membranen und Folien notwendig sind, in einem einzigen Rahmenprofil integriert und funktional vereinigt sind.

Dies wurde durch das Zusammensetzen zweier Rahmenprofile erreicht (siehe Abb. 40-42). Das zweigeteilte Rahmenprofil aus Stahl, Aluminium oder Kunststoff, besteht aus einem oberen und einem unteren Teilprofil, die, aufeinander gesetzt, ein Profilsystem ergeben. Das obere Teilprofil ist ein L-Profil dessen kürzerer Steg der Befestigung der äußeren Membran bzw. Folie dient. Die Befestigung wird über eine Klemmschiene realisiert, die das Herausrutschen der mit einem Keder konfektionierten Membran bzw. Folie verhindert. Die weiteren Membran bzw. Folienlagen werden zwischen einem unteren Flachprofil und dem oberen L-Profil geklemmt. Die Klemmung geschieht über das Anziehen von Schrauben, die beide Profile verbinden. Besteht das untere Profil aus wasserfestem Leimholz, so sind die unteren Folienlagen auf Ober- und Unterseite des Holzblocks befestigt und gegen das obere L-Profil verschraubt.

Eine Anbindung des Rahmensystems an die Unterkonstruktionen kann durch Schraubverbindungen die entweder durch Einsetzen der Schrauben von oben, oder durch das Einsetzen von Hammerkopfschrauben auf der Unterseite des Profils erfolgen.

Das Profil ermöglicht zudem das Befestigen von Bögen zum Auslenken der äußeren Membran bzw. Folienlage. Das Auslenken der äußeren Membran bzw. Folienlage ertüchtigt die Oberfläche äußere Lasten (vor allem Windlasten) abzutragen. Nach dem ebenen Bespannen des oberen Rahmens wird von unten der Bogen in die Membran bzw. Folienoberfläche gepresst und die Stirnplatten der Bögen rechts und links am Steg des L-Profils verschraubt. Die Lage des L-Profils kann auch gespiegelt werden, sodass der lange Steg nach Innen orientiert ist. Dies führt zu einem Überspannen der Profilkonstruktion durch die äußere Membran bzw. Folienlage und geringerer Sichtbarkeit der Profildicke. In diesem Fall muss der Anschluss des Bogens über einen Metallklotz erfolgen, der in der Länge des L-Profilstegs mit Bogen und Profil verschraubt wird.

Alternativ kann der Rahmen auch eben bespannt werden. In diesem Fall kann auf den Einbau des Bogens verzichtet werden. Soll die Rahmenbespannung sattelförmig ausgeführt werden, so muss die Rahmenprofilhöhe an zwei gegenüberliegenden Rahmenecken deutlich gesteigert sein. Die Höhe des Profils nimmt über die Länge der Rahmenkanten zu den anderen beiden Ecken kontinuierlich wieder ab.

Das Profil zeichnet sich zudem durch Hinterlüftung der äußeren Membran bzw. Folienlage aus. Dies wird zum einen durch Lüftungslöcher im Stegbereich des L-Profils erreicht. Zum anderen ermöglichen Stossfugen zwischen dem EPDM Klemmprofil einen Luftaustausch. Im Fall eines vertikalen Einbaus der Rahmen kann durch diese Fugen auch anfallendes Kondensat ablaufen.

Das Profil zeichnet sich durch eine thermische Trennung aus. Sie wird durch den Einbau von druckfestem, wärmedämmenden Hartschaum zwischen die unteren Membran bzw. Folienlagen erreicht und durch die Klemmung von oberen und unterem Profil gehalten. Zwischen die von dem Hartschaum getrennten Membran- bzw. Folienlagen ist optional das Einlegen von Wärmedämmung möglich.

Eine weitere Eigenschaft des Profils besteht in der Dichtigkeit der Membran bzw. Folienklemmung, die durch das Einlegen von EPDM Flachprofilen erreicht wird. Das Anziehen der Klemmschrauben dient also nicht nur der Befestigung der einzelnen Lagen, sondern erhöht durch das Anpressen der eingelegten EPDM Flachprofile die Dichtigkeit der Konstruktion.

Fig. 1

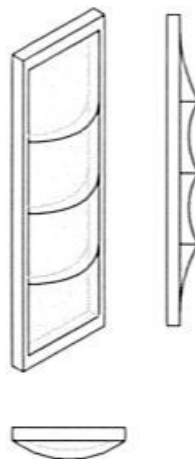


Abb. 43

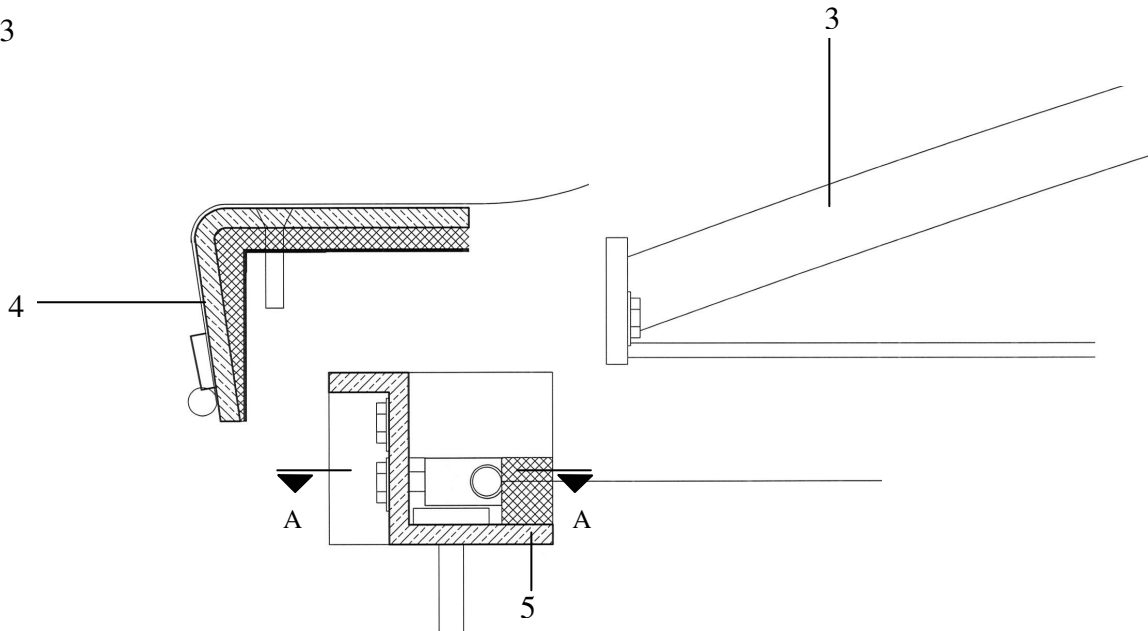
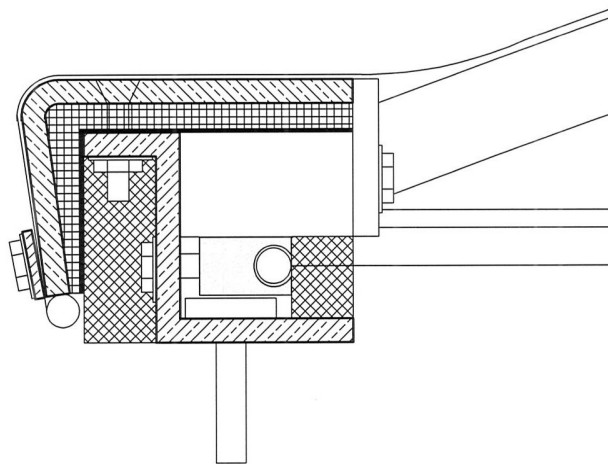


Abb. 44



Die Integration der mechanischen Vorspannung ist jedoch eine äußerst aufwändige und kostenintensive Technologie. Durch die Wahl der richtigen Vorspannung kann auf das nachträgliche Einwirken auf die Vorspannung verzichtet werden, wenn Relaxation und Kriechen im Vorfeld berücksichtigt werden.

Dieser Annahme liegen folgende Überlegungen zugrunde:

Nachspannmöglichkeit für Rahmenmodule mit ETFE-Folien

(Dr.-Ing. Mike Sieder)

Auf Grundlage der in der Vergangenheit veröffentlichten Ergebnisse von Werkstoffuntersuchungen zum mono- und biaxialen Verhalten der ETFE-Folie wurde für die baupraktische Anwendung allgemein ein annähernd lineares, homogenes und isotropes Materialverhalten angesetzt. Der lineare Zusammenhang zwischen Spannung und Materialdehnung bis zur Fließgrenze kann somit allgemein durch das HOOKE'sche Gesetz beschrieben werden und erleichtert die ingenieurmäßige Handhabung.

Die stetig wachsende Anwendung von ETFE-Folien im Bauwesen machte in den letzten Jahren eine vertiefte Auseinandersetzung mit dem Material erforderlich, um das Materialverhalten für die relevanten Anwendungsfälle umfassender beschreiben und Bemessungsgrundsätze mit allgemein gültigen und definierten Sicherheitsbeiwerten schaffen zu können. Von besonderer Bedeutung ist dabei das temperatur- und zeitabhängige Werkstoffverhalten. ETFE weist wie alle Polymere ein viskoelastisches Verhalten auf, wodurch sich für die baupraktischen Kennwerte wie E-Modul, Schubmodul und Querkontraktionszahl eine Abhängigkeit z. B. vom Spannungsverhältnis, der Temperatur und der Belastungsgeschwindigkeit und –dauer ergibt.

Saxe und Homm geben in [5] einen Überblick über die am Essener Labor für Leichte Flächentragwerke durchgeführten Werkstoffuntersuchungen an ETFE-Folien, insbesondere zum temperatur- und zeitabhängigen Materialverhalten. Die Ergebnisse bestätigen die wissenschaftlich bekannten phänomenologischen Erkenntnisse zu Polymerwerkstoffen. Besonders hervorzuheben sind die Auswirkungen der äußeren Einflussparameter auf die Dehnungsentwicklung der ETFE-Folie; sofortige und verzögert elastische sowie sofortige und verzögert plastische Dehnungsanteile bestimmen die Gesamtdehnungscharakteristik. Das Material zeigt einen ausgeprägten Anteil an verzögert elastischer Verformung, die erst nach der Entlastung über einen längeren Zeitraum zurückgeht. Weiterhin lässt sich ein bereichsweise ausgeprägtes Relaxationsverhalten feststellen, was zu einem verzögerten Abbau der Ursprungsspannung führt.

Diese Erkenntnisse müssen bei der Bemessung von vorgespannten Folienkonstruktionen und der Wahl der konstruktiven Randbedingungen hierfür Beachtung finden, da unberücksichtigte Dehnungszunahme

bzw. Spannungsabbau zu einem Verlust der ursprünglich eingebrachten Vorspannung und damit zu einem veränderten Trag- und Verformungsverhalten führen können.

Aus den neueren wissenschaftlichen Erkenntnissen sowie aktuellen eigenen Untersuchungsergebnissen im Rahmen von firmeneigenen Forschungsprojekten lässt sich für die baupraktische Anwendung definieren, dass zeitabhängige Dehnungs- und Spannungsänderungen von untergeordneter Bedeutung sind, wenn das Spannungsniveau der Folie im Vorspannzustand unterhalb von 30 % der zulässigen Bemessungsspannung bleibt. Entstehende Verformungen der Folie sind bis ungefähr 40 % der Elastizitätsgrenze vollständig reversibel. Aus Beanspruchungen mit sehr kurzer bzw. mittlerer Einwirkungsdauer (Wind, Schnee) erwachsen erfahrungsgemäß keine irreversiblen Vorgänge. Die praktisch umgesetzten Beispiele von vorgespannten Folienkonstruktionen bestätigen diese Grundsätze. Die geometrischen Randbedingungen der vorgefertigten Rahmenmodule sind unter Berücksichtigung der materialtechnischen Erkenntnisse so zu wählen, dass das Trag- und Verformungsverhalten unter Anwendung eines abgegrenzten Vorspannungsniveaus sichergestellt ist. Konstruktive Vorrichtungen zur nachträglichen Regulierung der Folienspannung sind bei entsprechend abgestimmtem Vorspannungsniveau nicht notwendig. Nachspannvorgänge über unkontrollierte Dehnungserhöhung können zu einer stetigen Vergrößerung der zeitabhängigen irreversiblen Vorgänge und zu einem Materialversagen führen.

2.2.4. Thermische Trennung

Ein grundlegendes Problem vieler Membrankonstruktionen ist ihre fehlende Dämmwirkung. Sowohl in der Fläche haben Membrane durch ihre geringe Materialstärke eine hohe Wärmeleitfähigkeit, als auch ihre Randbefestigungen. Meist sind es Klemmprofile in denen die Membran aufgenommen und befestigt wird, sie sind häufig eine Wärmebrücke. Ein Ziel des Forschungsvorhabens ist es Untersuchungen und Entwicklungen aufzuzeigen, um diese thermische Schwachstelle zu optimieren und das Bausystem durch eine thermische Trennung bauphysikalisch zu aktivieren.

Als Grundlage zu diesen Überlegungen dienen einfache Rahmenprofile, wie nachstehend abgebildet. Dabei kann es sich um Stahl- oder Aluminiumprofile handeln, die die Befestigung bzw. Klemmung einer oberen Membranlage ermöglicht. Diese einlagige Konstruktion bietet als Fassade lediglich einfachen Wetterschutz. Wärmedämmende Funktionen können von dieser Konstruktion nicht erfüllt werden. Der U-Wert einer einlagigen Membranfassade liegt bei ca. $5,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ [6].



Abb 44 a,b [G]

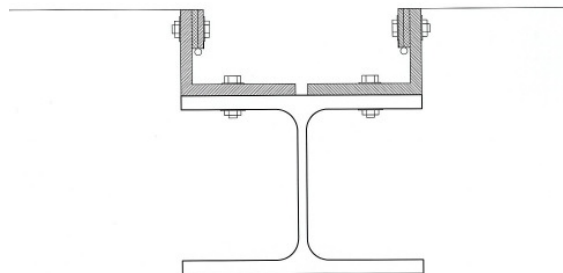


Abb.45 [G]

Um die Wärmedämmeigenschaften dieses Profil zu verbessern werden verschiedene Maßnahmen getroffen. Zum einen wird die Dämmqualität in der Membranfläche durch Zuschalten zwei weiterer Membranlagen verbessert. So entsteht ein dreilagiges Fassadenpaneel, das durch die eingeschlossenen stehenden Luftschichten mit ca. $1,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ bereits eine deutliche U-Wert Verbesserung aufweist [6]. Die Schwachstelle der Konstruktion bleibt das Profil, das durch seinen direkten Kontakt mit der Unterkonstruktion eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweist. Hier kann eine thermische Trennung Verbesserung schaffen, die als Dämmblock zwischen Profil und Unterkonstruktion eingeschoben wird. An den Dämmblock werden die neu eingefügten Folienlagen befestigt, so entsteht eine Luftschicht zwischen den beiden Folien.

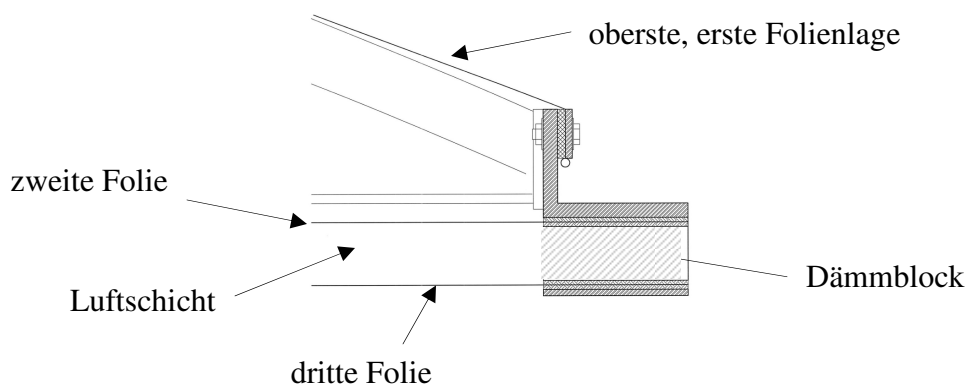


Abb. 46 Schema: thermische Trennung

Für die thermische Untersuchung dieses Systems werden folgende vier Konstruktionsvarianten berücksichtigt.

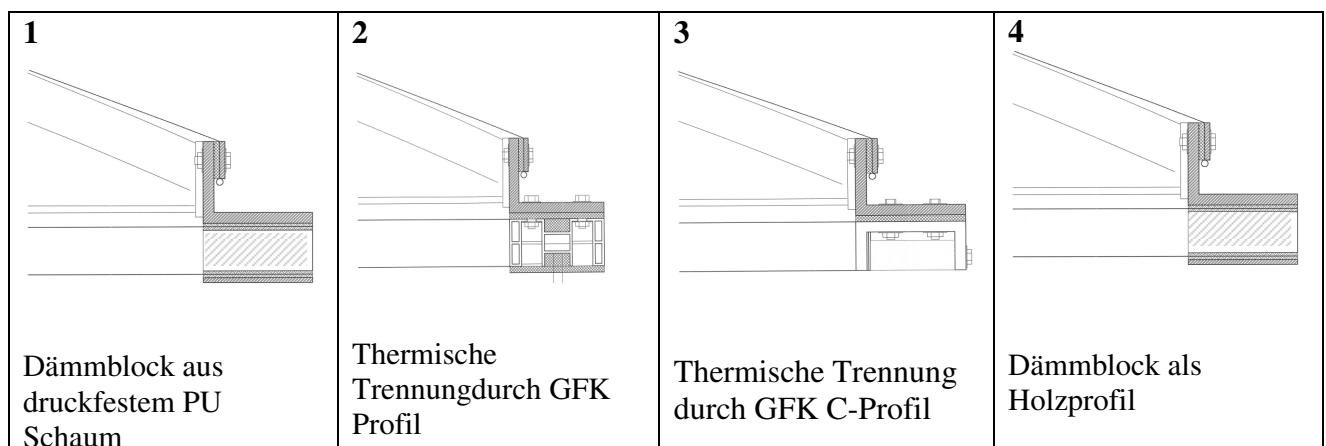
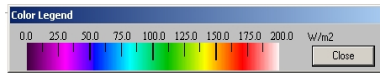


Abb. 47 thermische getrennte Profile

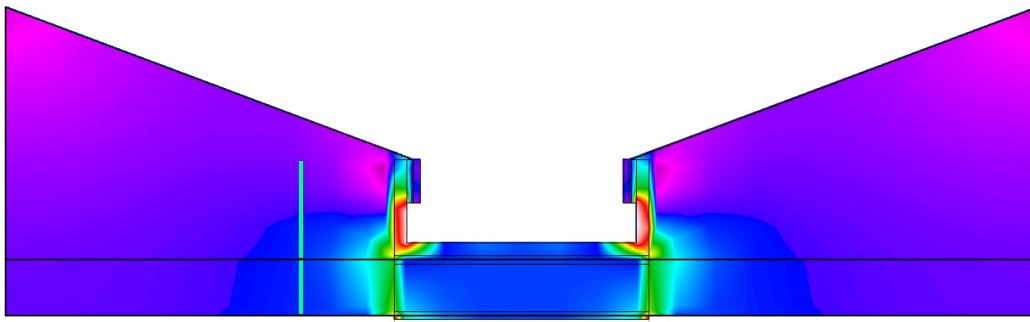
Die folgenden Untersuchungen durchgeführt mit der Software THERM zeigen den Wärmefluss im Profilschnitt in W/m^2 vergleichend.



1-30-a



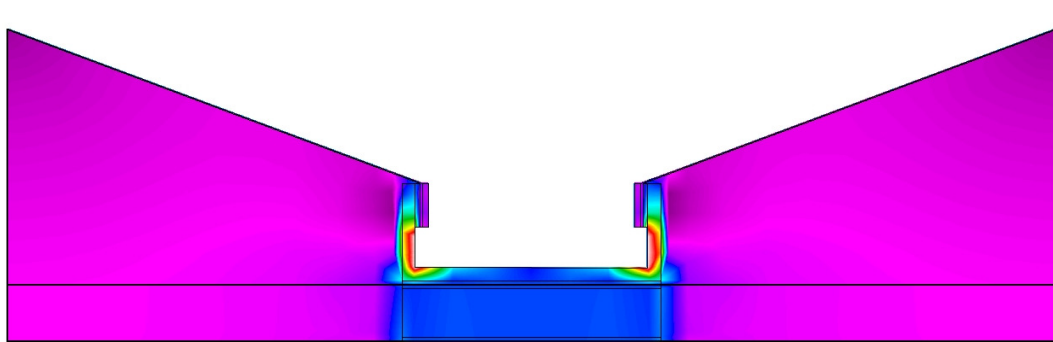
HD PU-Schaum ($0,060 W/mK$) 30mm,
Folienzwischenraum ungedämmt.
U-Factor (Profil) = $2,64 W/m^2K$

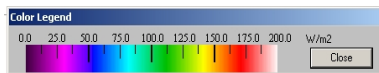


1-30-b

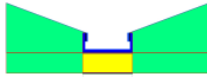


HD PU-Schaum ($0,060 W/mK$) 30mm,
Folienzwischenraum gedämmt ($0,05W/mK$) 30mm,
U-Factor (Profil) = $2,05 W/m^2K$

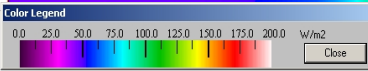
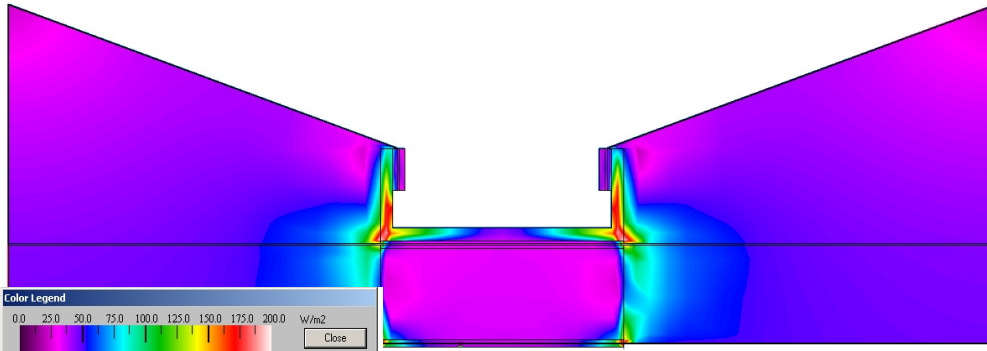




1-60-a



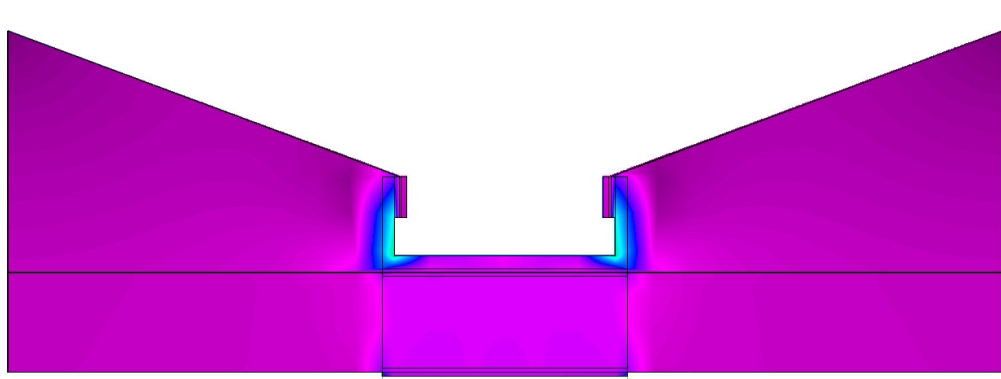
HD PU-Schaum (0,060 W/mk) 60mm,
Folienzwischenraum ungedämmt.
U-Factor (Profil) = 2,09 W/m²K

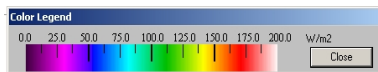


1-60-b

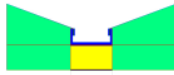


HD PU-Schaum (0,060 W/mk) 60mm,
Folienzwischenraum gedämmt (0,05W/mK) 60mm,
U-Factor (Profil) = 1,25 W/m²K

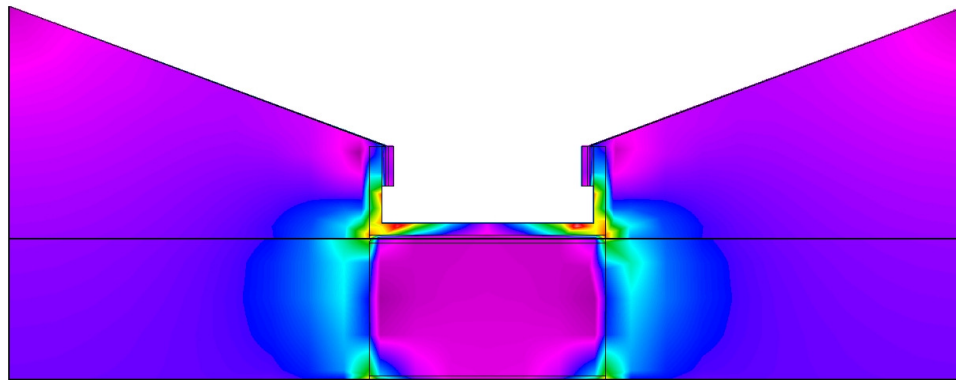




1-90-a



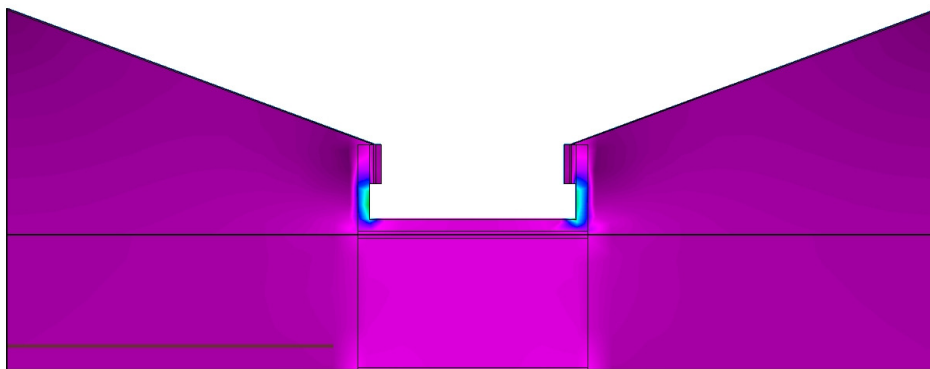
HD PU-Schaum (0,060 W/mk) 90mm,
Folienzwischenraum ungedämmt.
U-Factor (Profil) = 1,93 W/m²K

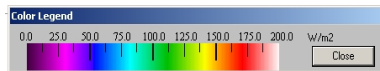


1-90-b

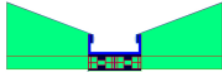


HD PU-Schaum (0,060 W/mk) 90mm,
Folienzwischenraum gedämmt (0,05W/mK) 90mm,
U-Factor (Profil) = 0,91 W/m²K

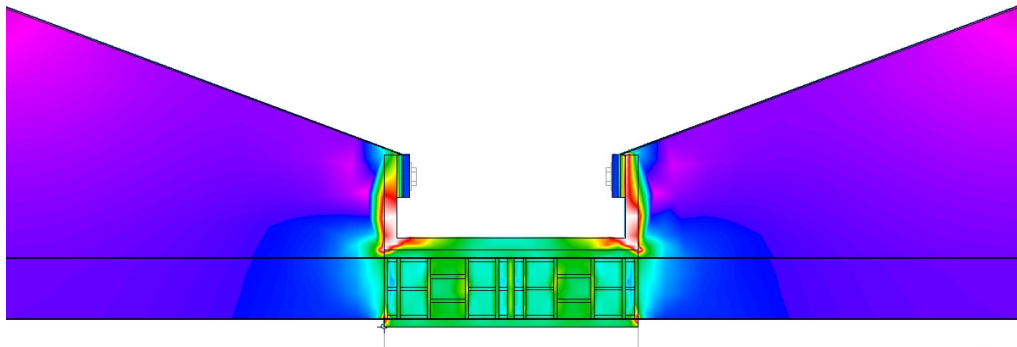




2-a



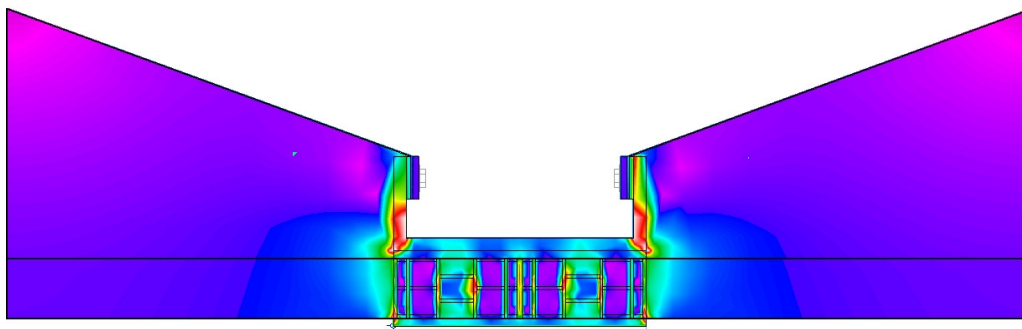
GFK Profil (0,23W/mK), 40mm
Folienzwischenraum ungedämmt.
U-Factor (Profil) = 3,4 W/m²K



2-b



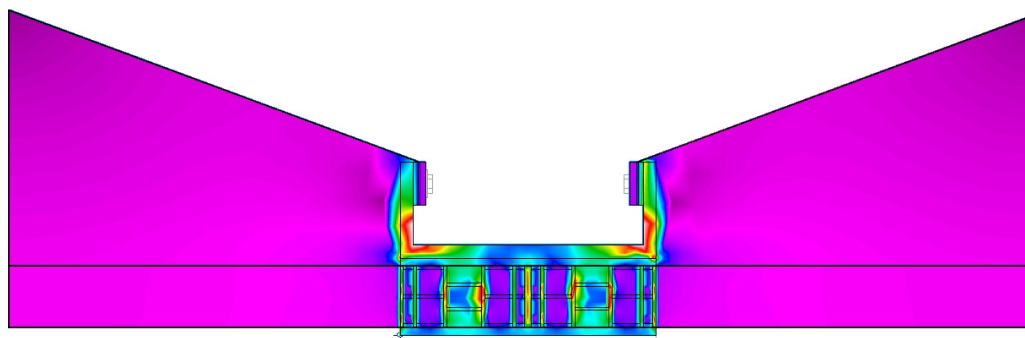
GFK Profil (0,23W/mK), 40mm
ausgeschäumt mit PU Schaum (0,05 W/mK)
Folienzwischenraum ungedämmt.
U-Factor (Profil) = 2,85 W/m²K

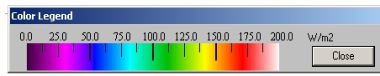


2-c

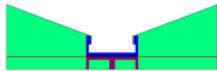


GFK Profil (0,23W/mK), 40mm, ausgeschäumt wie 2-b,
Folienzwischenraum gedämmt (0,05W/mK),
U-Factor (Profil) = 2,28 W/m²K

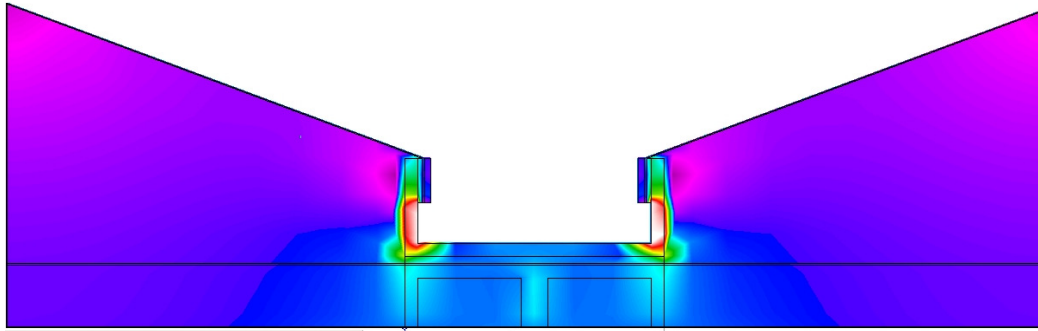




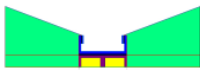
3-a



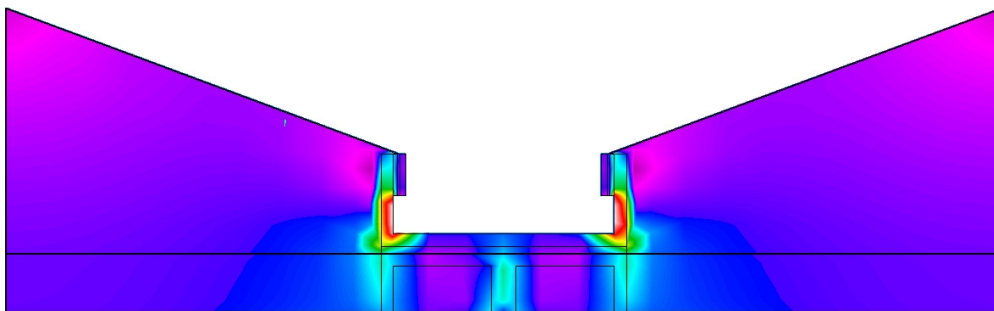
GFK Standard U-Profil (0,23W/mK), **40mm**
Folienzwischenraum ungedämmt.
U-Factor (Profil) = 2,74 W/m²K

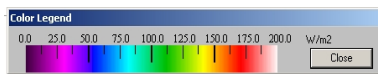


3-b

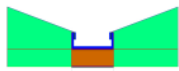


GFK Standard U-Profil (0,23W/mK), **40mm**
mit HD PU-Schaum (0,060 W/mk)
Folienzwischenraum ungedämmt.
U-Factor (Profil) = 2,41 W/m²K

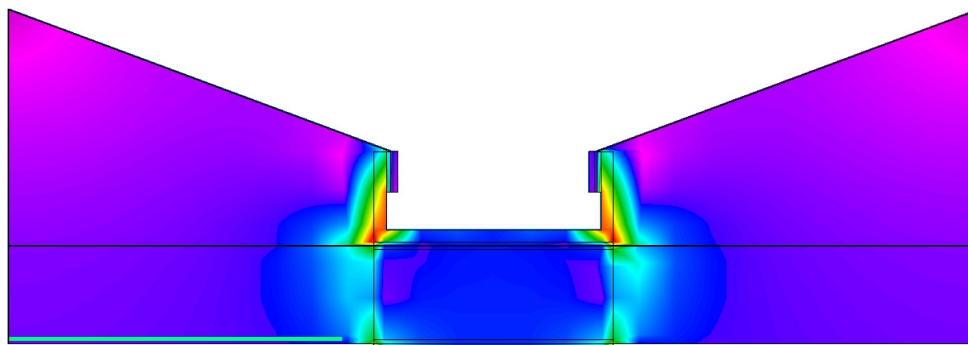




4-a



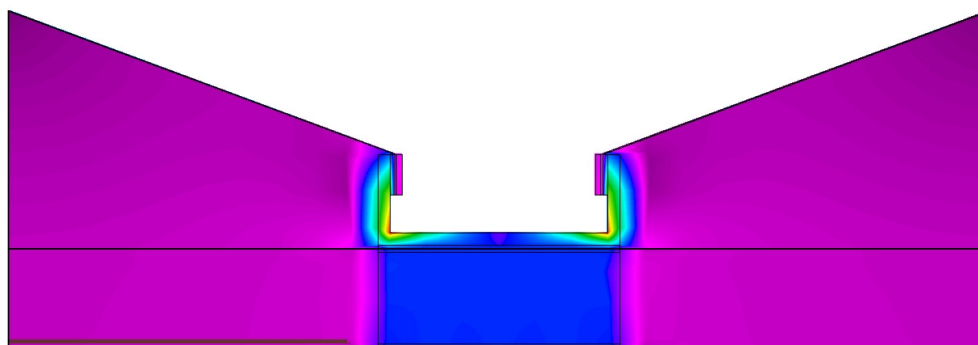
Holzprofil (0,11 W/mK), **40mm**
Folienzwischenraum ungedämmt.
U-Factor (Profil) = 2,52 W/m²K



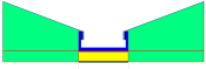


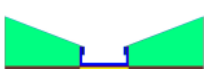


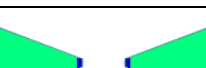




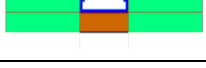
4-b



Holzprofil (0,11 W/mK), **40mm**
Folienzwischenraum gedämmt (0,05W/mK)
U-Factor (Profil) = 1,72 W/m²K



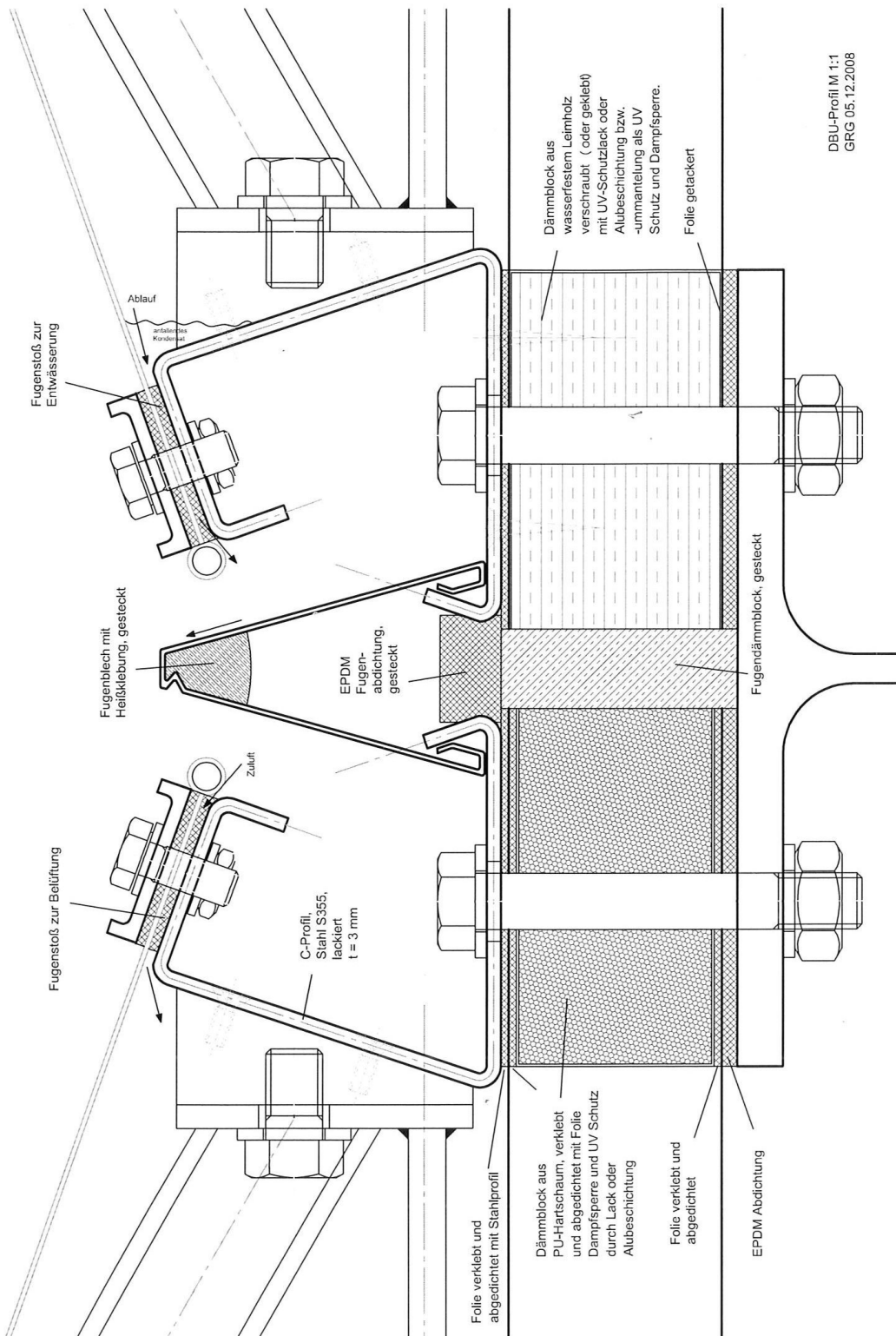
Zusammenfassung der Ergebnisse

| Nr. | Skizze | Profilbeschreibung | U-Wert Profil W/m ² K (ca.) | |
|-----------|---|--|--|--|
| 1-30 a |  | HD PU-Schaum (0,06W/mK) 30mm, FZR ungedämmt | 2,64 | |
| 1-30 b |  | HD PU-Schaum (0,06W/mk) 30mm, FZR gedämmt (0,05W/mK) 30mm | 2,05 | |
| 1-60 a |  | HD PU-Schaum (0,06W/mk) 60mm FZR ungedämmt | 2,09 | |
| 1-60 b |  | HD PU-Schaum (0,06W/mk) 60mm, FZR gedämmt (0,05W/mK) 60mm | 1,25 | |
| 1-90 a |  | HD PU-Schaum (0,06W/mk) 90mm, FZR ungedämmt | 1,93 | |
| 1-90 b |  | HD PU-Schaum (0,06W/mk) 90mm, FZR gedämmt (0,05W/mK) 90mm, | 0,91 | |
| 2-a |  | GFK Profil (0,23W/mK), 40mm FZR ungedämmt. | 3,4 | |
| 2-b |  | GFK Profil (0,23W/mK), 40mm ausgeschäumt mit PU Schaum (0,05 W/mK) FZR ungedämmt. | 2,85 | |
| 3-a |  | GFK Profil (0,23W/mK), 40mm ausgeschäumt mit PU Schaum (0,05 W/mK) FZR ungedämmt. | 2,85 | |
| 3-b |  | GFK Standard U-Profil (0,23W/mK), 40mm mit HD PU-Schaum (0,060 W/mk) FZR ungedämmt. | 2,41 | |
| 4-a |  | Holzprofil (0,11 W/mK), 40mm FZR ungedämmt. | 2,52 | |
| 4-c |  | Holzprofil (0,11 W/mK), 40mm FZR gedämmt (0,05W/mK) | 1,72 | |

Die besten thermischen Eigenschaften können durch das Einlegen eines PU-Hartschaums erzielt werden. Zusammen mit einer Flächendämmung zwischen den unteren beiden Folien werden die günstigsten U-Werte erzielt. Dagegen schneiden die GFK-Profil Lösungen deutlich schlechter ab. Sie sind zudem wesentlich kostenintensiver. Konstruktiv wird es beim PU Schaum aufgrund seiner geringen Schubfestigkeit Schwierigkeiten bei der Befestigung der Folie unter Vorspannung geben. Hierzu müssen noch Tests durchgeführt werden. Unproblematisch aufgrund entsprechend höherer Festigkeit ist das Befestigen der Folie an einem Holzprofil. Das Holzprofil ist schubfest genug, um die Last der Folie aufnehmen zu können. Außerdem ist das Befestigen der Folie am Holzprofil unproblematischer im Vergleich zum PU-Schaum.

2.2.6. Das Rahmenprofil

Aus der Vielzahl an Untersuchungen und experimentellen Testmodellen konnte ein Rahmenprofil entwickelt werden, das die unterschiedlichsten Anforderungen eines folienbespannten Rahmenmoduls vereint. Seine Funktionen und Eigenschaften werden im Folgenden genauer beschrieben und dargestellt. Dieses Profil stellt den momentanen Entwicklungsstand dieses Forschungsprojektes dar, ist jedoch weiterentwickel- und optimierbar. Qualitäten und Vorteile werden ebenso aufgezeigt, wie Schwierigkeiten und technische Probleme. Die Optimierung des Profils wird ein Teil der Arbeit des Hauptprojektes sein, das als Fortsetzung dieser Vorphase angedacht ist.



DBU-Profil M 1:1
GRG 05.12.2008

Abb. 47 Rahmenprofil

Der Stahlrahmen besteht aus einem kalt gewalztem [- Profil. Auf seinem oberen Flansch findet die erste Membranlage ihre Befestigung. Der obere Flansch ist in einem Winkel von 15° nach außen abfallend und greift damit die durchschnittliche Krümmung der Folie auf und leitet sie weiter. Dies garantiert zum einen den stufenfreien Abfluss des Regenwassers zum anderen werden Knickkanten im Verlauf der gespannten Folie vermieden. Der untere Flansch dient der Befestigung der zweiten ETFE Folienlage sowie der Verschraubung des Dämmblocks. Über eine Schraubverbindung wird das Profil hier an die Unterkonstruktion angeschlossen. Der untere Flansch verläuft parallel zur Fassadenebene und gewährleistet damit einen einfachen Anschluss. Oberer und unterer Flansch sind zum Rand hin aufgekantet um der Profilgeometrie eine höhere Steifigkeit zu verleihen.

Oberer und unterer Flansch werden durch den mittleren Steg des Profils verbunden. Dieser Steg ist um 20° aus dem rechten Winkel verschoben, neigt sich also nach außen und passt sich damit dem Bogenverlauf an, der an diesem Steg sein Auflager findet.

Das Profil wird aus der Stahlqualität St 355 hergestellt und anschließend Norm entsprechend grundiert und lackiert.

Klemmleiste

Die Klemmleiste wird entsprechend dem Profil aus gleicher Stahlqualität hergestellt. Es kann entweder als Flachstahl ohne seitliche Aufkantung, besser jedoch aus einem U-Profil mit seitlicher Aufkantung hergestellt werden. Die seitliche Aufkantung verleiht der Klemmleiste die nötige Steifigkeit und verhindert das seitliche aufbiegen der Leiste. Damit ist eine flächige Klemmung der Membran hergestellt. Die Membran wird, eingebettet zwischen zwei EPDM Streifen, die auf Klemmleiste und Stahlprofilflansch aufzukleben sind, durch eine M8 Schraube geklemmt. Das Herausrutschen der Membran ist durch die Keder verhindert. Alle 25cm ist eine Schraube auf dem gesamten Profilsteg umlaufend vorgesehen, wobei in den Rahmenecken zwei Schrauben der jeweilig angrenzenden Seiten dicht nebeneinander angeordnet werden.

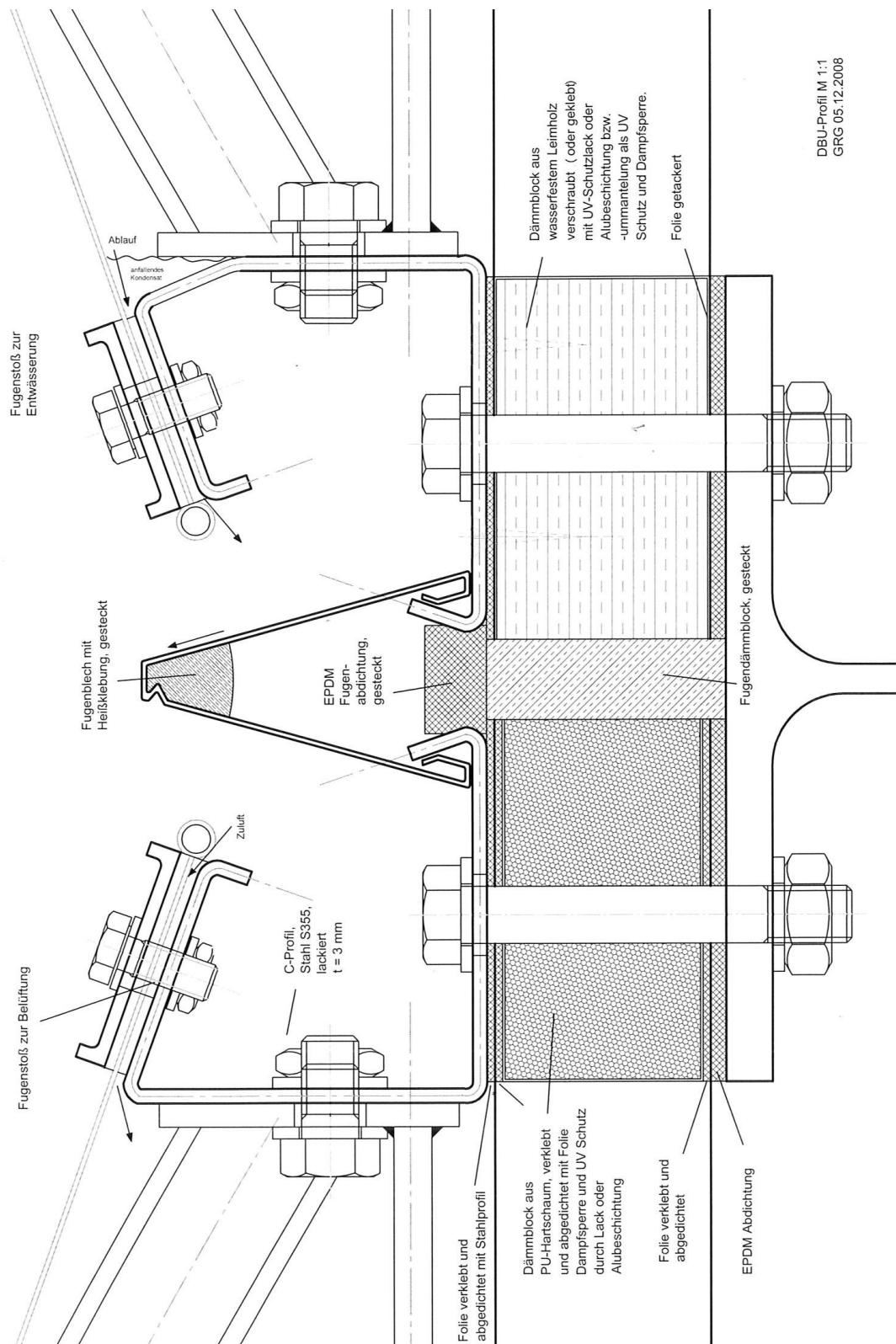
Bogenkonstruktion und sein Anschluss

Das Einfügen einer Bogenkonstruktion innerhalb des Rahmenmoduls ist notwendig, um eine gegensinnige Krümmung in der Folie zu erzeugen und somit die geometrische Steifigkeit des Flächenmaterials zu erhöhen. Die Aufnahme des Bogens muss konstruktiv in das Rahmenprofil integriert und das Einsetzen des Bogens im Montageablauf berücksichtigt werden.

Der Bogen besteht aus einem gebogenen Stahlrundrohr mit 33mm Durchmesser, das an beiden Enden an ein Bogenaufleger geschweißt ist. Ein Zugstab verbindet direkt unterhalb der Bogenkonstruktion die beiden Auflager miteinander und behindert das Auseinanderdrücken der Auflager durch den Bogenschub.

Da der Bogen erst nach der Folienbespannung des Rahmens eingesetzt wird kann der Bogen nur von unten in das Profil geschoben werden. Durch die Winkelverschiebung des mittleren Profilsteges kann das Bogenaufleger nicht direkt an den Steg angeschlossen werden. Zur Vermittlung der Geometrien kommt an der Stelle des Bogenauflegers ein entsprechend gefräster Stahlblock zum Einsatz der an das Stahlprofil geschraubt wird und die Schraubbefestigung des Bogens ermöglicht.

Da der gefräste Stahlblock teuer in der Herstellung ist und aufwändig in der Montage, wurden Profilloptimierungen dahingehend betrieben auf dieses Stück zu verzichten und die Rahmenprofilgeometrie an das vertikale Bogenaufleger anzupassen. Nachteilig gestaltet sich dabei das fehlende Gefälle des Profilstegs um anfallendes Kondensat abführen zu können. Wie in der nachstehenden Abbildung zu sehen wäre die komplett vertikale Ausführung des unteren Profils eine Lösung, oder die leicht angewinkelte Variante, wie im oberen Profil dargestellt. Hier wird dem anfallenden Kondensat noch auf der Hälfte des Profilstegs ein Gefälle zum besseren Ablauf angeboten.



DBU-Profil M 1:1
GRG 05.12.2008

Abb. 48 Rahmenprofil gerade gekantet

Montage der äußeren Folienlage

Die äußere Folie wird in zwei Schritten montiert: zuerst wird der Stahlrahmen flach bespannt, anschließend wird durch das Einschieben der Bögen die gespannte Folie nach außen ausgelenkt.

Das flache Bespannen des Stahlrahmens geschieht mit Hilfe eines Montagerahmens. Die fertige, mit Keder konfektionierte Folie wird über Klemmplatten, die um die Keder greifen und angeschlossenen Spanngurten an dem Montagerahmen befestigt und nach außen auf das notwendige Maß gespannt. In diesem Zustand wird die Folie auf den Stahlrahmen gelegt und über die Klemmleisten umlaufend an das Profil geschlossen. Danach kann die Folie vom Montagerahmen gelöst werden, die gesamte Vorspannung der Folie wird nun bereits vom Rahmen aufgenommen.

Von der Innenseite her werden nun die beiden Bögen in die Folie gedrückt, soweit, bis die beiden seitlichen Bogenauflager mit dem Stahlrahmen verschraubt werden können. Damit wäre die äußere Folienlage im Stahlrahmen eingebaut, vorgespannt und geometrisch ausgelenkt.

Dämmblock

Der Dämmblock, das hat die thermische Simulation gezeigt ist in PU Hartschaum Ausführung am effizientesten. Die Leistungsfähigkeit ist zudem über die Materialstärke des Blocks steuerbar. Die Eignung des Materials im Bezug auf ihre Schubfestigkeit und Verbindungsmöglichkeit an das Stahlprofil ist noch zu testen. Für die in der Vorphase untersuchte Rahmenvariante wird anstelle des PU Hartschaums ein Leimholzprofil verwendet. Die Vorteile beim Holz liegen zum einen darin, dass genügend Scherfestigkeit des Materials, eine Anbindung der vorgespannten Folie auf der Unterseite des Profils ermöglicht, zum anderen weil die Befestigung der Folie am Holzprofil einfacher zu realisieren ist.

Montage der beiden inneren Folienlagen

Für die Montage der beiden inneren Folien muss die äußere Folie bereits auf dem Stahlrahmen bespannt sein und mit Bögen ausgelenkt sein. Ebenfalls muss der Dämmblock in Form eines fertig zusammengesetzten Holzrahmens vorliegen. Die Maße beider Rahmen müssen korrespondieren.

Die ebene Folie wird mit Hilfe von Gribzangen über Spanngurte an einen Montagerahmen angeschlossen und auf die gewünschte Vorspannung gespannt. Die Folie wird in diesem gespannten Zustand auf den Holzrahmen gelegt und über Klemmen an den Rahmen befestigt. In diesem Zustand ist der Holzrahmen jedoch noch unbelastet, da die Vorspannkraft noch über die Gurte an den Montagerahmen abgeleitet werden.

Nun kann auf den folienbelegten Holzrahmen das Stahlmodul, mit den Bögen nach oben ausgerichtet, aufgelegt werden. Beide Rahmen werden mit zwei bis drei Schraubverbindungen pro Rahmenseite verbunden. Diese Kopplung stabilisiert den Holzrahmen, der nun die Kraft der vorgespannten Folie aufnehmen kann. Die Folie wird also von dem Montagerahmen gelöst. Sie wird zudem am Rand des Holzrahmens umgeschlagen und seitlich noch durch weitere Klammern an ihm befestigt.

Im letzten Montageschritt muss nun noch die unterste Folienlage an den Holzrahmen geschlossen werden. Hierfür wird eine weitere Folie in den Montagerahmen gespannt und auf entsprechende Vorspannung gezogen. Nach Auflegen der gespannten Folie auf die Unterseite des Holzrahmens kann nun die Folie über Klammern an den Balken geschlossen werden. Anschließend wird die Folie vom Montagerahmen gelöst, ihre freien Kanten um den Holzrahmen umgeschlagen und seitlich geklammert. Für die Schraubverbindung zur Befestigung des Moduls an eine Unterkonstruktion müssen an vier Stellen Löcher durch die beiden aufgezogenen Folien gebohrt werden um das Durchstecken der Schrauben zu gewährleisten.

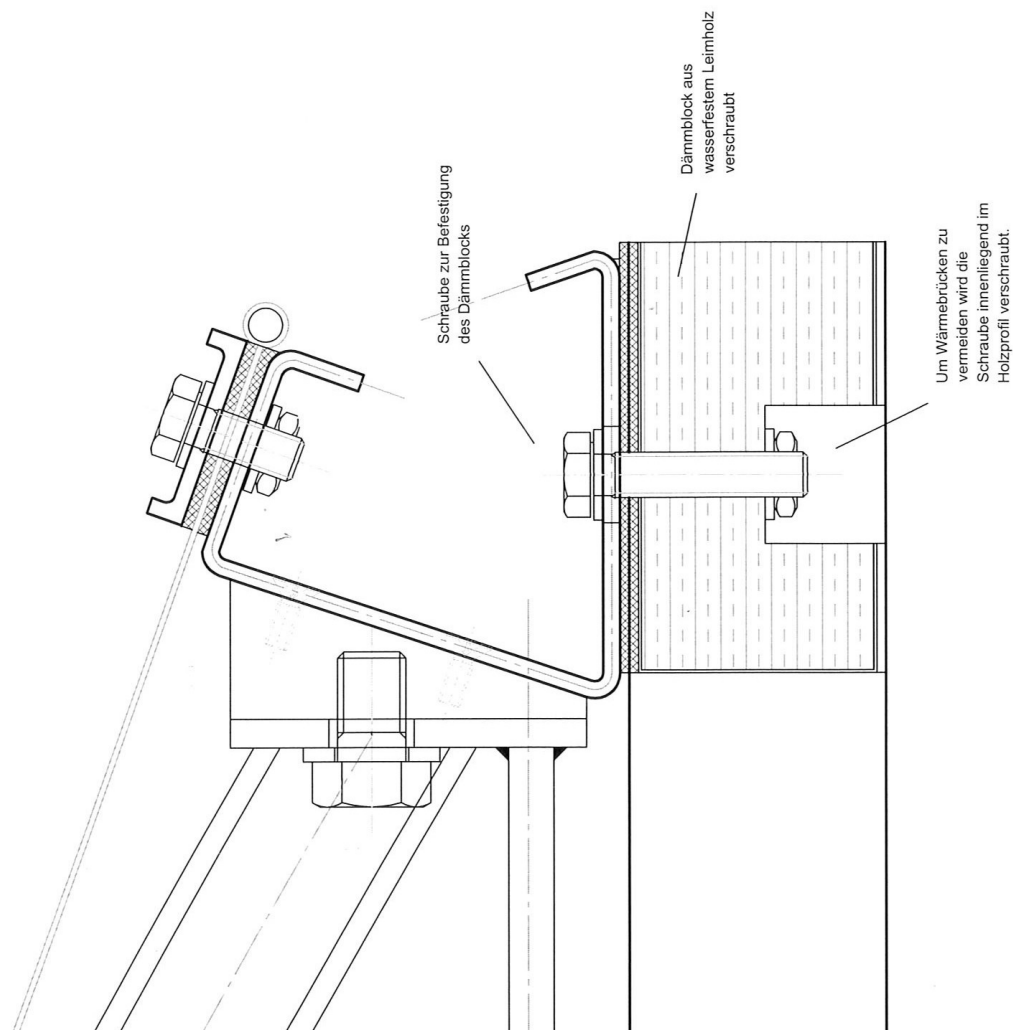


Abb. 49 Anschluss Holzrahmen

Befestigung an Unterkonstruktionen

Der Anschluss an die Unterkonstruktion ist für den Lastabtrag der MRM, ihre Lagesicherung und als Sicherung vor Abheben aufgrund von Windsogkräften verantwortlich. Aus gestalterischen Aspekten besteht der Anspruch an die Befestigung, dass sie sich optisch zurücknimmt. Insofern ist die Integration der Befestigungsschrauben innerhalb der Profilkonstruktion erwünscht.

Die Befestigung des Rahmenmoduls an die Unterkonstruktion geschieht mittels M12 Schrauben, die an vier Stellen den Rahmen mit der Unterkonstruktion verbinden. Die Schrauben verbinden durch den Dämmblock hindurch das Stahlprofil mit der Unterkonstruktion und sichern damit

sowohl den Stahlrahmen als auch das dahinter liegende Dämmpaneel. Die Anbindung stellt die einzige Wärmebrücke des Systems dar. Durch die Reduzierung dieser Wärmebrücken auf vier punktuelle Stellen pro Rahmenmodul bleibt dieses Problem jedoch auf geringe Flächen begrenzt.

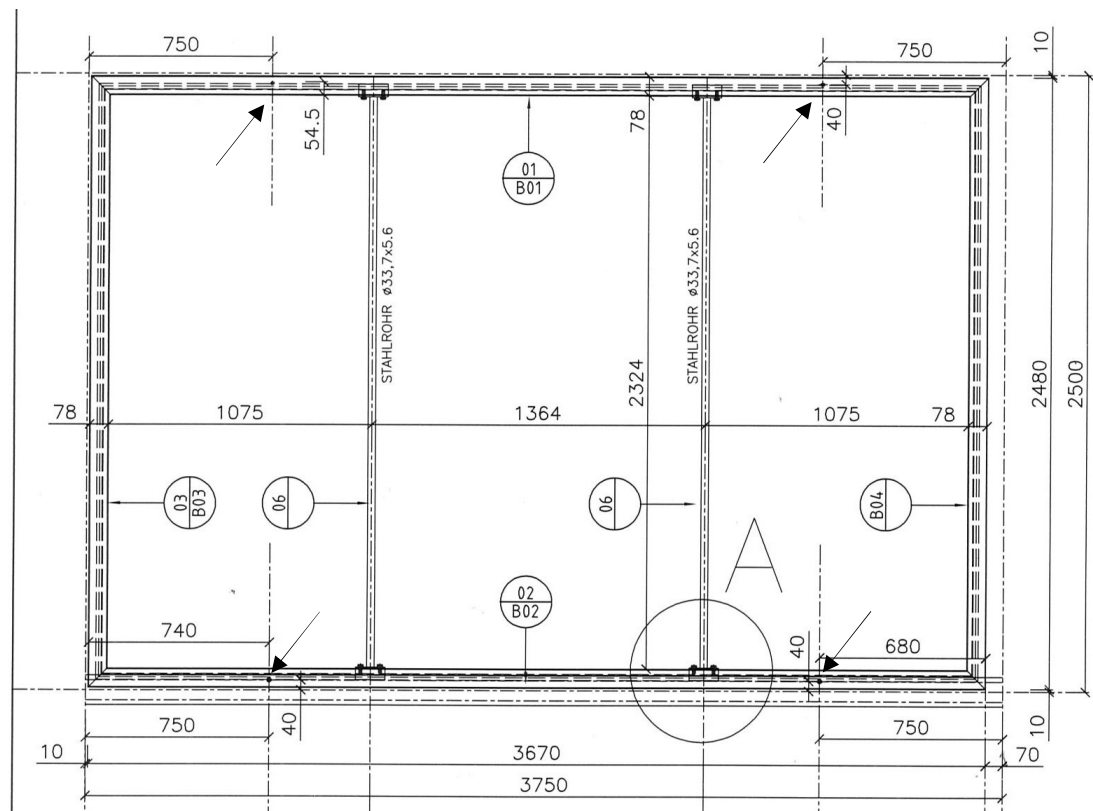


Abb.50: Befestigungspunkte des Rahmens an die Unterkonstruktion

Rahmenecken

Die Ausführung der Rahmenecken ist unproblematisch. Das Stahlprofil wird auf Gehrung geschnitten und zusammengeschweißt, ebenso stoßen die Klemmleisten in den Rahmenecken im 45° Winkel aufeinander. EPDM Dichtungsbänder können Stoß an Stoß ausgeführt werden, für die Rahmenecke des Holzrahmens ist eine verzapfte Verbindung der Seiten untereinander sinnvoll.

2.2.6. Entwässerung, Dichtigkeit und Kondensat

Eine Dichtigkeit gegen Niederschlagswasser ist in dem entwickelten Rahmenmodul vorgesehen. Die Klemmung der ETFE Folie mittels zwischen gelegter EPDM Streifen ermöglicht eine wasserdichte Ausführung der Module. Zwingend erforderlich hierfür ist eine kontinuierliche Klemmung der Klemmleiste über Schraubverbindungen. Hierfür ist ein Abstand von maximal 25cm angesetzt worden. Der Wasserablauf über die Folie ist unproblematisch, da sie als Fassadenmodul eingesetzt in jedem Punkt ausreichendes Gefälle besitzt. Die abgewinkelte Geometrie des oberen Flansches des Stahlprofils ermöglicht zudem ein kontinuierliches Auslaufen der Folie bis zur Keder. Insofern ist ein Eindringen von Wasser in das Modul unwahrscheinlich. Eine „Second Line of Defense“ in der Entwässerungsstrategie ermöglicht aber auch eingedrungenes Wasser abzuleiten.

Da die Konstruktion aber nicht luftdicht ist wird das Problem der Wasserdampfbildung auftreten. Ausfallender Wasserdampf kann sich niederschlagen und so müssen konstruktive Vorkehrungen zum Umgang mit diesem Problem gefunden werden. Prinzipiell sind drei Szenarien denkbar: 1. hinterlüftete Folie, 2. geschlossene, nicht hinterlüftete Folie und 3. sehr schwach hinterlüftet Folie.

Lösung 1 birgt die Gefahr, daß zuviel Schmutz über die Zuluftöffnung in die Konstruktion gelangt und sich auf der Innenseite der Folie niederschlagen wird. Entweder es gibt die Möglichkeit einer Reinigung dieser Seite oder die Verunreinigung muss billigend in Kauf genommen werden. Sollte die Konstruktion, wie in Lösung 2 beschrieben komplett geschlossen sein so wird sich das anfallende Kondensat als Wasser unten im Modul sammeln und nur im günstigsten Fall erst durch erneute Verdunstung entweichen.

Im Rahmen unserer Forschung haben wir die dritte Lösung der ganz geringen Belüftung des Panels verfolgt. Zum einen ist ein Wasserablauf im unteren Profil vorgesehen ist: über die Neigung des mittleren Stahlsteiges läuft das anfallende Wasser an die bespannte Außenseite des Rahmens. Hier kann das Wasser über Fugenstöße des EPDM Bandes nach außen ablaufen. Belüftet wird das Modul auf seiner oberen Rahmenkante, ebenfalls durch offene Fugenstöße des EPDM

Bandes zwischen Folie und Stahlprofil. Die Zuluftöffnung ist jedoch so stark minimiert und zudem geometrisch so abgeschirmt, dass Wasser nicht eindringen kann. Mit Luftein- und Wasserauslass ist das Problem des Kondensatablaufes gelöst. Es bleibt jedoch das Phänomen übrig, dass sich das Kondensat auf der Innenseite der äußeren Folie bilden wird und erst mit zeitlicher Verzögerung ablaufen wird. Dieser optische Mangel, der am unteren Rand auftreten kann, wird wahrscheinlich nur durch Verwendung einer opaken Folie (im unteren Bereich), also dem Verzicht der Transparenz umgangen werden.

Das Problem des Kondensats ist in diesem Vorprojekt nur in den Anfängen berührt und untersucht worden und ist sicherlich ein wichtiger Teil der Forschung des Hauptprojektes. Auch im Hinblick auf die Wasserdampfdichtigkeit des gesamten Rahmenmoduls, inklusive der beiden ebenen Folienlagen, bleiben wichtige Fragen bisher offen. Wie kann Kondensatausfall zwischen zweiter und dritter Folie vermieden werden? Wie müssen die Eigenschaften der Folie und ihrer Anschlüsse aussehen, wie können sie abgedichtet werden, um den Wasserdampfdurchlass zu stoppen bzw. ihn in eine Richtung zu kontrollieren?

Die Steuerung des s_d - Wertes (Wasserdampfdiffusionswiderstand), der für ETFE Folien bei 40m – 60m liegt, ist ein Ansatz der verfolgt werden könnte. Durch die Abnahme der Wasserdampfdurchlässigkeit von Innen nach Außen könnte sichergestellt werden, dass Wasserdampf, der von Innen durch eine Folie hindurch diffundiert ist auch durch die nächsten Folien hindurchdiffundieren wird. Es darf zu keinem Ausfall des Dampfes zwischen zweiter und dritter Lage kommen. Variation in Folienstärke wäre beispielsweise ein einfaches Mittel um konstruktiv auf die Durchlässigkeit der Folie einzuwirken. Auch die Verwendung anderer, Wasserdampf dichter Materialien als ETFE könnte eine Lösung sein. Eventuell können Trockenmittel im Paneel eingebaut ein Speicher für Wasserdampf sein.

In das Konzept der Wasserdampfdiffusion ist neben den Folien auch der Dämmklotz mit zu berücksichtigen, als Randelement des Paneels. Auch seine Durchlässigkeit Wasserdampf gegenüber ist eine zu berücksichtigende Eigenschaft. Über Schutzlacke oder Folienummantelung wäre eine Dampfsperre hier jedoch konstruktiv sicherlich einfacher zu realisieren.

Die gesamte Thematik Kondensat benötigt weitere, differenzierte Untersuchungen. Es würden beispielsweise Berechnungen der Feuchtelast hilfreiche Ergebnisse liefern können – Themen die Inhalt des Hauptprojektes sein werden.

2.2.9. UV-, Brand- und Korrosionsschutz

Die ETFE Folie hat neben der UV Beständigkeit die Eigenschaft UV Strahlung mit bis zu 95% durchzulassen. Dies kann für viele Anwendungen von Vorteil sein. Beispielsweise wird deshalb das Pflanzenwachstum unter ETFE Folie gefördert. Nachteilig ist, dass viele Bauteile des Rahmenmoduls der UV Strahlung ausgesetzt sind und entsprechenden Schutz benötigen. Vor allem ist dieser Schutz beim Dämmblock nötig, der zwischen den beiden hinteren Folienlagen direkter Sonnenstrahlung ausgesetzt ist. Hier ist ein entsprechender Schutzlackanstrich oder eine Folienummantelung notwendig. Das EPDM ist UV-stabil, ebenso muss der Lackanstrich des Stahls UV beständig sein.

Den Brandschutz betreffend ist festzustellen, dass ETFE Folie die Brandschutzanforderung B1 erfüllt. Als Fassadenmodul in mehrgeschossigen Gebäuden ist ein Brandschutzkonzept auszuarbeiten, dass den geforderten Brandüberschlag verhindern kann. Diese Untersuchungen stehen noch aus und werden Bestandteil der Hauptphase sein.

Der Korrosionsschutz des Stahlprofils sowie der Bogenkonstruktion wird durch entsprechende Grundierung und Schutzlackanstrich sichergestellt. Es werden Edelstahlschrauben, -muttern und -unterlegscheiben verwendet.

Problematisch könnte sich stehendes Wasser auf der Oberseite des Rahmenprofils auswirken. Ein Ablauf rechts und linksseitig ist zwar sichergestellt, Restwasser kann jedoch auf der Profilerseite stehen bleiben und zu Schäden führen.

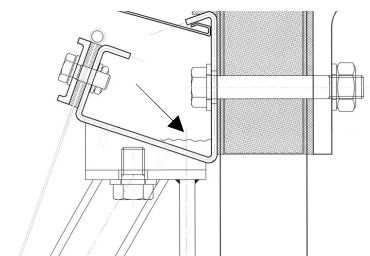


Abb. 51

2.2.9. Tragverhalten

Einwirkungen

Die MRM sind als Fassadenelemente unterschiedlichen Einwirkungen ausgesetzt. Es wirken vor allem Wind- und Vorspannkraft auf das Modul, diese allerdings abhängig von ihrer eingebauten Lage im Bauteil. Zu berücksichtigen sind dabei Windrichtung, Höhe des Bauteils und Lage, denn vor allem in Eck- und Randlagen kann es zu erhöhten Windlasten kommen. Darüber hinaus muss bei der Bemessung der Rahmenmodule unterschieden werden in den Montagezustand der Module, ihrer Lagerung und den Transport zur Baustelle im Gegensatz zu dem eingebauten Zustand der MRM. Die Ermittlung der Windlasten erfolgt nach DIN 1055, Teil 4 (03.05).

Ständige Einwirkungen: Eigengewicht, Vorspannung

Das Eigengewicht der Folie liegt unter 0,5 kg/m² Membranfläche und ist damit sehr gering. Ihre Vorspannung hat entscheidenden Einfluss auf die Steifigkeit des Tragwerks. Sie ist so hoch zu wählen, dass sie von äußeren Lasten nicht komplett abgebaut werden kann, denn ein Ausfall der Membranvorspannung führt zum Flattern der Membran, Faltenbildung, Materialschwächung und letztlich zum Materialversagen. Ebenso ist eine überhöhte Vorspannung des Materials schädlich. Zum einen führt sie zu unwirtschaftlicher Dimensionierung des Rahmens, zum anderen schwächt eine überhöhte Vorspannung auch das Material selber. Der ideale Vorspannungsgrad liegt also zwischen diesen gegensätzlichen Ansprüchen und liegt bei dem hier untersuchten Rahmenmodul bei 50kg/m.

Veränderliche Einwirkungen: Windlasten

Das Ansetzen von Windlasten ist ein sehr komplexes Thema und kann eigentlich nur durch Modellversuche im Windkanal oder CFD-Simulationen am Computer ermittelt werden. Da die hier vorgestellten Studien aber kein Einzelmodell beschreiben, sondern allgemeine Aussagen über den Einsatz von bespannten Rahmenmodulen als Gebäudehülle treffen sollen, werden die Maximalwindlasten, die die DIN 1055-4 vorgibt, als Bemessungsgrundlage herangezogen. Der Winddruck auf die Außenfläche eines Bauwerks wird angegeben mit: $w_e = c_{pe} \cdot q(z_e)$

Dabei ist c_{pe} der aerodynamische Beiwert für den Außendruck, der in Abhängigkeit von Gebäudeform und Bauteillage zu ermitteln ist. q ist der Geschwindigkeitsdruck und wird in Abhängigkeit von z_e , der Bezugshöhe, die Höhe der Oberkante der betrachteten Fläche über Gelände ermittelt.

Um trotz des Fehlens eines konkreten Gebäudes Aussagen über die Windlast w treffen zu können, werden einige Parameter für diese Studien festgelegt. Zum einen wird als Standort des Gebäudes München gewählt, die Gebäudehöhe wird auf maximal 10m beschränkt. Damit kann der Geschwindigkeitsdruck q mit $0,65\text{kN/m}^2$ festgelegt werden. Der aerodynamische Beiwert c_{pe} ist abhängig von Gebäudeform und Lage des betrachteten Rahmenmoduls auf dem Gebäude. Mit einem Gebäude von $35 \times 20\text{m}$ und einer Höhe von 7m wird in der Veröffentlichung [7] ein Gebäudevolumen vorgestellt, dass mit seinem Flachdach die in der DIN 1055-4 vorgesehenen höchsten Windbelastungen erfährt. Insofern können die Windlasten an diesem Gebäude als Bemessungsgrundlage für die Studien dieses Projekts verwendet werden, um damit die Aussagen zur Dimensionierung der Rahmenmodule auf ein breites Anwendungsspektrum ausdehnen zu können. Die Abbildungen auf der nächsten Seite aus [7] illustrieren übersichtlich Lage und Größe des auftretenden Winddrucks bzw. Windsogs an Gebäudefassaden.

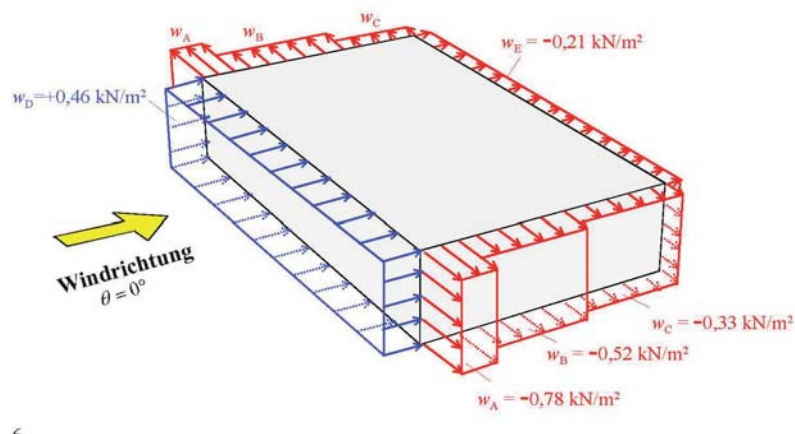


Abb. 52 aus [7]

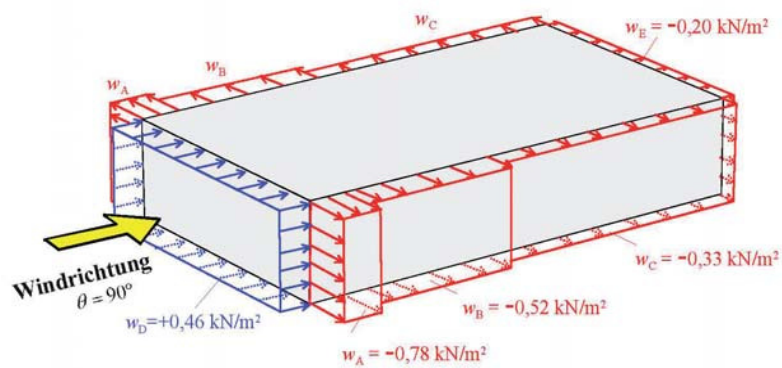


Abb. 53 aus [7]

Der maximale Winddruck der Fassadenmodule kann demnach mit $w_D 0,46 \text{ kN/m}^2$ die maximale Sogkraft. mit $w_S 0,78 \text{ kN/m}^2$ als Höchstbelastung angesetzt werden.

Veränderliche Einwirkungen: Temperatur

Die Temperatur ist eine weitere Einwirkung die bei der Untersuchung des Tragverhaltens der MRM zu berücksichtigen ist. Die höhere Dehnung des Materials bei steigenden Temperaturen muss bei dem Bespannen der Rahmenmodule im Werk in der entsprechenden Wahl der Vorspannung berücksichtigt werden. Bei hohen Temperaturen reichen demnach geringere Vorspannkraften, um einen entsprechenden Einbauzustand zu erreichen. Der Zusammenhang von Temperatur, Spannung und Dehnung der Folie wird in [4] beschrieben.

Bemessung und Sicherheitskonzept

Grundlage der Membranbemessung sind die Ergebnisse des Formfindungsprozesses. Die ermittelte flächige Geometrie des Seilnetzes wird im Computermodell mit Steifigkeiten und äußeren Lasten belegt. Als Ergebnis der nichtlinearen Strukturanalyse werden biaxiale Membrankräfte, Seilkräfte, Dehnungen und Strukturverformungen erhalten. Die Bemessungen erfolgen mittels normativer Standards. Angewendet wurden für die Stahlbemessung die DIN 18800, für die Membran die DIN 53354, Erfahrungswerte der Firma Hightex sowie Angaben laut dem Design Guide [8].

2.3. Ausbildung der Fugen

Fugenausbildung (Prof. Thomas Herzog)

So unterschiedlich die ›Nahtstellen‹ der Bauteile ausfallen, sie verlangen besondere Betrachtung, da sich hier u. U. vielzählige Aspekte konzentrieren, die beim Konstruieren relevant sind. Neben den funktionalen und technischen Aspekten tragen Fugen zur Gliederung einzelner Bauteile und von Fassaden (innen wie außen) als Ganzes bei, sie spiegeln geometrische und konstruktive Ordnungen wider. Fugen auf außenseitigen Fassadenflächen sind der Witterung in vollem Maße ausgesetzt. Mit zunehmender Gebäudehöhe steigt die Windbeanspruchung. An Gebäudekanten kommt es zu Konzentrationen der Strömung und somit zu höheren Windgeschwindigkeiten, bei Regen zu einer Verdichtung des ›Fassadenwassers‹, das sich zudem über die Höhe des Gebäudes nach unten hin addiert. Die Lage der Fugen zur Bewegungsrichtung von Niederschlags- und Fassadenwasser, welche durch Schwerkraft und Wind bestimmt wird, ist ein wichtiger Faktor für ihre Beanspruchung. Weitgehend parallel zur Fließrichtung des Fassadenwassers angeordnete Fugen (Vertikalfugen) sind im Regelfall weniger beansprucht als solche, die vorwiegend quer dazu liegen. Volumen- bzw. Längenänderungen der angrenzenden Bauteile durch Last, Temperaturschwankungen und Wasseraufnahme bzw. -abgabe beanspruchen zusätzlich jede Art von Fuge. Dies ist bei elementierten Fassadenkonstruktionen am offensichtlichsten.

2.3.1. Fugenausbildung zwischen Rahmen und Rahmen

Die Modularität der Bauweise ermöglicht es, trotz der Kleinmaßstäblichkeit des einzelnen Moduls, große Fassadenflächen mit MRM zu belegen. Bei der Addition der Module ist die Fuge zwischen den einzelnen Rahmen so auszuführen, dass anfallendes Wasser ablaufen kann, dass eine Belüftung der Fuge ermöglicht wird, Wärmebrücken vermieden werden und gestalterische Aspekte Berücksichtigung finden.

Hierfür wird ein Fugenblock verwendet der sich aus drei Elementen zusammensetzt. Innen liegend befindet sich ein wärmedämmender Schaumkern. Er ist ummantelt von einem EPDM Dichtungsprofil in liegender H-Form. Nach außen öffnet sich das Profil und bildet die Fuge aus. Zwei Stege dichten das Rahmenprofil seitlich ab und führen anfallendes Wasser durch das Gefälle der Stege nach Außen. Aus

gestalterischen Gründen kann die Stirnseite des Dichtungsprofils mit einem Stahl- oder Aluminiumblech verkleidet werden.

Der Fugenblock kann nach der Montage eines MRM umlaufend befestigt werden. Dabei wird der Block durch die seitlich abstehenden Federn in seiner Lage gehalten. Endgültige Befestigung wird durch den Einbau des benachbarten Rahmenmoduls erzielt.

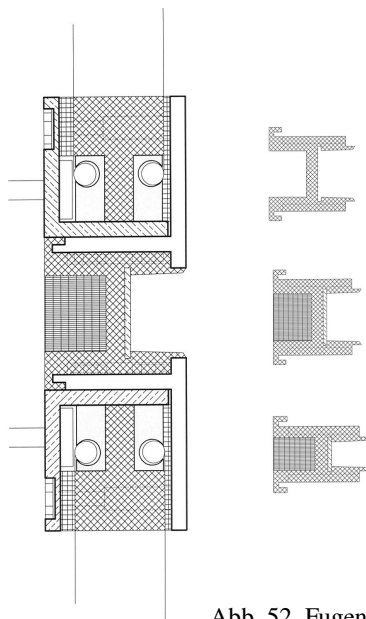


Abb. 52 Fugenblock

2.3.2. Fugenausbildung zwischen Rahmen und anderen angrenzenden Bauteilen

Ein weiterer Standardbereich der Rahmenmodule liegt zwischen Rahmen und anderer Bauteile, die an den Rahmen angrenzen. Neben der visuellen Gestaltung dieser Fuge ist aus technischer Sicht vor allem auf unterschiedliches Ausdehnungsverhalten der verschiedenen Bauteile sowie Dichtigkeit der Fuge zu achten.

3. Zeichnungen, Pläne, Umsetzung

3.1. Zuschnitt Folie

Der Zuschnitt der Folie ist auf Grund limitierter Folienbreite dreigeteilt. Die Auslenkung des Bogens, Schweißnähte und Keder sind im Zuschnitt der Folie berücksichtigt.

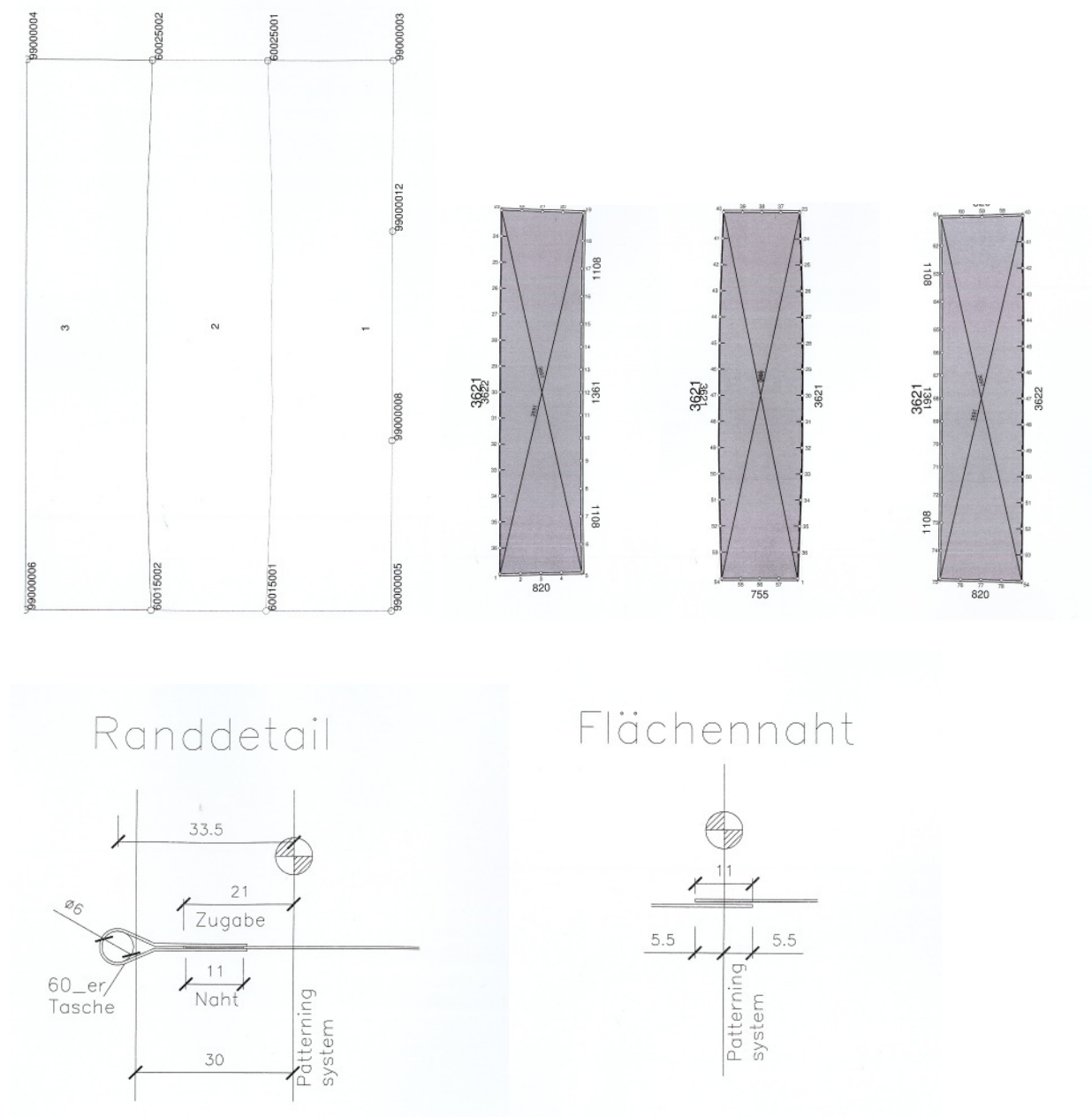


Abb. 53 a-f Zuschnitt und Randdetail

3.2. Stahlrahmen

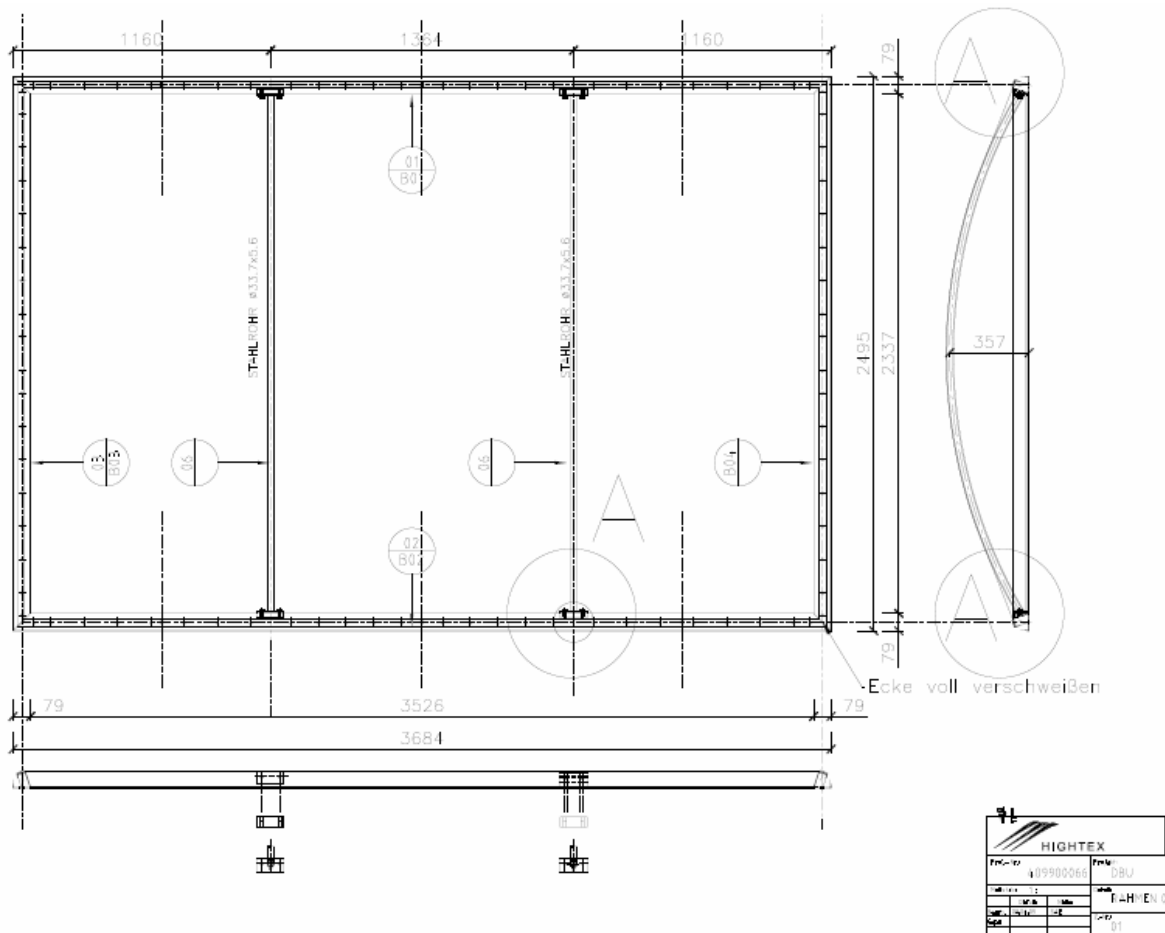


Abb. 54 Fassadenrahmen

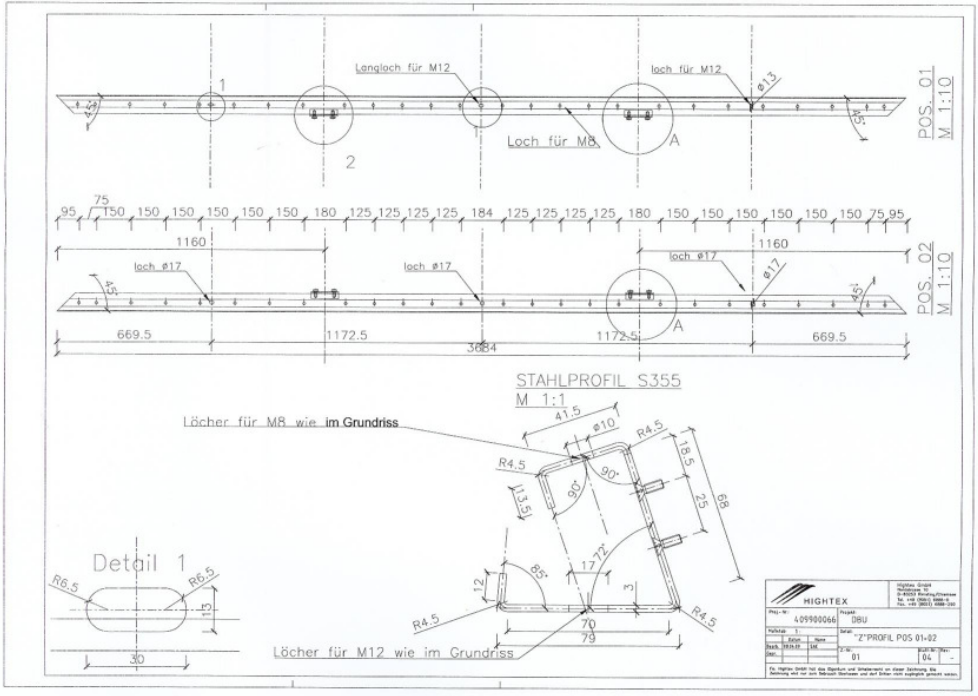
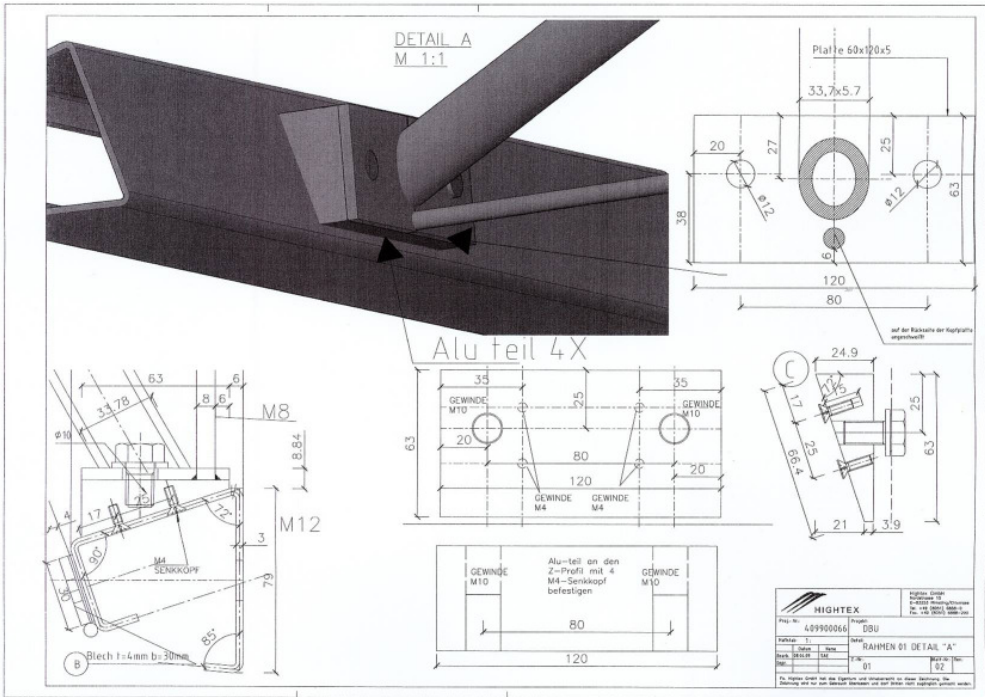


Abb. 55, 56 Rahmen Details

3.3.Bogenkonstruktion

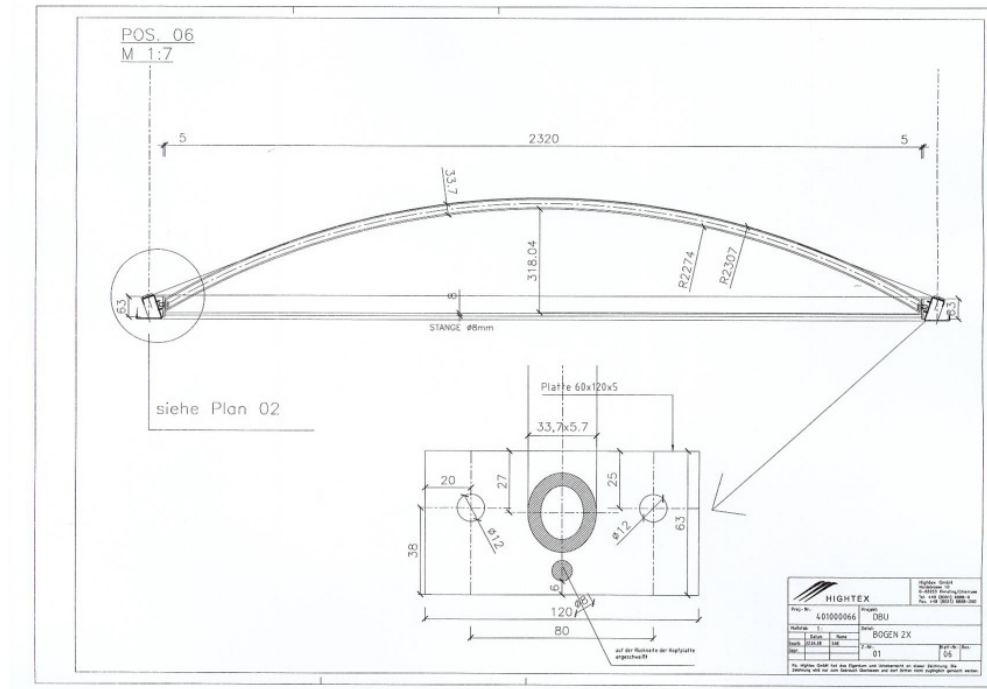


Abb. 57 Bogenkonstruktion

3.4. Datenblatt

| | Element | Maße |
|---|--------------------|---|
| 1 | Rahmen | a x b = 2500mm x 3750mm |
| 2 | Profil | b x h = 80mm x 63mm, t = 3mm |
| 3 | Bogen | Rundrohr Ø 33mm, Länge 2500mm, Stichhöhe 10 % |
| 4 | Folie | 0,25mm Materialstärke |
| 5 | Klemmverschraubung | M10 |
| 6 | Verbindungsbolzen | M12 |

| | Element | Material |
|---|---------------------|---|
| 1 | Profil | C-Profil, St 355, kalt gewalzt, grundiert, lackiert |
| 2 | Bogen | Rundrohr, St 355, grundiert, lackiert |
| 3 | Folie | ETFE |
| 4 | Verbindungselemente | Edelstahl |

| | Element | Gewicht |
|---|---------------------------------------|---------------------------|
| 1 | Rahmen komplett | ca.7,5 kg/m ² |
| 2 | zum Vergleich herkömmliche Fassade | 50 – 75 kg/m ² |

3.4.Prototyp

Bilddokumentation der Montage



Abb. 58 Das Rahmenmodul wird mit Folie belegt



Abb. 59 Die Folie wird an eine äußeren Montagerahmen gespannt und fixiert



Abb. 60 Vorbereitung der Klemmschienen
Aufkleben der EPDM Dichtungen



Abb.61 Montagevorbereitung der Bögen



Abb. 62 Eindrücken der Bögen

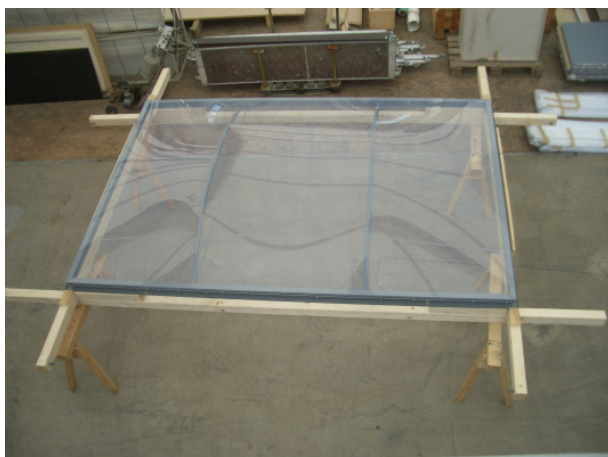


Abb. 63 Das fertige Modul

4. Wirtschaftlichkeits- und Ressourcenberechnung

Fragen zur Wirtschaftlichkeit vergleichbarer Konstruktionen (Prof. Thomas Herzog)

Wirtschaftlichkeit bemisst sich nach Aufwand für die jeweilige Konstruktion und im Hinblick auf die Auswirkungen. Unterstellt man, dass großflächige, transparente oder transluzente Glasfassaden mit entsprechendem, quasi gleichem Leistungsprofil zum Vergleich heranzuziehen sind, so zeigen sich eklatante Unterschiede, die wirtschaftlich relevant sind: - Was die Lebensdauer angeht, so gibt es die Faktoren der möglichen Beschädigung bei beiden Ausführungen - bei Glas durch Bruch, bei Membranen durch Verletzung. Fragt man nach dem materialbedingten Lebensalter, so hält Silikatglas Jahrtausende; ETFE- Folien derzeit mindestens 20 Jahre, PTFE aber quasi unbegrenzt in der Fläche, die Ränder sind abhängig von den dort eingesetzten Werkstoffen und dem konstruktiven Detail. Sehr lange Lebensdauer ist möglich. - Der Materialaufwand differiert geradezu extrem in Maßen und Gewicht. Bei Bauteilen von beispielsweise ca. 5 m² Größe, die bis zur Hochhausgrenze einsetzbar sind, sind für den umlaufenden Metallrahmen und die lichtdurchlässigen Flächen im Fall von einlagigen Membranen für die Rahmen- und Stützkonstruktionen zusammen nur rund 50 % der Masse erforderlich. Bei kleineren Formaten nimmt die Differenz etwas ab. Bei mehrlagigen Flächen wirkt sich das ganz erheblich geringere Gewicht der Membranen, bedingt durch die Materialstärke und das spezifische Gewicht, noch viel stärker zu Gunsten der Membrankonstruktionen aus. Was dies letzten Endes für die Kosten pro m² der Fassade bedeutet, hängt sehr stark davon ab, welcher zusätzliche Aufwand im Fall der Membranen für deren formbezogene, dreidimensionale, konstruktive Lagestabilisierung erforderlich ist. Was die Ausbildung der jeweiligen Bauteilrahmen angeht, so ist von vergleichbarem Aufwand für die Einleitung der äußeren Kräfte auszugehen; ebenso von gleichermaßen thermisch getrennten Profilen für die Rahmenkonstruktion in beiden Fällen. - Der große Unterschied der fertigen Bauteile schließlich, bezogen auf die Gewichts Differenz wirkt sich auch auf das gesamte Gebäudetragwerk aus, so daß sich bei den Gebäudekosten die Einsparmöglichkeiten im Falle der Fassaden aus Membrankonstruktionen aufsummieren und dies in der Vertikalen von der Dachkante bis in die Kellerfundamente. Doch auch schon bei der Produktion, bei Transport und Montage wirkt sich dieser Umstand in gleicher Weise zu Gunsten der Membrankonstruktionen aus. Letztlich ist im Kostenvergleich die Gesamtauswirkung quer durch die Detailausbildungen an allen Übergängen, Fugen und Rändern bezogen auf die Baukosten von grundlegender Bedeutung.

EINSCHUB:

Denkt man sich die Frage der Füllung der Flächen der einzelnen Bauteile in einem modularen System aus Rahmen als eigenes Thema und konstatiert, dass eine Glasdoppelscheibe von 10 Millimetern Materialgesamtstärke etwa 25 Kg pro m² wiegt, eine doppelt gekrümmte Membranfläche von 0,1 Millimeter etwa 1 Kg wiegt, so hat man es mit einer für die Rahmenkonstruktion in den beiden miteinander verglichenen Fällen mit einer relevanten Differenz um den Faktor 25 zu tun. Auch wenn sich dies keinesfalls unmittelbar linear auf die konkrete Ausbildung der jeweiligen Rahmen auswirkt, weil eine Reihe von Zusatzfunktionen (Handling bei Transport und Montage, Integration von Zu- und Abluftöffnungen, flächige Öffnungen wie Fenster und Türen...) zu berücksichtigen ist, so kann gleichwohl als grober Schätzwert angenommen werden, dass bei modularen Fassadenbauteilen, die in Tragkonstruktionen, welche als Skelett- oder Schottenbauweisen ausgeführt sind, geringere Materialaufwendungen in der Größenordnung von 20- 30 % realisierbar sind. Je größer die Flächen, um so größer die Auswirkung auf Einsparungen bei der Membranvariante. Die oben erwähnten Auswirkungen beim Tragwerk - vor allem auf mehrgeschossige Bauten - kommt hinzu.

Potential

- Spannweiten / Gewicht
- Eigengewicht Vergleich:
 - MRM ~ 7,5kg/m²
 - Standardfassaden ~ 50- 70kg/m²
 - Faktor ~ 10
- Reduzierung des Eigengewichtes der Fassade geht einher mit einer Verschlankung der primären Tragstruktur
- wirtschaftlich vor allem für hohe Gebäude, weil sich der Gewichtsvorteil multipliziert.
- Transparenz, Transluzenz
- Reduzierung von Kunstlicht, homogene Diffusstrahlung bei Dämmung der Folie,
- Beleuchtung, Bedruckung, Gestaltung, Medienfassade, Werbung, etc.

Alternative zu Überkopfverglasung

- erheblich geringeres Gewicht der Flächen - schwächere Querschnitte der Rahmenkonstruktion bei optimierter Auslegung der Größen
- Auswirkung des geringeren Eigengewichts aus Fläche und Randkonstruktion auf die Dimensionierung des Tragwerks (Deckenränder u. a.)
- Möglichkeit ästhetischen Differenzierung durch die Art der Sekundärelemente zur Spannung der Membranen
- Verwendungsmöglichkeit von "selbstreinigendem" Material (keine Reinigungsanlagen, Betriebskostensparnis)
- weitere Vorteile des Leichtbaus bei Produktion, Transport und Montage

5. Zusammenfassung, Bewertung

5.1. Resümee

Der vorliegende Bericht ist eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Forschung zu ressourcenschonenden Bausystemen mit Membran. Am Beispiel eines definierten Rahmenmoduls konnten wichtige konstruktive, statische, bauphysikalische und wirtschaftliche Aspekte erarbeitet und anschaulich dargestellt werden. Hohe Transparenz und geringe Rahmenprofilstärken führen zu einem sehr schlanken und elegantem Erscheinungsbild der Fassadenelemente. Die gekrümmte Folienoberfläche bricht das Licht in ungewohnter Weise und erlaubt interessante Einblicke und Spiegelungen. Das Ergebnis unserer Forschung leistet einen entscheidenden Beitrag in der Weiterentwicklung des Membranbaus und schafft es architektonisch neue Akzente zu setzen.

Der Vergleich des Eigengewichtes der Fassade mit $7,5 \text{ kg/m}^2$ mit herkömmlichen Fassadeneigengewichten, die bei $50 - 75 \text{ kg/m}^2$ liegen, verdeutlicht einen der entscheidenden Vorteile der Rahmenmodule: seine Gewichtsminimierung. Diese Minimierung führt zudem zu weiterer Verschlankeung und Ressourcenschonung der tragenden Primärkonstruktion des Gebäudes, bis hin zu Einsparungspotenzial in den Fundamenten. Vor allem bei hohen Gebäuden kann das Membranrahmenmodul durch die Multiplikation seiner Eigenschaft zu deutlicher Verschlankeung der Gebäudegesamtkonstruktion beitragen und damit einen entscheidenden Beitrag zur Ressourcenschonung leisten.

5.2. Ausblick auf die Hauptphase

Ziel der Hauptphase des Forschungsprojekts ist es, die ausgearbeitete Technologie zu einem universellen, standortunabhängigen Bauprodukt zu entwickeln. Standardisierung und Verallgemeinerung der in der Vorphase für eine bestimmte Rahmengröße getroffenen Annahmen und konstruktiven Lösungen werden zu entwickeln sein.

Außerdem sollten Untersuchungen der bauphysikalischen Eigenschaften des Rahmenmoduls Aufschluss auf die Leistungsfähigkeit des Rahmenmoduls geben. So könnten U- und g-Werte für die Konstruktion ermittelt werden oder weitere Optimierungen hinsichtlich der Wasserdampfdiffusion entwickelt werden. Auch ist das Thema Brandschutz bei mehrgeschossigen Fassadenanwendungen ein zentrales Thema einer möglichen Projekthauptphase.

Resultat der Forschung ist das universell einsetzbare Bausystem, das durch die Verwendung der Folie zu einem ressourcenschonenden, ästhetisch anspruchsvollen, energiesparenden und damit wirtschaftlichen Bauprodukt entwickelt wird.

Literatur

Forster B., Mollaert, M.: *European Design Guide for Tensile Surface Structures*, TensiNet, Brüssel, 2004

- [1] Herzog, Krippner, Lang: *Fassadenatlas*, Birkhäuser Edition Detail, Basel, Boston, Berlin 2004
- [2] Grunwald, G., *Mechanisch vorgespannte, doppellagige Membranmodule in ihrer Anwendung als zweite Gebäudehülle*, Dissertation an der TU-Berlin, 2007
- [3] Adamczewski, P., *Hochhausfassaden aus Membranen - Untersuchung transparenter Folien als vorgespanntes Membranentragwerk bei Hochhausfassaden*, Dissertation an der TU-Berlin 2007
- [4] Moritz, K., *ETFE-Folie als Tragelement*, Dissertation an der TU-München, 2007
- [5] Saxe, Klaus / Homm, Thomas: *Mechanische Eigenschaften von ETFE-Folien für vorgespannte Konstruktionen*, Universität GH Essen, Vortrag im Rahmen der Techtexil 2007,
- [6] U-Werte mehrlagiger Membrankonstruktionen in der Veröffentlichung zum 1. Konstanzer Leichtbau Symposium, (Hrsg.): IPL Ingenieurplanung Leichtbau GmbH
- [7] Widjaja, E.: *Baustatik- einfach und anschaulich*, Bauwerkverlag, Berlin, 2007
Lastannahmen nach neuen Normen, Bauwerkverlag, Berlin, 2007
- [8] Mollaert M., Haase J., u.a.: *Designing Tensile Architecture, Proceedings of the TensiNet Symposium*, Sep. 19th – 20th, Brüssel: TensiNet, 2003

Anhang

A: Statik des Rahmenmoduls (Dipl.-Ing. Said Elsayad)

1. Vorbemerkung

1.1 Werkstoffe

| | | |
|-----------|-----------|---------|
| Profile | Stahl | S235 |
| | Aluminium | F22 |
| Schrauben | Stahl | 8,8/5,6 |
| Membrane | ETFE | |

1.2 Konstruktion

Die weitgespannte Membrankonstruktion besteht aus einer mechanisch vorgespannten textilen Membran, die über Stahlrahmen stabilisiert wird.

1.3 Formfindung

Die Geometrie der Membran wird mittels Computerprogramm EASY (Formfindungsprozess) unter Einbeziehung architektonischer und statischer Gesichtspunkte ermittelt. Die Membran selbst wird als Seilnetz im Computermodell diskretisiert.

1.4 Bemessung

Membran:

Grundlage der Membranbemessung sind die Ergebnisse des Formfindungsprozesses. Die ermittelte flächige Geometrie des Seilnetzes wird im Computermodell mit Steifigkeiten und äußeren Lasten belegt. Als Ergebnisse der nichtlinearen Strukturanalyse werden biaxiale Membrankräfte, Seilkräfte, Dehnungen und Strukturverformungen erhalten.

Primärkonstruktion :

Die Bemessung erfolgt mittels normativer Standards.

Gegenstand dieser Bemessung ist die Analyse von

| | |
|--------------------|---|
| Membran | x |
| Primärkonstruktion | x |

1.5 Software

| | |
|-------|--|
| EASY | Programm zur Formfindung und Analyse von Seilnetz- und Membranstrukturen |
| RSTAB | Stabwerk Programm |

1.6 Normen

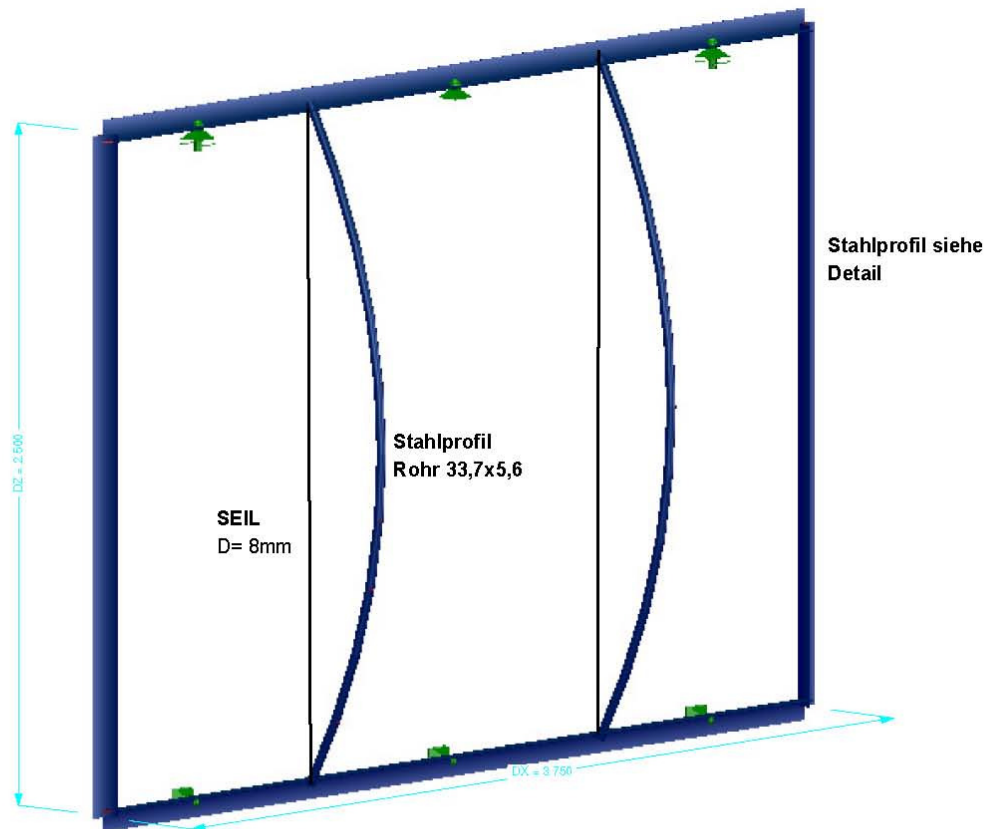
| | |
|--------------|-----------|
| Lastannahmen | DIN 1055 |
| Stahl | DIN 18800 |
| Membran | DIN 53354 |

2. SYSTEM

SEIT

Isometrie

Aufgrund der selbsttragenden Wirkung der Rahmen werden keine Horizontallasten an die Pfosten-Riegel-Unterkonstruktion abgegeben. Die Erhöhung der Rahmensteifigkeit wird durch vergrößerte Profilquerschnitte realisiert



3.1 Ständige Lasten

Eigengewicht+Konstruktion $g=$ 0,01KN/m²

3.2 Schnee

3.3 Vorspannung

Warp $q=$ 0,50KN/m
Fill $q=$ 0,50KN/m

3.4 Wind:

$$q(z) = 1,7 q_{ref} (z/10)^{0,37}$$

Windzone 2 $q_{ref}=$ 0,39KN/m²
 $z < 25m$ $q=$ 0,93KN/m²

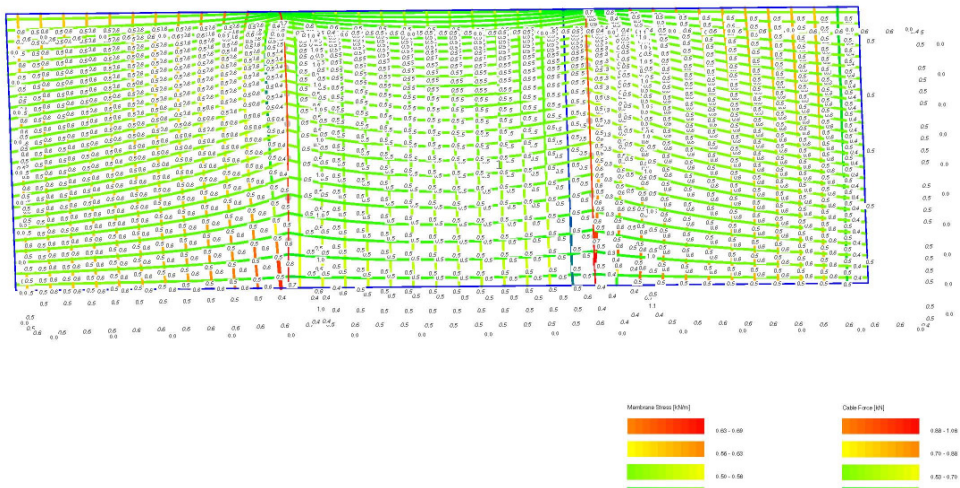
Sog Druck
 $w_e = c_{pe} * q(z_e)$ 0,47KN/m² 0,74KN/m²

3.5 LF-KOMBINATIONEN

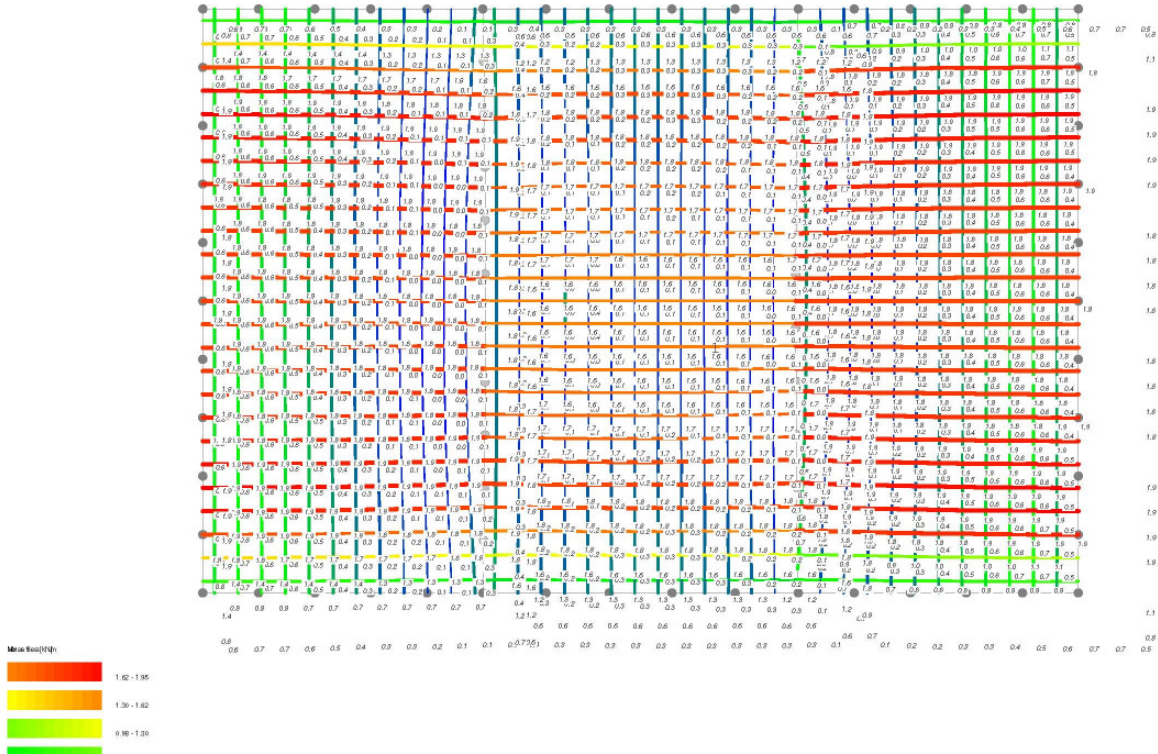
- LC1 Ständige Last + Vorspannung
- LC2 Ständige Last + Vorspannung +Winddruck
- LC3 Ständige Last + Vorspannung + Windsog

4 Schnitt- und Reaktionskräfte

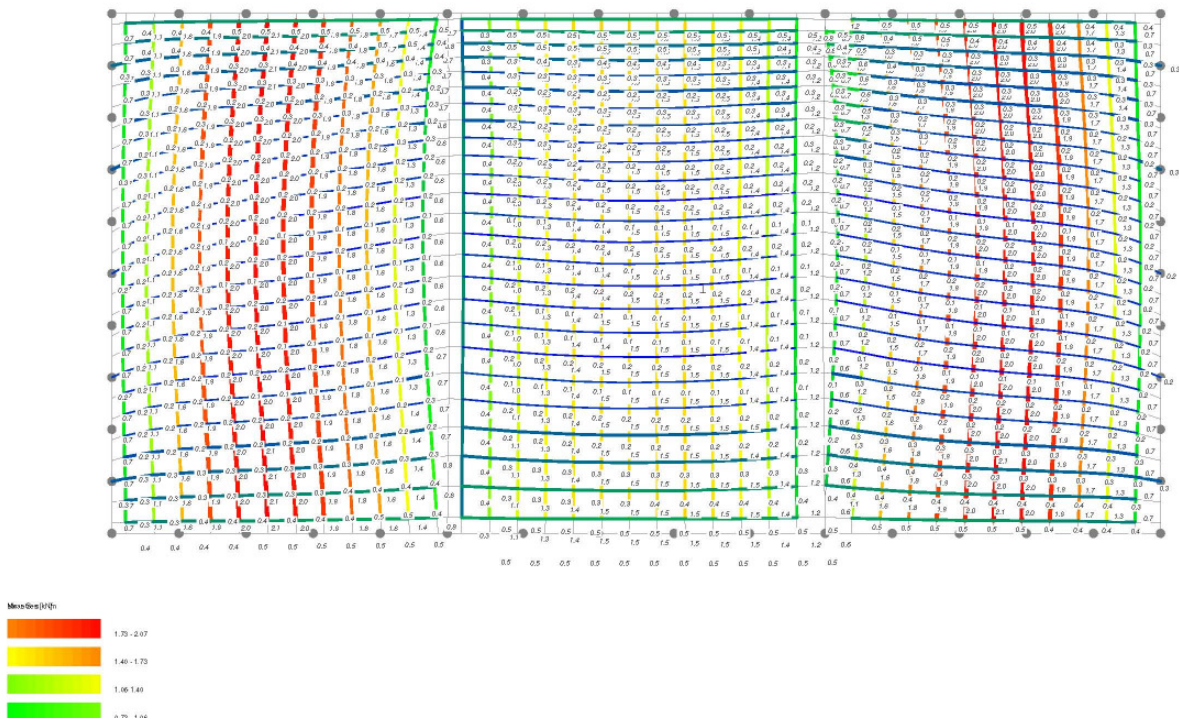
Membranspannung
LC1 Lastfall Vorspannung

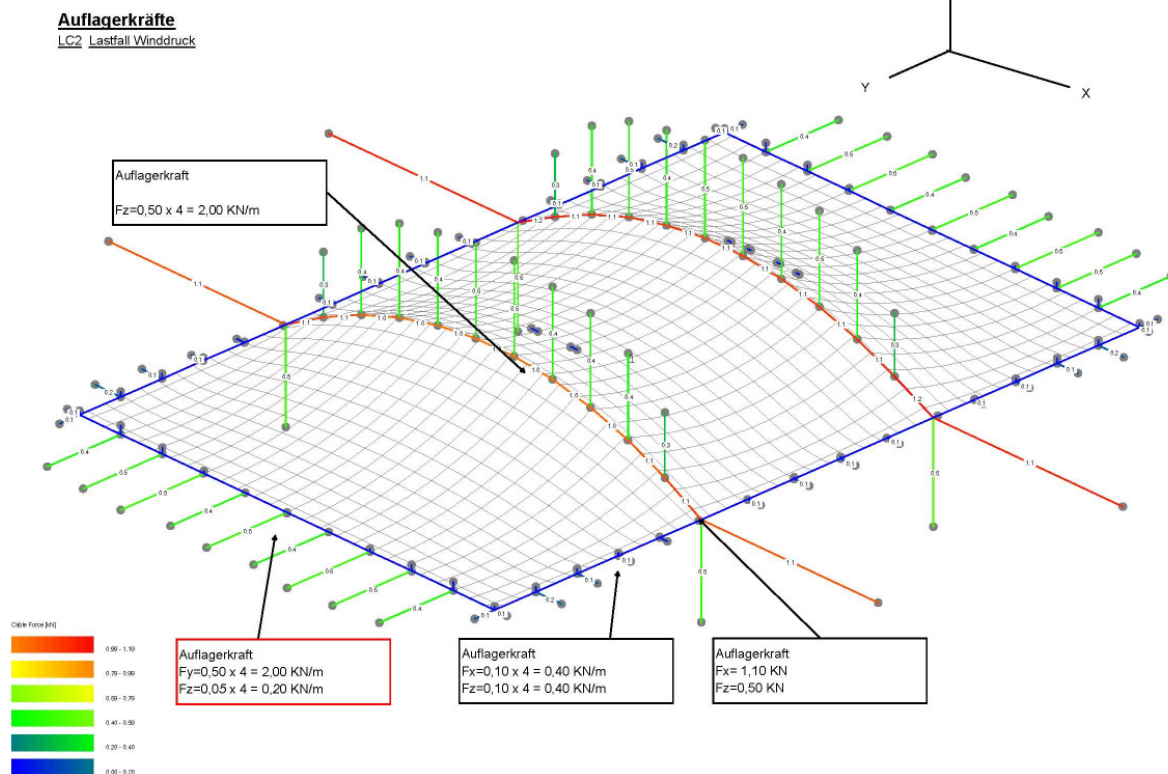
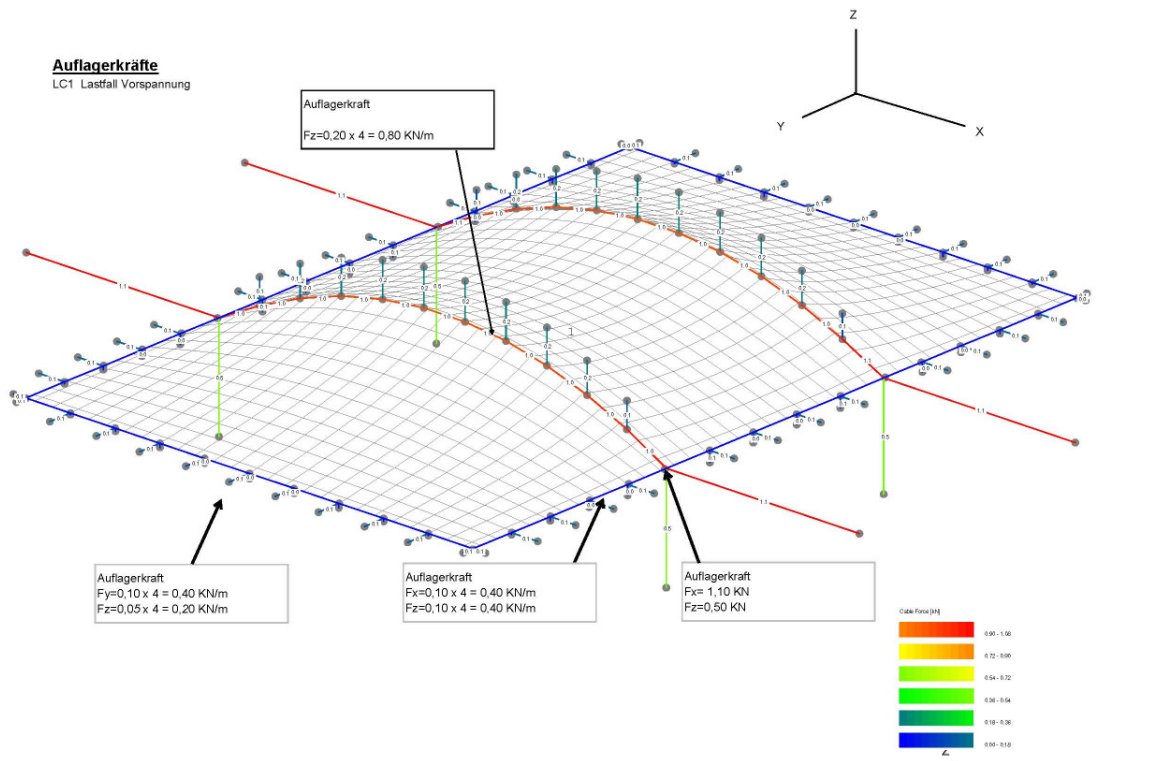


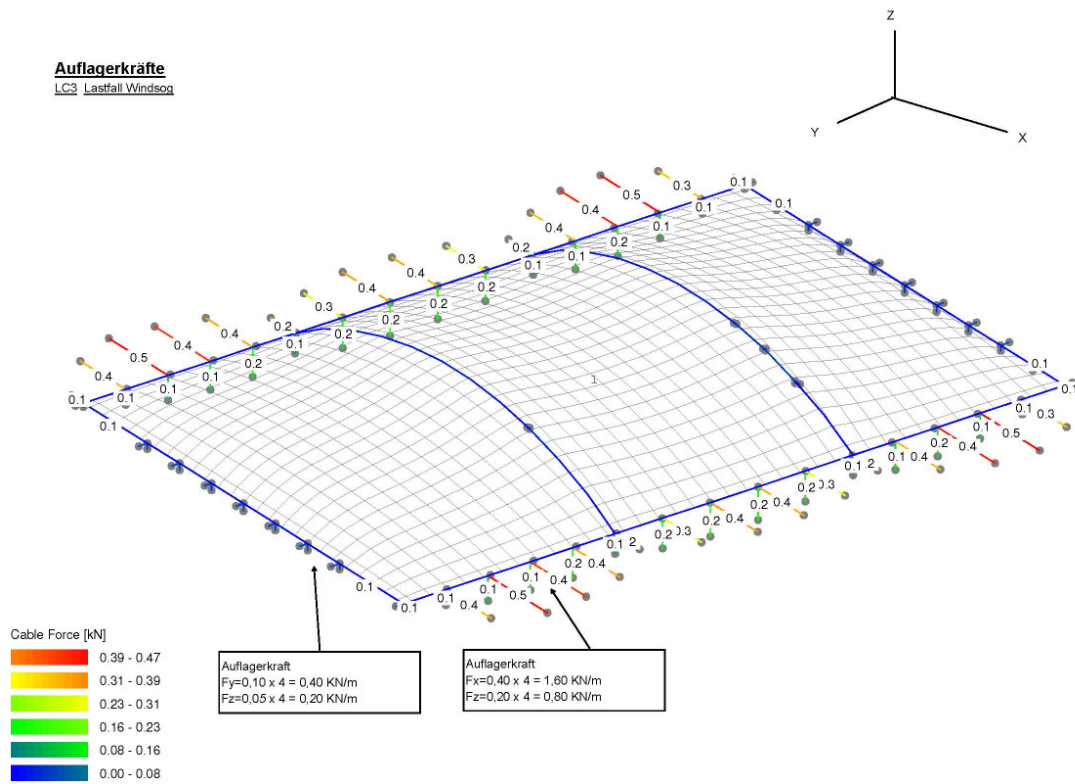
Membranspannung
LC2 Lastfall Winddruck



Membranspannung
LC3 Lastfall Windsoog







5 Membrane

5.1 Concept of structural design

$$\eta_k \times \gamma_F < (f_{u,kz} \times f_s) / [\gamma_m \times A_1 (A_0 \times A_1 \times A_2 \times A_3)]$$

| | |
|-------------------------------|--|
| η_k = | Characteristic stress caused by outer loads |
| γ_F = | load safety factor |
| $f_{u,kz} \text{ 23}^\circ$ = | tensile strength of material as defined in DIN 53354 |
| f_s = | statistically reduction |
| γ_m = | material safety factor |
| A_i = | reduction factors and there combination |



5.2 Membrane design

Fensterelement 3,50x2,50

Characteristical stress caused by outer loads

| Load comb. | MAX. (Warp) | MAX. (Fill) | | Load case | time of Load (h) |
|------------|-------------|-------------|--|----------------------------------|-------------------|
| LC1 | 0,70 KN/m | 0,70 KN/m | | Dead loads + Prestress | 10 ⁴ h |
| LC2 | 2,00 KN/m | 2,00 KN/m | | Dead load + Prestress + Wind (+) | 10 h |
| LC3 | 2,10 KN/m | 2,10 KN/m | | Dead load + Prestress + Wind (-) | 10 h |

Safety factors

| | | | |
|--------------|------|--------------|----------------------------|
| $\gamma_F =$ | 1,50 | "=1,5 x LC1" | Permanent Loads |
| $\gamma_F =$ | 1,60 | "=1,6X(LC3) | Maximum Loads (short time) |

Design loads

| | MAX. (Warp) | MAX. (Fill) |
|-----------|-------------|-------------|
| $n_{t,d}$ | 1,05 KN/m | 1,05 KN/m |
| $n_{0,d}$ | 3,36 KN/m | 3,36 KN/m |

| Material | ETFE | | 200 μm |
|------------------|-------|-------------------------|-------------|
| Tensile strength | units | Tensile strength (KN/m) | |
| Warp(Kette) | 48 | N/mm ² | 9,60 KN/m |
| Fill(Schuss) | 48 | N/mm ² | 9,60 KN/m |

Tensile strength DIN53354

| | |
|-------------------------|--------------|
| Reduction of connection | 0,9 |
| Number of layers | 1 |
| Factor of variation | 0,95 |
| total | 0,855 |

| | $f_{u,kz 23^\circ} =$ |
|------|-----------------------|
| Warp | 8,21 KN/m |
| Fill | 8,21 KN/m |

Reduction factors

| | | |
|---|--|------|
| Biaxial behavior | A_0 | 1,1 |
| Long-term Loads | A_1 | 2,2 |
| Environment influence | A_2 | 1,2 |
| High temp. | A_3 | 1,05 |
| | $\gamma_m =$ | 1,5 |
| $\gamma_m \times A_{1,t}$ Permanent Loads | $\gamma_m \times A_0 \times A_1 \times A_2 \times A_3$ | 4,57 |
| $\gamma_m \times A_{1,0}$ Max. Loads Wind | $\gamma_m \times A_0 \times A_2$ | 1,98 |

Limited strength

| | | FILL | WARP |
|-----------------|------------|-----------|-----------|
| Permanent Loads | $n_{t,Rd}$ | 1,79 KN/m | 1,79 KN/m |
| Max. Loads Wind | $n_{0,Rd}$ | 4,15 KN/m | 4,15 KN/m |

Design-check

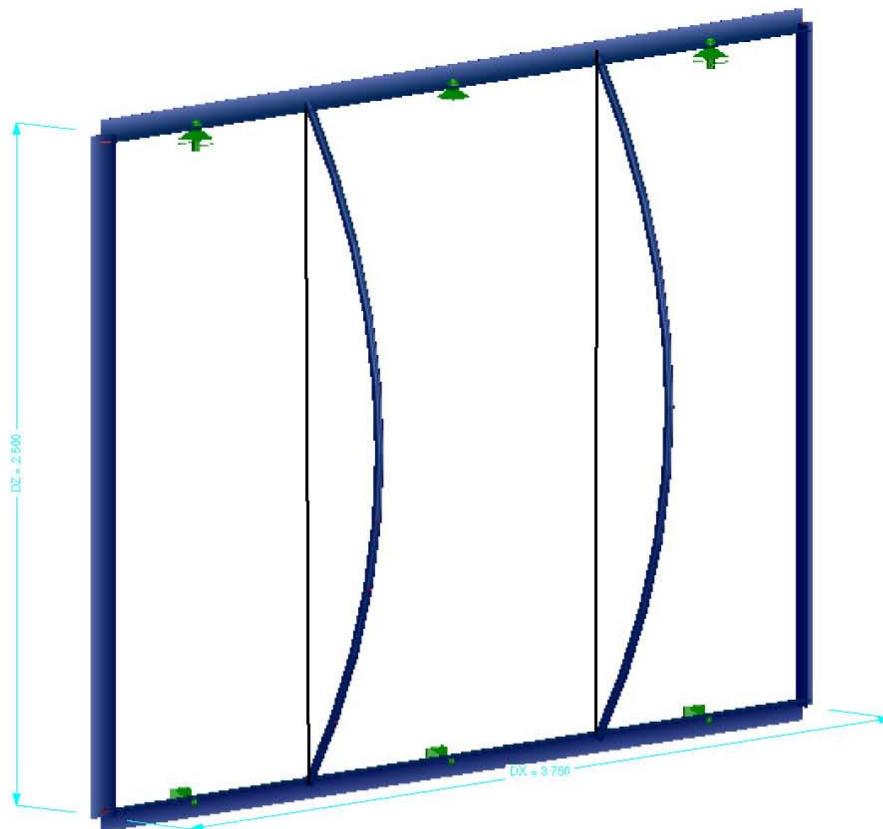
| | | | | $\gamma_m \times \gamma_f$ |
|------|------------------------|----------|----|----------------------------|
| Warp | $n_{t,d} / n_{t,Rd} =$ | 0,59 < 1 | ok | 6,9 |
| Fill | $n_{t,d} / n_{t,Rd} =$ | 0,59 < 1 | ok | 6,9 |
| Warp | $n_{t,d} / n_{t,Rd} =$ | 0,81 < 1 | ok | 3,2 |
| Fill | $n_{t,d} / n_{t,Rd} =$ | 0,81 < 1 | ok | 3,2 |

6 Bemessung Rahmen

GRAFIK

STRUKTUR

Isometrie





Hightex GmbH
Nordstraße 10, 83253 RIMSTING
Tel: 08051/6888-281 - Fax: 08051/6888-290

Seite: 15
Blatt: 1

STRUKTUR

Projekt: **FORSCHUNG** Position: **Rahmen01**
Rahmen 01

Datum: 20.02.2009

INHALT

| | |
|---|-----------|
| Basisangaben | 15 |
| Struktur | 15 |
| Materialien | 15 |
| Querschnitte | 15 |
| Stäbe | 16 |
| Knotenlager | 16 |
| Belastung | 17 |
| Lastfälle | 17 |
| LF 1 | 17 |
| LF 2 | 17 |
| LF 3 | 17 |
| Lastfallkombinationen | 17 |
| Ergebnisse - Lastfälle, LF-Gruppen | 18 |
| Ergebnisse - Zusammenfassung | 18 |
| Querschnitte - Schnittgrößen | 18 |

INHALT

| | |
|------------------------------------|-----------|
| Knoten - Lagerkräfte | 19 |
| STAHL | 20 |
| FA1 - Spannungsanalyse | 20 |
| Basisangaben | 20 |
| Details | 20 |
| Materialien | 20 |
| Querschnitte | 20 |
| Ergebnisse | 21 |
| Querschnittsdetails | 21 |
| DUENQ F02-N | 21 |
| DUENQ F02-N | 21 |
| Spannungen | 21 |
| Spannungen querschnittsweise | 28 |
| Maßgebende Schnittgrößen stabweise | 28 |
| Stückliste stabweise | 28 |

BASISANGABEN

BERECHNUNGSART

- | | |
|--|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Statik | <input checked="" type="checkbox"/> Theorie I. Ordnung (lineare Berechnung) |
| <input type="checkbox"/> Nachweis | <input type="checkbox"/> Theorie II. Ordnung (nichtlinear nach Timoshenko) |
| <input type="checkbox"/> Dynamik | <input type="checkbox"/> Theorie großer Verschiebungen (nichtlinear nach Newton-Raphson) |
| | <input type="checkbox"/> Durchschlagproblem (nichtlinear nach Newton-Raphson) |
| <input checked="" type="checkbox"/> Lastfälle | <input checked="" type="checkbox"/> Bemessungsfälle |
| <input type="checkbox"/> LF-Gruppen | <input type="checkbox"/> Dynamikfälle |
| <input checked="" type="checkbox"/> LF-Kombinationen | <input type="checkbox"/> Knickfiguren |

STRUKTURKENNWERTE

- | | | |
|---|-----------------|-----------------------|
| <input type="checkbox"/> 1D-Durchlaufträger | 34 Knoten | 38 Stäbe |
| <input type="checkbox"/> 2D-Stabwerk | 5 Materialien | 2 Seilstäbe |
| <input checked="" type="checkbox"/> 3D-Stabwerk | 3 Querschnitte | 0 Voutenstäbe |
| <input type="checkbox"/> Trägerrost | 0 Stabergelenke | 0 EI, gebettete Stäbe |
| | 0 Stabteilungen | 0 Stabsätze |

MATERIALIEN

| Material Nr. | Material-Bezeichnung | Elast.-Modul E [kN/cm ²] | Schubmodul G [kN/cm ²] | Sp. Gewicht γ [kN/m ³] | Wärmedehn. α [1/°C] | Beiwert γ _M [-] |
|--------------|----------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------|----------------------------|
| 1 | Aluminium EN AWF22 | 7000.00 | 2700.00 | 27.00 | 2.3000E-05 | 1.100 |
| 2 | Baustahl S 235 J0 | 21000.00 | 8100.00 | 78.50 | 1.2000E-05 | 1.100 |
| 3 | ALU-F22 | 7000.00 | 2700.00 | 27.00 | 2.3000E-05 | 1.100 |
| 4 | Baustahl S 235 J0 | 21000.00 | 8100.00 | 78.50 | 1.2000E-05 | 1.100 |
| 5 | Aluminium | 7000.00 | 2700.00 | 27.00 | 2.4000E-05 | 1.100 |

QUERSCHNITTE

| Quers. Nr. | Querschnitts-Bezeichnung | Mater. Nr. | I _y [cm ⁴] A [cm ²] | I _x [cm ⁴] A _x [cm ²] | I _z [cm ⁴] A _z [cm ²] | Hauptachsen α [°] | Kommentar |
|------------|--------------------------|------------|---|--|--|-------------------|-----------|
| 1 | RO 33,7x5,6 (Mannesmann) | 4 | 9.76 4.94 | 5.07 | 5.07 | 0.00 | |
| 2 | DUENQ F02-N | 2 | 0.47 8.72 | 63.62 3.81 | 45.24 1.46 | 101.07 | |
| 3 | Kreis 8 | 2 | 0.04 0.50 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | |

RO 33,7x5,6 (Min., DUENQ F02-N)



RSTAB 6.03.3331 - Räumliche Stabwerke

www.dlupal.de



Hightex GmbH
Nordstraße 10, 83253 RIMSTING
Tel. 08051/6888-281 - Fax: 08051/6888-290

Seite: 16

Blatt: 1

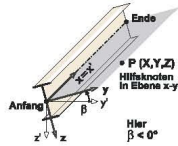
STRUKTUR

Projekt: **FORSCHUNG**

Position: **Rahmen01**

Datum: 20.02.2009

Rahmen 01



STÄBE

| Stab Nr. | Stabtyp | Knoten | | Drehung Typ | β [°] | Querschnitt | | Gelenk | | Exz. Nr. | Teil. Nr. | Länge L [m] | |
|----------|------------|--------|------|-------------|--------|-------------|------|--------|---|----------|-----------|-------------|----|
| | | Anfang | Ende | | | Anfang | Ende | | | | | | |
| 1 | Balkenstab | 1 | 5 | Winkel | 180.00 | 2 | 2 | - | - | - | - | 0.425 | X |
| 2 | Balkenstab | 5 | 7 | Winkel | 180.00 | 2 | 2 | - | - | - | - | 0.600 | X |
| 3 | Balkenstab | 7 | 33 | Winkel | 180.00 | 2 | 2 | - | - | - | - | 0.775 | X |
| 4 | Balkenstab | 9 | 11 | Winkel | 180.00 | 2 | 2 | - | - | - | - | 0.600 | X |
| 5 | Balkenstab | 11 | 2 | Winkel | 180.00 | 2 | 2 | - | - | - | - | 0.425 | X |
| 6 | Balkenstab | 2 | 13 | Winkel | 180.00 | 2 | 2 | - | - | - | - | 1.200 | Z |
| 7 | Balkenstab | 3 | 12 | Winkel | 0.00 | 2 | 2 | - | - | - | - | 0.425 | X |
| 8 | Balkenstab | 12 | 10 | Winkel | 0.00 | 2 | 2 | - | - | - | - | 0.600 | X |
| 9 | Balkenstab | 10 | 34 | Winkel | 0.00 | 2 | 2 | - | - | - | - | 0.775 | X |
| 10 | Balkenstab | 8 | 6 | Winkel | 0.00 | 2 | 2 | - | - | - | - | 0.600 | X |
| 11 | Balkenstab | 6 | 4 | Winkel | 0.00 | 2 | 2 | - | - | - | - | 0.425 | X |
| 12 | Balkenstab | 4 | 14 | Winkel | 180.00 | 2 | 2 | - | - | - | - | 1.200 | Z |
| 13 | Balkenstab | 13 | 3 | Winkel | 180.00 | 2 | 2 | - | - | - | - | 1.200 | Z |
| 14 | Balkenstab | 14 | 1 | Winkel | 180.00 | 2 | 2 | - | - | - | - | 1.200 | Z |
| 35 | Balkenstab | 33 | 9 | Winkel | 180.00 | 2 | 2 | - | - | - | - | 0.775 | X |
| 36 | Balkenstab | 34 | 8 | Winkel | 0.00 | 2 | 2 | - | - | - | - | 0.775 | X |
| 37 | Balkenstab | 7 | 16 | Winkel | 0.00 | 1 | 1 | - | - | - | - | 0.236 | YZ |
| 38 | Balkenstab | 16 | 17 | Winkel | 0.00 | 1 | 1 | - | - | - | - | 0.269 | YZ |
| 39 | Balkenstab | 17 | 18 | Winkel | 0.00 | 1 | 1 | - | - | - | - | 0.260 | YZ |
| 40 | Balkenstab | 18 | 19 | Winkel | 0.00 | 1 | 1 | - | - | - | - | 0.254 | YZ |
| 41 | Balkenstab | 19 | 20 | Winkel | 0.00 | 1 | 1 | - | - | - | - | 0.250 | YZ |
| 42 | Balkenstab | 20 | 21 | Winkel | 0.00 | 1 | 1 | - | - | - | - | 0.250 | YZ |
| 43 | Balkenstab | 21 | 22 | Winkel | 0.00 | 1 | 1 | - | - | - | - | 0.254 | YZ |
| 44 | Balkenstab | 22 | 23 | Winkel | 0.00 | 1 | 1 | - | - | - | - | 0.260 | YZ |
| 45 | Balkenstab | 23 | 24 | Winkel | 0.00 | 1 | 1 | - | - | - | - | 0.269 | YZ |
| 46 | Balkenstab | 24 | 8 | Winkel | 0.00 | 1 | 1 | - | - | - | - | 0.236 | YZ |
| 47 | Balkenstab | 9 | 35 | Winkel | 0.00 | 1 | 1 | - | - | - | - | 0.236 | YZ |
| 48 | Balkenstab | 35 | 36 | Winkel | 0.00 | 1 | 1 | - | - | - | - | 0.269 | YZ |
| 49 | Balkenstab | 36 | 37 | Winkel | 0.00 | 1 | 1 | - | - | - | - | 0.260 | YZ |
| 50 | Balkenstab | 37 | 38 | Winkel | 0.00 | 1 | 1 | - | - | - | - | 0.254 | YZ |
| 51 | Balkenstab | 38 | 39 | Winkel | 0.00 | 1 | 1 | - | - | - | - | 0.250 | YZ |
| 52 | Balkenstab | 39 | 40 | Winkel | 0.00 | 1 | 1 | - | - | - | - | 0.250 | YZ |
| 53 | Balkenstab | 40 | 41 | Winkel | 0.00 | 1 | 1 | - | - | - | - | 0.254 | YZ |
| 54 | Balkenstab | 41 | 42 | Winkel | 0.00 | 1 | 1 | - | - | - | - | 0.260 | YZ |
| 55 | Balkenstab | 42 | 43 | Winkel | 0.00 | 1 | 1 | - | - | - | - | 0.269 | YZ |
| 56 | Balkenstab | 43 | 10 | Winkel | 0.00 | 1 | 1 | - | - | - | - | 0.236 | YZ |
| 57 | Seilstab | 7 | 8 | Winkel | 0.00 | 3 | 3 | - | - | - | - | 2.400 | Z |
| 58 | Seilstab | 10 | 9 | Winkel | 0.00 | 3 | 3 | - | - | - | - | 2.400 | Z |



KNOTENLAGER

| Lager Nr. | Knoten Nr. | Folge | Lagerdrehung [°] | | | Stützung bzw. Einspannung | | | | | | |
|-----------|---------------------|-------|------------------|------|------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| | | | um X | um Y | um Z | u _X | u _Y | u _Z | φ _X | φ _Y | φ _Z | |
| 1 | 6,12 | ZYX | 0.00 | 0.00 | 0.00 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3 | 34 | ZYX | 0.00 | 0.00 | 0.00 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 4 | Gelenkig 5,11,33 | ZYX | 0.00 | 0.00 | 0.00 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |



RSTAB 6.03.3331 - Räumliche Stabwerke

www.diubal.de



Hightex GmbH
Nordstraße 10, 83253 RIMSTING
Tel: 08051/6888-281 - Fax: 08051/6888-290

Seite: 17
Blatt: 1

BELASTUNG

Projekt: **FORSCHUNG**

Position: **Rahmen01**
Rahmen 01

Datum: 20.02.2009

■ **LASTFÄLLE**

| LF Nr. | LF-Bezeichnung | LF-Faktor | Lastfalltyp | Eigengewicht | Berechnungs-Theorie |
|--------|----------------|-----------|--------------|--------------|---------------------|
| 1 | | 1.0000 | Ständig | -1.00 | I. Ordnung |
| 2 | | 1.0000 | Veränderlich | - | I. Ordnung |
| 3 | | 1.0000 | Veränderlich | - | I. Ordnung |

LF1

■ **STABLASTEN**

LF1

| Nr. | Beziehen auf | An Stäben Nr. An Stabs. Nr. | Last-Art | Last-Verlauf | Last-Richtung | Bezugs-Länge | Lastparameter | | |
|-----|--------------|--------------------------------|----------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------|---------|
| | | | | | | | Symbol | Wert | Einheit |
| 1 | Stäbe | 7-11,36 | Kraft | Konstant | Z | Projektion Z | p | -0.900 | kN/m |
| 2 | Stäbe | 1-5,35 | Kraft | Konstant | Z | Projektion Z | p | 0.900 | kN/m |
| 3 | Stäbe | 6,13 | Kraft | Konstant | X | Projektion X | p | -0.900 | kN/m |
| 4 | Stäbe | 12,14 | Kraft | Konstant | X | Projektion X | p | 0.900 | kN/m |

LF2

■ **STABLASTEN**

LF2

| Nr. | Beziehen auf | An Stäben Nr. An Stabs. Nr. | Last-Art | Last-Verlauf | Last-Richtung | Bezugs-Länge | Lastparameter | | |
|-----|--------------|--------------------------------|----------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------|---------|
| | | | | | | | Symbol | Wert | Einheit |
| 1 | Stäbe | 12,14 | Kraft | Konstant | X | Projektion X | p | 1.900 | kN/m |
| 2 | Stäbe | 6,13 | Kraft | Konstant | X | Projektion X | p | -1.900 | kN/m |
| 3 | Stäbe | 37-56 | Kraft | Konstant | Y | Projektion Y | p | -1.900 | kN/m |
| 4 | Stäbe | 1-5,35 | Kraft | Konstant | Z | Projektion Z | p | 1.900 | kN/m |
| 5 | Stäbe | 7-11,36 | Kraft | Konstant | Z | Projektion Z | p | -1.900 | kN/m |

LF3

■ **STABLASTEN**

LF3

| Nr. | Beziehen auf | An Stäben Nr. An Stabs. Nr. | Last-Art | Last-Verlauf | Last-Richtung | Bezugs-Länge | Lastparameter | | |
|-----|--------------|--------------------------------|----------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------|---------|
| | | | | | | | Symbol | Wert | Einheit |
| 1 | Stäbe | 7-11,36 | Kraft | Konstant | Z | Projektion Z | p | -1.900 | kN/m |
| 2 | Stäbe | 1-5,35 | Kraft | Konstant | Z | Projektion Z | p | 1.900 | kN/m |

■ **LASTFALLKOMBINATIONEN**

| LK Nr. | LK-Bezeichnung | Kombinationskriterium |
|--------|----------------|-----------------------|
| 1 | Verformung | LF1/S + LF2 |
| 2 | bemessung | 1.50*LF2 |



RSTAB 6.03.3331 - Räumliche Stabwerke

www.dlubal.de



Hightex GmbH
Nordstraße 10, 83253 RIMSTING
Tel: 08051/6888-281 - Fax: 08051/6888-290

Seite: 18
Blatt: 1

ERGEBNISSE

Projekt: **FORSCHUNG** Position: **Rahmen01**
Rahmen 01

Datum: 20.02.2009

■ ERGEBNISSE - ZUSAMMENFASSUNG

| Bezeichnung | Wert | Einheit | Kommentar |
|--|------------|---------|---|
| LF1 | | | |
| Summe Belastung in X | 0.00 | kN | |
| Summe Lagerkräfte in X | 0.00 | kN | |
| Summe Belastung in Y | 0.00 | kN | |
| Summe Lagerkräfte in Y | 0.00 | kN | |
| Summe Belastung in Z | -1.04 | kN | |
| Summe Lagerkräfte in Z | -1.04 | kN | |
| Max. Verschiebung in X | -0.9 | mm | Stab Nr. 40, x: 0.114 m |
| Max. Verschiebung in Y | 4.1 | mm | Stab Nr. 41, x: 0.225 m |
| Max. Verschiebung in Z | 4.1 | mm | Stab Nr. 3, x: 0.775 m |
| Max. Verschiebung vektoriell | 4.4 | mm | Stab Nr. 41, x: 0.213 m |
| Max. Verdrehung um X | -5.8 | mrاد | Stab Nr. 37, x: 0.012 m |
| Max. Verdrehung um Y | -3.1 | mrاد | Stab Nr. 2, x: 0.210 m |
| Max. Verdrehung um Z | 0.2 | mrاد | Stab Nr. 44, x: 0.065 m |
| Berechnungsart | I. Ordnung | | Theorie I. Ordnung (lineare Berechnung) |
| Anzahl der Iterationen | 100 | | Achtung: Max. Iterationsanzahl erreicht, ohne dass Konvergenzkriterium erfüllt wurde! |
| LF2 | | | |
| Summe Belastung in X | 0.00 | kN | |
| Summe Lagerkräfte in X | 0.00 | kN | |
| Summe Belastung in Y | -9.12 | kN | |
| Summe Lagerkräfte in Y | -9.12 | kN | |
| Summe Belastung in Z | 0.00 | kN | |
| Summe Lagerkräfte in Z | 0.00 | kN | |
| Max. Verschiebung in X | -3.1 | mm | Stab Nr. 6, x: 1.200 m |
| Max. Verschiebung in Y | -1.5 | mm | Stab Nr. 41, x: 0.250 m |
| Max. Verschiebung in Z | -0.8 | mm | Stab Nr. 1, x: 0.319 m |
| Max. Verschiebung vektoriell | 3.2 | mm | Stab Nr. 6, x: 1.200 m |
| Max. Verdrehung um X | 1.5 | mrاد | Stab Nr. 39, x: 0.091 m |
| Max. Verdrehung um Y | -3.7 | mrاد | Stab Nr. 12, x: 0.360 m |
| Max. Verdrehung um Z | -1.1 | mrاد | |
| Berechnungsart | I. Ordnung | | Theorie I. Ordnung (lineare Berechnung) |
| Anzahl der Iterationen | 2 | | |
| LF3 | | | |
| Summe Belastung in X | 0.00 | kN | |
| Summe Lagerkräfte in X | 0.00 | kN | |
| Summe Belastung in Y | 0.00 | kN | |
| Summe Lagerkräfte in Y | 0.00 | kN | |
| Summe Belastung in Z | 0.00 | kN | |
| Summe Lagerkräfte in Z | 0.00 | kN | |
| Max. Verschiebung in X | 4.1 | mm | Stab Nr. 6, x: 1.080 m |
| Max. Verschiebung in Y | 16.4 | mm | Stab Nr. 41, x: 0.250 m |
| Max. Verschiebung in Z | 15.1 | mm | Stab Nr. 3, x: 0.775 m |
| Max. Verschiebung vektoriell | 17.5 | mm | Stab Nr. 41, x: 0.238 m |
| Max. Verdrehung um X | 22.4 | mrاد | Stab Nr. 46, x: 0.213 m |
| Max. Verdrehung um Y | -10.3 | mrاد | Stab Nr. 1, x: 0.425 m |
| Max. Verdrehung um Z | 0.5 | mrاد | Stab Nr. 44, x: 0.078 m |
| Berechnungsart | I. Ordnung | | Theorie I. Ordnung (lineare Berechnung) |
| Anzahl der Iterationen | 100 | | Achtung: Max. Iterationsanzahl erreicht, ohne dass Konvergenzkriterium erfüllt wurde! |
| Gesamt | | | |
| Max. Verschiebung in X | 4.1 | mm | LF3, Stab Nr. 6, x: 1.080 m |
| Max. Verschiebung in Y | 16.4 | mm | LF3, Stab Nr. 41, x: 0.250 m |
| Max. Verschiebung in Z | 15.1 | mm | LF3, Stab Nr. 3, x: 0.775 m |
| Max. Verschiebung vektoriell | 17.5 | mm | LF3, Stab Nr. 41, x: 0.238 m |
| Max. Verdrehung um X | 22.4 | mrاد | LF3, Stab Nr. 46, x: 0.213 m |
| Max. Verdrehung um Y | -10.3 | mrاد | LF3, Stab Nr. 1, x: 0.425 m |
| Max. Verdrehung um Z | -1.1 | mrاد | LF2, |
| Anzahl 1D-Finite-Elemente (Stabelemente) | 38 | | |
| Anzahl FE-Knoten | 34 | | |
| Anzahl der Gleichungen | 204 | | |
| Gleichungslösermethode | Direkt | | |
| Maximale Anzahl Iterationen | 100 | | |
| Anzahl der Laststeigerungen | 5 | | |
| Stabteilungen für Ergebnisse der Stäbe | 10 | | |
| Stabteilungen der Seil-, Bettungs- und Voutenstäbe | 6 | | |
| Stab-Schubsteifigkeiten (A-y, A-z) berücksichtigen | Ja | | |

■ QUERSCHNITTE - SCHNITTGRÖSSEN

| Stab Nr. | LF/LG | Knoten Nr. | Stelle x [m] | Normal- und Querkräfte [kN] | | | Momente [kNm] | | |
|---|-------|------------|--------------------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | N | V _y | V _z | M _T | M _y | M _z |
| Querschnitt-Nr. 1: RQ 33.7x5.6 (Mannesmann) | | | | | | | | | |
| 46 | LF1 | 0.236 | MAX N | -0.13 | -0.03 | 0.09 | 0.00 | 0.00 | 0.02 |
| 37 | LF2 | 0.000 | MIN N | -4.45 | 0.01 | 0.11 | 0.01 | 0.00 | 0.02 |
| 37 | LF3 | 0.000 | MAX V _y | -0.71 | 0.08 | 0.45 | 0.05 | -0.01 | 0.12 |
| 42 | LF3 | 0.000 | MIN V _y | -0.84 | -0.08 | 0.05 | 0.00 | -0.29 | -0.03 |
| 46 | LF3 | 0.000 | MAX V _z | -0.71 | -0.08 | 0.45 | 0.01 | -0.10 | 0.05 |
| 38 | LF2 | 0.000 | MIN V _z | -4.26 | 0.01 | -0.37 | 0.00 | 0.06 | 0.02 |
| 37 | LF3 | 0.000 | MAX M _T | -0.71 | 0.08 | 0.45 | 0.05 | -0.01 | 0.12 |
| 47 | LF3 | 0.000 | MIN M _T | -0.71 | -0.08 | 0.45 | -0.05 | -0.01 | -0.12 |
| 41 | LF3 | 0.250 | MAX M _y | -0.84 | 0.08 | 0.05 | 0.01 | 0.29 | 0.03 |
| 42 | LF3 | 0.000 | MIN M _y | -0.84 | -0.08 | 0.05 | 0.00 | -0.29 | -0.03 |
| 37 | LF3 | 0.000 | MAX M _z | -0.71 | 0.08 | 0.45 | 0.05 | -0.01 | 0.12 |
| 47 | LF3 | 0.000 | MIN M _z | -0.71 | -0.08 | 0.45 | -0.05 | -0.01 | -0.12 |
| Querschnitt-Nr. 2: DUENQ F02-N | | | | | | | | | |



RSTAB 6.03.3331 - Räumliche Stabwerke

www.dlubal.de



Hightex GmbH
Nordstraße 10, 83253 RIMSTING
Tel.: 08051/6888-281 - Fax: 08051/6888-290

Seite: 19
Blatt: 1

ERGEBNISSE

Projekt: **FORSCHUNG**

Position: **Rahmen01**
Rahmen 01

Datum: 20.02.2009

■ QUERSCHNITTE - SCHNITTGRÖSSEN

| Stab Nr. | LF/LG | Knoten Nr. | Stelle x [m] | Normal- und Querkräfte [kN] | | | Momente [kNm] | | |
|----------------------------|-------|------------|--------------------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | N | V _y | V _z | M _T | M _y | M _z |
| 9 | LF3 | 0.000 | MAX N | 0.41 | -0.55 | 0.12 | 0.00 | -0.08 | -0.35 |
| 6 | LF3 | 0.000 | MIN N | -2.58 | 0.33 | -0.06 | 0.00 | 0.17 | 0.92 |
| 1 | LF3 | 0.000 | MAX V _y | -0.34 | 2.53 | -0.49 | -0.01 | 0.18 | 0.92 |
| 5 | LF3 | 0.425 | MIN V _y | -0.34 | -2.53 | 0.49 | 0.01 | 0.18 | 0.92 |
| 35 | LF2 | 0.775 | MAX V _z | -2.35 | -1.18 | 1.68 | 0.00 | 0.56 | 0.10 |
| 3 | LF2 | 0.000 | MIN V _z | -2.35 | 1.18 | -1.68 | 0.00 | 0.56 | 0.10 |
| 10 | LF3 | 0.000 | MAX M _T | 0.34 | 1.37 | -0.29 | 0.01 | -0.05 | -0.29 |
| 7 | LF3 | 0.000 | MIN M _T | 0.34 | 2.53 | -0.50 | -0.01 | 0.02 | 0.13 |
| 8 | LF2 | 0.600 | MAX M _y | -2.23 | -0.51 | 1.01 | 0.00 | 0.57 | 0.14 |
| 3 | LF2 | 0.775 | MIN M _y | -2.35 | -0.27 | -1.38 | 0.00 | -0.62 | -0.25 |
| 6 | LF3 | 0.000 | MAX M _z | -2.58 | 0.33 | -0.06 | 0.00 | 0.17 | 0.92 |
| 3 | LF3 | 0.775 | MIN M _z | -0.41 | -0.02 | -0.09 | 0.00 | -0.32 | -1.12 |
| Querschnitt Nr. 3: Kreis 8 | | | | | | | | | |
| 57 | LF2 | 0.000 | MAX N | 1.98 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 57 | LF2 | 0.000 | MIN N | 1.98 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 57 | LF2 | 0.000 | MAX V _y | 1.98 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 57 | LF2 | 0.000 | MIN V _y | 1.98 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 57 | LF2 | 0.000 | MAX V _z | 1.98 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 57 | LF2 | 0.000 | MIN V _z | 1.98 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 57 | LF2 | 0.000 | MAX M _T | 1.98 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 57 | LF2 | 0.000 | MIN M _T | 1.98 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 57 | LF2 | 0.000 | MAX M _y | 1.98 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 57 | LF2 | 0.000 | MIN M _y | 1.98 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 57 | LF2 | 0.000 | MAX M _z | 1.98 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 57 | LF2 | 0.000 | MIN M _z | 1.98 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

■ KNOTEN - LAGERKRÄFTE

| Stab Nr. | LF/LG | Knoten Nr. | Stelle x [m] | N | V _y | V _z | M _T | M _y | M _z |
|----------|-------|------------|--------------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 5 | LF1 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| | LF3 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| | LF2 | 0.00 | -0.89 | 0.32 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| | LF1 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| | LF3 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| | LF2 | 0.00 | -0.89 | 0.32 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| | LF1 | 0.00 | -0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| | LF3 | 0.00 | -0.18 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| | LF2 | 0.00 | -2.77 | -0.64 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| | LF1 | 0.00 | 0.00 | -1.04 | | | | | |
| | LF2 | 0.00 | -9.12 | 0.00 | | | | | |
| | LF3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | | | | |



RSTAB 6.03.3331 - Räumliche Stabwerke

www.dlubal.de



Hightex GmbH
Nordstraße 10, 83253 RIMSTING
Tel: 08051/6888-281 - Fax: 08051/6888-290

Seite: 20
Blatt: 1

STAHL

Projekt: **FORSCHUNG** Position: **Rahmen01**
Rahmen 01

Datum: 20.02.2009

STAHL
FA1
Spannungsanalyse

BASISANGABEN

Zu bemessende Stäbe: Alle
Zu bemessende Stabsätze: Alle
Zu bemessende Lastfallkombinationen: LK1 LK2 Verformung bemessung

DETAILS

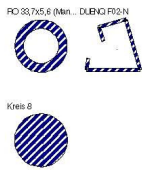
Örtlich begrenzte Plastizierung berücksichtigen:
Normalspannungen mit Alpha-pl berechnen:
Berechnungsart bei Spannungen aus LK: Spannungen einzelner Lastfälle aus LK berechnen und diese dann nach LK-Kriterium überlagern
FAKTOREN FÜR SIGMA-V
Sigma 1.00
Tau 3.00
Vereinfachte Berücksichtigung exzentrischer Lasteinleitung:

MATERIALIEN

| Mat.-Nr. | Material-Bezeichnung | Teilsich.-Faktor γ_M [] | Streckgrenze f_{yk} [kN/cm ²] | Grenzspannungen [kN/cm ²] | | | |
|----------|----------------------|---------------------------------|---|---------------------------------------|------------------|--------------|------------------|
| | | | | Manuell | grenz σ_x | grenz τ | grenz σ_y |
| 2 | Baustahl S 235 J0 | 1.10 | 23.50 | <input type="checkbox"/> | 21.36 | 12.33 | 21.36 |
| 4 | Baustahl S 235 J0 | 1.10 | 23.50 | <input type="checkbox"/> | 21.36 | 12.33 | 21.36 |

QUERSCHNITTE

| Quer.-Nr. | Mat.-Nr. | Querschnittsbezeichnung | I_x [cm ⁴] A [cm ²] | I_y [cm ⁴] Alpha _{pl,y} | I_z [cm ⁴] Alpha _{pl,z} | Kommentar |
|-----------|----------|--|--|---|---|-----------|
| 1 | 4 | RO 33,7x5,6 (Mannesmann) | 9.759 | 5.073 | 5.073 | |
| | | | 4.944 | 1.488 | 1.488 | |
| 2 | 2 | DUENQ F02-N $\alpha = 101.07^\circ$ | 4.695E-01 | 63.62 | 45.24 | |
| | | | 8.718 | 1.56 | 1.522 | |
| 3 | 2 | Kreis 8 | 4.021E-02 | 2.011E-02 | 2.011E-02 | |
| | | | 5.027E-01 | 1.00 | 1.00 | |



RSTAB 6.03.3331 - Räumliche Stabwerke

www.dlubal.de



Hightex GmbH
Nordstraße 10, 83253 RIMSTING
Tel: 08051/6888-281 - Fax: 08051/6888-290

Seite: 21
Blatt: 1

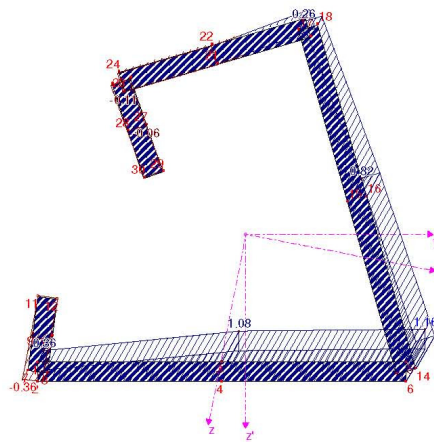
STAHL

Projekt: **FORSCHUNG** Position: **Rahmen01**
Rahmen 01

Datum: 20.02.2009

■ **DUENQ F02-N**

2 - DUENQ F02-N
Tau gesamt
Stab Nr. 3, x: 0.000 m



Min : -0.36 kN/cm² (8)
Max : 1.16 kN/cm² (5)

■ **SPANNUNGEN**

| S-Punkt Nr. | Spannungsart | Spannung [kN/cm ²] | | Aus-nutzung |
|-------------------|-------------------|--------------------------------|-------|-------------|
| | | vorn | grenz | |
| 1 | Sigma gesamt | 5.20 | 21.36 | 0.24 |
| | Sigma N | -0.41 | 21.36 | 0.02 |
| | Sigma M-y | 4.41 | 21.36 | 0.21 |
| | Sigma M-z | -1.28 | 21.36 | 0.06 |
| | Sigma N+M-y | 4.01 | 21.36 | 0.19 |
| | Sigma N+M-z | -1.42 | 21.36 | 0.07 |
| | Sigma M | 5.61 | 21.36 | 0.26 |
| | Sigma Zug | 5.20 | 21.36 | 0.24 |
| | Sigma Druck | -1.63 | 21.36 | 0.08 |
| | Sigma Delta | 6.83 | 21.36 | 0.32 |
| | Tau gesamt | 0.36 | 12.33 | 0.03 |
| | Tau V-y | 0.21 | 12.33 | 0.02 |
| | Tau V-z | 0.16 | 12.33 | 0.01 |
| | Tau V | 0.36 | 12.33 | 0.03 |
| | Tau M-T St Venant | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T Bredt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Sigma-v | 5.24 | 21.36 | 0.25 |
| | 2 | Sigma gesamt | 5.69 | 21.36 |
| Sigma N | | -0.41 | 21.36 | 0.02 |
| Sigma M-y | | 4.93 | 21.36 | 0.23 |
| Sigma M-z | | -1.25 | 21.36 | 0.06 |
| Sigma N+M-y | | 4.52 | 21.36 | 0.21 |
| Sigma N+M-z | | -1.39 | 21.36 | 0.07 |
| Sigma M | | 6.10 | 21.36 | 0.29 |
| Sigma Zug | | 5.69 | 21.36 | 0.27 |
| Sigma Druck | | -1.62 | 21.36 | 0.08 |
| Sigma Delta | | 7.32 | 21.36 | 0.34 |
| Tau gesamt | | 0.36 | 12.33 | 0.03 |
| Tau V-y | | 0.21 | 12.33 | 0.02 |
| Tau V-z | | 0.16 | 12.33 | 0.01 |
| Tau V | | 0.36 | 12.33 | 0.03 |
| Tau M-T St Venant | | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Tau M-T Bredt | | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Tau M-T | | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Sigma-v | | 5.73 | 21.36 | 0.27 |
| 3 | | Sigma gesamt | 3.05 | 21.36 |
| | Sigma N | -0.41 | 21.36 | 0.02 |
| | Sigma M-y | 3.46 | 21.36 | 0.16 |
| | Sigma M-z | 0.01 | 21.36 | 0.00 |



RSTAB 6.03.3331 - Räumliche Stabwerke

www.dlupal.de



Hightex GmbH
Nordstraße 10, 83253 RIMSTING
Tel: 08051/6888-281 - Fax: 08051/6888-290

Seite: 22
Blatt: 1

STAHL

Projekt: **FORSCHUNG** Position: **Rahmen01** Datum: 20.02.2009
Rahmen 01

SPANNUNGEN

| S-Punkt Nr. | Spannungsart | Spannung [kN/cm ²] | | Aus- nutzung |
|-------------------|-------------------|--------------------------------|-------|-----------------|
| | | vorh | grenz | |
| 3 | Sigma N+M-y | 3.06 | 21.36 | 0.14 |
| | Sigma N+M-z | -0.41 | 21.36 | 0.02 |
| | Sigma M | 3.45 | 21.36 | 0.16 |
| | Sigma Zug | 3.05 | 21.36 | 0.14 |
| | Sigma Druck | -0.29 | 21.36 | 0.01 |
| | Sigma Delta | 3.34 | 21.36 | 0.16 |
| | Tau gesamt | 1.08 | 12.33 | 0.09 |
| | Tau V-y | 0.47 | 12.33 | 0.04 |
| | Tau V-z | 0.62 | 12.33 | 0.05 |
| | Tau V | 1.08 | 12.33 | 0.09 |
| | Tau M-T St.Venant | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T Bredt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Sigma-v | 3.57 | 21.36 | 0.17 |
| | Sigma gesamt | 3.54 | 21.36 | 0.17 |
| | 4 | Sigma N | -0.41 | 21.36 |
| Sigma M-y | | 3.98 | 21.36 | 0.19 |
| Sigma M-z | | 0.04 | 21.36 | 0.00 |
| Sigma N+M-y | | 3.58 | 21.36 | 0.17 |
| Sigma N+M-z | | -0.44 | 21.36 | 0.02 |
| Sigma M | | 3.94 | 21.36 | 0.18 |
| Sigma Zug | | 3.54 | 21.36 | 0.17 |
| Sigma Druck | | -0.29 | 21.36 | 0.01 |
| Sigma Delta | | 3.83 | 21.36 | 0.18 |
| Tau gesamt | | 1.08 | 12.33 | 0.09 |
| Tau V-y | | 0.47 | 12.33 | 0.04 |
| Tau V-z | | 0.62 | 12.33 | 0.05 |
| Tau V | | 1.08 | 12.33 | 0.09 |
| Tau M-T St.Venant | | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Tau M-T Bredt | | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Tau M-T | | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Sigma-v | 4.00 | 21.36 | 0.19 | |
| 5 | Sigma gesamt | 1.63 | 21.36 | 0.08 |
| | Sigma N | -0.41 | 21.36 | 0.02 |
| | Sigma M-y | 2.51 | 21.36 | 0.12 |
| | Sigma M-z | 1.30 | 21.36 | 0.06 |
| | Sigma N+M-y | 2.11 | 21.36 | 0.10 |
| | Sigma N+M-z | -1.62 | 21.36 | 0.08 |
| | Sigma M | 2.04 | 21.36 | 0.10 |
| | Sigma Zug | 1.63 | 21.36 | 0.08 |
| | Sigma Druck | 0.00 | 21.36 | 0.00 |
| | Sigma Delta | 1.63 | 21.36 | 0.08 |
| | Tau gesamt | 1.16 | 12.33 | 0.09 |
| | Tau V-y | 0.19 | 12.33 | 0.02 |
| | Tau V-z | 0.97 | 12.33 | 0.08 |
| | Tau V | 1.16 | 12.33 | 0.09 |
| | Tau M-T St.Venant | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T Bredt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Tau M-T | 0.00 | 12.33 | 0.00 | |
| Sigma-v | 2.26 | 21.36 | 0.11 | |
| 6 | Sigma gesamt | 1.96 | 21.36 | 0.09 |
| | Sigma N | -0.41 | 21.36 | 0.02 |
| | Sigma M-y | 3.03 | 21.36 | 0.14 |
| | Sigma M-z | 1.32 | 21.36 | 0.06 |
| | Sigma N+M-y | 2.63 | 21.36 | 0.12 |
| | Sigma N+M-z | -1.64 | 21.36 | 0.08 |
| | Sigma M | 2.37 | 21.36 | 0.11 |
| | Sigma Zug | 1.96 | 21.36 | 0.09 |
| | Sigma Druck | 0.00 | 21.36 | 0.00 |
| | Sigma Delta | 1.96 | 21.36 | 0.09 |
| | Tau gesamt | 1.16 | 12.33 | 0.09 |
| | Tau V-y | 0.19 | 12.33 | 0.02 |
| | Tau V-z | 0.97 | 12.33 | 0.08 |
| | Tau V | 1.16 | 12.33 | 0.09 |
| | Tau M-T St.Venant | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T Bredt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Tau M-T | 0.00 | 12.33 | 0.00 | |
| Sigma-v | 2.51 | 21.36 | 0.12 | |
| 7 | Sigma gesamt | 5.53 | 21.36 | 0.26 |
| | Sigma N | -0.41 | 21.36 | 0.02 |
| | Sigma M-y | 4.68 | 21.36 | 0.22 |
| | Sigma M-z | -1.33 | 21.36 | 0.06 |
| | Sigma N+M-y | 4.28 | 21.36 | 0.20 |
| | Sigma N+M-z | -1.47 | 21.36 | 0.07 |
| | Sigma M | 5.93 | 21.36 | 0.28 |
| | Sigma Zug | 5.53 | 21.36 | 0.26 |
| | Sigma Druck | -1.69 | 21.36 | 0.08 |
| | Sigma Delta | 7.22 | 21.36 | 0.34 |
| | Tau gesamt | -0.36 | 12.33 | 0.03 |
| | Tau V-y | -0.21 | 12.33 | 0.02 |
| | Tau V-z | -0.16 | 12.33 | 0.01 |
| | Tau V | -0.36 | 12.33 | 0.03 |
| | Tau M-T St.Venant | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T Bredt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Tau M-T | 0.00 | 12.33 | 0.00 | |
| Sigma-v | 5.53 | 21.36 | 0.26 | |
| 8 | Sigma gesamt | 5.37 | 21.36 | 0.25 |
| | Sigma N | -0.41 | 21.36 | 0.02 |



RSTAB 6.03.3331 - Räumliche Stabwerke

www.dlubal.de



Hightex GmbH
Nordstraße 10, 83253 RIMSTING
Tel: 08051/6888-281 - Fax: 08051/6888-290

Seite: 23
Blatt: 1

STAHL

Projekt: **FORSCHUNG**

Position: **Rahmen01**
Rahmen 01

Datum: 20.02.2009

SPANNUNGEN

| S-Punkt Nr. | Spannungsart | Spannung [kN/cm ²] | | Aus- nutzung |
|-------------------|-------------------|--------------------------------|-------|-----------------|
| | | vorh | grenz | |
| 8 | Sigma M-y | 4.65 | 21.36 | 0.22 |
| | Sigma M-z | -1.19 | 21.36 | 0.06 |
| | Sigma N+M-y | 4.25 | 21.36 | 0.20 |
| | Sigma N+M-z | -1.33 | 21.36 | 0.06 |
| | Sigma M | 5.77 | 21.36 | 0.27 |
| | Sigma Zug | 5.37 | 21.36 | 0.25 |
| | Sigma Druck | -1.55 | 21.36 | 0.07 |
| | Sigma Delta | 6.92 | 21.36 | 0.32 |
| | Tau gesamt | -0.36 | 12.33 | 0.03 |
| | Tau V-y | -0.21 | 12.33 | 0.02 |
| | Tau V-z | -0.16 | 12.33 | 0.01 |
| | Tau V | -0.36 | 12.33 | 0.03 |
| | Tau M-T St.Venant | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T Bredt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Sigma-v | 5.37 | 21.36 | 0.25 |
| | 9 | Sigma gesamt | 4.55 | 21.36 |
| Sigma N | | -0.41 | 21.36 | 0.02 |
| Sigma M-y | | 3.69 | 21.36 | 0.17 |
| Sigma M-z | | -1.35 | 21.36 | 0.06 |
| Sigma N+M-y | | 3.29 | 21.36 | 0.15 |
| Sigma N+M-z | | -1.49 | 21.36 | 0.07 |
| Sigma M | | 4.95 | 21.36 | 0.23 |
| Sigma Zug | | 4.55 | 21.36 | 0.21 |
| Sigma Druck | | -1.66 | 21.36 | 0.08 |
| Sigma Delta | | 6.21 | 21.36 | 0.29 |
| Tau gesamt | | -0.18 | 12.33 | 0.01 |
| Tau V-y | | -0.11 | 12.33 | 0.01 |
| Tau V-z | | -0.07 | 12.33 | 0.01 |
| Tau V | | -0.18 | 12.33 | 0.01 |
| Tau M-T St.Venant | | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Tau M-T Bredt | | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Tau M-T | | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Sigma-v | 4.55 | 21.36 | 0.21 | |
| 10 | Sigma gesamt | 4.39 | 21.36 | 0.21 |
| | Sigma N | -0.41 | 21.36 | 0.02 |
| | Sigma M-y | 3.66 | 21.36 | 0.17 |
| | Sigma M-z | -1.21 | 21.36 | 0.06 |
| | Sigma N+M-y | 3.25 | 21.36 | 0.15 |
| | Sigma N+M-z | -1.35 | 21.36 | 0.06 |
| | Sigma M | 4.79 | 21.36 | 0.22 |
| | Sigma Zug | 4.39 | 21.36 | 0.21 |
| | Sigma Druck | -1.52 | 21.36 | 0.07 |
| | Sigma Delta | 5.91 | 21.36 | 0.28 |
| | Tau gesamt | -0.18 | 12.33 | 0.01 |
| | Tau V-y | -0.11 | 12.33 | 0.01 |
| | Tau V-z | -0.07 | 12.33 | 0.01 |
| | Tau V | -0.18 | 12.33 | 0.01 |
| | Tau M-T St.Venant | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T Bredt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Sigma-v | 4.39 | 21.36 | 0.21 | |
| 11 | Sigma gesamt | 3.57 | 21.36 | 0.17 |
| | Sigma N | -0.41 | 21.36 | 0.02 |
| | Sigma M-y | 2.70 | 21.36 | 0.13 |
| | Sigma M-z | -1.37 | 21.36 | 0.06 |
| | Sigma N+M-y | 2.29 | 21.36 | 0.11 |
| | Sigma N+M-z | -1.51 | 21.36 | 0.07 |
| | Sigma M | 3.98 | 21.36 | 0.19 |
| | Sigma Zug | 3.57 | 21.36 | 0.17 |
| | Sigma Druck | -1.63 | 21.36 | 0.08 |
| | Sigma Delta | 5.21 | 21.36 | 0.24 |
| | Tau gesamt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau V-y | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau V-z | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau V | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T St.Venant | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T Bredt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Sigma-v | 3.57 | 21.36 | 0.17 | |
| 12 | Sigma gesamt | 3.41 | 21.36 | 0.16 |
| | Sigma N | -0.41 | 21.36 | 0.02 |
| | Sigma M-y | 2.66 | 21.36 | 0.12 |
| | Sigma M-z | -1.23 | 21.36 | 0.06 |
| | Sigma N+M-y | 2.26 | 21.36 | 0.11 |
| | Sigma N+M-z | -1.37 | 21.36 | 0.06 |
| | Sigma M | 3.81 | 21.36 | 0.18 |
| | Sigma Zug | 3.41 | 21.36 | 0.16 |
| | Sigma Druck | -1.49 | 21.36 | 0.07 |
| | Sigma Delta | 4.90 | 21.36 | 0.23 |
| | Tau gesamt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau V-y | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau V-z | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau V | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T St.Venant | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T Bredt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Sigma-v | 3.41 | 21.36 | 0.16 | |



RSTAB 6.03.3331 - Räumliche Stabwerke

www.dlubal.de



Hightex GmbH
Nordstraße 10, 83253 RIMSTING
Tel: 08051/6888-281 - Fax: 08051/6888-290

Seite: 24
Blatt: 1

STAHL

Projekt: **FORSCHUNG** Position: **Rahmen01**
Rahmen 01 Datum: 20.02.2009

SPANNUNGEN

| S-Punkt Nr. | Spannungsart | Spannung [kN/cm ²] | | Aus- nutzung |
|----------------|-------------------|--------------------------------|-------|-----------------|
| | | vorh | grenz | |
| 13 | Sigma gesamt | 1.85 | 21.36 | 0.09 |
| | Sigma N | -0.41 | 21.36 | 0.02 |
| | Sigma M-y | 2.89 | 21.36 | 0.14 |
| | Sigma M-z | 1.25 | 21.36 | 0.06 |
| | Sigma N+M-y | 2.49 | 21.36 | 0.12 |
| | Sigma N+M-z | -1.57 | 21.36 | 0.07 |
| | Sigma M | 2.26 | 21.36 | 0.11 |
| | Sigma Zug | 1.85 | 21.36 | 0.09 |
| | Sigma Druck | 0.00 | 21.36 | 0.00 |
| | Sigma Delta | 1.85 | 21.36 | 0.09 |
| | Tau gesamt | 1.16 | 12.33 | 0.09 |
| | Tau V-y | 0.19 | 12.33 | 0.02 |
| | Tau V-z | 0.97 | 12.33 | 0.08 |
| | Tau V | 1.16 | 12.33 | 0.09 |
| | Tau M-T St Venant | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T Bredt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Sigma-v | 2.42 | 21.36 | 0.11 | |
| 14 | Sigma gesamt | 1.75 | 21.36 | 0.08 |
| | Sigma N | -0.41 | 21.36 | 0.02 |
| | Sigma M-y | 2.65 | 21.36 | 0.12 |
| | Sigma M-z | 1.37 | 21.36 | 0.06 |
| | Sigma N+M-y | 2.25 | 21.36 | 0.11 |
| | Sigma N+M-z | -1.69 | 21.36 | 0.08 |
| | Sigma M | 2.16 | 21.36 | 0.10 |
| | Sigma Zug | 1.75 | 21.36 | 0.08 |
| | Sigma Druck | 0.00 | 21.36 | 0.00 |
| | Sigma Delta | 1.75 | 21.36 | 0.08 |
| | Tau gesamt | 1.16 | 12.33 | 0.09 |
| | Tau V-y | 0.19 | 12.33 | 0.02 |
| | Tau V-z | 0.97 | 12.33 | 0.08 |
| | Tau V | 1.16 | 12.33 | 0.09 |
| | Tau M-T St Venant | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T Bredt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Sigma-v | 2.35 | 21.36 | 0.11 | |
| 15 | Sigma gesamt | -2.41 | 21.36 | 0.11 |
| | Sigma N | -0.41 | 21.36 | 0.02 |
| | Sigma M-y | -1.38 | 21.36 | 0.06 |
| | Sigma M-z | 0.67 | 21.36 | 0.03 |
| | Sigma N+M-y | -1.78 | 21.36 | 0.08 |
| | Sigma N+M-z | -1.03 | 21.36 | 0.05 |
| | Sigma M | -2.00 | 21.36 | 0.09 |
| | Sigma Zug | 0.59 | 21.36 | 0.03 |
| | Sigma Druck | -2.41 | 21.36 | 0.11 |
| | Sigma Delta | 3.00 | 21.36 | 0.14 |
| | Tau gesamt | 0.82 | 12.33 | 0.07 |
| | Tau V-y | -0.22 | 12.33 | 0.02 |
| | Tau V-z | 1.04 | 12.33 | 0.08 |
| | Tau V | 0.82 | 12.33 | 0.07 |
| | Tau M-T St Venant | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T Bredt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Sigma-v | 2.41 | 21.36 | 0.11 | |
| 16 | Sigma gesamt | -2.76 | 21.36 | 0.12 |
| | Sigma N | -0.41 | 21.36 | 0.02 |
| | Sigma M-y | -1.62 | 21.36 | 0.08 |
| | Sigma M-z | 0.79 | 21.36 | 0.04 |
| | Sigma N+M-y | -2.02 | 21.36 | 0.09 |
| | Sigma N+M-z | -1.15 | 21.36 | 0.05 |
| | Sigma M | -2.36 | 21.36 | 0.11 |
| | Sigma Zug | 0.73 | 21.36 | 0.03 |
| | Sigma Druck | -2.76 | 21.36 | 0.13 |
| | Sigma Delta | 3.49 | 21.36 | 0.16 |
| | Tau gesamt | 0.82 | 12.33 | 0.07 |
| | Tau V-y | -0.22 | 12.33 | 0.02 |
| | Tau V-z | 1.04 | 12.33 | 0.08 |
| | Tau V | 0.82 | 12.33 | 0.07 |
| | Tau M-T St Venant | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T Bredt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Sigma-v | 2.76 | 21.36 | 0.13 | |
| 17 | Sigma gesamt | -6.13 | 21.36 | 0.29 |
| | Sigma N | -0.41 | 21.36 | 0.02 |
| | Sigma M-y | -5.65 | 21.36 | 0.26 |
| | Sigma M-z | 0.09 | 21.36 | 0.00 |
| | Sigma N+M-y | -6.05 | 21.36 | 0.28 |
| | Sigma N+M-z | -0.49 | 21.36 | 0.02 |
| | Sigma M | -5.73 | 21.36 | 0.27 |
| | Sigma Zug | 0.22 | 21.36 | 0.01 |
| | Sigma Druck | -6.13 | 21.36 | 0.29 |
| | Sigma Delta | 6.35 | 21.36 | 0.30 |
| | Tau gesamt | 0.26 | 12.33 | 0.02 |
| | Tau V-y | -0.40 | 12.33 | 0.03 |
| | Tau V-z | 0.65 | 12.33 | 0.05 |
| | Tau V | 0.26 | 12.33 | 0.02 |
| | Tau M-T St Venant | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T Bredt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |



RSTAB 6.03.3331 - Räumliche Stabwerke

www.dlubal.de



Hightex GmbH
Nordstraße 10, 83253 RIMSTING
Tel: 08051/6888-281 - Fax: 08051/6888-290

Seite: 25
Blatt: 1

STAHL

Projekt: **FORSCHUNG** Position: **Rahmen01** Datum: 20.02.2009
Rahmen 01

SPANNUNGEN

| S-Punkt Nr. | Spannungsart | Spannung [kN/cm ²] | | Aus- nutzung | |
|-------------------|-------------------|--------------------------------|-------|-----------------|------|
| | | vorh | grenz | | |
| 17 | Tau M-T | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| | Sigma-v | 6,13 | 21,36 | 0,29 | |
| 18 | Sigma gesamt | -6,49 | 21,36 | 0,30 | |
| | Sigma N | -0,41 | 21,36 | 0,02 | |
| | Sigma M-y | -5,88 | 21,36 | 0,28 | |
| | Sigma M-z | 0,22 | 21,36 | 0,01 | |
| | Sigma N+M-y | -6,29 | 21,36 | 0,29 | |
| | Sigma N+M-z | -0,61 | 21,36 | 0,03 | |
| | Sigma M | -6,09 | 21,36 | 0,28 | |
| | Sigma Zug | 0,35 | 21,36 | 0,02 | |
| | Sigma Druck | -6,49 | 21,36 | 0,30 | |
| | Sigma Delta | 6,84 | 21,36 | 0,32 | |
| | Tau gesamt | 0,26 | 12,33 | 0,02 | |
| | Tau V-y | -0,40 | 12,33 | 0,03 | |
| | Tau V-z | 0,65 | 12,33 | 0,05 | |
| | Tau V | 0,26 | 12,33 | 0,02 | |
| | Tau M-T St Venant | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| | Tau M-T Bredt | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| | Tau M-T | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| | Sigma-v | 6,49 | 21,36 | 0,30 | |
| | 19 | Sigma gesamt | -6,11 | 21,36 | 0,29 |
| | | Sigma N | -0,41 | 21,36 | 0,02 |
| Sigma M-y | | -5,53 | 21,36 | 0,26 | |
| Sigma M-z | | 0,19 | 21,36 | 0,01 | |
| Sigma N+M-y | | -5,93 | 21,36 | 0,28 | |
| Sigma N+M-z | | -0,58 | 21,36 | 0,03 | |
| Sigma M | | -5,70 | 21,36 | 0,27 | |
| Sigma Zug | | 0,30 | 21,36 | 0,01 | |
| Sigma Druck | | -6,11 | 21,36 | 0,29 | |
| Sigma Delta | | 6,41 | 21,36 | 0,30 | |
| Tau gesamt | | 0,26 | 12,33 | 0,02 | |
| Tau V-y | | -0,40 | 12,33 | 0,03 | |
| Tau V-z | | 0,65 | 12,33 | 0,05 | |
| Tau V | | 0,26 | 12,33 | 0,02 | |
| Tau M-T St Venant | | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| Tau M-T Bredt | | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| Tau M-T | | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| Sigma-v | | 6,11 | 21,36 | 0,29 | |
| 20 | | Sigma gesamt | -6,52 | 21,36 | 0,31 |
| | | Sigma N | -0,41 | 21,36 | 0,02 |
| | Sigma M-y | -6,00 | 21,36 | 0,28 | |
| | Sigma M-z | 0,12 | 21,36 | 0,01 | |
| | Sigma N+M-y | -6,40 | 21,36 | 0,30 | |
| | Sigma N+M-z | -0,52 | 21,36 | 0,02 | |
| | Sigma M | -6,11 | 21,36 | 0,29 | |
| | Sigma Zug | 0,26 | 21,36 | 0,01 | |
| | Sigma Druck | -6,52 | 21,36 | 0,31 | |
| | Sigma Delta | 6,78 | 21,36 | 0,32 | |
| | Tau gesamt | 0,26 | 12,33 | 0,02 | |
| | Tau V-y | -0,40 | 12,33 | 0,03 | |
| | Tau V-z | 0,65 | 12,33 | 0,05 | |
| | Tau V | 0,26 | 12,33 | 0,02 | |
| | Tau M-T St Venant | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| | Tau M-T Bredt | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| | Tau M-T | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| | Sigma-v | 6,52 | 21,36 | 0,31 | |
| | 21 | Sigma gesamt | -4,34 | 21,36 | 0,20 |
| | | Sigma N | -0,41 | 21,36 | 0,02 |
| Sigma M-y | | -4,34 | 21,36 | 0,20 | |
| Sigma M-z | | -0,43 | 21,36 | 0,02 | |
| Sigma N+M-y | | -4,74 | 21,36 | 0,22 | |
| Sigma N+M-z | | -0,57 | 21,36 | 0,03 | |
| Sigma M | | -3,94 | 21,36 | 0,18 | |
| Sigma Zug | | 0,00 | 21,36 | 0,00 | |
| Sigma Druck | | -4,34 | 21,36 | 0,20 | |
| Sigma Delta | | 4,34 | 21,36 | 0,20 | |
| Tau gesamt | | -0,11 | 12,33 | 0,01 | |
| Tau V-y | | -0,37 | 12,33 | 0,03 | |
| Tau V-z | | 0,36 | 12,33 | 0,03 | |
| Tau V | | -0,11 | 12,33 | 0,01 | |
| Tau M-T St Venant | | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| Tau M-T Bredt | | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| Tau M-T | | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| Sigma-v | | 4,34 | 21,36 | 0,20 | |
| 22 | | Sigma gesamt | -4,75 | 21,36 | 0,22 |
| | | Sigma N | -0,41 | 21,36 | 0,02 |
| | Sigma M-y | -4,81 | 21,36 | 0,23 | |
| | Sigma M-z | -0,49 | 21,36 | 0,02 | |
| | Sigma N+M-y | -5,21 | 21,36 | 0,24 | |
| | Sigma N+M-z | -0,63 | 21,36 | 0,03 | |
| | Sigma M | -4,35 | 21,36 | 0,20 | |
| | Sigma Zug | 0,00 | 21,36 | 0,00 | |
| | Sigma Druck | -4,75 | 21,36 | 0,22 | |
| | Sigma Delta | 4,75 | 21,36 | 0,22 | |
| | Tau gesamt | -0,11 | 12,33 | 0,01 | |
| | Tau V-y | -0,37 | 12,33 | 0,03 | |
| | Tau V-z | 0,36 | 12,33 | 0,03 | |
| | Tau V | -0,11 | 12,33 | 0,01 | |



RSTAB 6.03.3331 - Räumliche Stabwerke

www.dlubal.de



Hightex GmbH
Nordstraße 10, 83253 RIMSTING
Tel: 08051/6888-281 - Fax: 08051/6888-290

Seite: 26
Blatt: 1

STAHL

Projekt: **FORSCHUNG**

Position: **Rahmen01**
Rahmen 01

Datum: 20.02.2009

■ SPANNUNGEN

| S-Punkt Nr. | Spannungsart | Spannung [kN/cm ²] | | Aus- nutzung | |
|-------------------|-------------------|--------------------------------|-------|-----------------|------|
| | | vorh | grenz | | |
| 22 | Tau M-T St Venant | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| | Tau M-T Bredt | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| | Tau M-T | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| | Sigma-v | 4,75 | 21,36 | 0,22 | |
| | Sigma gesamt | -2,75 | 21,36 | 0,13 | |
| 23 | Sigma N | -0,41 | 21,36 | 0,02 | |
| | Sigma M-y | -3,15 | 21,36 | 0,15 | |
| | Sigma M-z | -1,04 | 21,36 | 0,05 | |
| | Sigma N+M-y | -3,55 | 21,36 | 0,17 | |
| | Sigma N+M-z | -1,19 | 21,36 | 0,06 | |
| | Sigma M | -2,34 | 21,36 | 0,11 | |
| | Sigma Zug | 0,00 | 21,36 | 0,00 | |
| | Sigma Druck | -2,75 | 21,36 | 0,13 | |
| | Sigma Delta | 2,75 | 21,36 | 0,13 | |
| | Tau gesamt | -0,11 | 12,33 | 0,01 | |
| | Tau V-y | -0,20 | 12,33 | 0,02 | |
| | Tau V-z | 0,13 | 12,33 | 0,01 | |
| | Tau V | -0,11 | 12,33 | 0,01 | |
| | Tau M-T St Venant | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| | Tau M-T Bredt | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| | Tau M-T | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| | Sigma-v | 2,75 | 21,36 | 0,13 | |
| | Sigma gesamt | -3,07 | 21,36 | 0,14 | |
| | 24 | Sigma N | -0,41 | 21,36 | 0,02 |
| | | Sigma M-y | -3,62 | 21,36 | 0,17 |
| Sigma M-z | | -1,11 | 21,36 | 0,05 | |
| Sigma N+M-y | | -4,02 | 21,36 | 0,19 | |
| Sigma N+M-z | | -1,25 | 21,36 | 0,06 | |
| Sigma M | | -2,66 | 21,36 | 0,12 | |
| Sigma Zug | | 0,00 | 21,36 | 0,00 | |
| Sigma Druck | | -3,07 | 21,36 | 0,14 | |
| Sigma Delta | | 3,07 | 21,36 | 0,14 | |
| Tau gesamt | | -0,11 | 12,33 | 0,01 | |
| Tau V-y | | -0,20 | 12,33 | 0,02 | |
| Tau V-z | | 0,13 | 12,33 | 0,01 | |
| Tau V | | -0,11 | 12,33 | 0,01 | |
| Tau M-T St Venant | | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| Tau M-T Bredt | | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| Tau M-T | | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| Sigma-v | | 3,07 | 21,36 | 0,14 | |
| 25 | | Sigma gesamt | -2,97 | 21,36 | 0,14 |
| | | Sigma N | -0,41 | 21,36 | 0,02 |
| | | Sigma M-y | -3,51 | 21,36 | 0,16 |
| | Sigma M-z | -1,02 | 21,36 | 0,05 | |
| | Sigma N+M-y | -3,92 | 21,36 | 0,18 | |
| | Sigma N+M-z | -1,16 | 21,36 | 0,05 | |
| | Sigma M | -2,56 | 21,36 | 0,12 | |
| | Sigma Zug | 0,00 | 21,36 | 0,00 | |
| | Sigma Druck | -2,97 | 21,36 | 0,14 | |
| | Sigma Delta | 2,97 | 21,36 | 0,14 | |
| | Tau gesamt | -0,11 | 12,33 | 0,01 | |
| | Tau V-y | -0,20 | 12,33 | 0,02 | |
| | Tau V-z | 0,13 | 12,33 | 0,01 | |
| | Tau V | -0,11 | 12,33 | 0,01 | |
| | Tau M-T St Venant | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| | Tau M-T Bredt | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| | Tau M-T | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| | Sigma-v | 2,97 | 21,36 | 0,14 | |
| | 26 | Sigma gesamt | -2,85 | 21,36 | 0,13 |
| | | Sigma N | -0,41 | 21,36 | 0,02 |
| Sigma M-y | | -3,25 | 21,36 | 0,15 | |
| Sigma M-z | | -1,14 | 21,36 | 0,05 | |
| Sigma N+M-y | | -3,66 | 21,36 | 0,17 | |
| Sigma N+M-z | | -1,28 | 21,36 | 0,06 | |
| Sigma M | | -2,44 | 21,36 | 0,11 | |
| Sigma Zug | | 0,00 | 21,36 | 0,00 | |
| Sigma Druck | | -2,85 | 21,36 | 0,13 | |
| Sigma Delta | | 2,85 | 21,36 | 0,13 | |
| Tau gesamt | | -0,11 | 12,33 | 0,01 | |
| Tau V-y | | -0,20 | 12,33 | 0,02 | |
| Tau V-z | | 0,13 | 12,33 | 0,01 | |
| Tau V | | -0,11 | 12,33 | 0,01 | |
| Tau M-T St Venant | | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| Tau M-T Bredt | | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| Tau M-T | | 0,00 | 12,33 | 0,00 | |
| Sigma-v | | 2,86 | 21,36 | 0,13 | |
| 27 | | Sigma gesamt | -2,19 | 21,36 | 0,10 |
| | | Sigma N | -0,41 | 21,36 | 0,02 |
| | Sigma M-y | -2,37 | 21,36 | 0,11 | |
| | Sigma M-z | -0,84 | 21,36 | 0,04 | |
| | Sigma N+M-y | -2,77 | 21,36 | 0,13 | |
| | Sigma N+M-z | -0,98 | 21,36 | 0,05 | |
| | Sigma M | -1,78 | 21,36 | 0,08 | |
| | Sigma Zug | 0,00 | 21,36 | 0,00 | |
| | Sigma Druck | -2,19 | 21,36 | 0,10 | |
| | Sigma Delta | 2,19 | 21,36 | 0,10 | |
| | Tau gesamt | -0,06 | 12,33 | 0,00 | |
| | Tau V-y | -0,09 | 12,33 | 0,01 | |



RSTAB 6.03.3331 - Räumliche Stabwerke

www.dlubal.de



Hightex GmbH
Nordstraße 10, 83253 RIMSTING
Tel: 08051/6888-281 - Fax: 08051/6888-290

Seite: 27
Blatt: 1

STAHL

Projekt: **FORSCHUNG** Position: **Rahmen01**
Rahmen 01 Datum: 20.02.2009

SPANNUNGEN

| S-Punkt Nr. | Spannungsart | Spannung [kN/cm ²] | | Aus- nutzung |
|----------------|-------------------|--------------------------------|-------|-----------------|
| | | vorh | grenz | |
| 27 | Tau V-z | 0.05 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau V | -0.06 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T St Venant | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T Bredt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| 28 | Sigma gesamt | -2.08 | 21.36 | 0.10 |
| | Sigma N | -0.41 | 21.36 | 0.02 |
| | Sigma M-y | -2.11 | 21.36 | 0.10 |
| | Sigma M-z | -0.96 | 21.36 | 0.05 |
| | Sigma N+M-y | -2.51 | 21.36 | 0.12 |
| | Sigma N+M-z | -1.10 | 21.36 | 0.05 |
| | Sigma M | -1.67 | 21.36 | 0.08 |
| | Sigma Zug | 0.00 | 21.36 | 0.00 |
| | Sigma Druck | -2.08 | 21.36 | 0.10 |
| | Sigma Delta | 2.08 | 21.36 | 0.10 |
| | Tau gesamt | -0.06 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau V-y | -0.09 | 12.33 | 0.01 |
| | Tau V-z | 0.05 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau V | -0.06 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T St Venant | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T Bredt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Sigma-v | 2.08 | 21.36 | 0.10 | |
| 29 | Sigma gesamt | -1.42 | 21.36 | 0.07 |
| | Sigma N | -0.41 | 21.36 | 0.02 |
| | Sigma M-y | -1.22 | 21.36 | 0.06 |
| | Sigma M-z | -0.67 | 21.36 | 0.03 |
| | Sigma N+M-y | -1.63 | 21.36 | 0.08 |
| | Sigma N+M-z | -0.81 | 21.36 | 0.04 |
| | Sigma M | -1.01 | 21.36 | 0.05 |
| | Sigma Zug | 0.00 | 21.36 | 0.00 |
| | Sigma Druck | -1.42 | 21.36 | 0.07 |
| | Sigma Delta | 1.42 | 21.36 | 0.07 |
| | Tau gesamt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau V-y | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau V-z | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau V | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T St Venant | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T Bredt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Sigma-v | 1.42 | 21.36 | 0.07 | |
| 30 | Sigma gesamt | -1.30 | 21.36 | 0.06 |
| | Sigma N | -0.41 | 21.36 | 0.02 |
| | Sigma M-y | -0.96 | 21.36 | 0.05 |
| | Sigma M-z | -0.79 | 21.36 | 0.04 |
| | Sigma N+M-y | -1.37 | 21.36 | 0.06 |
| | Sigma N+M-z | -0.93 | 21.36 | 0.04 |
| | Sigma M | -0.89 | 21.36 | 0.04 |
| | Sigma Zug | 0.00 | 21.36 | 0.00 |
| | Sigma Druck | -1.30 | 21.36 | 0.06 |
| | Sigma Delta | 1.30 | 21.36 | 0.06 |
| | Tau gesamt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau V-y | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau V-z | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau V | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T St Venant | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T Bredt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | Tau M-T | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| Sigma-v | 1.30 | 21.36 | 0.06 | |
| Min | Sigma gesamt | -6.52 | | |
| | Sigma N | -0.41 | | |
| | Sigma M-y | -6.00 | | |
| | Sigma M-z | -1.37 | | |
| | Sigma N+M-y | -6.40 | | |
| | Sigma N+M-z | -1.69 | | |
| | Sigma M | -6.11 | | |
| | Sigma Zug | 0.00 | | |
| | Sigma Druck | -6.52 | | |
| | Sigma Delta | 1.30 | | |
| | Tau gesamt | -0.36 | | |
| | Tau V-y | -0.40 | | |
| | Tau V-z | -0.16 | | |
| | Tau V | -0.36 | | |
| | Tau M-T St Venant | 0.00 | | |
| | Tau M-T Bredt | 0.00 | | |
| | Tau M-T | 0.00 | | |
| Max | Sigma gesamt | 5.69 | | |
| | Sigma N | -0.41 | | |
| | Sigma M-y | 4.93 | | |
| | Sigma M-z | 1.37 | | |
| | Sigma N+M-y | 4.52 | | |
| | Sigma N+M-z | -0.41 | | |
| | Sigma M | 6.10 | | |
| | Sigma Zug | 5.69 | | |
| | Sigma Druck | 0.00 | | |
| | Sigma Delta | 7.32 | | |



RSTAB 6.03.3331 - Räumliche Stabwerke

www.dlubal.de



Hightex GmbH
Nordstraße 10, 83253 RIMSTING
Tel: 08051/6888-281 - Fax: 08051/6888-290

Seite: 28
Blatt: 1

STAHL

Projekt: **FORSCHUNG**

Position: **Rahmen01**
Rahmen 01

Datum: 20.02.2009

■ SPANNUNGEN

| S-Punkt Nr. | Spannungsart | Spannung [kN/cm ²] | Aus-nutzung |
|-------------|-------------------|--------------------------------|-------------|
| | | vorn | grenz |
| Max | Tau gesamt | 1.16 | |
| | Tau V-y | 0.47 | |
| | Tau V-z | 1.04 | |
| | Tau V | 1.16 | |
| | Tau M-T St Venant | 0.00 | |
| | Tau M-T Bredt | 0.00 | |
| | Tau M-T | 0.00 | |
| | Sigma-v | 6.52 | |

STAHL
FA1
Spannungsanalyse

■ SPANNUNGEN QUERSCHNITTSWEISE

| Quer.-Nr. | Stab Nr. | x-Stelle [m] | S-Punkt Nr. | Last-fall | Spannungsart | Spannung [kN/cm ²] | Aus-nutzung | |
|-----------|---------------------------------|--------------|-------------|-----------|--------------|--------------------------------|-------------|------|
| | | | | | | vorn | grenz | |
| 1 | RO 33,7x5,6 (Mannesmann) | | | | | | | |
| | 38 | 0.000 | 8 | LK2 | Sigma gesamt | -4.61 | 21.36 | 0.22 |
| | 37 | 0.236 | 1 | LK1 | Tau gesamt | 0.56 | 12.33 | 0.05 |
| 2 | DUENQ F02-N | | | | | | | |
| | 6 | 0.000 | 7 | LK1 | Sigma gesamt | 12.95 | 21.36 | 0.61 |
| | 3 | 0.000 | 14 | LK2 | Tau gesamt | 1.16 | 12.33 | 0.09 |
| 3 | Kreis 8 | | | | | | | |
| | 57 | 0.000 | 37 | LK2 | Sigma gesamt | 5.91 | 21.36 | 0.28 |
| | 57 | 0.000 | 1 | LK1 | Tau gesamt | 0.00 | 12.33 | 0.00 |
| | 57 | 0.000 | 37 | LK2 | Sigma-v | 5.91 | 21.36 | 0.28 |

■ MASSGEBENDE SCHNITTGRÖSSEN STABWEISE

| Stab Nr. | x-Stelle [m] | Last-fall | Kräfte [kN] | | | Momente [kNm] | | |
|----------|--------------|-----------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | N | V _y | V _z | M _T | M _y | M _z |
| 1 | 0.000 | LK1 | -3.53 | 2.75 | -0.54 | 0.00 | 0.27 | 1.39 |
| 2 | 0.600 | LK2 | -3.50 | -0.30 | 1.40 | 0.00 | 0.83 | 0.12 |
| 3 | 0.775 | LK1 | -3.57 | -0.28 | -1.41 | 0.00 | -0.73 | -0.65 |
| 4 | 0.000 | LK2 | -3.50 | 0.30 | -1.40 | 0.00 | 0.83 | 0.12 |
| 5 | 0.425 | LK1 | -3.53 | -2.75 | 0.54 | 0.00 | 0.27 | 1.39 |
| 6 | 0.000 | LK1 | -2.81 | 3.47 | -0.68 | 0.00 | 0.27 | 1.39 |
| 7 | 0.000 | LK1 | -3.19 | 2.59 | -0.51 | 0.00 | 0.19 | 0.98 |
| 8 | 0.600 | LK2 | -3.34 | -0.77 | 1.51 | 0.00 | 0.86 | 0.21 |
| 9 | 0.000 | LK2 | -3.32 | 1.30 | -2.37 | 0.00 | 0.85 | 0.20 |
| 10 | 0.000 | LK2 | -3.34 | 0.77 | -1.51 | 0.00 | 0.86 | 0.21 |
| 11 | 0.425 | LK1 | -3.19 | -2.59 | 0.51 | 0.00 | 0.19 | 0.98 |
| 12 | 1.200 | LK2 | -2.36 | -0.08 | 0.02 | 0.00 | -0.18 | -0.93 |
| 13 | 1.200 | LK2 | -2.36 | -3.28 | 0.64 | 0.00 | 0.19 | 0.99 |
| 14 | 1.200 | LK1 | -2.81 | -3.47 | 0.68 | 0.00 | 0.27 | 1.39 |
| 35 | 0.000 | LK1 | -3.57 | 0.28 | 1.41 | 0.00 | -0.73 | -0.65 |
| 36 | 0.775 | LK2 | -3.32 | -1.30 | 2.37 | 0.00 | 0.85 | 0.20 |
| 37 | 0.236 | LK2 | -6.38 | 0.02 | 0.65 | 0.01 | 0.10 | 0.02 |
| 38 | 0.000 | LK2 | -6.39 | 0.02 | -0.56 | 0.01 | 0.10 | 0.03 |
| 39 | 0.000 | LK1 | -4.30 | 0.04 | -0.28 | 0.01 | 0.07 | 0.04 |
| 40 | 0.000 | LK1 | -4.16 | 0.04 | -0.27 | 0.01 | 0.06 | 0.04 |
| 41 | 0.138 | LK2 | -5.75 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | -0.06 | 0.01 |
| 42 | 0.113 | LK2 | -5.75 | -0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.06 | -0.01 |
| 43 | 0.089 | LK2 | -5.82 | -0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.00 |
| 44 | 0.260 | LK1 | -4.24 | -0.04 | -0.28 | 0.00 | -0.06 | 0.01 |
| 45 | 0.269 | LK2 | -6.39 | -0.02 | -0.56 | 0.00 | -0.10 | 0.01 |
| 46 | 0.000 | LK2 | -6.38 | -0.02 | 0.65 | 0.00 | -0.10 | 0.01 |
| 47 | 0.236 | LK2 | -6.38 | -0.02 | 0.65 | -0.01 | 0.10 | -0.02 |
| 48 | 0.000 | LK2 | -6.39 | -0.02 | -0.56 | -0.01 | 0.10 | -0.03 |
| 49 | 0.000 | LK1 | -4.30 | -0.04 | -0.28 | -0.01 | 0.07 | -0.04 |
| 50 | 0.000 | LK1 | -4.16 | -0.04 | -0.27 | -0.01 | 0.06 | -0.04 |
| 51 | 0.138 | LK2 | -5.75 | -0.02 | 0.00 | 0.00 | -0.06 | -0.01 |
| 52 | 0.113 | LK2 | -5.75 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.06 | 0.01 |
| 53 | 0.089 | LK2 | -5.82 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.00 |
| 54 | 0.260 | LK1 | -4.24 | 0.04 | -0.28 | 0.00 | -0.06 | -0.01 |
| 55 | 0.269 | LK2 | -6.39 | 0.02 | -0.56 | 0.00 | -0.10 | -0.01 |
| 56 | 0.000 | LK2 | -6.38 | 0.02 | 0.65 | 0.00 | -0.10 | -0.01 |
| 57 | 0.000 | LK2 | 2.97 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 58 | 0.000 | LK2 | 2.97 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

■ STÜCKLISTE STABWEISE

| Position Nr. | Querschnittsbezeichnung | Anzahl Stäbe | Länge [m] | G-Länge [m] | Oberfläche [m ²] | Volumen [m ³] | E-Gewicht [kg/m] | Gewicht [kg] | G-Gewicht [t] |
|--------------|-------------------------|--------------|-----------|-------------|------------------------------|---------------------------|------------------|--------------|---------------|
| 1 | 2 - DUENQ F02-N | 4 | 0.43 | 1.70 | 0.77 | 0.00 | 6.84 | 2.91 | 0.012 |
| 2 | 2 - DUENQ F02-N | 4 | 0.60 | 2.40 | 1.08 | 0.00 | 6.84 | 4.11 | 0.016 |
| 3 | 2 - DUENQ F02-N | 4 | 0.77 | 3.10 | 1.40 | 0.00 | 6.84 | 5.30 | 0.021 |
| 4 | 2 - DUENQ F02-N | 4 | 1.20 | 4.80 | 2.17 | 0.00 | 6.84 | 8.21 | 0.033 |



RSTAB 6.03.3331 - Räumliche Stabwerke

www.dlubal.de



Hightex GmbH
Nordstraße 10, 83253 RIMSTING
Tel: 08051/6888-281 - Fax: 08051/6888-290

Seite: 29
Blatt: 1

STAHL

Projekt: **FORSCHUNG**

Position: **Rahmen01**
Rahmen 01

Datum: 20.02.2009

■ **STÜCKLISTE STABWEISE**

| Position Nr. | Querschnittsbezeichnung | Anzahl Stäbe | Länge [m] | G-Länge [m] | Oberfläche [m ²] | Volumen [m ³] | E-Gewicht [kg/m] | Gewicht [kg] | G-Gewicht [t] |
|--------------|---------------------------|--------------|-----------|-------------|------------------------------|---------------------------|------------------|--------------|---------------|
| 5 | 1 - RO 33,7x5,6 (Mannesma | 4 | 0,24 | 0,95 | 0,10 | 0,00 | 3,88 | 0,92 | 0,004 |
| 6 | 1 - RO 33,7x5,6 (Mannesma | 4 | 0,27 | 1,07 | 0,11 | 0,00 | 3,88 | 1,04 | 0,004 |
| 7 | 1 - RO 33,7x5,6 (Mannesma | 4 | 0,26 | 1,04 | 0,11 | 0,00 | 3,88 | 1,01 | 0,004 |
| 8 | 1 - RO 33,7x5,6 (Mannesma | 4 | 0,25 | 1,01 | 0,11 | 0,00 | 3,88 | 0,98 | 0,004 |
| 9 | 1 - RO 33,7x5,6 (Mannesma | 4 | 0,25 | 1,00 | 0,11 | 0,00 | 3,88 | 0,97 | 0,004 |
| 10 | 3 - Kreis 3 | 2 | 2,40 | 4,80 | 0,12 | 0,00 | 0,39 | 0,95 | 0,002 |
| Summe | | 38 | | 21,87 | 6,07 | 0,01 | | | 0,104 |

B: Produktdatenblatt ETFE-Folie NOWOFLON

NOWOFLON®

Postfach 1263
D-83310 Siegsdorf
Telefon 086 62/6602-0
Telefax 086 62/6602-50
e-mail: info@nowoflon.de

Produktdatenblatt
Product Data Sheet

| | | | |
|------------|-------------------|-----------|------------|
| Folientype | NOWOFLON ET 6235 | Dicke | 250 µm |
| Foiltype | | Thickness | |
| Farbe | transparent/clear | Datum | 14.06.2005 |
| Colour | | Date | |

Probenbreite 15mm/Probenlänge 50mm/Prüfgeschwindigkeit 100mm/min

Sample width 15mm/Sample length 50mm/Test speed 100mm/min

| Lfd.Nr. | Merkmal | Einheit | Mittelwerte | Prüfrichtung | Prüfmethode |
|---------|--|---------|-------------|----------------|------------------|
| Cons.no | Property | Unit | Mean value | Test direction | Test method |
| 1 | Zugfestigkeit Tensile strength | M Pa | 50 | M.D | DIN EN ISO 527-1 |
| 2 | Spannung bei 10% Dehnung Tensile stress at 10% strain | M Pa | 21 | M.D | DIN EN ISO 527-1 |
| 3 | Bruchdehnung Tensile strain at break | % | 650 | M.D | DIN EN ISO 527-1 |
| 4 | Zugfestigkeit Tensile strength | M Pa | 50 | T.D | DIN EN ISO 527-1 |
| 5 | Spannung bei 10% Dehnung Tensile stress at 10% strain | M Pa | 21 | T.D | DIN EN ISO 527-1 |
| 6 | Bruchdehnung Tensile strain at break | % | 650 | T.D | DIN EN ISO 527-1 |
| 7 | Weiterreißwiderstand Tear resistance | N/mm | 450 | M.D | DIN 53 363 |
| 8 | Weiterreißwiderstand Tear resistance | N/mm | 450 | T.D | DIN 53 363 |
| 9 | Opazität Opacity | % | 8 | | |

Die Messwerte in diesem Produktdatenblatt sind materialtypische Mittelwerte, welche entsprechend dem derzeitigen Wissensstand von unserem Labor ermittelt worden sind. Dieses Datenblatt ist eine technische Information bezüglich oben genannter Produktqualität, jedoch keine Produktspezifikation mit Garantianspruch und auch keine Zusicherung für spezielle Folienanwendungsmöglichkeiten. Hinsichtlich Variationen bezüglich Farbe, Vorbehandlung und Stärke ist eine Rücksprache bei Marketing/ Vertrieb erforderlich.

These values reflect current knowledge and state of the art. They are intended to provide information on our products and are not to be understood as a guarantee of any specific product characteristic or suitability of any product for a particular application purpose. Colour, treatment and thickness can be varied. For this purpose please get in contact with our sales and marketing department.

Abb. xx Produktdatenblatt NOWOFLON ET 6235 der Firma Nowofol.