

DIPLOMARBEIT

# Tragluftbauten: Erstellung eines Nachweiskonzeptes auf Basis der aktuellen Eurocodes und der DIN 4134

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer  
Diplom-Ingenieurin  
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Tünde Bodor**

Matr.Nr.: 01428445

unter der Anleitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. **Andreas Kolbitsch**

Institut für Hochbau, Baudynamik und Gebäudetechnik  
Forschungsbereich Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung  
Technische Universität Wien,  
Karlsplatz 13/208-02, A-1040 Wien

Wien, im November 2020

*Tünde Bodor*

---



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Kurzfassung

Membrantragwerke repräsentieren eine relativ neue Bauart im Bauingenieurwesen mit besonderem Tragverhalten im Vergleich zu Bauwerken aus klassischen Materialien wie Stahl, Beton, Holz oder Glas. Diese neue Bauweise hat sich in den letzten 50 Jahren signifikant weiterentwickelt und ist durch ihre Flexibilität sehr populär geworden. Wegen weitgehend fehlender einheitlicher Regelwerke bleiben Planung und Realisierung derartiger Bauwerke bisher nur spezialisierten Büros und Firmen vorbehalten. Die Belastung und das Material beeinflussen die Form und nach der Formänderung bildet sich das aktuelle statische System aus, die gegenseitige Beeinflussung erfordert eine gründliche Untersuchung der Materialien, und der Lastansätze - besonders Windbelastung - weil damit die Ermittlung der Schnittgrößen komplexer wird.

Das Materialverhalten von beschichteten Geweben unterscheidet sich von demjenigen herkömmlicher Materialien, weil es von den Lasten, der Lasteinwirkung, der Zeit, der Prüfgeschwindigkeit und der Temperatur beeinflusst wird. Membranmaterialien sind Kompositwerkstoffe, die aus den Fäden und der Beschichtung bestehen, welche unterschiedliche Steifigkeiten und Festigkeiten aufweisen. Beschichtete Gewebe sind viskoelastisch und anisotrop. Die Nachweise und die Anforderungen an raumabschließende Bauteile, die Hüllkonstruktion und deren Verbindungen sind in **DIN 18204-1:2018** [5] zusammengefasst. Ein allgemeiner Überblick über Anschlüsse und Verankerungskonstruktionen wird im Rahmen dieser Arbeit gegeben.

Die Erfassung der Lastannahmen basiert auf **DIN 4134:1983** [4]. Besonders wird die Windbelastung untersucht, die unterschiedlichen Windkanalversuche von *Horcic* [18], *Gerhardt* [27] und *Kassem* [25] und die Normen **DIN 4134:1983** [4], **EN 1991-1-4:2011** [20] werden vorgestellt und verglichen. Für die Ermittlung der Schnittgrößen und Verankerungskräfte werden zwei Methoden vorgestellt, durch geometrische Berechnungen- **DIN 4134:1983** [4] - und durch Diagramme - *Herzog* [31]. Die Sicherheitsnachweise von **DIN 4134:1983** [4] werden auf Basis von **DIN 18204-1:2018-11** [5], **EN 1993-1-1:2014** [36], **ÖNROM EN 1990:2013** [34] unter der Berücksichtigung des semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts umformuliert. Zusätzlich werden die aktuellen Vorschriften nach **DIN 4134:1983** [4] und beispielhaft die **Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-10.5-35** [39] zusammengefasst.

Im Anhang zur Diplomarbeit wird eine Musterberechnung für eine allgemeine Traglufthalle auszugsweise angefügt, um die Ergebnisse der unterschiedlichen Methoden zu dokumentieren.

## Abstract

Membrane structures represent a relatively new type of construction in civil engineering, their load-bearing behaviour sets them apart from other structures made from traditional building materials such as steel, concrete, timber or glass. This new type of construction has been developed significantly over the last 50 years and has become very popular as a result of its flexibility. Due to the lack of standardized norms or requirements, the design and construction of such structures has remained in the scope of specialized offices and companies. The external loads and the material behaviour have significant influence on the form of the structure, as the result of the new shape the structural system also changes continuously. Hereby the interrelated influence between the structural system and shape, substantial analysis of the material and the loads are required, since this effect makes the determination of the internal forces more complex.

Textile membrane materials with coated fabrics differ from the conventional building materials as their behaviour is determined by several types of factors: the different type of loads, the direction of loading, duration, as well as the speed of tests and the ambient temperature. Membrane fabrics are composite materials, which consist of fibres and layers of coatings. Both of these parts have different stiffness and strength that explains the viscoelastic and anisotropic behaviour of membrane materials. The structural requirement and verification methods of space enclosing systems, the building enclosure and their joints are summarised in **DIN 18204-1:2018** [5]. This thesis gives a general overview of connection details and anchorage systems.

Load assumptions are based on **DIN 4134:1983** [4], especially the wind load is analysed based on the wind tunnel tests by *Horcic* [18], *Gerhardt* [27] and *Kassem* [25], the available standards **DIN 4134:1983** [4] and **EN 1991-1-4:2011** [20] are presented and compared. To determine the internal and anchoring forces, two methods are presented: geometric calculations according to **DIN 4134:1983** [4] and a method based on design charts by *Herzog* [31]. The limit states of **DIN 4134:1983** [4] are revised according to the current technical standards such as **DIN 18204-1:2018-11** [5], **EN 1993-1-1:2014** [36] and **ÖNROM EN 1990:2013** [34] that are based on the semi-probabilistic safety concept. In addition, current regulations according to **DIN 4134:1983** [4] and **European Technical Assessments Nr. Z-10.5-35** [39] are summarised.

An exemplary calculation of a regular air-supported structure will be added to the appendix, which considers the different design methods mentioned in this thesis.

## Inhaltsverzeichnis

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Einleitung.....   | 7  |
| 1.1   | Motivation und Problemstellung.....   | 7  |
| 1.2   | Zielsetzung.....  | 8  |
| 1.3   | Vorgehensweise, Aufbau der Masterarbeit.....                                    | 8  |
| 2     | Membrantragwerke.....   | 10 |
| 2.1   | Mechanisch gespannte Membranen.....   | 13 |
| 2.2   | Pneumatisch gespannte Membranen.....  | 13 |
| 2.3   | Entwicklung von Tragluftbauten und Normung.....                                 | 16 |
| 2.4   | Grundlagen der Bemessung – Unterschiede in den Normen.....                      | 20 |
| 2.4.1 | Deterministische Methoden - DIN.....  | 20 |
| 2.4.2 | Semiprobabilistische Konzepte.....  | 21 |
| 3     | Hüllkonstruktion und Materialien.....   | 25 |
| 3.1   | Allgemeines.....  | 25 |
| 3.1.1 | Beschichtete Gewebe.....  | 27 |
| 3.1.2 | Unbeschichtete Gewebe.....  | 28 |
| 3.1.3 | Folien.....   | 29 |
| 3.2   | Materialverhalten beschichteter Gewebe.....                                     | 30 |
| 3.3   | Anforderungen an raumabschließende Bauteile nach DIN 18204-1:2018.....          | 34 |
| 3.4   | Nachweise nach DIN 18204-1:2018.....  | 36 |
| 3.4.1 | Grundlagen zur Berechnung.....  | 36 |
| 3.4.2 | Ermittlung der Bemessungswerte des Bauteilwiderstandes.....                     | 37 |
| 3.5   | Detailausbildungen und Verbindungen.....  | 38 |
| 3.5.1 | Allgemeines.....  | 38 |
| 3.5.2 | Flächennähte.....   | 39 |
| 3.5.3 | Montagestöße und Randanschlüsse.....  | 40 |
| 3.5.4 | Konstruktive Anschlüsse und Verbindungen.....                                   | 42 |
| 3.6   | Festigkeit und Steifigkeit der Naht.....  | 42 |
| 3.7   | Nachweise der Verbindungen und Anschlüsse.....                                  | 44 |
| 4     | Lastannahmen nach DIN 4134:1983 und EN 1991-1.....                              | 47 |
| 4.1   | Allgemeines.....  | 47 |
| 4.2   | Einführung Teilsicherheitsbeiwerte, Kombinationswerte und Grenzzustände.....    | 47 |
| 4.2.1 | Lastfälle nach DIN 4134:1983.....   | 47 |
| 4.2.2 | Lastfallkombinationen nach semiprobabilistische Nachweiskonzept nach [31]:..... | 48 |
| 4.3   | Ständige Einwirkungen.....  | 49 |
| 4.3.1 | Eigenlast.....  | 49 |
| 4.3.2 | Ersatzlast.....   | 50 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.3.3 | Nenn - Innendruck .....   | 50  |
| 4.4   | Veränderliche Einwirkungen .....  | 53  |
| 4.4.1 | Wind.....   | 53  |
| 4.4.2 | Schneelast.....   | 65  |
| 4.4.3 | Wärmeeinwirkung.....  | 68  |
| 4.5   | Außergewöhnliche Einwirkungen, Erdbebenlasten, Auflagerbewegungen .....               | 69  |
| 5     | Ermittlung der Schnittgrößen .....  | 70  |
| 5.1   | Formfindung.....  | 70  |
| 5.2   | Grundlagen.....   | 71  |
| 5.3   | Ermittlung der Schnittgrößen nach DIN 4134:1983.....                                  | 76  |
| 5.4   | Ermittlung der Schnittgrößen der Hüllen mit Stützung durch Seile oder Seilnetze ..... | 79  |
| 5.5   | Diagramme zur Membranberechnung nach Herzog .....                                     | 79  |
| 5.6   | Verankerungen und Befestigungen .....   | 80  |
| 5.6.1 | Allgemeines .....   | 80  |
| 5.6.2 | Berechnung der Verankerungskräfte .....   | 81  |
| 5.6.3 | Verankerungskonstruktionen.....   | 82  |
| 5.6.4 | Befestigungen.....  | 84  |
| 6     | Sicherheitsnachweise .....  | 86  |
| 6.1   | Festigkeitsnachweis für die Hülle.....  | 86  |
| 6.2   | Bemessung der Seile.....  | 87  |
| 6.3   | Bemessung der Rand- und Anschlussbauteile.....  | 87  |
| 6.4   | Bemessung der Gründung.....   | 88  |
| 6.5   | Verträglichkeit der Verformungen .....  | 88  |
| 7     | Vorschriften.....   | 90  |
| 7.1   | Allgemeines.....  | 90  |
| 7.2   | Ausbildung der Türen und starrer Bauteile.....  | 90  |
| 7.3   | Aufrechterhaltung und Sicherung des Innendruckes .....                                | 90  |
| 7.4   | Überwachung .....   | 91  |
| 7.5   | Senkungsvorgang.....  | 91  |
| 8     | Ergebnisbewertung der Musterberechnung.....   | 93  |
| 9     | Zusammenfassung.....  | 96  |
|       | Formelverzeichnis.....  | 98  |
|       | Literaturverzeichnis.....   | 101 |
|       | Anhang A.....   | 104 |
|       | Anhang B - Musterberechnung.....  | 110 |

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Problemstellung

Die Anwendung des technischen Prinzips von Membrantragwerken und pneumatischen Konstruktionen hat langsam in der modernen Architektur Eingang gefunden [31]. Obwohl das Bauen mit Textilien eine der ältesten Bauweisen ist und grundlegende Entwicklungen bezüglich Membranbau seit dem Ende des 18. Jahrhunderts stattfanden, hat die breite Anwendung von pneumatischen Konstruktionen, die Erforschung von moderner Membranbauweise und eine vertiefte ingenieurtechnische Untersuchung erst Mitte des 20. Jahrhunderts begonnen [31], [2]. Pneumatische Konstruktionen bieten enorme Möglichkeiten der Formgebung und Gestaltung; durch ihr besonderes Tragverhalten sind pneumatische Konstruktionen in bestimmten Situationen ökonomisch effizienter als herkömmliche Bauwerke [1].

Die noch gültige **DIN 4134:1983** [4] regelt die Ermittlung der Schnittgrößen und beschreibt die notwendigen Sicherheitsnachweise für neu zu errichtenden pneumatischen Konstruktionen. Deterministische Nachweiskonzepte wie **DIN 4134:1983** [4] und die vorhandenen praxisorientierten Berechnungsdiagramme von *Herzog* [31] dürfen im Zusammenhang mit aktuellen Normen für die Lastannahmen angewendet werden. Das semi-probabilistische Nachweiskonzept kann nach der aktuellen Norm **DIN 4134** aus dem Jahr 1983 nicht berücksichtigt werden, jedoch basiert **DIN 18204-1:2018** [5] für Bauteile aus textilen Flächengebilden und Folien auf den Eurocodes **EN 1990:2013** [34] und **1991-1**. Die anzuwendenden Normen von einzelnen Bestandteilen der Traglufthallen (**DIN 4134:1983** für Traglufthallen, **DIN 18204-1:2018** für Bauteile aus textilen Flächengebilden und Folien, die Eurocodes **EN 1990** und **EN 1991**) erfordern eine Harmonisierung. Mangels öffentlich publizierter Regelwerke bleibt die Planung und Ausführung von pneumatischer Konstruktionen zumeist Experten vorbehalten. [1], [2]

Moderne FEM-Software bietet komplizierte und zeitaufwendige Lösungen, um pneumatische Konstruktionen zu berechnen, jedoch existieren derzeit keine praxisgeeigneten einheitlichen Berechnungsmethoden und Nachweiskonzepte unter Berücksichtigung des semi-probabilistischen Nachweiskonzeptes.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die vorhanden Normen und Berechnungsverfahren vorgestellt, die Tragsicherheitsnachweise entsprechend dem semi-probabilistischen Nachweiskonzept überarbeitet und die Ergebnisse unterschiedlicher Berechnungsverfahren verglichen. Mit den ermittelten Ergebnissen wird die Notwendigkeit vereinheitlichter und harmonisierter Standards für pneumatische Konstruktionen dargelegt.

## 1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Diplomarbeit dient dazu, einen allgemeinen Überblick über Membrantragwerke und darüber hinaus einen detaillierten über Tragluftbauten zu geben. Die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit umfasst die Beschreibung des Tragverhaltens von Membranen und Tragluftbauten, ein Überblick über die Normungssysteme, die Zusammenfassung der wesentlichen Lastfälle, der Prüfmethode, der zugrundeliegenden Vorschriften, die Vorstellung der zur Planung und Ausführung notwendigen Anschlüsse sowie die Erstellung der entsprechenden Nachweise gemäß Eurocode.

Membrantragwerke bestehen aus vielen komplexen Tragelementen, weswegen bei der Untersuchung von Tragluftbauten, mehrere Forschungsgebiete behandelt werden müssen, um das Tragverhalten besser beurteilen zu können.

Die Ziele dieser Arbeit sind:

- den aktuellen Stand der Technik, das Tragverhalten von Membranen und Tragluftbauten vorzustellen,
- einen allgemeinen Überblick über Hüllkonstruktion zu geben (Vorstellung der Eigenschaften von unterschiedlichen Geweben oder Folien wie bauphysikalische- und mechanische Eigenschaften) und die Nachweise der Materialien und Anschlüsse von Membranen zusammenzufassen,
- die Detaillierung (Nähte und Anschlüsse von bestimmten Bereichen) und die Fundamentanker schematisch darzustellen,
- die Nachweismethoden (Ermittlung der Schnittgrößen, Sicherheitsnachweise) vorzustellen,
- die erforderlichen Vorschriften und die notwendigen Regeln zur Steuerung zu beschreiben und
- eine exemplarische Musterberechnung zu erstellen, welche das Nachweiskonzept darlegt.

## 1.3 Vorgehensweise, Aufbau der Masterarbeit

**Kapitel 2** gibt einen Überblick über Membrantragwerke, die gängigen Typen und deren Tragverhalten. Hier werden die im Kapitel 1 bemerkten Unterschiede zwischen der **DIN 4134:1983** [4] und den aktuellen Eurocodes detailliert beschrieben.



**Kapitel 3** beschreibt die Hüllkonstruktion und stellt die verwendbaren Gewebe vor. In diesem Kapitel wird das mechanische Verhalten unterschiedlicher Materialien zusammengefasst und die erforderlichen rechnerischen Nachweise sowohl der Materialien als auch der unterschiedlichen Verbindungen gezeigt.

**Kapitel 4** befasst sich mit den Lastannahmen, welche nach **DIN 4134:1983** [4] angesetzt werden, und beschäftigt sich mit der Beschreibung der Windbelastungen.

In **Kapitel 5** wird die Ermittlung der Schnittgrößen und Verankerungskräfte beschrieben. Unterschiedliche Berechnungsmethoden werden vorgestellt und die gängigen Verankerungskonstruktionen werden detailliert beschrieben.

**Kapitel 6** beschäftigt sich mit den Sicherheitsnachweisen auf Grundlage der **DIN 4134:1983** [4] bzw. unter Berücksichtigung des Sicherheitskonzeptes der aktuellen Eurocodes.

**Kapitel 7** fasst die gültigen Vorschriften zusammen und gibt einen Überblick über die Steuerung und Überwachung. Darüber hinaus wird ein Senkungsvorgang beschrieben.

In **Kapitel 8** wurde eine Zusammenfassung aufgrund der vorherigen Kapitel gegeben und die Ergebnisse der Musterberechnung wurden zusammengefasst und verglichen.

Diese Arbeit beschränkt sich auf pneumatisch gespannte Membranbauten. Mechanisch gespannte Konstruktionen und ihr Tragverhalten werden der Vollständigkeit halber vorgestellt.

## 2 Membrantragwerke

Das Tragverhalten von Membrantragwerken basiert auf der Ableitung von Zugkräften, über ihre gekrümmte Oberfläche, da sie keine nennenswerte Biegefestigkeit haben. Die äußeren Lasten verursachen Normalspannungen in der Membranfläche, die durch Krümmungsänderungen in der Membranfläche abgeleitet werden müssen. [1]

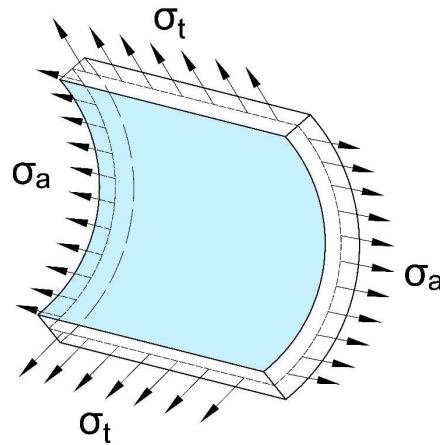
Das Tragverhalten von unterschiedlichen Membranbauwerken, welche mit zugbeanspruchten Elementen ausgebildet sind, hängt von der Geometrie und von der Verteilung der Zugelemente ab. Eine bestimmte Geometrie und Belastung kann einer Gleichgewichtsgeometrie zugeordnet werden. Die analytische Berechnung von Gleichgewichtsformen von Seilnetzen und Gleichgewichtsflächen von Membranen ist in **Abschnitt 5.2** beschrieben. Äußere Belastungen erzeugen in Seilen, Seilnetzen oder in Membranen aus Folien oder beschichteten Geweben große elastische Dehnungen. Nach *Otto* [46] ist das Tragverhalten von Seilnetzen und Membranflächen ähnlich, deshalb können die Berechnungsverfahren von Seilnetzen für Membranen verwendet werden. Vorbelastungen oder Vorspannungen können die Verformungen von Seilen oder Membranen signifikant reduzieren.

Die Normalspannungen infolge Vorspannung können vereinfacht mit der *Kesselformel* beschrieben werden [1]:

$$N=r \cdot q \quad (2.1)$$

Dabei sind:

- $N$  - Normalspannungen in Membranebene
- $r$  - Krümmungsradius
- $q$  - Innendruck



**Abb. 1:** Schematische Darstellung der Spannungen infolge Innendruck [44]

Die Membrankräfte sind vom Krümmungsradius abhängig, also je kleiner der Krümmungsradius ist, desto geringer sind die Normalkräfte in der Membranoberfläche [1]. Infolge äußerer Kräfte treten wegen der dünnen Querschnitte der beschichteten Gewebe große Verformungen an den Membrankonstruktionen auf [46]. Die Konstruktionsmaterialien müssen planmäßig vorgespannt oder vorbelastet werden, um zu große Verformungen zu vermeiden und um die wechselnden Belastungen ausgleichen zu können [1]. Vorspannung verursacht einen ständigen Eigenspannungszustand, weswegen konstante Schnittgrößen in den Membranen auftreten [46]. Die Vorspannung ist so wählen, dass in der Membran stets Zugspannungen unter den angenommenen äußeren Lasten auftreten. Die Vorspannung muss so geplant werden, dass sie eine ständig wirkende Belastung ist, da die Belastung des Membranmaterials ihre Lebensdauer beeinflusst. [7]

Zwei wesentliche Vorspannprinzipien können unterschieden werden: die mechanisch vorgespannten Konstruktionen mit gegensinniger Krümmung und die pneumatisch vorgespannten Konstruktionen mit gleichsinniger (synklastischer) Krümmung. Die nächsten Bilder geben einen Überblick über Membrankonstruktionen, eingeteilt nach den Typen von pneumatisch gespannten Membrantragwerken. (**Abb. 2**)

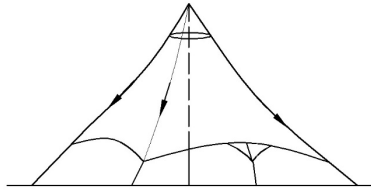
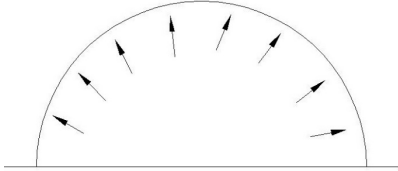
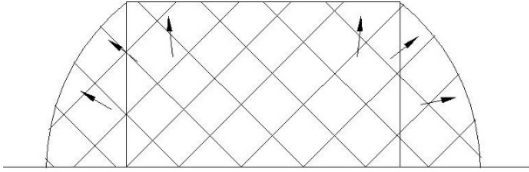
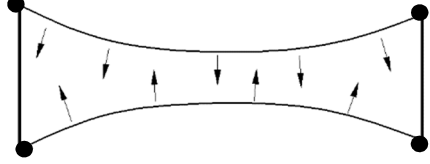
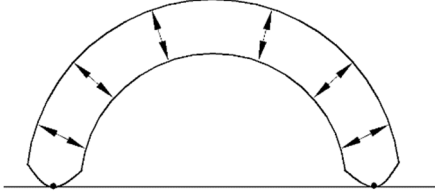
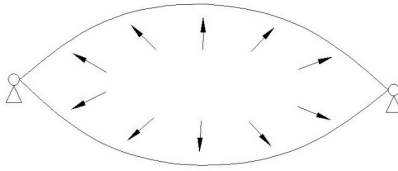
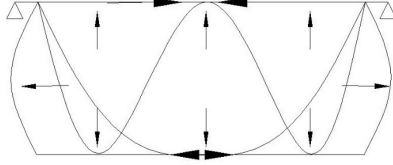
|                                |                             |  |
|--------------------------------|-----------------------------|--|
| Mechanisch gespannte Membrane  |                             |    |
| Pneumatisch gespannte Membrane | Innendruckpneu              |    |
|                                | Membran mit Seilverstärkung |    |
|                                | Unterdruckpneu              |   |
|                                | Aufgeblasene Membran        |  |
|                                | Kissen-konstruktion         |  |
|                                | Tensairity Konstruktion     |  |

Abb. 2: Typen von Membrantragwerke [13]

## 2.1 Mechanisch gespannte Membranen

Mechanisch gespannte Membranen werden gegen Fixpunkte und/oder linienförmige Auflager vorgespannt, um Hoch- und Tiefpunkte zu erzeugen [1]. Die typische Sattelform oder spitze Zeltform kann durch die häufig verwendeten Strukturen erzeugt werden, z.B. durch Bögen, Seile, Ringe und Schlaufen. Antiklastisch gekrümmte Flächen haben eine Tragrichtung und eine Spannrichtung (gegenseitig spannende Fasern). Je nach der Belastungsrichtung werden die Wirkrichtungen entsprechend aktiviert. [7]

Mit größerer Krümmung sind die Verformungen und die Auflagerkräfte am Rand infolge der Lastabtragung günstiger. Bei der Berechnung der Vorspannkraft müssen Relaxation und Langzeitverhalten des Membranmaterials berücksichtigt werden und Nachspannmöglichkeiten gegeben werden. [1]

## 2.2 Pneumatisch gespannte Membranen

Pneumatisch gespannte Membranen sind besondere Typen von Membrantragwerken mit gleichsinniger (synklastischer) Krümmung. Die Form wird durch den Innendruck in einer geschlossenen Hülle erzeugt oder das ganze Luftvolumen wird mit dem Membranmaterial eingehüllt und die Lasten werden in der Richtung der Krümmung abgetragen. [1]

Diese Konstruktionen werden durch die Druckdifferenz zwischen der Innen- und Außenseite stabilisiert. Die Membran verhindert die weitere Ausdehnung und, wenn die Ausdehnung in alle Richtungen gleich ist, ergibt sich eine synklastisch gekrümmte Membranoberfläche. Bei den Tragluftbauten ist das Volumen entweder einseitig begrenzt oder von allen Seiten der Membranen eingeschlossen. So haben pneumatisch vorgespannte Membrane entweder kugelförmige Blasenformen oder zylindrische Schlauchformen, welche variiert und kombiniert werden können. Die meisten pneumatischen Konstruktionen werden durch leichten Überdruck zwischen dem Boden und der Hülle erzeugt, aber die Form selbst kann ebenso durch Unterdruck geformt werden. [7]

Die durch Innendruck erzeugte Krümmung leitet die Lasten über Zugkräfte in der Membrane weiter. Die Soglasten werden über die Membranoberfläche abgetragen und die Drucklasten werden durch das Luftvolumen an den Grund weitergegeben [1]. Der Innendruck wirkt immer senkrecht auf die Membranfläche und ist überall konstant. Weil äußere Belastungen große Verzerrungen verursachen können, ist die Wirkungsrichtung der Vorspannung von der Geometrie und von der Verformung der Hülle abhängig. [46]

Bei Kissenkonstruktionen werden die Lasten aus der pneumatische Vorspannung und äußere Lasten an die andere Seite weitergegeben. Bei Kissenkonstruktionen ist das Luftvolumen komplett eingehüllt, deswegen spielt die Dichtigkeit der Membranen eine wesentliche Rolle. [1]

Bei den kurzzeitigen Einwirkungen wird das eingeschlossene Gas als ideales Gas betrachtet. So gilt die thermische Zustandsgleichung, siehe **Formel (2.1)**. [46]

$$p_i \cdot V_i = m \cdot R \cdot T = \text{konst.} \quad (2.1)$$

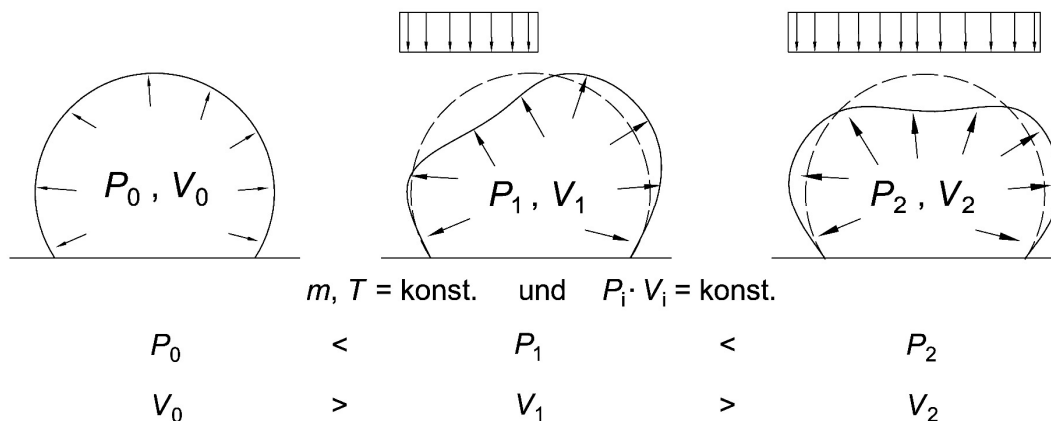
Dabei sind:

- $p_i$  - Der Innendruck
- $V_i$  - Volumen der eingeschlossenen Hülle
- $m$  - Stoffmenge
- $R$  - Die Gas-Konstante
- $T$  - Die Temperatur des eingeschlossenen Gases

Bei kurzzeitigen Einwirkungen, wo die Stoffmenge und die Temperatur konstant sind, kann die Kissenkonstruktion nur durch Volumenänderung reagieren, weil die Stützluftversorgung den Innendruck so schnell nicht anpassen kann. So kann Ein- und Ausströmung des Gases in die geschlossene Volumen ausgeschlossen werden. Nach dem *Boyle - Marriot Gesetz* ist das Produkt von Innendruck und Volumen der Stoffmenge bei konstanter Temperatur und konstanter Stoffmenge immer konstant. [1]

$$p_i \cdot V_i = \text{konst.} \quad (2.2)$$

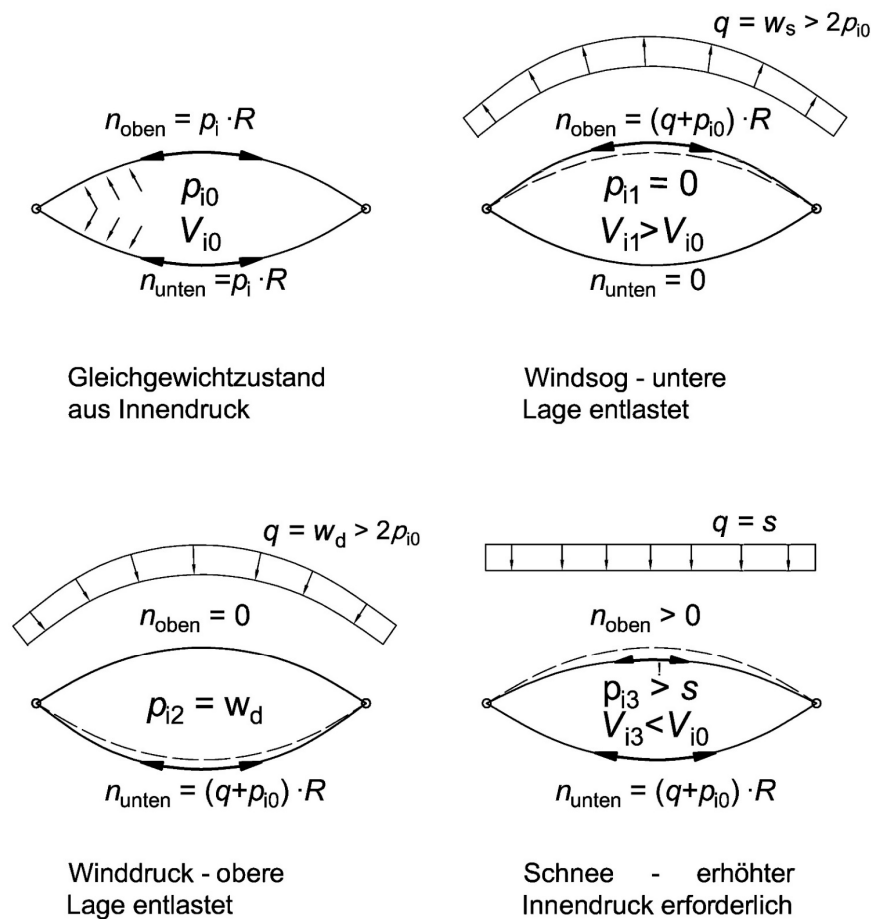
Durch Windsog entsteht eine Volumenvergrößerung, weshalb sich der Innendruck reduziert und bei Winddruck reagiert das System umgekehrt. Mit **Abb. 3** kann das *Boyle-Marriot Gesetz* anschaulich beschrieben werden, es ändert sich Membranoberfläche, Luftvolumen und Innendruck infolge der Belastung. [1]



**Abb. 3:** Boyle-Marriot Gesetz: geänderte Membranoberfläche, Luftvolumen und Innendruck infolge der Belastung [50]

Abhängig von der Windrichtung ist eine Lage der Kissenkonstruktion entlastet, bei Windsog trägt die Außenlage und bei Winddruck trägt die untere Lage. Die pneumatische Stützung erzeugt keine Zugkräfte an der entlasteten Seite der Membrane, wenn der Winddruck mindestens zweimal größer ist als der Innendruck. Weil sich Belastungen zufolge Schnee relativ langsam bilden und die Luft entweichen kann, muss der Innendruck gemäß der projizierten Schneelast gewählt werden. So kann gewährleistet werden, dass der Innendruck immer größer als Winddruck bzw. der Innendruck höher als die Schneelast ist. Bei Schneelast können der Innendruck temporär erhöht werden. [1]

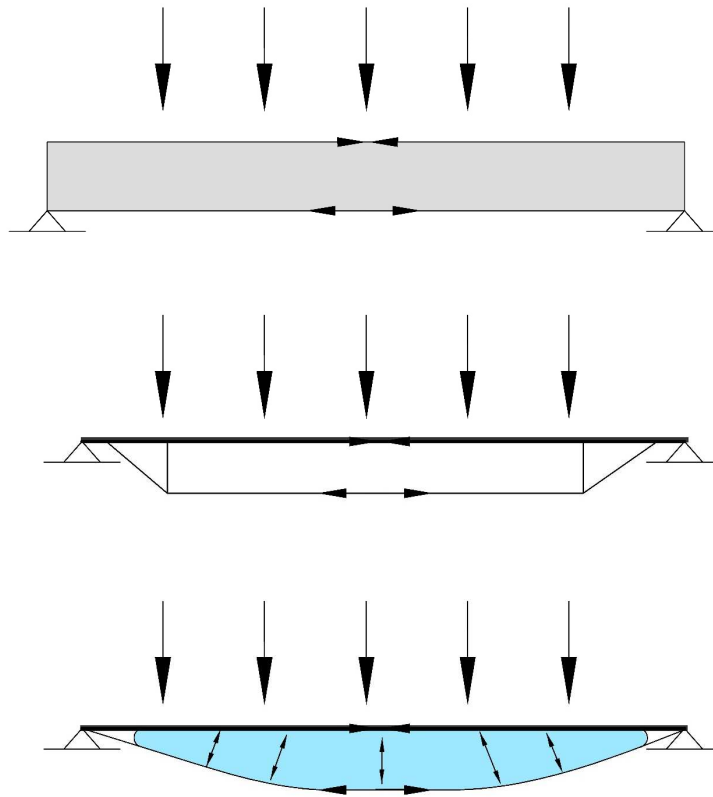
Das nächste Bild (**Abb. 4**) zeigt das Tragverhalten von Kissenkonstruktionen [1].



**Abb. 4:** Tragverhalten von Kissenkonstruktionen [1]

Tensairity ist ein neuartiges Strukturkonzept, dessen Grundidee ist, die Vorteile von geringerem Eigengewicht eines pneumatischen Körpers und das einfache Tragverhalten von unterspannten Träger zu kombinieren. Die Tensairity-Strukturen bestehen aus einem Träger und aus einem

geschlossenen Pneu mit Kabel. Der pneumatische Körper erzeugt die Vorspannung für die Kabel und stabilisiert den Stab, siehe **Abb. 5**. [14]



**Abb. 5:** Das Tragverhalten von Tensairity-Konstruktionen [45]

### 2.3 Entwicklung von Tragluftbauten und Normung

Die Entwicklung von Luftfahrzeuge begann im 18. Jahrhundert, dabei wurde der Grundstein für pneumatische Konstruktionen gelegt. Das Prinzip von Heißluftballons basiert auf der Auftriebskraft, welche durch den Dichteunterschied zwischen warmer und kalter Luft entsteht. Die Dichte von Luft sinkt mit steigender Temperatur, wenn der Druck konstant bleibt [47]. Den ersten funktionstüchtigen Heißluftballon stellten die *Brüder Montgolfier* aus leinenverstärktem Papier hergestellt. Am Ende des 18. Jahrhunderts baute *J. Charles* den ersten Gasballon, welcher mit Wasserstoff gefüllt war. [24], [41]

Die Idee, dass die eingehüllte heiße Luft Konstruktionshüllen ohne Tragkonstruktion tragen kann und diese Technologie in der Architektur auch umsetzbar ist, stammt von *F. W. Lanchester*. Sein Patent für eine aufgeblasene Halle wurde 1918 erteilt. Mangels geeigneter Membranmaterialien wurde die Konstruktion nie realisiert. 1922 wurde eine pneumatische Dachkonstruktion für das



Oasis Theatre gebaut. 1929 wurde die erste pneumatische Halle errichtet, welche aus aufgeblasenen Schläuchen bestand. [24], [41]

Pneumatische Konstruktionen fanden nach der Erfindung von Nylonwerkstoffen, während des II. Weltkrieges Verbreitung [9]. Um die bei Luftkämpfen notwendigen Radaranlagen gegen Witterung zu schützen [41], installierte die U.S. Air Force mehrere Membranen am Ende des Weltkrieges.

Nach dieser Idee wurden pneumatische Konstruktionen eher für militärische Anwendungen als Zelte verwendet. Membranen, Zelte und pneumatische Konstruktionen sind schnell herstellbar, und neben relativ geringen Kosten ermöglichen sie, große Volumen abzudecken. Stahl konnte wegen der Radaranlagen nicht verwendet werden, weil Stahl die elektromagnetischen Impulse negativ beeinflusst hätte. Während des Weltkrieges waren Membrantragwerke temporäre Konstruktionen, erst später wurde realisiert, dass diese Bauwerke nicht nur temporäre Lösungen bieten können, sondern mit Weiterentwicklungen in mehreren anderen Bereichen ökonomisch anwendbar sind. [9]

Die Amerikanische Armee gründete das *Cornel Aeronautical Lab* mit *Walter Bird* als Vorstand, um pneumatische Technologien zu fördern. Wissenschaftliche Untersuchungen wurden zuerst von *Frei Otto* durchgeführt, mit dem Schwerpunkt der Forschungen auf dem Prozess der Formfindung [41].

Die Expo '58 war die erste Weltausstellung nach dem zweiten Weltkrieg. Die Ausstellung konzentrierte sich auf die Wissenschaft, und 45 Staaten, 8 internationale Organisationen und multi-nationale Firmen nahmen teil [10].

Das erste internationale Symposium zu pneumatischen Strukturen fand im Jahr 1967 in Stuttgart statt. Infolge der Weltausstellung im Jahr 1970 wurde erkannt, dass diese Konstruktionen nicht nur vielseitig, sondern auch effizient sind und die leichten Konstruktionen für unterschiedliche Umstände angepasst werden können. Bei der EXPO' 70 wurden mehrere pneumatische Pavillons vorgestellt, nämlich der U.S. Pavillon und der Fuji Group Pavillon, womit ein großer Bedarf nach Entwicklungen, Forschungen und auch Richtlinien zum Thema der pneumatisch gespannten Membranen erzeugt wurde. [9]

Der U.S. Pavillon war das erste luftgestützte Seiltragwerk und dadurch die leichteste Dachkonstruktion, die jemals gebaut wurde. Das Dach hat eine superelliptische Form, die 80 m breit und 140 m lang ist, damit kann 30480 m<sup>2</sup> Fläche abgedeckt werden. Die Kabelführung wurde ohne Hochpunkt in der Mitte gestaltet, um die Notwendigkeit von Regen- oder Schneeräumung zu vermeiden. Das Rautenmuster statt radialer Kabelführung ermöglicht die Gewichtsreduktion und verursacht weniger Anschlüsse, wodurch eine ökonomische und ästhetische Ausgestaltung der Dachkonstruktion möglich wurde. Das luftgestützte Seiltragwerk ermöglicht es, eine große

Spannweite bei geringen Kosten zu überbrücken. Eine weitere Anforderung war, dass das Tragwerk hohe Windlasten (240 km/h im Fall eines Taifuns) widerstehen kann. Wegen dieser Anforderung wurde ein flaches Dach konzipiert, um die Windbelastung noch effektiver verringern zu können. Das Dach wurde durch einen Innendruck in diesem geschlossenen Volumen vorgespannt. 0.03 Psi (206,8 Pa) Innendruck wurde benötigt, um die Dachkonstruktion um 7 m über dem Auflagerbereich zu überhöhen. Die Kabel sind in einem Beton-Druckring verankert, der durch eine zinklegierte Platte mit dem Betonfundament verbunden ist. Die Membran besteht aus einem mit Vinyl beschichteten Gewebe aus Glasfasern. Mit der Beschichtung kann Luft- und Wasserdichtheit erreicht werden, außerdem ist das Gewebe unbrennbar. Obwohl das Gewebe eine Festigkeit von 1400 N/cm aufweist, liegt das Hauptproblem in der richtigen Ausbildung der Anschlüsse. Gebläse sind verantwortlich, um den Innendruck aufrechterhalten zu können, aber die Kapazität der Gebläse muss nach dem Druckverlust der Membran geplant werden, so sind die Kosten unabhängig vom gesamten Luftvolumen. [11]

Der Fuji Group Pavillon wurde auch als pneumatische Konstruktion geplant, mit einer ganz neuen Konzeption: „pneumatisch innerhalb pneumatisch“, diese Konstruktion besteht aus kleinen aufgeblasenen Segmenten - Hochdruckpneus - innerhalb und außerhalb der Hauptkonstruktion. Die Form besteht aus 16 gewölbten, 72 m langen Schläuchen mit 4 m Durchmesser, die zusammen einen Kreis mit Durchmesser von 50 m bildeten. Zur Zeit der Errichtung des Pavillons waren Tragluftbauten schon bekannt, aber es gab zu aufgeblasenen Strukturen weder Regelwerke noch technische Grundlagen. Die Hochdruckpneus wurden aus zweilagigem Vinylon-Gewebe (Kurzzeitfestigkeit 2,0 kN/cm) hergestellt und mit Neoprenkleber verklebt. Die Oberfläche wurde mit Hypalon behandelt und die Luftdichtheit wurde durch eine Beschichtung aus Polyvinylchlorid erreicht. Das angewandte Membranmaterial war 4 mm dick und hatte ein Gewicht von 0,05 kN/m<sup>2</sup>. Der erforderliche Innendruck war 10-bis 40-mal höher als bei gewöhnlichen Tragluftbauten. Die Steuerung des Innendrucks wurde durch ein Gebläse ermöglicht und ständiges Monitoring sicherte den konstanten Innendruck. [12]

Der Planungsprozess, die Errichtung des Fuji Pavillons und die dazu erforderlichen Forschungen und Entwicklungen zeigten, dass die immer häufiger gewordenen Tragluftbauten normative Vorgaben benötigen, die technische Nachweise, Berechnungsgrundlagen, Sicherheitsnachweise, Vorschriften zur Steuerung des Innendrucks und zur Überwachung umfassen.

In den 60er-Jahren wurden Tragluftbauten häufig verwendet wegen ihrer zahlreichen Vorteile, z.B. dem geringen Eigengewicht, der einfachen Montage und der raschen Umsetzbarkeit. Pneumatische Konstruktionen unterscheiden sich grundsätzlich von den bis dahin meist verwendeten starren Baukonstruktionen. Wegen des besonderen Tragverhaltens von pneumatischen Konstruktionen ergab sich die Notwendigkeit von entsprechenden normativen

Vorgaben. Spezielle Baubestimmungen wurden auch verlangt, um Druckschwankungen zu vermeiden, dazu waren entsprechende maschinentechnische Entwicklungen notwendig. Für pneumatische Konstruktionen mussten andere Forderungen festgelegt werden als bei herkömmlichen Bauwerken, weil die Aufrechterhaltung der Form mehr von der Leistung der Gebläse als von den Materialeigenschaften abhängt. [8]

Im Jahr 1971 wurden die ersten Entwürfe der „Richtlinien für den Bau und Betrieb von Tragluftbauten“ von der „Fachkommission Bauaufsicht“ verlegt, und in den Jahren 1971-1973 in allen deutschen Bundesländern als technische Baubestimmungen eingeführt. Professor Dr. *Bub* wurde beauftragt, einen Arbeitsausschuss „Tragluftbauten“ zu bilden. Dieser Ausschuss bestand aus Mitgliedern der Fachkommission Bauaufsicht, Wissenschaftlern, wie z.B. Meteorologe, die bei der besseren Beschreibung von äußeren Lasten helfen konnten, erfahrenen Baustatikern und einem Vertreter der Sachversicherer. Durch dieses Komitee wurde die Normvorlage im Oktober 1979 verabschiedet. Die derzeit aktuellste Norm von Tragluftbauten ist die deutsche Norm **DIN 4134:1983** [4] vom Februar 1983. [8]

## 2.4 Grundlagen der Bemessung – Unterschiede in den Normen

Seit Juni 2009 müssen alle statischen Berechnungen nach den aktuellen Eurocodes sowie deren nationalen Anhängen und nationalen Anwendungsdokumenten durchgeführt werden. [3]

Die Verwendung von deterministischen Methoden, wie in **DIN 4134:1983** [4] implementiert, weicht stark vom aktuellen semi-probabilistischen System ab, weil die Bestimmung der Sicherheitsfaktoren auf länder- und bauweisen-spezifischen Festlegungen basiert. Die großen Unterschiede führten zur Überarbeitung der bisherigen Normen und Ausarbeitung eines allgemein verwendeten, auf stochastischen Grundlagen begründeten Sicherheitskonzepts. Dieses Konzept wird in den Eurocodes als semiprobabilistisches Nachweisverfahren verwendet. [15]

### 2.4.1 Deterministische Methoden - DIN

Vor der Erstellung der aktuell gültigen Eurocodes wurden in alle Ländern eigene Normen verwendet, auf ähnlichen (deterministischen) Prinzipien beruhten. Jahrzehntlang wurden deterministische Methoden als Grundlagen der nationalen Normen verwendet, die auf den Ergebnissen der Wissenschaft, Erfahrung und dem Stand der Technik basierten. Deterministische Methoden greifen zurück auf bekannte Baustoffeigenschaften, wie das lineare Spannungs - Dehnungs-Verhalten. So wurde die Tragsicherheit mit der Methode der zulässigen Spannungen berechnet, später wurde das plastische Verhalten in die Berechnung aufgenommen. Das Grundprinzip der deterministischen Methoden basiert darauf, dass ein ausreichender Sicherheitsabstand zwischen der Beanspruchbarkeit und der Beanspruchung eingehalten wird, was durch Verwendung einer „reduzierten Baustofffestigkeit“ gewährleistet werden kann. Die Sicherheit wird aus den Gebrauchs- und Tragzuständen - zurückgerechnet, qualitative Veränderungen des Tragverhaltens zwischen Gebrauchs- und Traglastzuständen, unterschiedlich wirkende Belastungen und die Nichtlinearität von Baustoffverhalten wurden noch nicht berücksichtigt. [15]

Das deterministische Nachweisformat lautet:

$$\sigma_{\text{vorh}} \leq \sigma_{\text{zul}} \quad (2.2)$$

Dabei sind:

- $\sigma_{\text{vorh}}$  - Vorhandene Spannungen
- $\sigma_{\text{zul}}$  - Zulässige Spannungen

Nach bauteil-, bauweisen-, und versagensspezifischen Vorgaben wurden Sicherheitsniveaus festgelegt. Alle Unsicherheiten wurden auf der Widerstandsseite durch den globalen Sicherheitsfaktor berücksichtigt und nach Baustoffen differenziert. [15]

Ein weiterer Schritt zum semiprobabilistischen Nachweiskonzept war die Einführung des Traglastverfahrens, was

- den erforderlichen Sicherheitsabstand schon an der Einwirkungsseite nach unterschiedlichen Lastfällen und nach Versagensmechanismus bestimmt,
- Veränderungen in der Spannungs-Dehnungs-Zuordnung berücksichtigt,
- das Sicherheitsniveau nicht aus dem Gebrauchszustand, sondern aus Versagenszustand definiert. [15]

Die Grundlage des Sicherheitsnachweises nach dem Traglastverfahren lautet:

$$R = \sum_i \gamma_i \cdot S_i \quad (2.3)$$

Dabei sind:

|            |   |                        |
|------------|---|------------------------|
| $R$        | - | Widerstand             |
| $\gamma_i$ | - | Teilsicherheitsbeiwert |
| $S_i$      | - | Beanspruchung          |

#### 2.4.2 Semiprobabilistische Konzepte

Das semiprobabilistische Sicherheitskonzept beruht auf der Betrachtung von Grenzzuständen wobei Teilsicherheitsfaktoren angesetzt werden [3]. Die Teilsicherheitsbeiwerte werden nach dem betrachteten Grenzzustand in die Gleichung auf der Einwirkungs- und auf der Widerstandsseite eingeführt. Bemessungswerte werden aus den Basiswerten mithilfe der Sicherheitsbeiwerte berechnet. Um genug Sicherheit zu gewährleisten, müssen die Sicherheitsfaktoren aus den Fraktilwerten - 5%- und 95%-Quantilwerte - der Basisvariablen sowohl auf der Einwirkungs- als auch auf der Widerstandsseite bestimmt werden. [15]

Die Grundlage zur Ermittlung der Sicherheitsbeiwerte ist die Festlegung der Sicherheitsindices, die eine wirklichkeitsnähere Erfassung der Sicherheit gewährleisten. Für zwei normalverteilte, unabhängige Basisvariablen gilt die Grenzzustandsfunktion, damit ein ausreichend großer deterministisch bestimmter Sicherheitsabstand gewährleistet werden kann:

$$Z=R - S \quad (2.4)$$

Dabei sind:

- $R$  - Widerstand
- $Z$  - Sicherheitsabstand
- $S_i$  - Beanspruchung

Wenn

- $Z \geq 0$                       Sicherer Zustand,
- $Z \leq 0$                       Versagenszustand. [15]

Der Sicherheitsabstand  $Z$  in dieser Form ist nicht geeignet für einen Sicherheitsnachweis; um die tatsächlich vorhandene Tragsicherheit zu bestimmen, müssen sowohl die stochastischen Charaktere der Basisvariablen - Beanspruchungs- und auch Widerstandseite - als auch die materiellen Nichtlinearitäten berücksichtigt werden. [15]

Der Sicherheitsindex  $\beta$ , also der minimale Abstand der Grenzzustandsgeraden zum Ursprung des Standardnormalraumes, kann mit der Annahme  $R - S = 0$  abgeleitet werden, und er ist mit der Versagenswahrscheinlichkeit im Fall von linearen Grenzzustandsfunktion direkt verknüpft. Der Sicherheitsindex hängt mit den Schadensfolgekassen zusammen, die für die Bestimmung von Nutzungsdauer und Grenzzustand dienen. Die Werte des Sicherheitsindex und der Schadensfolgekassen zeigen **Tab. 1** und **Tab. 2**. [3]

**Tab. 1:** Sicherheitsindex nach EC 1990:2013 [34]

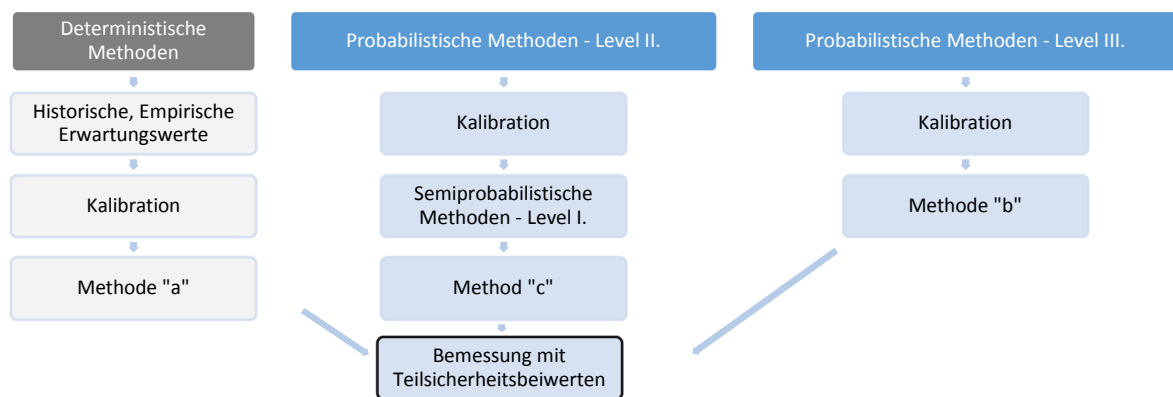
| Minimum<br>Zuverlässigkeitsindex /<br>Versagenswahrscheinlichkeit<br>$\beta / P_f$ | Werte für den Bezugszeitraum |                           |
|--|------------------------------|---------------------------|
|  | 1 Jahr                       | Geplante<br>Nutzungsdauer |
| Tragfähigkeit  | $4,7 / 10^{-6}$              | $3,8 / 10^{-4}$           |
| Gebrauchstauglichkeit  | $2,9 / 10^{-3}$              | $1,5 / 10^{-1}$           |
| Ermüdung   | -                            | 1,5 - 3,8                 |

**Tab. 2:** Schadensfolgeklassen nach EC 1990, Anhang B, Tabelle B.1 und B.2 [34]

| Schadensfolgeklassen | Zuverlässigkeitsklasse | Mindestwerte der Zuverlässigkeitsindex $\beta$<br>1 Jahr / 50 Jahr | Merkmale   |
|----------------------|------------------------|--|--|
| CC3                  | RC3                    | 5,2 / 4,3  | Hohe Folgen für Menschleben <u>oder</u> sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen                      |
| CC2                  | RC2                    | 4,7 / 3,8  | Mittlere Folgen für Menschleben, beträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen                          |
| CC1                  | RC1                    | 4,2 / 3,3  | Niedrige Folgen für Menschleben <u>und</u> kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen |

Das semiprobabilistische Sicherheitskonzept basiert auf deterministischen Größen, die mit probabilistischen Sicherheitselementen differenziert werden. Beim Übergang auf die aktuellen Normen wurde rechnerisch kontrolliert, dass annähernd gleiche Ergebnisse aus den zwei Sicherheitskonzepten erhalten werden können. [3], [15]

**Tab. 3:** Bemessungsmethoden [3], [34]



Bemessungszustand für den Grenzzustand der **Tragfähigkeit** [3], [34]:

$$E_d \leq R_d \quad (2.5)$$

Dabei sind:

- $E_d$  - Bemessungswert der Beanspruchung  
 $R_d$  - Bemessungswert des Tragwiderstands

- ständige und vorübergehende Beanspruchungen  $E_d$

$$E_d = \sum_i \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_i \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (2.6)$$

- außergewöhnliche Beanspruchungen  $E_{dA}$

$$E_{dA} = \sum_i \gamma_{GA,j} \cdot G_{k,j} \oplus A_d \oplus \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_i \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (2.7)$$

- Bemessungssituationen infolge Erdbeben  $E_{dAE}$

$$E_{dAE} = \sum_i G_{k,j} \oplus \gamma_1 \cdot A_{Ed} \oplus \sum_i \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (2.8)$$

Bemessungszustand für den Grenzzustand der **Gebrauchstauglichkeit** [34]:

$$E_d \leq C_d \quad (2.9)$$

Dabei sind:

- $E_d$  - Bemessungswert der Beanspruchung  
 $C_d$  - Bemessungswert des Gebrauchstauglichkeitskriteriums

- seltene Kombinationen der Einwirkungen  $E_{d,rare}$

$$E_{d,rare} = \sum_i G_{k,j} \oplus Q_{k,1} \oplus \sum_i \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (2.10)$$

- häufige Kombinationen der Einwirkungen  $E_{d,frequ}$

$$E_{d,frequ} = \sum_i G_{k,j} \oplus \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_i \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (2.11)$$

- quasi-ständige Kombinationen der Einwirkungen  $E_{d,perm}$

$$E_{d,perm} = \sum_i G_{k,j} \oplus \sum_i \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (2.12)$$



### 3 Hüllkonstruktion und Materialien

#### 3.1 Allgemeines

Wie der Begriff Tragluftbauten beschreibt, besteht der äußere Raumabschluss von luftgestützten Bauwerken **ganz oder überwiegend** aus einer flexiblen Hülle, die einseitig das innere Volumen begrenzt. Unterschiedliche Gewebe oder Folien spielen eine große Rolle sowohl beim Raumabschluss, als auch bei der Lastabtragung. Wie in **Abschnitt 2** beschrieben, sind Tragluftbauten pneumatisch gespannte Membrantragwerke, bei denen die einachsige Krümmung und der Innendruck Membranspannungen erzeugen. Diese Krümmung dient zum Abtragen der aufgetretenen Zugkräfte aus den äußeren Belastungen und zum Abtrag der Drucklasten. Das Membranmaterial muss die Volumenverkleinerung oder Volumenvergrößerung und damit den veränderten Innendruck aufnehmen können. **Abschnitt 5** beschäftigt sich mit der Schnittgrößenermittlung aus den unterschiedlichen Einwirkungen. Bei Traglufthallen gibt es die Besonderheit, dass sie **ohne Primärtragwerke** oder mit Stützung durch Seile oder Seilnetze nur mithilfe des Innendrucks funktionieren. Den mechanischen Eigenschaften der Membranbaustoffe und der Verbindungen kommt daher besondere Bedeutung zu. [1]

Für Membrantragwerken verwendete Materialien sind beschichtete sowie unbeschichtete Gewebe und hochfeste Kunststofffolien, die unterschiedliche Eigenschaften aufweisen [1]. Die heutzutage verwendeten Gewebe müssen die gleichen Grundvoraussetzungen erfüllen, diese sind die folgenden: große Zugfestigkeit, Dauerhaftigkeit und eine ausreichende Brandschutzklasse [13]. Folien haben nahezu isotrope Eigenschaften, während textile Gewebe eine orthogonal verlaufende Schuss- und Kettrichtung mit unterschiedlichen Festigkeiten haben [1]. Wenn die Spannweite oder die Beanspruchung so groß ist, dass das Membranmaterial die Belastungen nicht aufnehmen kann, kann eine Seilverstärkung herangezogen werden [13]. Für bessere bauphysikalische und mechanische Eigenschaften ist es möglich, mehrere Lagen von Membranschichten zu verwenden. Die Luftschicht zwischen den Lagen wirkt dabei als Dämmung [7].

Die für die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen maßgebende Faktoren sind:

- Temperatur,
- Beanspruchzeit,
- Prüf- und Belastungsgeschwindigkeit,
- Ausnutzungsgrad bzw. Höhe der Belastung,
- Belastungsart,

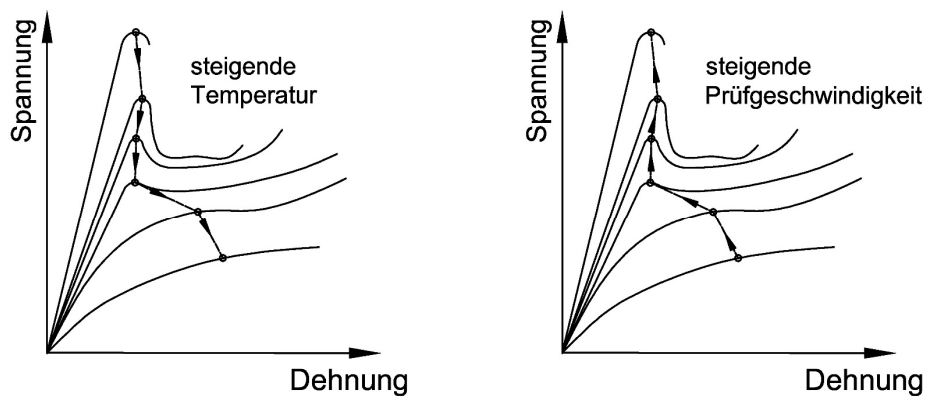
- Herstellungsart,
- Umweltbedingungen. [18]

**Temperatur:** Die Umgebungstemperatur der Gewebe kann zwischen  $-20\text{ °C}$  und  $+40\text{ °C}$  variieren. Da sie den Umgebungseinflüssen, wie der Sonneneinstrahlung und der Außentemperatur direkt ausgesetzt sind, sind diese Einflüsse genauer zu untersuchen. Daher müssen die mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur untersucht werden. Die sogenannte Glastemperatur weist eine deutliche Grenze aus, unterhalb dieser Temperatur sind Kunststoffe hart und spröde, oberhalb dieser Temperatur kommt es aber zu einer starken Abnahme der elastischen Kenngrößen. [18]

Eine der wichtigsten Eigenschaften ist neben der Zugfestigkeit, der Dehnsteifigkeit und der Weiterreißfestigkeit die **Bruchdehnung**. Eine höhere Bruchdehnung steht für duktiler Materialverhalten. Ein mögliches Versagen tritt erst nach großen Verformungen auf [18].

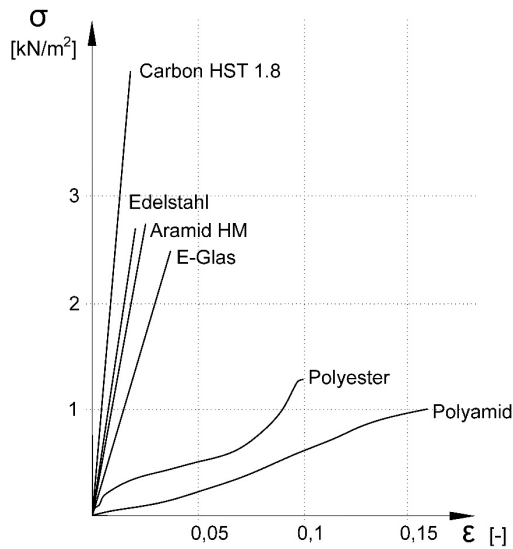
**Beanspruchungsdauer:** im Gegensatz zu den Metallen ist die Verformung der technischen Gewebe bei hoher Temperatur annähernd reversibel, wenn die Verformung einen bestimmten Grenzwert nicht überschreitet. Die Änderungen der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von Temperatur, und Prüfgeschwindigkeit sind im folgenden Spannungs-Dehnungs-Diagramm (**Abb. 6**) dargestellt. [18]

Die Umgebungstemperatur wird in Grenzwerten der mechanischen Kenngrößen und die Beanspruchungsdauer wird in den Lastfallkombinationen berücksichtigt (siehe **Kapitel 3.4**).

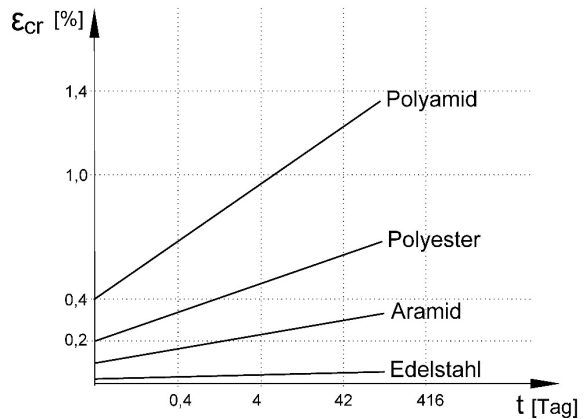


**Abb. 6:** Die Änderungen der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Temperatur bzw. der Prüfgeschwindigkeit [18]

**Abb. 7** und **Abb. 8** veranschaulichen das Spannungs-Dehnungs-Diagramm und die Langzeitverformung (Kriechen) der im Membranbau verwendeten Materialien. [17]



**Abb. 7:** Spannung-Dehnungs-Diagramm von Gewebematerialien [17]



**Abb. 8:** Kriechverhalten von Gewebematerialien [17]

### 3.1.1 Beschichtete Gewebe

Drei Typen von beschichteten Geweben, die am meisten im Membranbau verwendet werden, sind die Folgenden:

- PVC- beschichtete Gewebe,
- PTFE- oder silikonbeschichtete Glasfasergewebe. [1]

Die Beschichtung gewährleistet Schutz vor Witterungseinflüssen wie UV- Strahlung und Feuchtigkeit, dadurch ist dauerhafte Erhaltung der mechanischen Eigenschaften gewährleistet [1]. Trägergewebe bestehen aus orthogonal aufeinander stehenden Fäden, die aus parallelen Fasern gebildet sind. Die Fasern sind maßgebend für das Materialverhalten: PET-Fasern (Polyethylenterephthalat) weisen gute Formbeständigkeit gegenüber chemischen und physikalischen Belastungen auf. Die Festigkeit hängt von der Orientierung der Fasern, der Bindung der Molekülketten und deren Polymerisationsgrad ab. Die Beschichtungen und die Trägergewebe werden nach den maßgebenden Anforderungen - aufnehmende Kräfte und Beständigkeit gegen Witterung - ausgewählt. In der Tragrichtung liegende Fäden werden als Kett-, und darauf orthogonal liegen Fäden als Schussrichtung bezeichnet. Die Flächenbildung erfolgt durch die Anbindung der Kett- und Schussfäden, aus der entsprechenden Anbindung ergibt sich die Fadendichte. Die Fäden bekommen nach der Anbindung und Streckung ihre typische Wellenform. Die Kreuzungsstellen hängen von den Bindungsarten ab. Die aufeinander senkrecht liegenden Fäden weisen nach dem Beschichtungsprozess eine unterschiedliche Geometrie auf. Nach der Streckung des Gewebes sind die Kettfäden mehr gestreckt und leicht gekrümmt, die

Schussfäden sind aber wellig, siehe **Abb. 12**. Deswegen weisen die Schussfäden immer kleinere E-Moduli als die Kettfäden auf, trotz gleicher Faserstärke in Schuss- und Kettrichtung. [43]

In diesem Sinne müssen die Beschichtungen für die verwendeten Fasern geeignet sein. Einerseits wird die Beschichtung bei hoher Temperatur auf das Material aufgetragen, ein Prozess welchem das Gewebe widerstehen muss, andererseits sorgen gute chemische und mechanische Adhäsion für hohe Scherfestigkeit und Tragfähigkeit. [17]

Die am häufigsten verwendeten beschichteten Gewebe sind die PVC-beschichteten Polyestergewebe, deren Lebensdauer 10 - 15 Jahren beträgt [18]. Das fertige Material wird mit einer PVC-Schicht behandelt, um bessere Wasserdichtheit und Luftdichtheit zu erreichen. Die PVC-Schicht dient auch als Schutz der Fasern, die Stärke beträgt zwischen 0,08 - 0,25 mm [1], [43]. Für eine bessere Dauerhaftigkeit müssen PVC-beschichtete Polyestergewebe mit einem zusätzlichen Decklack oder Kaschierungen behandelt werden [1]. Coatings schützen das Trägergewebe gegen Versprödung [43]. Verwendbare Lacke sind PVDF- oder acrylhalte Lacke und für Kaschierungen sind PVF-Folien geeignet [1].

PTFE-beschichtete Glasgewebe werden bei hohen Anforderungen an die Dauerhaftigkeit oder an das Brandverhalten verwendet. Glasgewebe können UV-Strahlung widerstehen, die Beschichtung hilft bei der Witterungsbeständigkeit [43]. Die Oberfläche von Glasgewebe wird entweder beschichtet oder mit PTFE-Folie laminiert, so wird die Haltbarkeit von PTFE -beschichteten Glasfasergeweben auf 25-30 Jahre erhöht. Glasfasergewebe weisen eine größere Reißfestigkeit und einen höheren Elastizitäts-Modul als Polyestergewebe auf [13]. Glasfasergewebe sind knickempfindlich, deswegen muss die Randausbildung und die Montage des Materials angepasst werden. Starkes Kriechverhalten verursacht längere Vorspannungszeit. [43]

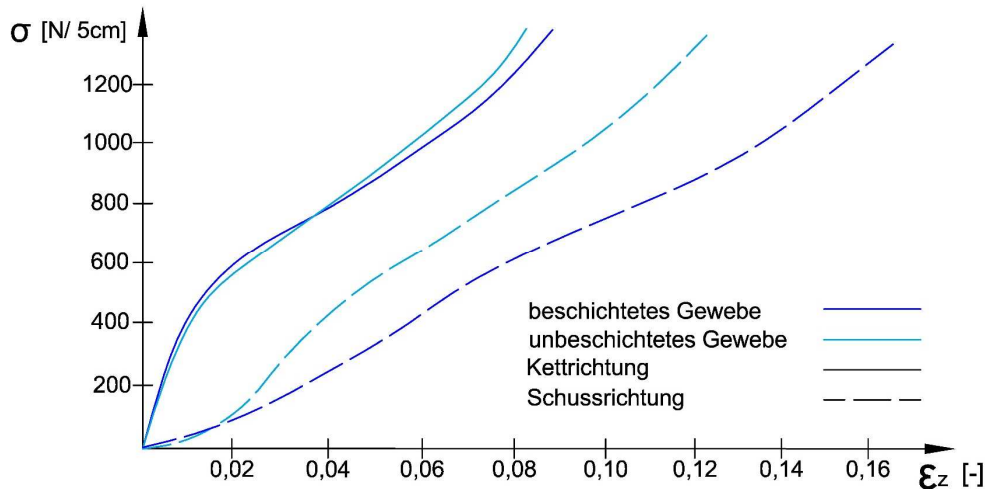
Schweißen und Vernetzungen stellen einerseits die erforderlichen mechanischen Eigenschaften sicher, andererseits ermöglichen schnelle und dichte Verbindung die konfektionierten Flächengebilde [1]. Die Abmessungen der in Österreich hergestellten Gewebe sind maximal 3,2 m x 2200 lfm [43].

### 3.1.2 Unbeschichtete Gewebe

Unbeschichtete Gewebe weisen höhere Flexibilität als beschichtete Gewebe auf. In der Kettrichtung liegende Fäden werden im ersten Schritt der Belastung, im unteren Belastungsbereich gestreckt und ihre gekrümmte Form begradigt und im zweiten Schritt sind die eigenen Dehnungen der Fäden erkennbar. Durch Beschichtung erhalten die Kreuzungsstellen eine gewisse Festigkeit, dadurch wird die Dehnung verzögert ausgebildet. **Abb. 9** zeigt das unterschiedliche Dehnverhalten von beschichteten und unbeschichteten Geweben. [18]

Ohne Beschichtung sind die Gewebe gegenüber Umwelteinflüssen sensibel. Unbeschichtete Gewebe werden vorwiegend für temporäre oder innenliegende Strukturen verwendet, weil die

die mechanischen Eigenschaften bzw. die Dauerhaftigkeit beschränkt sind. Da das Gewebe genäht werden muss, haben die Verbindungen Dichtigkeitsprobleme. PTFE-Gewebe sind hingegen hochflexibel und dauerhaft. **Tab. 4** fasst die Kurzzeitfestigkeiten der meist verwendeten beschichteten und unbeschichteten Geweben zusammen.[1]



**Abb. 9:** Vergleich der beschichteten und unbeschichteten Gewebe [18]

**Tab. 4:** Vergleich der Kurzzeitfestigkeiten von beschichteten und unbeschichteten Geweben [1]

| Material                 |                                    | Kurzzeitfestigkeiten<br>Kette/Schuss |   |
|--------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---|
| beschichtete<br>Gewebe   | PVC-beschichtete<br>Polystergewebe | Typ I.                               | 3000 / 3000 N / 5cm                                 |
|                          |                                    | Typ V.                               | 10000 / 9000 N / 5cm                                |
|                          |                                    | Typ VII.                             | 20000 / 19000 N / 5cm                               |
|                          | PTFE-beschichtete<br>Glasgewebe    |                                      | von 4000 / 4000 N / 5cm<br>bis 10500 / 9000 N / 5cm |
|                          | Folienlaminierte<br>Glasgewebe     |                                      | von 4000 / 4000 N / 5cm<br>bis 6000 / 6000 N / 5cm  |
| unbeschichtete<br>Gewebe | Folienbeschichtete<br>Glasgewebe   |                                      | von 2000 / 2000 N / 5cm<br>bis 8000 / 8000 N / 5cm  |
|                          | Leinengewebe                       | feuchteempfindlich                   | -   |
|                          | Ballonseide                        | UV-empfindlich                       | -   |
|                          | PTFE-Gewebe                        |                                      | von 2000 / 2000 N / 5cm<br>bis 8000 / 8000 N / 5cm  |

### 3.1.3 Folien

Folien sind UV-beständig und weisen ein günstiges Alterungsverhalten auf [43]. Bei längerer Krafteinwirkung kommt es bei hochfesten Kunststofffolien zu signifikantem Kriechverhalten.

Wegen ihres Kriechverhaltens dürfen Folienkonstruktionen bei erwarteten Dauerbeanspruchungen nur bedingt eingesetzt werden oder müssen entweder nachspannbar sein oder pneumatisch vorgespannt werden, weil die pneumatische Vorspannung geringere Kriechdehnungen ausgleichen kann. Ansonsten weisen Folienkonstruktionen ein Anwendungsgebiet mit eingeschränkter Spannweite und erforderlicher hoher Krümmung auf. **Tab. 5** fasst die mechanischen Eigenschaften von Folien zusammen. [1]

ETFE-Folie ist licht- und UV-durchlässig und weist keine chemischen Veränderungen zwischen  $-200\text{ °C}$  und  $+150\text{ °C}$  auf. ETFE-Folien werden wegen ihrer Beständigkeit gegen Witterungseinflüsse und Sonneneinstrahlung oft verwendet. Dieses näherungsweise isotrope Material kann bautechnisch nur bis zur Fließgrenze verwendet werden, darüber hinaus zeigt die ETFE-Folie extrem hohe Dehnungen und Verformungen bis zu 800%. Weil die Folie eine ausgeprägte Querdehnung hat, muss bei den Prüfungen berücksichtigt werden, dass die Fließspannung durch monoaxiale Prüfungen gemessen wird, die in der Wirklichkeit nur selten auftreten. Faltenbildung kann den Verlust der Formstabilität verursachen und die Querdehnung wirkt bei einer Entspannung der Folie gegen die Spannrichtung. Aber die hohe Duktilität verhindert das Weiterreißen bei Beschädigung. [7]

**Tab. 5:** Mechanische Eigenschaften von Folien [1]

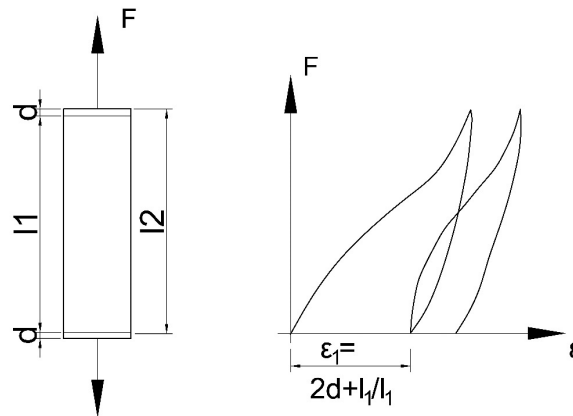
| Material |            | Stärke                | Fließgrenze        | Bruchgrenze        |
|----------|------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| Folien   | ETFE-Folie | 50-300 $\mu\text{m}$  | 20 $\text{N/mm}^2$ | 50 $\text{N/mm}^2$ |
|          | PVC-Folie  | 300-800 $\mu\text{m}$ | 8 $\text{N/mm}^2$  | 20 $\text{N/mm}^2$ |

### 3.2 Materialverhalten beschichteter Gewebe

Textile Flächenelemente müssen nicht nur mechanischen Einwirkungen widerstehen, sondern sie haben die Aufgabe den Innenraum gegen Witterung zu schützen. Bei beschichteten Geweben bestehen hohe Anforderungen an die Beständigkeit gegen biologische, physikalische und chemische Einwirkungen. Das mechanische Materialverhalten ist abhängig von der Art der Beanspruchung, der Beanspruchungsdauer und der Temperatur. Beschichtete Gewebe sind Kompositmaterialien, das Flächenelement besteht aus den Fäden und der Beschichtung, welche unterschiedliche Steifigkeiten und Festigkeiten aufweisen. Im Fall der Verformung treten unterschiedliche Spannungen in den einzelnen Elementen auf. Bei Flächentragwerken sind größere Verformungen notwendig, um die Spannungsspitzen im biegeweichen Material abzubauen zu können, deswegen spielt Duktilität bei Flächenelementen eine wesentliche Rolle. Kriechen und Relaxation haben bei beschichteten Geweben ebenfalls hohe Relevanz, weil die Deformation und

die Nachgiebigkeit des Materials von der Ausrichtung der Fäden abhängig sind. Wegen der Komplexität des Materialverhaltens von beschichteten Geweben, sind Zugversuche notwendig, damit das Verhalten des Materials besser verstanden werden kann. [43]

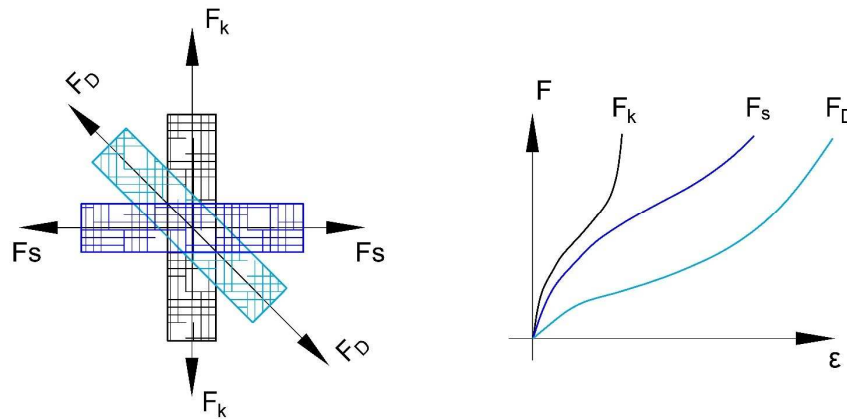
Das Verhalten von synthetischen Geweben kann nicht als linear beschrieben werden. Einaxiale Zugversuche ergeben, dass das Spannung-Dehnung-Diagramm nichtlinear ist. Bei Entlastung treten bleibende Dehnungen auf, siehe **Abb. 10**. Das Materialverhalten ist beeinflusst durch die Eigenschaften der Lasteinwirkung und die Temperatur. Je größer die Einwirkung oder schneller sie auftritt, desto größere Deformationen sind bemerkbar. Dauerhafte oder oft auftretende Belastungen verursachen ebenfalls größere Deformationen. Im Fall ansteigender oder dauernder Belastung verfestigt sich jedoch das Material. Das Materialverhalten der Flächenelemente kann als viskoelastisch beschrieben werden. [43]



**Abb. 10:** viskoelastisches Materialverhalten des Gewebes[43]

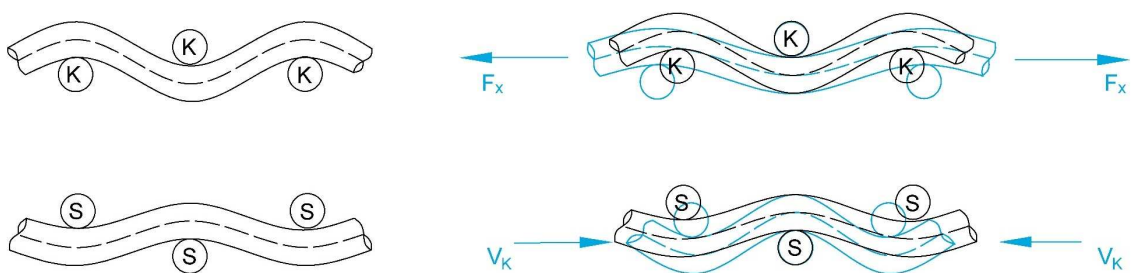
Wie in **Abschnitt 3.1.1** beschrieben, haben die in unterschiedlicher Richtung liegenden Fäden unterschiedliche Steifigkeit. Anisotropes Materialverhalten bedeutet, dass das Gewebe eine bevorzugte Richtung mit höherer Festigkeit hat, deswegen müssen die mechanischen Kennwerte in mehrere Richtungen ermittelt werden. **Abb. 11** zeigt die Abhängigkeit des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von der Probenorientierung dar.





**Abb. 11:** Kraft-Dehnungs- Diagramme in Abhängigkeit von der Orientierung [43]

Abhängig vom Webverfahren bekommen die Fäden ihre Welligkeit, siehe **Abb. 12**. Zuzugspannung sind die Fäden gestreckt, damit ändert sich ihre Krümmung. Die verursachten Verschiebungen werden als Konstruktionsdehnungen bezeichnet. Fäden in Kettrichtung sind weniger gekrümmt, also ist die Steifigkeit in dieser Richtung höher und sie dehnen sich weniger aus. Kett- und Schussfäden sind über den Kreuzungsstellen in Interaktion [43], die Kreuzungsstellen von in Schuss- und Kettrichtung liegenden Fasern können als gelenkig betrachtet werden, aber nach dem Beschichtungsprozess können diese Stellen auch eine gewisse Festigkeit aufweisen und die Beschichtungen ermöglichen die Ausbildung von stabilen Verbindungen [18]. Interaktion bedeutet, dass nicht nur die Schussrichtung zufolge Zugbeanspruchung ausgedehnt wird, sondern die Kettrichtung wird verkürzt, weil die Krümmung der Kettfäden zufolge Zugspannung in Schussrichtung größer wird. [43]



**Abb. 12:** Schematische Darstellung der Kett- und Schussrichtung, Änderung der Geometrie bei einachsiger Spannung [43]

Die Konstruktionsdehnungen je Richtungen hängen vom Verhältnis der Spannungen in Kett- und Schussrichtung ab. Die Querkontraktion kann durch die Querdehnzahl  $\mu$  beschrieben werden, welche bei Membranwerkstoffen nicht konstant ist. Diese kann nur durch Zugversuche ermittelt



werden. Die Querdehnung hängt von der Orientierung der Fäden und dem E-Modul ab. Die Verformungen bestehen aus reversiblen und irreversiblen Teilen. Wegen der Ausrichtung und Anbindung der orthogonalen Fäden, können zu große Zugspannungen in Schussrichtung negative Dehnungen in Kettrichtung verursachen. Querdehnungen an den Rändern müssen verhindert werden, so müssen die Randanschlüsse sorgfältig geplant und ausgeführt werden, damit die auftretenden Kräfte quer zur Berandung aufgenommen werden können. [43]

Die Festigkeit und Steifigkeit hängen eindeutig von der Orientierung der Fäden ab, dabei wird zwischen Langzeitfestigkeit und Kurzzeitfestigkeit unterschieden. Langzeitfestigkeit bedeutet, dass das Material den Spannungen bis zu 11,4 Jahre ohne Bruch widerstehen kann. Die Kurzzeitfestigkeit ist deutlich höher als die Langzeitfestigkeit. Die Kurzzeitfestigkeit eines Gewebes kann durch einen einaxialen Zugversuch und die Dehnungen durch zweiachiale Spannungsversuche geprüft werden, so kann das Materialverhalten des Trägergewebes zufolge unterschiedlicher Belastungssituationen, Belastungsgeschwindigkeiten, Belastungshöhe und Temperatur - beschreiben werden. Weitere Kennwerte, welche die mechanischen Eigenschaften des Gewebes beschreiben können, sind das Weiterreißverhalten, die Schubsteifigkeit und die Knickbeständigkeit. Das Weiterreißverhalten kann durch zweiachsige Weiterreißversuche geprüft werden, dieses Verhalten beschreibt die meisten auftretenden Schadensfälle. Aus einem Beschädigungspunkt können sich die Risse zufolge Spannungskonzentration fortpflanzen. [43]

Am Rand des Gewebes treten Kräfte auf, die in Schussrichtung wirken, so treten Schubspannungen im Gewebe auf. Durch Schubdeformationen baut das Gewebe die Schubspannungen ab. Die erzeugten Verzerrungen bilden aber weitere Spannungen zwischen Kett- und Schussrichtung aus, die nur die Beschichtung des Gewebes aufnehmen kann. Wenn die Verzerrung zu groß wird, werden die Kett- und Schussfäden gegenseitig deformiert, und es vermindert sich der Widerstand des Gewebes gegen Schubverzerrung. Um dieses Verhalten prüfen zu können, sind ein- oder zweiachsige Schubversuche notwendig. [43]

Während der Ausführung werden die Flächenelemente weiteren, in Endzustand nicht auftretenden mechanischen Einwirkungen ausgesetzt, z.B. Faltung, punktuelle Halterung und Klemmung. Diese Beanspruchungen können zur Beschädigungen der Beschichtung führen, womit das Trägergewebe frei gelegt wird. Glas-/ PTFE-Gewebe sind besonders knickempfindlich wegen ihres spröden Materialverhaltens. [43]

Bei beschichteten Geweben sind die last- und zeitabhängigen Verformungen noch ausgeprägter als bei herkömmlichen Materialien. Langzeitige Beanspruchungen reduzieren die Beanspruchbarkeit der Membrane. Lastabhängige Verformung (Kriechen) bedeutet, dass sich das Material zufolge dauernder konstanter Belastung zeitabhängig ausdehnt, dieses Verhalten hängt sehr stark von der Temperatur ab, wobei bei bereits Raumtemperatur mit einem starken Kriechen gerechnet werden kann. Wenn die Dehnungen des Materials konstant gehalten werden, bauen

sich die auftretenden Spannungen mit der Zeit und der Temperatur ab, dieser Effekt wird als Relaxation bezeichnet. Kriech- und Relaxationsverhalten sind bei Geweben komplex, die unterschiedlichen Materialien reagieren auf Temperatur und dauernde Belastung nicht gleich, zusätzlich beeinflusst die Verbindungstechnik der Bahnen die Deformationen. Glas/PTFE - Membranen werden bei niedrigeren Temperatur spröder und das Kriechen wird ausgeprägter. Aus Versuchen wurde erkannt, dass bei tiefen Temperaturen zweimal größere Kräfte für die Vorspannung der Glas/PTFE-Gewebe notwendig sind. Wenn das Gewebe nicht ausreichend vorgespannt ist, bekommt das Material zusätzliche dynamische Belastungen zufolge Faltenbildung, welche zur Reduktion der Lebensdauer führen können. Deswegen müssen die Membranen in Abhängigkeit von der Zeit und Temperatur nachgespannt werden. Nachspannmöglichkeiten müssen im Vorhinein vorgesehen werden. [43]

### 3.3 Anforderungen an raumabschließende Bauteile nach DIN 18204-1:2018

**DIN 18204-1:2018** [5] beschäftigt sich mit raumabschließenden Bauteilen aus textilen Flächengebilden und Folien für Hallen und Zelte. Wie im **Abschnitt 3.1** erläutert, sind beschichtete Gewebe im Membranbau gängig, Folien und unbeschichtete Gewebe sind nur bei temporären Bauteilen im Einsatz, weil sie ihre erforderlichen mechanischen Eigenschaften nicht dauerhaft halten können. Hier muss berücksichtigt werden, dass **DIN 18204-1:2018** [5] für **Zelthallen mit Primärtragwerk** anzuwenden ist. Diese Norm dient als Basis zur Ermittlung eines Nachweiskonzeptes, dieses muss aber mit spezifischen Nachweisen und einer Produktionskontrolle ergänzt werden, so dass sie mit den für Traglufthallen geltenden Anforderungen übereinstimmen. Weiters behandelt die **Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-10.5-35** das Material für Tragluftbauten aus PVC-beschichtetem Polyestergewebe.

**DIN 18204-1:2018** [5] legt die Anforderungen und die Leistungsklassen von raumabschließenden Bauteilen fest. Diese umfassen:

- Gewebe müssen die Beanspruchungen während der geplanten Nutzungsdauer gemäß ihrer Einteilung in Schadensfolgeklassen (siehe **Tab. 1** und **Tab. 2**) aufnehmen und ableiten können,
- Baustoffklassen sind nach **DIN 4102-1** geregelt, das Brandverhalten von raumabschließenden Bauteile muss diesen entsprechen,
- Klassen für textile Flächengebilde sind nach **DIN 18204-1:2018** [5] **Tabelle 1** geregelt. Diese werden nach den erforderlichen mechanischen Kennwerten und Festigkeiten unterschieden,

- das Grundmaterial muss ebenso den bauphysikalischen Anforderungen entsprechen, so muss es sowohl Schimmel als auch UV-Strahlung widerstehen. Die Lichtechtheit ist nach **DIN EN ISO 105-B02** zu bestimmen,
- die Breite von tragenden Schweißnähten muss mindestens 15 mm erreichen,
- Festigkeiten des Kederummantelungsmaterials dürfen nicht kleiner als jenes des Flächengebildes sein,
- bei der Dimensionierung von Keder und Kederprofil muss sichergestellt werden, dass die Verbindungen nach dem Auftretenden der Lasten erhalten bleiben,
- die Profilkanten des Kederprofils müssen abgerundet sein. [5]

Die Anforderungen müssen gewährleistet sein und durch Prüfungen und Nachweise bestätigt werden. Die Ergebnisse sind stets von Temperatur, Belastungsgeschwindigkeit, den Probenabmessungen, der Belastungsgeschichte und dem gegebenen Spannungszustand abhängig. [7]

### 3.4 Nachweise nach DIN 18204-1:2018

#### 3.4.1 Grundlagen zur Berechnung

Beim Nachweis von Hüllkonstruktion ist der Standsicherheitsnachweis für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) zu bestimmen. Für die Hülle, die Verbindungen und die Anschlüsse müssen Festigkeitsnachweise geführt werden. Prüfungen sind nur dann erforderlich, wenn keine bauaufsichtliche Zulassung vorliegt. [8]

Der Bemessungswert der Zugbeanspruchung muss immer kleiner sein als der Bemessungswert der Zugfestigkeit:

$$\frac{f_{Ed}}{f_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.13)$$

Dabei sind:

- $f_{Ed}$  - Bemessungswert der Zugbeanspruchung, unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte mit Bezug auf die Bemessungssituation
- $f_{t,Rd}$  - Bemessungswert der Zugfestigkeit

Für die Bestimmung der Bemessungssituationen gibt **DIN 18204-1:2018-11** [5] Anweisungen. **Tab. 6** und **Tab. 7** stellen die Bemessungssituationen nach alter DIN 18204-1:2007-05 und nach aktueller Norm **DIN 18204-1:2018** [5] dar.

Dabei stellen "G" die ständigen Einwirkungen, "S" die veränderlichen Einwirkungen infolge Schnee, "W" die veränderlichen Einwirkungen infolge Wind dar. Die ständigen Einwirkungen infolge Vorspannung müssen definiert und berücksichtigt werden, diese sind mit "P" angemerkt.

**Tab. 6:** Bemessungssituationen nach DIN 18204-1:2007-05

|                              |                           |  |
|------------------------------|---------------------------|--|
| Bemessungssituation 1        | Kurzzeitige Einwirkung    | G ⊕ P ⊕ W ⊕ S/2 ohne Einfluss erhöhter Temperatur<br>G ⊕ P ⊕ W/2 ⊕ S ohne Einfluss erhöhter Temperatur |
| Bemessungssituation 2        | Sommergewitter            | G ⊕ P ⊕ W unter Einfluss erhöhter Temperatur   |
| <b>Bemessungssituation 3</b> | <b>Dauerbeanspruchung</b> | <b>G ⊕ P ⊕ S/4 ohne Einfluss erhöhter Temperatur</b>   |

**Tab. 7:** Bemessungssituationen nach DIN 18204-1:2018-11[5]

|   |   |  |
|---|---|--|
| Bemessungssituation 1                       | Wintersturm                             | G ⊕ P ⊕ W ⊕ S ohne Einfluss erhöhter Temperatur        |
| Bemessungssituation 2                       | Sommergewitter                          | G ⊕ P ⊕ W unter Einfluss erhöhter Temperatur           |
| Bemessungssituation 3                       | Dauerbeanspruchung                      | <b>G ⊕ P unter Einfluss erhöhter Temperatur</b>        |
| <b>Außergewöhnliche Bemessungssituation</b> | <b>außergewöhnliche Schneebelastung</b> | <b>G ⊕ P ⊕ W ⊕ S ohne Einfluss erhöhten Temperatur</b> |

Hier ist anzumerken, dass die aktuelle Norm **DIN 18204-1:2018** [5] zusätzlich eine außergewöhnliche Bemessungssituation differenziert und die dauernde Einwirkung ohne Berücksichtigung einer Schneelast, sondern mit erhöhter Temperatur berechnet wird. Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte zu **Tab. 7** sind nach **EN 1990:2013** [34] zu bestimmen.

### 3.4.2 Ermittlung der Bemessungswerte des Bauteilwiderstandes

Die Ermittlung der Beanspruchbarkeit des Grundmaterials wird in beiden zuvor angeführten Normen gleich behandelt. Der Bemessungswert der Zugfestigkeit wird aus dem Anteil der Reißkraft nach **DIN 18204-1:2018** [5] **Tabelle 1** mittels eines werkstoffspezifischen Modifikationsfaktors und eines Teilsicherheitsbeiwertes ermittelt.

$$f_{t,Rd} = \frac{f_u}{A_{mod} \cdot \gamma_M} \quad (3.14)$$

Dabei sind:

- $f_u$  - Reißkraft in kN/5 cm ohne erhöhte Temperatur (20 °C)
- $A_{mod}$  - Werkstoffspezifischer Modifikationsfaktor
- $\gamma_M$  - Teilsicherheitsbeiwert für den Bauteilwiderstand

Im **Tab. 8** sind die Produkte von aus  $A_{mod}$  und  $\gamma_M$  nach **DIN 18204-1:2018** [5] anschaulich zusammengefasst. Das Produkt hängt von den Bemessungssituationen - von der Temperatur, Belastungsdauer und den jeweiligen Umweltbedingungen - ab und berücksichtigt die Modellunsicherheiten. Hier ist der Unterschied zwischen den aufeinanderfolgenden Ausgaben von **DIN 18204-1:2018** ebenfalls ersichtlich.

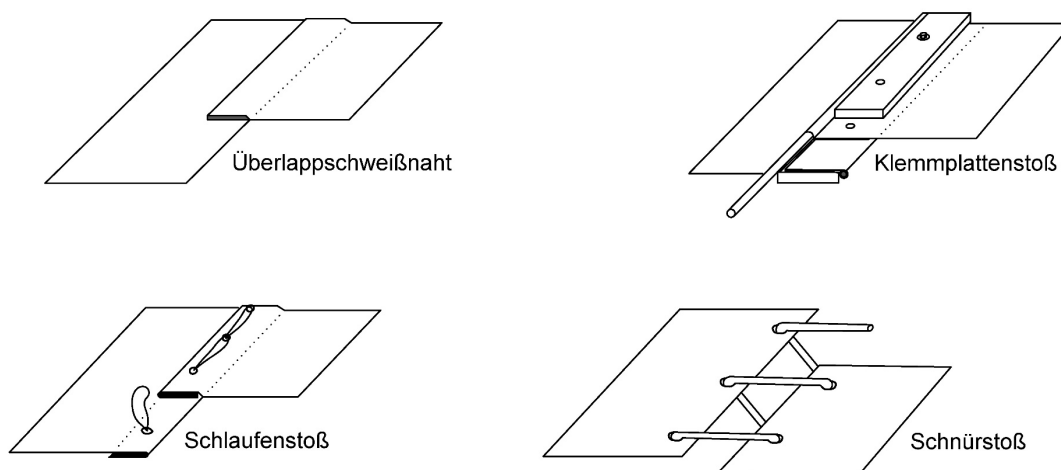
**Tab. 8:** Werte für das Produkt  $A_{mod}$  und  $\gamma_M$  für das Grundmaterial nach DIN 18204-1:2018-11 [5]

| Bemessungssituation                            | $A_{mod} \cdot \gamma_M$ |                   |
|--|--------------------------|-------------------|
|  | DIN 18204 -1:2007        | DIN 18204 -1:2018 |
| 1 - Wintersturm                                | 2,0                      | 2,5               |
| 2 - Sommergewitter                             | 2,2                      | 2,2               |
| 3 - Dauerbeanspruchung mit Schnee              | 3,5                      |                   |
| 3 - Dauerbeanspruchung mit erhöhter Temperatur |                          | 3,5               |
| Außergewöhnliche Schneebelastung               |                          | 1,5               |

### 3.5 Detailausbildungen und Verbindungen

#### 3.5.1 Allgemeines

Membranmaterialien werden als Rollware mit einer Breite von 5 m hergestellt und geliefert. Dann müssen sie entsprechend der gewünschten Geometrie in Streifen zugeschnitten werden [1]. Die konfektionierten Bahnen müssen miteinander verbunden werden, damit das Material seine Funktion erfüllen kann. Membrantragwerke werden am meisten durch Hochfrequenznähte (HF) verbundene Überlappungen zusammengefügt [43]. Die Planen können noch alternativ genähte Verbindung oder durch Kombinationen von HF und genähten Stößen verbunden werden [1]. Lösbare Verbindungen sind Klemmplatten- Kederschienestöße, Schlaufen und Schnürstöße, zusammenfassend siehe **Abb. 13** [43].

**Abb. 13:** Verbindungstypen [43]

Bei der Ermittlung der Festigkeit eines Membranmaterials muss die Festigkeit der Verbindungen berücksichtigt werden. Wenn die Verbindungen kleinere Festigkeiten aufweisen als die beschichteten Gewebe, sind die Verbindungen für die Bemessung maßgebend. Die Verbindungen beeinflussen stets den Kraftfluss in dem Flächentragwerk, weil die Nähte eine geometrische Diskontinuität verursachen und die Verbindungen eine andere Steifigkeit als das Grundmaterial aufweisen. [43]

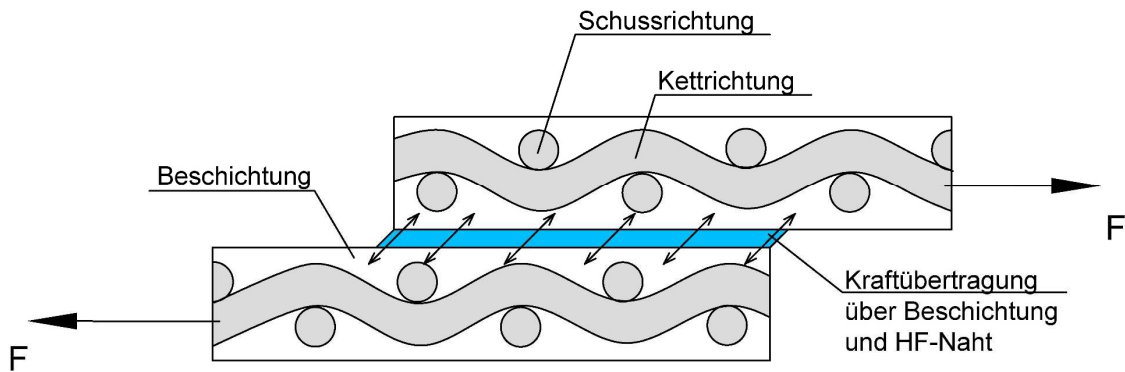
Spezielle mechanische Verbindungen, die bei Tragluftbauten verwendet werden können, sind Kederanschlüsse. Verschnürung, Steckverschluss, Reißverschluss und bieten eine Möglichkeit für das Schließen der Öffnungen bei Seitenteilen. [5]

Der dritte Typ von Anschlüssen sind besondere Seilanschlüsse mit Stahlbauteilen und Schrauben, die zu einem Ring, mit Bügeln oder Spannschlössern verbunden sind [17]. Die oben genannten Anschlüsse sind für die Ausbildung von Hoch-, Tiefpunkten und Aufhängungen notwendig. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die bei den Tragluftbauten verwendeten Konstruktionen, daher wurden Seilanschlüsse, Verschnürungen, Steckverschlüsse, Reißverschlüsse nur am Rande, aus Gründen der Vollständigkeit angeführt.

### 3.5.2 Flächennähte

Die formgeschnittenen Planen werden durch Schweißnähte verbunden. Bei den Schweißnähten können Hochfrequenznähte, die Schweißung mit Heizbalken und das Thermoimpulsverfahren unterschieden werden [1]. Schweißnähte sind wasserdicht, die Festigkeit kann 60-95% der Werkstofffestigkeit erreichen und die Herstellung von Flächennähten ist in der Serienfertigung günstiger als die genähten Stöße. [43], [17]

Hochfrequenznähte sind die meist verwendeten Nähte, die für z.B. PVC/Polyester geeignet sind [17]. Elektroden erwärmen die Membranränder auf die erforderliche Temperatur und zusätzlich werden die Ränder zusammengepresst [16]. Die Qualität kann durch Schweißgeschwindigkeit, Pressdruck und Verarbeitungstemperatur beeinflusst werden [43]. Geschweißte Verbindungen übertragen die Kräfte von einer geschnittenen Bahn auf die andere über die Beschichtung und die Schweißnaht, deswegen beeinflusst die Beschichtung die Tragfähigkeit der Anschlüsse, siehe **Abb. 14** [17]. HF-Schweißnähte werden mit einer Breite von 30-100 (50-80) mm ausgeführt, im Fall zu breiter Schweißnähte kann die Beschichtung aus dem Schweißbereich herausschwimmen [43].



**Abb. 14:** Weiterleitung der Spannungen durch Beschichtung und Schweißnaht [43]

**Schweißung mit Heizbalken** ist eine Fügetechnik, geeignet für Glas/PTFE [1]. Hier wird zwischen die Gewebe FEP-Folie gelegt, so kann der Anschluss 80-90% der Tragfähigkeit des Membranmaterials zwischen 23 °C und 70 °C erreichen [1], [17]. Das **Thermoimpulsverfahren** wird bei ETFE-Folien benutzt [1].

### 3.5.3 Montagestöße und Randanschlüsse

In Abhängigkeit von Geometrie, Fertigung und Transport müssen die formgeschnittenen Membranstreifen vor Ort verbunden werden. Membranränder werden mit Keder versehen, dieser stellt die Verbindung zwischen den Streifen sicher. [16]

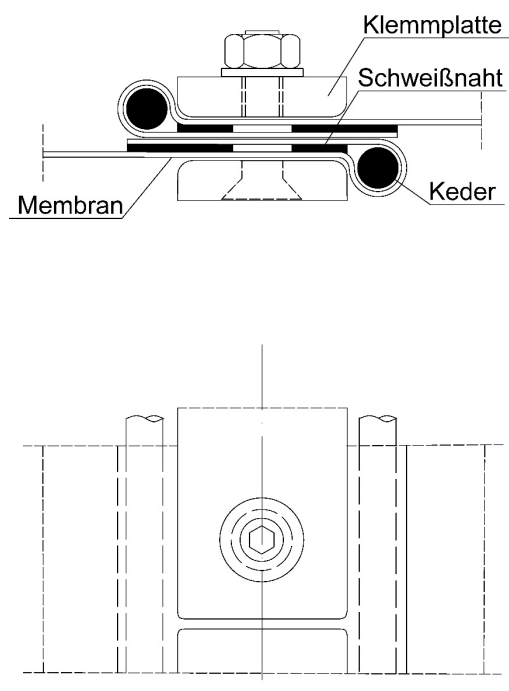
Die Membran muss die auftretenden Kräfte aufnehmen und an die Fundamente weiterleiten können. An festen Rändern werden Kräfte konzentriert auftreten, welche strukturelle und konstruktive Probleme verursachen. Die wegen der Kraftkonzentration und wegen des Kontakts von unterschiedlichen Materialien auftretenden möglichen Probleme müssen berücksichtigt werden, damit die Anschlüsse richtig ausgebildet werden können. Die Verankerungen und die festen Ränder sind mit Metallelementen verbunden, die steifer sind als das Gewebe. Um eine Kraftkonzentration zu vermeiden, müssen die Ränder Belastungen in alle Richtungen aufnehmen können, so brauchen diese Anschlüsse eine sehr detaillierte Ausarbeitung. [17]

Bei Tragluftbauten ist das Volumen einseitig begrenzt, hier werden Kederanschlüsse (**Abb. 16**) und Klemmplattenstöße (**Abb. 15**) am häufigsten verwendet. Kederanschlüsse sind nach **DIN 18204-1:2018 Teil 1** [5]: „zum Anschluss der Plane mit der Tragkonstruktion eng in den Planenrand eingeschweißte PVC-Vollschnüre, die in speziell geformten Metallprofilen geführt und gehalten werden“. Mit einem Kederanschluss können feste Ränder und Planenanschlüsse ausgeführt werden. Die Membranen werden mit Kederrand ausgebildet und mit Klemmleisten auf der Randlinie an der Baustelle geklemmt [1]. Diese Verbindungen können für eine feste

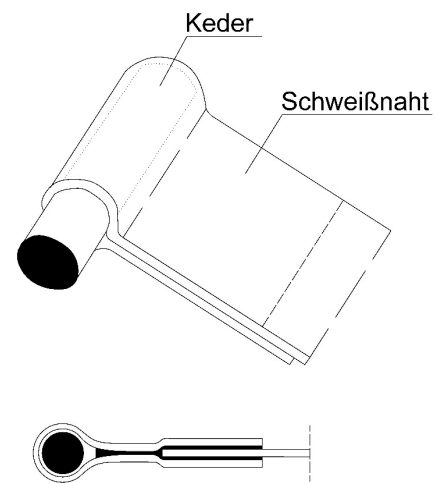


Randverankerung verwendet werden. Die Festigkeit von Kederanschlüssen und Klemmplattenstößen sind gleichwertig wie die Festigkeit der Schweißnähte [43].

Anschlüsse können für eine einfache Montage als spannbare Verbindungen ausgebildet werden oder der Keder kann aus einer Planentasche vorgefertigt werden, damit die Plane nicht direkt die Metallwandung der Kederschiene berührt [1], [16]. Nach **DIN 18204-1:2018** [5] sind alle Zubehörteile aus dem beschichteten Gewebe verträglichen Werkstoffen herzustellen und die Klemmplatte zur Sicherstellung einer ausreichenden Dichtheit mit Überlappungsstreifen abzudecken [5], [16]. Weil die Anschlüsse eine andere Dehnsteifigkeit als das Membranmaterial aufweisen, müssen die Membranen stückweise vorgedehnt und die Klemmplatten vorgekrümmt werden, um Faltenbildung zu vermeiden [43].



**Abb. 15:** Klemmplattenstoß [13]



**Abb. 16:** Keder [13]

Die Anforderungen an Schweißnahtfestigkeiten und Kederanschlüsse fasst **DIN 18204-1:2018 Teil 1** [5] zusammen.

### 3.5.4 Konstruktive Anschlüsse und Verbindungen

In den Seitenteilen von Zelthallen, die mit einer Primärtragkonstruktion ausgestattet sind, bieten Verschnürung, Steckverschluss, Reißverschluss eine Möglichkeit für den Abschluss der Öffnungen. Im Falle der Verwendung der vorher genannten Anschlüsse, ist der Festigkeitsnachweis nicht notwendig, wenn

- die Zelthalle mit Primärtragwerk normgemäß nach Landesbauordnung bemessen wurde,
- die auf die Seitenteile wirkende Windbelastung nicht größer als im **DIN 4134:1983** [4] vorgeschrieben ist und das Bauteil unter 8,0 m Geländeniveau liegt,
- die Verbindung zwischen Primärtragwerk und Seitenteilen maximal 5,5 m ist,
- die Öffnungshöhe der Seitenteile nicht größer als 5,0 m sind. Bei maximaler Höhe von 8,0 m sind die Spannweiten der Planen zu beschränken. [5]

**Verschnürung:** Der Membranrand einer Plane wird mit Metallösen versehen und mit der anderen Plane mit Kordelschlingen verbunden. Polyesterschnüre werden durch die Ösen gezogen, damit der Verbund zwischen den Planen hergestellt wird. Schnürstöße bieten eine einfache Montage durch schrittweises Spannen und Entspannen der Verbindung. DIN 18204-1:2007 Teil 1 [5] gibt die erforderlichen Durchmesser und Abstände von Ösen. [16]

**Reißverschlüsse** haben die niedrigste Festigkeit von allen Montagestößen. Reißverschlüsse können wasserdicht und gasdicht hergestellt werden, die Zugkräfte werden durch ineinandergreifende Zähne weitergeleitet, die auf Planenränder aufgenäht werden. [16]

### 3.6 Festigkeit und Steifigkeit der Naht

In Abhängigkeit der Lage der Naht und Orientierung der Fäden, können Nähte eine Steifigkeitszunahme oder Festigkeitsreduktion verursachen. Wenn die Naht parallel zur Belastungsrichtung ist, erhöht sich die Steifigkeit des Gewebes. Wenn die Naht senkrecht zum Kraftfluss liegt, müssen die Spannungen von den Fäden durch die Beschichtung auf die Fäden des benachbarten Gewebes weitergeleitet werden, so erzeugen Schweißnähte in diesem Fall einen Festigkeitsverlust, siehe **Abb. 17**. Weil die Nähte eine lineare geometrische Diskontinuität erzeugen, können sich Spannungskonzentrationen aus der Naht herausbilden, die die Lebensdauer des Gewebes reduzieren. Die unterschiedliche Dehnfähigkeit zwischen Nähten und Material kann auch zur Faltenbildung führen. [43]

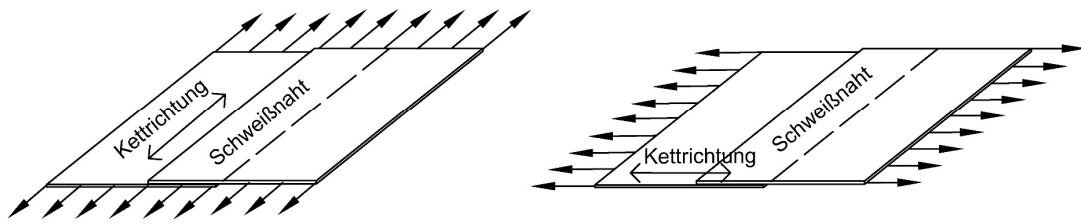
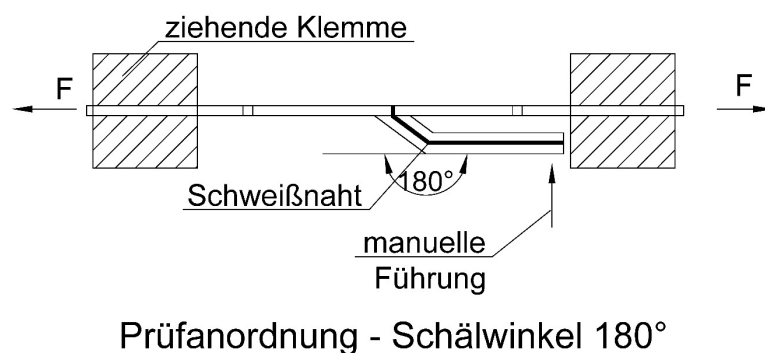


Abb. 17: Orientierung der Fäden [43]

Mechanische Kennwerte der Naht können durch die Nahtfestigkeit quantifiziert werden. Weil die Beanspruchung durch die Beschichtung weitergeleitet werden muss, bekommt in diesem Fall die Beschichtung eine Schubbeanspruchung. Je besser die Verbindung zwischen den Fäden und der Beschichtung ist, desto höher ist die Nahtfestigkeit, die erreicht werden kann. Die Verbindung zwischen der Beschichtung und den Fäden kann durch die Haftfestigkeit beurteilt werden. Die Festigkeit der Nähte hängen weiters von der Art, der Geschwindigkeit der Schweißung, der Nahtbreite und den Fertigungsbedingungen ab. Die Festigkeit der Schweißnaht kann durch Zugversuche geprüft werden. [43]

Die Prüfmethode für Schweißnähte ist in **DIN 18204-1:2018 Teil 1** [5] detailliert beschrieben. Die 5 cm breiten und 30 cm langen Probestreifen werden mit einer HF-Schweißmaschine verschweißt. Der verbundene Bereich muss mindestens 3 cm breit und 15 cm lang sein. Aus dem Mittelbereich der Schweißnähte werden 20 mm breite Streifen in Nahtlängsrichtung ausgeschnitten. Die Enden von den Probestreifen werden 5 cm lang mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/min auseinandergedrückt, so erhält man ein Kraft-Traversenverschiebungs-Diagramm. Die Prüfung ist in Kett- und Schussrichtung an mindestens 5 Probestreifen bei einer Temperatur von 20 °C durchzuführen. Die Auswertung der Prüfung wird nach **DIN 55543-5:2017** [42], dem Nachfolgedokument von **DIN 53357:1982** durchgeführt. **Abb. 18** stellt die Lage der auszuschneidenden Prüfstreifen dar und veranschaulicht die Durchführung der Prüfung. [5]



**Abb. 18:** Prüfanordnung für einen Schälwinkel von 90° und 180° nach DIN 55543-5:2017 [42]

Die Temperatur während der Versuche kann die Ergebnisse beeinflussen, mit wachsender Temperatur reduzieren sich die gemessenen Nahtfestigkeiten, weil die Haftung zwischen Beschichtung und Fäden mit höheren Temperaturen abnimmt. [43]

### 3.7 Nachweise der Verbindungen und Anschlüsse

Zugbeanspruchungen dürfen die aufnehmbaren Grenzzugkräfte, die von den einzelnen Bemessungssituationen stammen, nicht überschreiten. Um den Bemessungswert für Schweißnähte zu bestimmen, wird ein Abminderungsfaktor eingeführt, so kann die Zugfestigkeit von Schweißnähten aus dem Bauteilwiderstand des Grundmaterials nach der entsprechenden Bemessungssituation berechnet werden. Es ist zu bemerken, dass der Widerstand der Anschlüsse, wie Schweißnähte und Kederanschlüsse, nicht kleiner als der Widerstand des Grundmaterials sein darf. Der Abminderungsfaktor ist nach **DIN 18204 Teil 1 Tabelle 2** [5] in Abhängigkeit der Schweißnahtbreite und Temperatur zu wählen. **DIN 18204-1:2007 Teil 1 Tabelle 2** betrachtet die außergewöhnlichen Schneebelastung noch nicht, für diese neue Belastungssituation bietet erst **DIN 18204-1:2018 Teil 1** Abminderungsfaktoren nach **Tabelle 3**: die

Abminderungsfaktor  $\alpha_w$  ist 0,7, wenn  $b < 40$  mm, und 0,8, wenn  $b \geq 40$  mm. Mit  $A_{mod}$  und  $\gamma_M$  nach **Tab. 8** werden die entsprechenden Bemessungssituationen berücksichtigt. [5]

$$f_{t,Rd} = \frac{f_u}{A_{mod} \cdot \gamma_M} \cdot \alpha_w \quad (3.15)$$

Dabei ist:

$\alpha_w$  - Abminderungsfaktor für Schweißnähte

Die Randverstärkung ist mit Kedern auszuführen, um das Einreißen zu vermeiden müssen die Kanten des Keders konstruktiv abgerundet werden. Der Kederanschluss kann mit Textilstreifen abgedeckt werden, um die Reibung zwischen Plane und Metallteilen zu vermeiden. Die Ermittlung des Bemessungswertes des Bauteilwiderstandes für die Kederanschlüsse folgt dem gleichen Prinzip wie nach **Formel (3.15)**[5]:

$$f_{t,Rd} = \frac{f_{K,u}}{A_{mod} \cdot \gamma_M} \quad (3.16)$$

Dabei ist:

$f_{K,u}$  - Festigkeit der Kederanschlüsse in kN/ 5 cm

**Tab. 9:** Werte für das Produkt  $A_{mod}$  und  $\gamma_M$  für Kederanschlüsse nach Normen DIN 18204-1:2018-11 [5]

| Bemessungssituation                        | $A_{mod} \cdot \gamma_M$ |                   |
|--|--------------------------|-------------------|
|  | DIN 18204 -1:2007        | DIN 18204 -1:2018 |
| Wintersturm                                | 2,0                      | 2,5               |
| Sommergewitter                             | 2,9                      | 2,9               |
| Dauerbeanspruchung mit Schnee              | 10,00                    |                   |
| Dauerbeanspruchung mit erhöhter Temperatur |                          | 10,00             |
| Außergewöhnliche Schneebelastung           |                          | 1,5               |

Die Festigkeit von Kederanschlüssen sind in **DIN 18204-1:2018 [5] Tabelle 1** dargestellt. **Tab. 9** veranschaulicht das Produkt von  $A_{mod}$  und  $\gamma_M$  für Kederanschlüsse. Die Unterschiede zwischen den Normen **DIN 18204-1:2007** und **DIN 18204-1:2018 [5]** sind mit grauer Hinterlegung angemerkt. Zusammenfassend ist ersichtlich, obwohl das Prinzip von aufeinanderfolgenden Normen identisch ist, dass es wesentliche Änderungen in den Normen gibt, die die

Bemessungswerte mit höherer Sicherheit berücksichtigen, z.B. Wintersturm. Nach den geänderten Anforderungen werden die Bemessungssituationen angepasst und neue außergewöhnlichen Kombinationen in der Norm **DIN 18204-1:2018** [5] berücksichtigt. Konstruktiv gesehen ist es wichtig, die Dauerbeanspruchung statt mit Schneebelastung auf jene mit erhöhter Temperatur zu ändern, siehe blaue Markierung. [5]

## 4 Lastannahmen nach DIN 4134:1983 und EN 1991-1

### 4.1 Allgemeines

Die Nachweise von Tragluftbauten sind so aufgebaut, dass die Einwirkungen von ständigen und veränderlichen Lasten und deren Zeitdauer berücksichtigt werden können. Die ermittelten Schnittgrößen von Belastungen müssen in allen Grenzzuständen der Tragfähigkeit und in allen Hauptrichtungen des Konstruktionsmaterials (Kett- und Schussrichtung) kleiner sein als die gegebenen Festigkeiten des Gewebes. [18]

Die nach Norm **DIN 4134:1983** [4] zu berücksichtigenden Lasten sind in der Regel:

- Eigenlasten  $g, G$ ,
- Nenn-Innendruck  $p_i$ ,
- Windlast  $w$ ,
- Schneelast  $s$ ,
- Wärmeeinwirkungen aus Temperatur  $T$ .

Durch ständige Lasten wie Innendruck, Eigengewicht und durch veränderliche Schneelast werden gleichförmige Belastungen erzeugt, die auftretenden Dehnungen des Membranmaterials bleiben im elastischen Bereich. Windlasten sind veränderliche, dynamische Belastungen, die ungleichförmige Lastverteilungen, dadurch ungleichmäßige Deformationen und Spannungen verursachen. [27]

### 4.2 Einführung Teilsicherheitsbeiwerte, Kombinationswerte und Grenzzustände

#### 4.2.1 Lastfälle nach DIN 4134:1983

Folgende maßgebenden Lastfälle sind nach **DIN 4134:1983** [4] zu beachten:

- Lastfall A: Wintersturm
- Lastfall B: Sommergewitter
- Lastfall C: Dauerbeanspruchung

**Tab. 10** fasst die Lastfallkombinationen der einzelnen Lastfälle zusammen. [4]

**Tab. 10:** maßgebende Lastfälle nach DIN 4134 [4]

| Lastfall               | Beanspruchungsdauer | Kombination                        | Temperatur |
|------------------------|---------------------|------------------------------------|------------|
| A "Wintersturm"        | Kurzzeit            | $G \oplus P_i \oplus W$            | 20 °C      |
| B "Sommergewitter"     | Kurzzeit            | $G \oplus P_i \oplus 0.6 \times W$ | 70 °C      |
| C "Dauerbeanspruchung" | $t > 10$ Jahre      | $G \oplus P_i$                     | 20 °C      |

#### 4.2.2 Lastfallkombinationen nach semiprobabilistische Nachweiskonzept nach [31]:

Grundkombination der ständigen und vorübergehenden Beanspruchungen  $E_d$ :

$$E_d = \sum_j \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_i \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.17)$$

Außergewöhnliche Situation der ständigen und vorübergehenden Beanspruchungen  $E_{dA}$ :

$$E_{dA} = \sum_j G_{k,j} \oplus A_d \oplus \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_i \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.18)$$

- Lastfallkombination A: Wintersturm

$$E_{d,A1} = \gamma_G \cdot G_k \oplus \gamma_G \cdot p_i \oplus \gamma_Q \cdot w_e \oplus \gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot s_k \quad (4.19)$$

$$E_{d,A2} = \gamma_G \cdot G_k \oplus \gamma_G \cdot p_i \oplus \gamma_Q \cdot s_k \oplus \gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot w_e \quad (4.20)$$

$$E_{d,A3} = \gamma_G \cdot G_k \oplus \gamma_G \cdot p_i \oplus \gamma_Q \cdot w_e \quad (4.21)$$

$$E_{d,A4} = \gamma_G \cdot G_k \oplus \gamma_G \cdot p_i \oplus \gamma_Q \cdot s_k \quad (4.22)$$

- Lastfallkombination B: Sommergewitter mit erhöhter Temperatur

$$E_{d,B} = \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_{G,j} \cdot p_i \oplus \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{0,i} \cdot w_e \quad (4.23)$$

- Lastfallkombination C1: Dauerbeanspruchung

$$E_{d,C} = \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_{Q,j} \cdot p_i \quad (4.24)$$

- Lastfallkombination C2: Dauerbeanspruchung mit erhöhter Temperatur

$$E_{d,C} = \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_{Q,j} \cdot p_i \quad (4.25)$$

- Lastfallkombination D: Außergewöhnliche Bemessungssituation (außergewöhnliche Schneelast)

$$E_{d,A,D} = G_{k,j} \oplus p_i \oplus s_{Ad} \oplus \psi_{1,1} \cdot w_e \quad (4.26)$$

Bei Dauerbeanspruchung wird der Nenn-Innendruck mit erhöhtem Teilsicherheitsbeiwert berücksichtigt. In **DIN 18204-1:2018** [5] wurden neue Bemessungssituationen eingeführt, die Dauerbeanspruchung unter Einfluss erhöhter Temperatur (C2) und die außergewöhnliche Bemessungssituation (D). Diese Kombinationen sind zusätzlich zu den anderen Lastfallkombinationen nach **DIN 4134:1983** [4] zu prüfen.



Die Temperatureinwirkungen der Lastfallkombinationen werden an der Materialseite berücksichtigt, mit oder ohne reduzierter Reißkraft. Temperatureinwirkungen siehe **Tab. 11**

**Tab. 11** : Lastfallkombinationen und die zugehörigen Temperatureinwirkungen

| Lastfall                    | Beanspruchungsdauer | Temperatur |
|-----------------------------|---------------------|------------|
| A "Wintersturm"             | kurzzeit            | 20 °C      |
| B "Sommergewitter"          | kurzzeit            | 70 °C      |
| C1 "Dauerbeanspruchung"     | t > 10 Jahre        | 20 °C      |
| C2 "Dauerbeanspruchung"     | t > 10 Jahre        | 70 °C      |
| D "Außergewöhnliche Schnee" | kurzzeit            | 20 °C      |

## 4.3 Ständige Einwirkungen

### 4.3.1 Eigenlast

Die ständigen Lasten von Tragluftbauten setzen sich einerseits aus dem Eigengewicht des Konstruktionsmaterials, und andererseits aus der Aufbaulasten zusammen [4]. Die ständigen Lasten, die als Eigenlast zu berücksichtigen sind, sind in **EC EN 1991-1-1:2011** [29] konkretisiert, wie z.B. Einzellasten der Beleuchtung oder Linienlasten der Leitungen. Das Eigengewicht der Hallenhaut ist von der Dicke des Konstruktionsmaterials und von der Leistungsklasse abhängig. Die flächenbezogene Gesamtmasse von beschichtetem Gewebe ist in **DIN 18204-1:2018 Teil 1** [5] in der **Tabelle 1** zusammengefasst, und beträgt abhängig von der Klasse des textilen Flächengebildes zwischen 450 und 650 g/m<sup>2</sup>. Die Belastung zufolge Eigenlasten ist in der Regel so gering, dass der Ausgleich mit leichtem Überdruck möglich ist. Nach **DIN 4134:1983** [4] müssen die Beanspruchung von Eigenlasten nicht in der Berechnung der Schnittgrößen berücksichtigt werden. [18]

Nach [46] muss das Eigengewicht der Membrane nur dann berücksichtigt werden, wenn es zu Stabilisierung der Bauteile oder zum deutlichen Abbau der Vorspannung führt [46].

Nach **EN 13782:2015** [35] muss jedoch der Einfluss des Eigengewichts der trockenen oder nassen Plane, durch den oberen oder unteren charakteristischen Wert, auch berücksichtigt werden. Die Belastungen von Beleuchtungen als Einzellasten, die notwendigen technischen Errichtungen und Zubehöre als Linienlasten sind nach genaueren Angaben zu definieren.

Die zu berücksichtigenden Nutzlasten nach **EC EN 1991-1-1:2011** [29] entsprechen nach der Kategorie H- nicht begehbare Dächer-, in denen die Instandsetzungsmaßnahmen nicht vorgesehen sind.

### 4.3.2 Ersatzlast

Nach **EN 13782:2015** [35], welche für fliegenden Bauten - Zelte gilt, kann die Standsicherheit für eine gleichmäßig verteilte Ersatzlast von  $0,1 \text{ kN/m}^2$  nachgewiesen werden. Dieser Lastfall kann nur mit Eigengewicht kombiniert werden. [35]

### 4.3.3 Nenn - Innendruck

Der innere Luftüberdruck  $p_i$  muss unter Berücksichtigung der veränderlichen Einwirkungen (Schneelast und Windlast), Nutzungszweck nach Umgebung der Traghalle und der Abmessungen der Traglufthalle festgelegt werden. Der Innendruck hat großen Einfluss auf Formstabilität und Standsicherheit des Bauwerks, deswegen muss der Innendruck rechnerisch ermittelt werden. Anbei muss berücksichtigt werden, dass die Überdruckhöhe die Betriebs- und Fertigstellungskosten beeinflusst, daher ist der Nenn-Innendruck sorgfältig zu wählen. [18]

Der Überdruck kann durch Berücksichtigung von Erfahrungswerten der Praxis und nach bestimmten Kriterien für den Druckbeiwert bestimmt werden. Diese Kriterien basieren auf der Verformung der Querschnitte entsprechend dem inneren Überdruck. *M. Horcic* beschäftigte sich in seiner Dissertation [18] mit der Ermittlung des erforderlichen Überdrucks. Die Untersuchungen basierten auf der Ermittlung der maximalen Deformation zufolge von Modelluntersuchungen im Windkanal. Während der Modelluntersuchungen ändert sich der innere Überdruck, die Windbelastung bleibt aber konstant. Die maximale Deformation,  $\max \Delta r_i$  wird gemessen. Der erforderliche Überdruck liegt dort, wo die Deformationsdifferenz zufolge steigendem Überdruck entweder abnimmt oder konstant bleibt. Nach den Untersuchungen ergibt sich der ideale Überdruckbereich, welcher zwischen  $294\text{-}490 \text{ N/m}^2$  ( $30$  bis  $50 \text{ kp/m}^2$ ) liegt. Unterhalb  $294 \text{ N/m}^2$  ( $30 \text{ kp/m}^2$ ) müssen die bisherigen Erfahrungen in Betracht gezogen werden. Wenn der Innendruck zu niedrig gewählt wird, ist die Formstabilität gefährdet. Ab  $490 \text{ N/m}^2$  ( $50 \text{ kp/m}^2$ ) verursacht der Überdruck keine bedeutende Änderung im Deformationsverhalten, siehe **Abb. 19**. [18]

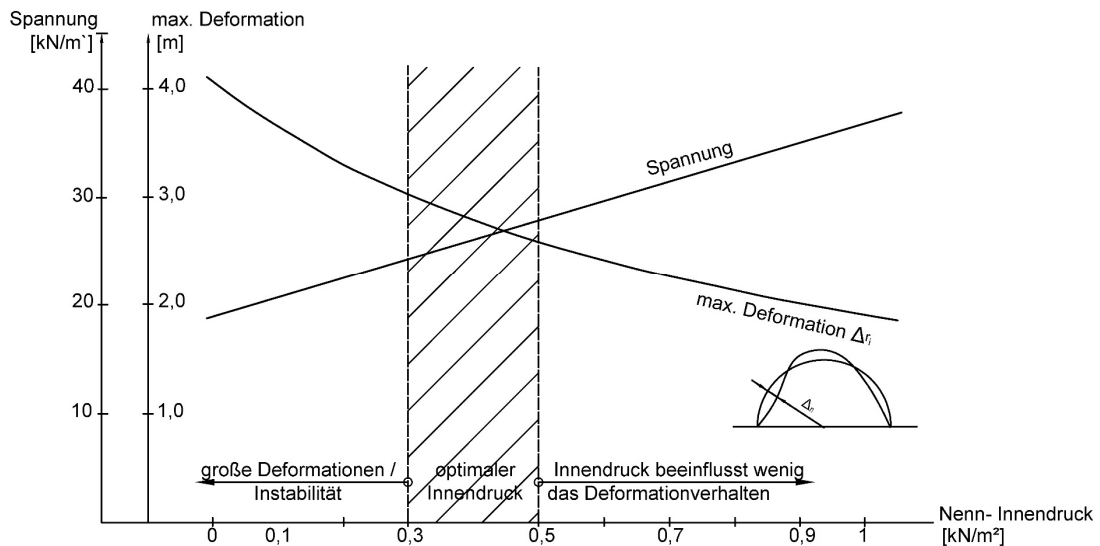


Abb. 19: Spannung und Deformation in Abhängigkeit vom Überdrucks [18]

Firt [30] hat den erforderlichen Innendruck mit Windkanalmessungen getestet. Aus den Messungen hat sich ergeben, dass mit steigender Windgeschwindigkeit ein größerer Innendruck erforderlich wird, um die Formstabilität zu erhalten. Bei einer Windgeschwindigkeit von 15 m/s beträgt der notwendige Innendruck 90-120 N/m<sup>2</sup>, jedoch ändert sich dieser Wert bei 35 m/s auf 550-700 N/m<sup>2</sup>. Der erforderliche Innendruck ist nach Firt [30] kleiner oder gleich der Windbelastung. Der Unterschied zwischen der Windbelastung und dem notwendigen Innendruck ist im Falle einer Windgeschwindigkeit von 35 m/s und unter 45° zur Senkrechten auf die Längsachse nur 20 N/m<sup>2</sup>, wobei die Unterschiede bei 0° und 30° zur Senkrechten auf die Längsachse 130-150 N/m<sup>2</sup> beträgt siehe Abb. 20. [30]

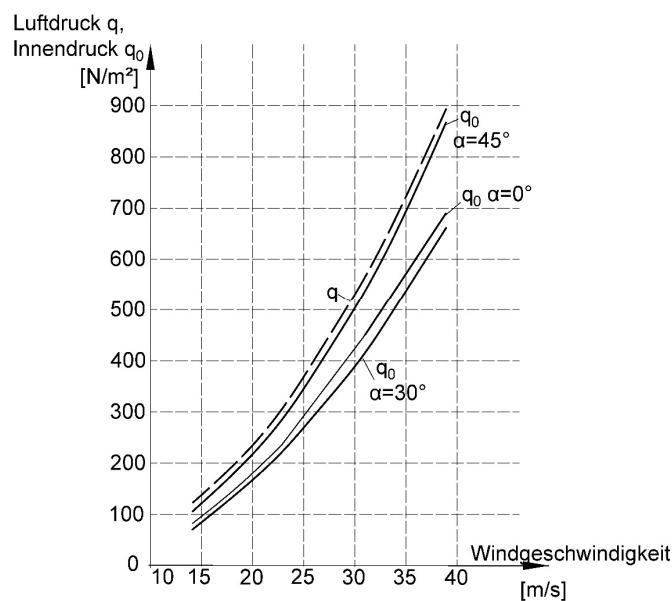


Abb. 20: Innendruck in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit [30]

Nach **DIN 4134:1983** [4] wird der Nenn-Innendruck in Abhängigkeit von den veränderlichen Einwirkungen nach Erfahrungswerten ermittelt. Der Innendruck bei gleichsinnig doppelt gekrümmten Hüllen ohne Seilstützung kann nach den ungünstigsten Lastfallkombinationen bestimmt werden, wenn die Berücksichtigung der Systemverformungen nicht erforderlich ist [4]. In diesem Fall, muss die Konstruktion, die auf das System wirkenden Belastungen so aufnehmen, dass das Tragwerk in einem Gleichgewichtszustand ist, in dem ausschließlich Normalspannungen entstehen [19]. Dadurch ist sichergestellt, dass keine Faltenbildung auftritt. Die Anforderung des Membranzustandes kann bei zylinderförmigen Membranen mit Abschlusskuppel oder bei kugelförmigen Membranen sichergestellt werden, wenn der Nenn-Innendruck  $p_i$  nach **DIN 4134:1983 Tabelle 1** [4] in Abhängigkeit vom Staudruck definiert wird. Die durch **DIN 4134:1983** [4] definierten Werte des Nenn-Innendrucks sollen zu starke Verformungen der Membran verhindern [27].

Nach **DIN 4134:1983** [4] wird der Nenn-Innendruck durch das Verhältnis von Höhe und Radius des Zylinders, (siehe **Abb. 33**, **Abb. 34**) oder unter Berücksichtigung der Windlast und Schneelast bestimmt, welcher im **Abschnitt 4.4** und **4.4.2** zusammengefasst ist. Maßgebend ist der größte oben genannten Werte, unter der Voraussetzung, dass der Nenn-Innendruck nicht kleiner als 0,3 kN/m<sup>2</sup> sein darf [4]. Dieser Wert gilt für flache Hallen, weil diese Konstruktionen vor allem durch Sogkräfte zufolge Windbelastung beansprucht wird [31].

Der maximale Innendruck ist von der Dehnsteifigkeit  $D$ , der Geometrie der Halle und dem Radius der Membran  $R_0$  abhängig. Dieser heißt Berstdruck. Der kritische Innendruck, welcher nach *Herzog* [31] immer größer als der Berstdruck zu wählen ist, kann wie folgt ausgerechnet werden:

- bei Zylindern:  $p_{\text{crit}} = 0,25 \cdot D/R_0$
- bei Kugeln:  $p_{\text{crit}} = 0,296 \cdot D/R_0$ . [31]

**Tab. 12:** Bestimmung des Nenn-Innendrucks  $p_i$  nach **DIN 4134:1983** [4] **Tabelle 1**

| Gestalt der Membran                | Verhältnisse der Abmessungen     | Nenn-Innendruck $p_i$ in kN/m <sup>2</sup> |                             |
|------------------------------------|----------------------------------|--|-----------------------------|
|                                    |                                  | nach Staudruck $q$                         | nach Schneelast $s$         |
| Zylinderförmig mit Abschlusskuppel | Dreiviertelzylinder $h/r = 1,5$  | $\geq 80\%$ der Staudruck                  | $\geq 1,6 \cdot$ Schneelast |
|                                    | Halbzylinder $h/r = 1$           | $\geq 60\%$ der Staudruck                  | $\geq 1,3 \cdot$ Schneelast |
|                                    | Flacher Zylinder $h/r \leq 0,75$ | $\geq 50\%$ der Staudruck                  | $\geq 1,1 \cdot$ Schneelast |
| Kugelförmig                        | Dreiviertelkugel $h/r = 1,5$     | $\geq 100\%$ der Staudruck                 | $\geq 1,3 \cdot$ Schneelast |
|                                    | Halbkugel $h/r = 1$              | $\geq 70\%$ der Staudruck                  | $\geq 1,0 \cdot$ Schneelast |
|                                    | Kugelabschnitt $h/r = 0,5$       | $\geq 60\%$ der Staudruck                  | $\geq 1,0 \cdot$ Schneelast |

Bei temporären Tragwerken bis 20 m Höhe, kann der Nenn-Innendruck  $p_i = 0,30 \text{ kN/m}^2$  gewählt werden. Allerdings muss sichergestellt werden, dass sich keine Personen ab Windsstärke 8 (siehe **Abschnitt 4.4**) in der Halle aufhalten und die Hülle durch Einbauten, Lagergüter oder andere Objekte nicht gefährdet sind. Die Reduktion des Nenn-Innendrucks ist jedoch bis 50% des vorgeschriebenen Nenn-Innendrucks - jedoch nicht weniger als  $p_i = 0,18 \text{ kN/m}^2$  - möglich, wenn eine windabhängige Steuerung vorhanden ist und die Halle mit einer Alarmanlage ausgestattet ist. Wenn das Bauwerk keine windabhängige Steuerung hat, aber eine funktionierende Alarmanlage installiert ist und eine verantwortliche Aufsichtsperson anwesend ist, kann die Reduktion der Nenn-Innendruck auch gesetzt werden. [4]

Die Sicherstellung des Nenn-Innendrucks erfolgt durch Luftreserven und Betriebsanweisungen, damit der vorgesehene Nenn-Innendruck um nicht mehr als 10% überschritten, und nicht mehr als 50%, -aber nicht weniger als auf  $0,18 \text{ kN/m}^2$  - unterschritten wird. [4]

## 4.4 Veränderliche Einwirkungen

### 4.4.1 Wind

#### 4.4.1.1 Allgemeines

Die Deformationen und Spannungszustände sind bei Tragluftbauten stark geknüpft. Weil das Konstruktionsmaterial nur Zug- und geringe Schubfestigkeit aufweist, ist die Formfindung der Membranen ausschlaggebend [23]. Die Form, die Belastungen, die statischen Beanspruchungen und die Werkstoffe beeinflussen die Formfindung. Die veränderlichen Belastungen, wie Wind oder Schnee, verändern die Form der Hülle so, dass sich ein Gleichgewicht bildet unter der Voraussetzung, dass nur Zugspannungen in den Fasern auftreten. Dadurch ändert sich der Spannungszustand bei jeder Veränderung der Belastung und es bildet sich eine neue Form aus. [18] Obwohl die Formfindung bei pneumatischen Konstruktionen nicht so komplex ist, wie z.B. bei tensegrity Konstruktionen, weil das Erreichen des Gleichgewichtszustandes im Falle einer geschlossenen Hülle immer möglich ist, müssen die architektonischen Anforderungen erfüllt werden, ohne dass Faltenbildungen auftreten [23].

Vor der Verbreitung der computergestützten Modellierung und der FEM wurden die Druckbeiwerte aus Windbelastungen entweder analytisch ermittelt, oder durch Windkanalmessungen an verkleinerten Modellen bestimmt [24]. Im Fall pneumatischer Konstruktionen können die Konstruktionsformen große Vielfalt aufweisen. Die einfacheren Formen, wie zylinder- und kugelförmige Geometrien wurden bereits ausführlich untersucht, aber bei besonderer Formen, die durch neue Technologien möglich sind, sind Windkanaluntersuchungen ebenfalls notwendig.

Die analytischen Methoden zur Ermittlung der Spannungszustände von einfacheren Formen und entsprechende Erfahrungswerte geben die Möglichkeit, Bemessungen ohne weitere Untersuchungen durch die Normansätze zu führen. Die Gleichungen von analytischen Methoden sind von *Otto, Dent, Bulson, Herzog* [31] und *Firt* [30] ermittelt und die nationalen Anhänge der angeführten Normen geben entsprechend einfachere Lösungen. [24]

Die Windbelastung besteht aus Reibungskräften und Druckkräften. Weil diese Reibungskräfte vernachlässigbar klein sind [18], siehe **Abschnitt 4.4.1.2**, können Windbelastungen  $w$  durch das Produkt von dem aerodynamischen Beiwert  $c_{pe}$  für den Außendruck und des Böengeschwindigkeitsdrucks  $q_p(z_e)$  ermittelt werden, siehe **Gleichung (4.30)**. Nach [46] müssen Reibungskräfte jedoch bei großen Dachflächen berücksichtigt werden. Der aerodynamische Beiwert kann durch Windkanalversuche ermittelt werden, weil die Geometrie, die Verformungen und die Anströmrichtung großen Einfluss auf diesen Beiwert haben. Die Druckverteilung hängt von der Reynolds Zahl und der Oberflächenrauigkeit ab. [31]

Windbelastungen verursachen große Verformungen an den Membranen. Wind wirkt immer normal zur Oberfläche. Eine Verformung der Hülle ruft eine Änderung der aerodynamischen Beiwerte und der Richtung der Windlast hervor. [46]

#### 4.4.1.2 Ermittlung der Windbelastung durch Windkanaluntersuchung mit verkleinerten Modellen

*Horcic M.* und *Gerhardt H. J.* haben sich mit Windkanaluntersuchungen des **zylindrischen Teils** von Traglufthallen ausführlich beschäftigt und die Ergebnisse in [18] und [27] zusammengefasst. Die Messungen wurden an verkleinerten Modellen durchgeführt, die geometrische Ähnlichkeit basiert auf der Idee, dass ähnliche physikalische Vorgänge sich auf geometrisch ähnlichen Gebilden entwickeln, wenn die gleichen Randbedingungen und mathematischen Ansatzgleichungen für beide Gebilde gelten. Wenn strenger Ähnlichkeit entsteht, muss ein Längenmaßstab festgestellt werden  $l_v = \frac{l_M}{l_H}$ , wobei sich  $l_M$  sich auf das Modell und  $l_H$  sich auf die Hauptausführung bezieht. Beim Längenmaßstab müssen zeitunabhängige Konstanten dargestellt werden, und bei strenger Ähnlichkeit müssen alle einander entsprechenden Größen im Modell und in der Hauptausführung übereinstimmen. Weil strenge Ähnlichkeit im Fall von Modelluntersuchungen zufolge der Komplexität dieser Modelle meist nicht gewährleistet werden kann, muss dann eine angenäherte Ähnlichkeit angenommen werden. [18]

Nach *Gerhardt* [27] kann strenge Ähnlichkeit angenommen werden, wenn die Reynolds-Zahl für das Modell und für das Original gleich groß ist. Die Reynolds- Zahl zeigt das charakteristische Verhältnis zwischen Trägheitskräften und Reibungskräften:

$$R_e = \frac{v \cdot L}{\nu} \quad (4.27)$$

Dabei sind:

- $v$  - Bezugsgeschwindigkeit [m/s]
- $L$  - charakteristische Länge [m]
- $\nu$  - kinematische Viskosität [m<sup>2</sup>/s]

Bei angenäherter Ähnlichkeit kann die Reynolds-Zahl des Modells von jener des Originals um mehrere Größenordnungen abweichen. Wichtig ist, dass die Strömungsform am Modell und beim Original gleich ist. Ob der Wind bis zur Ablösung turbulent oder laminar strömt, ist die kritische Umströmungszahl zu ermitteln. Die kritische Reynolds-Zahl für einen Kreiszyylinder, welcher senkrechter Winbelastung unterworfen ist, beträgt  $R_e = 3,5 \cdot 10^5$ . Unter der kritischen Reynolds-Zahl wird die Anströmung nicht turbulent. Bei überkritischer Umströmung ist die Druckverteilung unabhängig von der Reynolds-Zahl, deswegen müssen die Modelle im Fall von Windkanalmessungen eine überkritische Reynolds-Zahl besitzen, damit die Ergebnisse mit guter Näherung auf die Originalausführung übertragbar sind. [27]

Neben der aerodynamischen Ähnlichkeit, muss auch eine elasto-statische Ähnlichkeit gewährleistet werden, weil Tragfluthallen sich zufolge Windbelastungen verformen. Aus der Hook'sche Ähnlichkeitszahl kommt die Gleichung der elasto-statische Ähnlichkeit:  $\frac{q_M \cdot L_M}{D_M} = \frac{q_G \cdot L_G}{D_G}$ , wo  $q$  die Staudrücke,  $L$  die Abmessungen und  $D$  den Dehnungsmodul des Modells oder der Großausführung repräsentiert. Obwohl  $q$  und  $L$  ähnlich sind, können die Dehnungsmodule von Tragfluthallenwerkstoffen und Modellwerkstoffen die nötige Ähnlichkeit erfüllen. [27]

Die Messungen von *Horcic* [18] wurden an starren Modellen durchgeführt, da der Verformungszustand mithilfe von starren Modellen durch analytische Methoden einfacher bestimmt werden kann. Die Windbelastung verursacht bei pneumatischen Konstruktionen große Deformationen, was nicht auf die Dehnung des Werkstoffes, sondern auf die Nachgiebigkeit der Konstruktion zurückzuführen ist, die minimalen Dehnungen von Konstruktionsmaterialien beeinflussen die Windlastverteilung nicht. Obwohl flexible Modelle die Windverteilung in Abhängigkeit von Innendruck und Staudruck besser repräsentieren können, wird wegen der trotzdem ungleichen Konstruktionsnachgiebigkeit das strenge Ähnlichkeitskriterium nicht erfüllt. [18].

Die Windbelastung der kugelförmigen Membranen untersuchten *Kassem* und *Novak* in [25]. Die Windbelastung, und die modalen Formen wurden mit aeroelastischen Modellen und mit starren Modellen durch Windkanal-Tests untersucht, und die Ergebnisse wurden verglichen. Die oben genannte Untersuchung hilft beim Verständnis der Ergebnisse von unterschiedlichen Modellen, nämlich starre und flexible Modellen. Nach dem Vergleich der Ergebnisse von unterschiedlichen Modellen wurde festgestellt, dass der Unterschied zwischen den Ergebnissen (von starren und



flexiblen Modellen) nur 14% beträgt. Weil die Herstellung von starren Modellen einfacher und die Kosten geringer sind, wird die Verwendung von starren Modellen meist für experimentelle Untersuchungen bevorzugt. [25]

Windlasten bewirken Druck- und Sogkräfte, die normal auf die Teilflächen wirken, sowie kleine tangentiale Reibungskräfte. Die Reibungskräfte können nach **Formel (4.28)** berechnet werden: [18]

$$w = c_f \cdot q \cdot F \quad (4.28)$$

Dabei sind:

- $c_f$  - Gesamtwiderstandsbeiwert
- $F$  - durch Wandschubspannung belastete Teilfläche der Traglufthalle
- $q$  - Staudruck
- $w$  - auf Fläche  $F$  wirkende Reibungskraft

Die Lage der Strömungsablösung an einem Körper und die Reibungskräfte hängen von der Oberflächenrauigkeit ab, die die Textur und Verbindungen beeinflussen. Die Wände von Traglufthallen sind weitgehend glatt, und die Nähte sind meist auch vernachlässigbar. [27] Die Untersuchungen zeigten, dass die Reibungskräfte keine wesentlichen Änderungen in dem Spannungs-dehnungszustand verursachen. [18]

Der Spannung- und Verformungszustand des Modells in [18] wurde iterativ aus den Messergebnisse berechnet. Die Flächenlast, die auf eine pneumatische Konstruktion wirkt, besteht aus dem Staudruck und Innendruck, die auf Einzelkräfte aufgeteilt werden:

$$p = c \cdot q + p_i \quad (4.29)$$

Der erste Schritt der iterativen Berechnung ist, die Bestimmung der Einzelkräfte zufolge Windbelastung und diese normal auf dem unverformten Querschnitt darzustellen. Gesucht ist der verformte Querschnitt, unter der Voraussetzung, dass sich die Hallenhaut nicht ausdehnen kann. Im zweiten Schritt, werden die Einzelkräften so modifiziert, dass sie tangential auf der im ersten Schritt ermittelten deformierten Hallenhaut stehen. Die zwei Berechnungsschritte werden so lange wiederholt, bis die Differenz der Ergebnisse akzeptierbar klein ist, siehe **Abb. 21**. [18]



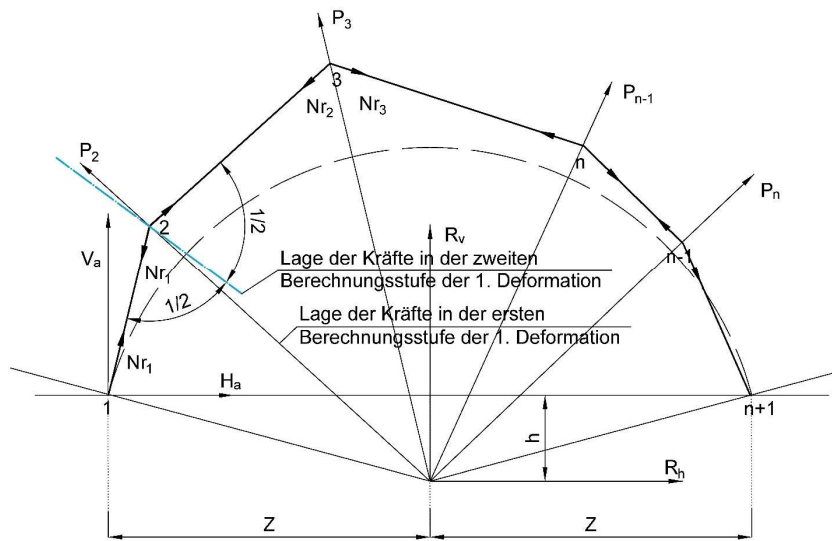


Abb. 21: Darstellung der Schritte der iterativen Berechnung [18]

In [18] wurden 2 Modelle untersucht, das erste Modell mit der Form eines Halbkreiszyinders mit kugelförmigen Abschlusskuppeln und das zweite Modell mit kleinerer Bauwerkshöhe. Die Modelle wurden aus 4 Richtungen belastet, siehe **Abb. 22**

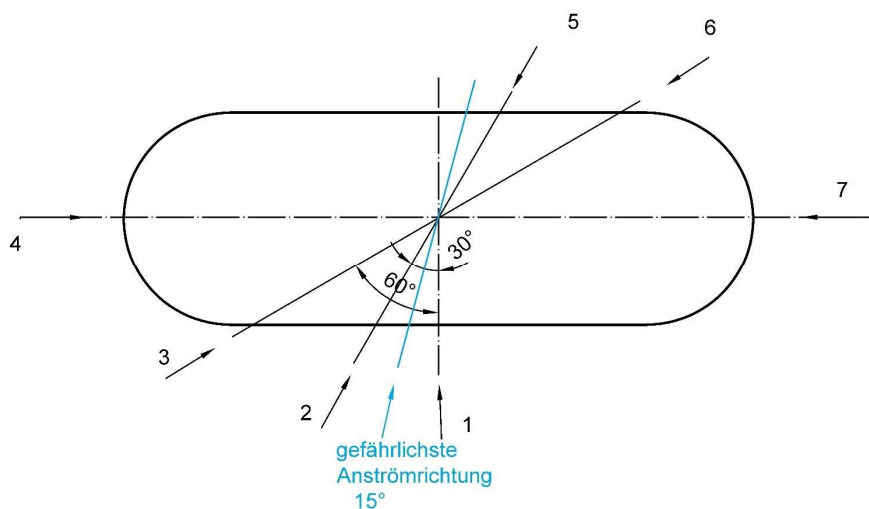


Abb. 22: Messungen nach Horcic [18]

Die Ergebnisse zeigen, dass ein Halbzylinder höheren Windkräften ausgesetzt ist, der Unterschied beträgt ca. 20%. Die Umgebung kann aber positive Effekte auf die gemessenen Druckbeiwerte bewirken. Die Queranströmung erzeugt keine symmetrische Druckverteilung im Querschnitt, aber wegen der Symmetrie war es möglich, die Modelle mit nur 4 Anströmrichtung zu untersuchen. Die größte Windbelastung stammt aus der Queranströmung und der meistbelastete zylindrische Bereich liegt in der Nähe der zustromseitigen Endkugeln. Nach genaueren

Untersuchungen wurde festgestellt, dass die gefährlichste Belastungsrichtung bei  $15^\circ$  zur Senkrechten auf die Längsachse ist. Die gefährlichste Belastungsrichtung spezifiziert die Anströmrichtung, bei der der größte Flächeninhalt des Druckbeiwert-Diagramms am Zylinderteil gemessen werden kann. Angenommen wird, dass diese Stelle für das Konstruktionsmaterial maßgebend ist, also wo die größten Spannungen entstehen. Die größten Deformationen treten aber nicht an den gleichen Stellen auf. Die größten Deformationen in Abhängigkeit von der Anströmrichtung, befinden sich bei den Endteilen. Die Untersuchungen von *Horcic* [18] haben die Wirkungen der deformierten Hallenform analysiert und es hat sich gezeigt, dass die Deformation nur am zustromseitigen Endteil des Modells eine Wirkung hat. [18]

Ein wesentlicher Faktor bei der Beurteilung der Windbelastung und der Ermittlung der Druckbeiwerte, ist das Verhältnis vom Innendruck zu Staudruck. Der Druckbeiwert-  $C_p$  -hängt stark von  $p_i/q$  Anteil ab: bei kleinerem  $p_i/q$  Verhältnis, ist der Druckbeiwert größer. [26] Ein Nachteil von starren Modellen ist, dass die Höhe des Überdrucks entweder nach Erfahrungen oder nach einem bestimmten Kriterium anzusetzen ist. In [18] wurde der erforderliche Überdruck nach der Querschnittsverformung gewählt. Bei der Bestimmung der gefährlichsten Windbelastung nach [18] beträgt das Verhältnis vom Innendruck und Staudruck 0,4. Wenn das  $p_i/q$  Verhältnis wegen z.B. ökonomischer Gründe niedriger gewählt werden muss, kann die Windkanaluntersuchung bei starrem Modell den  $C_p$ -Wert unterschätzen. [26]

*Gerhardt* [27] hat auch Windkanaluntersuchungen ausgeführt, um die ermittelten Druckbeiwerte zufolge statischer und dynamischer Windbelastung zu ermitteln. Es wurde ein flexibles Modell mit dem Wert nach **DIN 4134:1983** [4] vorgeschlagenen Mindestnennwert des Innendrucks  $C_{pi}=0,6$  kN/m<sup>2</sup> eingestellt. Als Modellform wurde eine Traglufthalle mit halbzyklindrischem Mittelteil und rechteckigem Grundriss gewählt. Obwohl die untersuchten Formen nicht gleich waren, stimmen die Ergebnisse mit [18] überein. Das Modell wurde mit 4 unterschiedlichen Winkeln zur Senkrechten der Längsachse - Windrichtungen ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ) untersucht (**Abb. 23**).

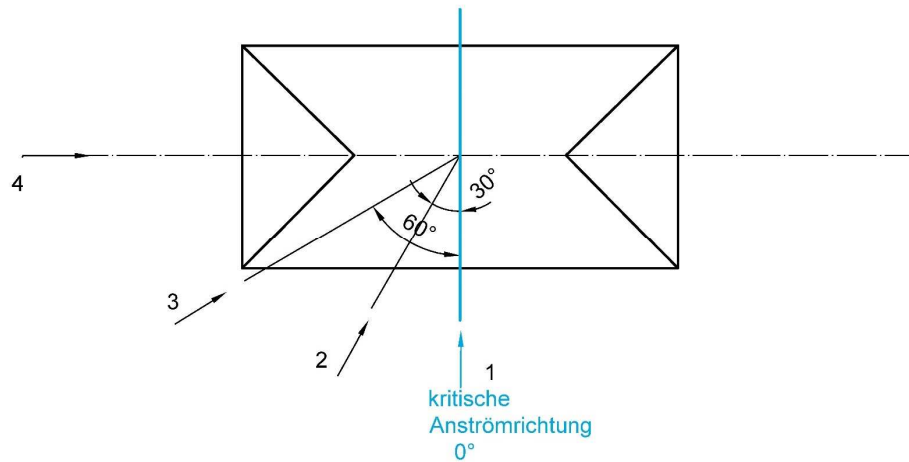
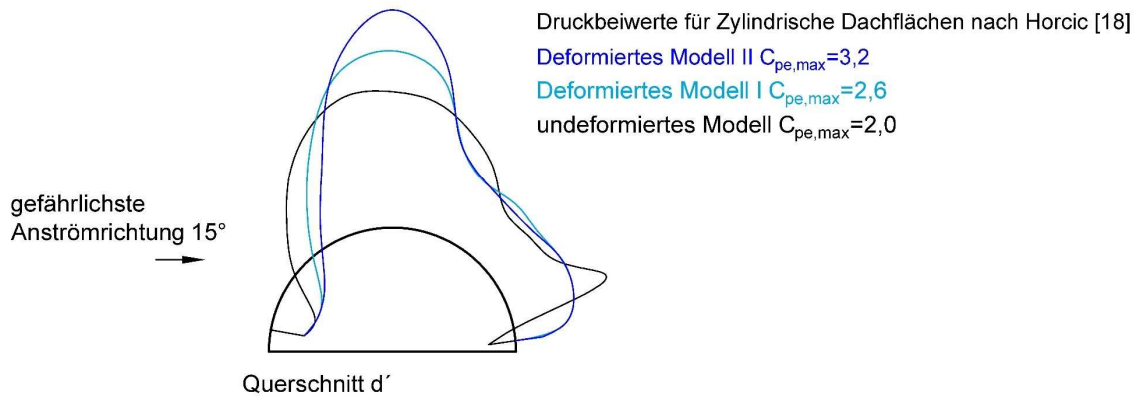


Abb. 23: Messungen nach Gerhardt [27]

Dabei zeigte sich, dass die größte Windbelastung unter  $0^\circ$  im halbzyllindrischen Mittelbereich, auf der Luvseite auftritt. Als kritischer Bereich war hier auch der bodennahe Bereich an den Stirnseiten und der Übergangsbereich zwischen Halbzylinder und Stirnseite. Grund dafür sind die Krümmungsänderung und die großen Druckgradienten. Im Übergangsbereich sind die größten Membranspannungen zu erwarten. Die größte Sogbelastung tritt unter  $30^\circ$  an der Luvseite auf. Auf der anderen Seite des Modells ist der Druck ungefähr konstant  $c_{pm} = -0,45$ . Zuzufolge des Windkanaltests konnten die dynamischen und statischen Windbelastungen verglichen werden, die Druckbeiwerte zeigten, dass die Windkanalströmung eine größere Belastung bewirkt, als in der Wirklichkeit nach simulierter atmosphärischer Windströmung vorkommen kann. Diese Untersuchung diente auch als eine Verifizierung der **DIN 4134:1983** [4]. Unter  $0^\circ$  wurden die Dehnungen der Modellhülle in Kett- und Schussrichtung untersucht, die größten Dehnungen sind an den Randseiten und beim Übergangsbereich zu erwarten, diese betragen 1,4%. Es wurde festgestellt, dass die zeitabhängigen Nachverformungen vernachlässigt werden können, weil die gemessenen Belastungen der Hallenhaut 1% der Kurzzeitfestigkeit des Hallenwerkstoffes nicht überschreiten. Gerhardt [27] wies darauf hin, dass die ermittelten Schnittkräfte nach **DIN 4134:1983** [4] in Umfangrichtung unterschätzt werden können. [27]

Abb. 24 vergleicht die Ergebnisse von [18] und [27] und dient als eine Zusammenfassung der Druckbeiwerte unterschiedlicher Messungen.



**Abb. 24:** Zusammenfassung der Ergebnisse nach Horcic [18]

#### 4.4.1.3 Ermittlung von Windlasten nach DIN 4134:1983 [4], nach EN 1991-1-4:2011 [20] und nach ÖNORM B 1991-1-4:2019 [50]

Der Berechnungshintergrund der Windlasten ist bei den Normen **DIN 4134:1983** [4], **EN 1991-1-4:2011** [20] und **ÖNORM B 1991-1-4:2019** [50] gleich, obwohl **DIN 4134:1983** [4] keine semiprobabilistischen Sicherheitsbeiwerte verwendet. **DIN 4134:1983** [4] berücksichtigt die Windlasten rechtwinklig zur Tangentialebene auf der Hülle, die Verformung der Oberfläche zufolge der Windbelastung ist nicht zu berücksichtigen, so kann der entsprechende Böengeschwindigkeitsdruck und der nach den aktuellen Normen [20], [50] ermittelte Druckbeiwert ohne Berücksichtigung der Deformationen verwendet werden.

Die Ermittlung des Winddrucks erfolgt nach [4] und [20] durch das Produkt von Böengeschwindigkeitsdruck und aerodynamischem Beiwert:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (4.30)$$

$$w_i = q_p(z_i) \cdot c_{pi} \quad (4.31)$$

Dabei sind:

- $c_{pe}$  - aerodynamischer Beiwert für den Außendruck [ - ]
- $c_{pi}$  - aerodynamischer Beiwert für den Innendruck [ - ]
- $q_p(z_e)$  - Böengeschwindigkeitsdruck [kN/m<sup>2</sup>]
- $z_e$  - Bezugshöhe [m]

Der innere Winddruck muss bei geschlossenen Hüllen nicht berücksichtigt werden [35].

Berechnung des **Böengeschwindigkeitsdrucks** nach [20]:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) \quad (4.32)$$

Dabei sind:

- $I_v(z)$  - Turbulenzintensität, siehe [20] Gleichung 4.7
- $\rho$  - Dichte der Luft
- $v_m$  - mittlere Windgeschwindigkeit, siehe [20] Gleichung 4.3

Nach **ÖNORM B 1991-1-4:2019** [50] Tabelle 2 ist **Gleichung (4.32)** nicht zu berücksichtigen, die anwendbaren Formeln fasst die nächste Tabelle (nach **ÖNORM B 1991-1-4:2019** [50] **Tabelle 2**) zusammen:

| Geländekategorie | $q_p$                                    | $q_m$                                     | $I_v(z)$                    | $z_{\min}$ in m |
|------------------|--|---|-----------------------------|-----------------|
| II               | $2,1 \cdot (z/10)^{0,24} \cdot q_{b,0}$  | $(z/10)^{0,3} \cdot q_{b,0}$              | $0,18 \cdot (z/10)^{-0,15}$ | 5               |
| III              | $1,75 \cdot (z/10)^{0,29} \cdot q_{b,0}$ | $0,593 \cdot (z/10)^{0,42} \cdot q_{b,0}$ | $0,29 \cdot (z/10)^{-0,21}$ | 10              |
| IV               | $1,2 \cdot (z/10)^{0,38} \cdot q_{b,0}$  | $0,263 \cdot (z/10)^{0,64} \cdot q_{b,0}$ | $0,46 \cdot (z/10)^{-0,32}$ | 15              |

**DIN 4134:1983** [4] beschreibt die Ermittlung des **Staudrucks** vereinfachend, nur in Abhängigkeit von der Höhe des Bauwerks, ohne Berücksichtigung der Geländekategorie. Wie in **Abschnitt 4.4.1.2** beschrieben wurde, hat die Umgebung (Vorgelände) eine günstige Wirkung auf die Windlastverteilung, damit werden die ermittelten Druckbeiwerte niedriger.

Vereinfachend sind die Werte für den Staudruck nach **DIN 4134:1983** [4] **Tabelle 2** anzusetzen.

**Tab. 13:** DIN 4134:1983 [4] Tabelle 2

| Bauwerkhöhe über Gelände<br>$h$<br>[m] | Staudruck<br>$q_p(z_e)$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] |
|--|---|
| $\leq 8$                               | 0,5   |
| 8-20                                   | $0,3 + h/40$                                    |
| $\geq 20$                              | $0,725 + h/266$                                 |

Die **Tabelle 3** in **DIN 4134:1983** [4] fasst die Abminderungsfaktoren zusammen, wenn die horizontale Projektion mehr als 500 m<sup>2</sup> beträgt.

**Tab. 14:** DIN 4134:1983 [4] Tabelle 3

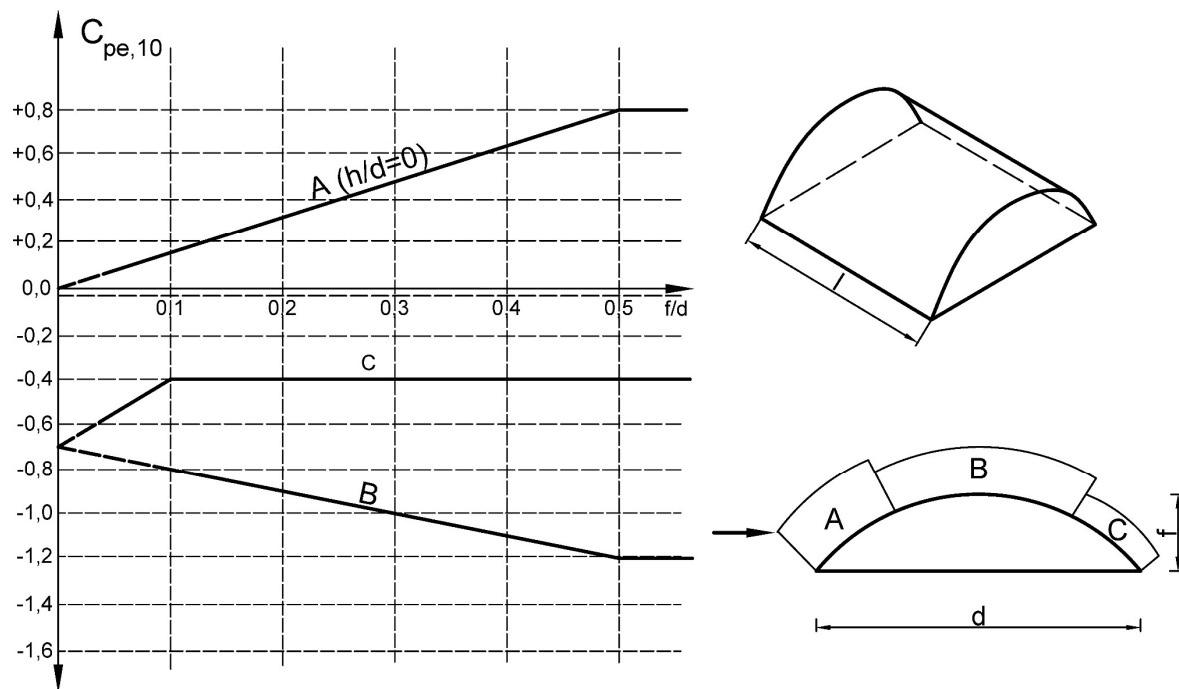
| Projektionsfläche<br>$A$<br>[m <sup>2</sup> ] | Reduktionsfaktor          |
|---|---------------------------|
| 500 - 3000                                    | $(1,05 - 0,0001 \cdot A)$ |
| $\geq 3000$                                   | 0,75                      |

Die sich aus den Windbelastungen ergebenden Schnittgrößen sind in **DIN 4134:1983** [4] in **Tabelle 4 und 5** zusammengefasst, siehe **Anhang A - 1**. Die Schnittgrößenermittlung wird in **Abschnitt 5** ausführlich diskutiert.

Ermittlung **des aerodynamischen Beiwerts  $c_{pe}$**  für den Außendruck nach [20]:

Für die Bestimmung der Druckbeiwerte verweist **DIN 4134:1983** [4] auf die aktuelle Norm, also müssen die Werte nach [20] ermittelt werden. Weil die Normen [20], [50] sich nicht direkt mit pneumatischen Konstruktionen beschäftigen, müssen die Beiwerte nach ähnlichen Dachformen ermittelt werden. Für zylinderförmige Bauwerke sind die gekrümmten Dächer und Kuppeln nach [20] **Abschnitt 7.2.8** und nach [50] **Abschnitt 9.2.8 Tabelle 15, 16** anzunehmen. **EN 1991-1-4:2011** bietet die Möglichkeit bei Konstruktionen ohne vertikale Seitenwände den Druckbeiwert zu ermitteln. Demensprechend vereinfacht sich das **Bild 7.11 und 7.12** von [20].

Die nächsten **Abb. 25, Abb. 26** stellen die Außendruckbeiwerte  $c_{pe,10}$  für zylinderförmige Membranen über Rechteckgrundrisse und für Kuppeln mit kreisrunder Basis.



**Abb. 25:** Aerodynamische Beiwerte für zylindrische Dachflächen nach EN 1991-1-4:2011 [20]

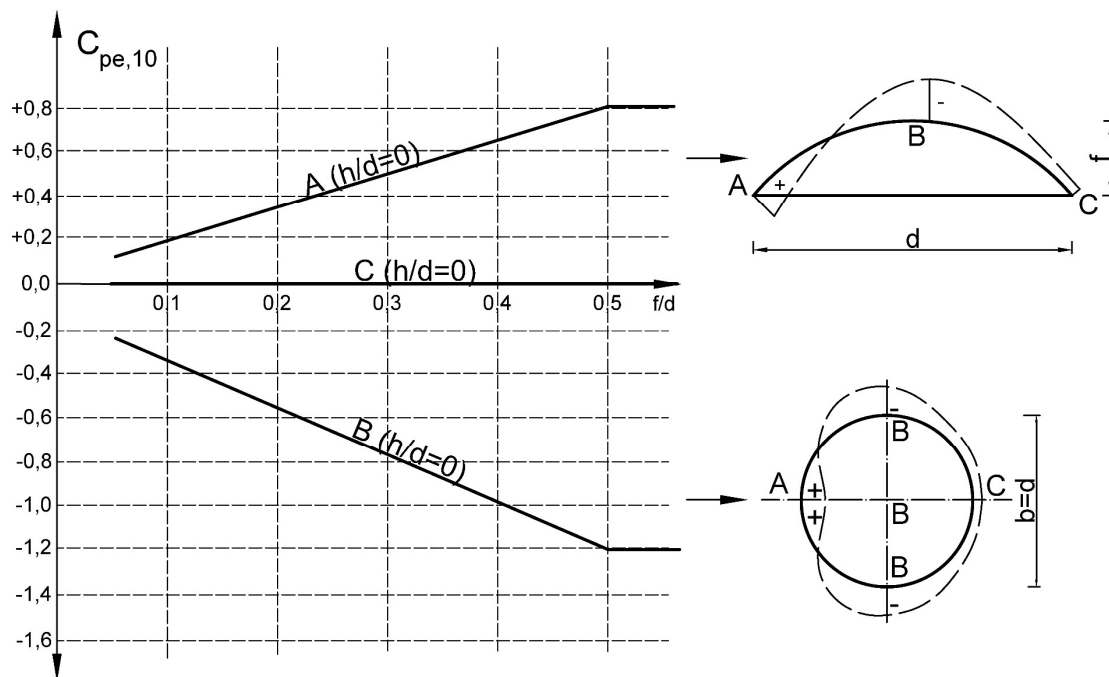


Abb. 26: Aerodynamische Beiwerte für Kuppel nach EN 1991-1-4:2011 [20]

Die Verwendung von Druckbeiwerten nach [20] wurde erfolgreich bei der Planung des Ontario Celebration Zone Pavilion benutzt. Die Studie [28] hat unterschiedliche Normen - Canadian code, ASCE, und Eurocode - verglichen und zur Ermittlung der Windbelastung der unregelmäßigen Form verwendet. Weil die Form nicht eindeutig kategorisiert werden kann, wurden alle möglichen Formen untersucht, um die maßgebenden Werte zu ermitteln. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Außendruckbeiwerte  $c_{pe,10}$  für gewölbte Membranen konservativer sind, als die Außendruckbeiwerte für Kuppeln. [28]

Nach den Versuchen von *Holmes* [32] ist es möglich Kuppeldächer als gekrümmte Dächer zu bemessen, diese Annahme bietet eine konservative und vereinfachte Lösung für die Ermittlung der Windbelastung.

#### 4.4.1.4 Vergleich der Ergebnisse von Windkanaluntersuchungen, DIN 4134:1983 [4], EN 1991-1-4:2011 [20] und ÖNORM B 1991-1-4:2019 [50]

Tab. 15 stellt den Unterschied von Böengeschwindigkeitsdruck  $q_p(z)$  zwischen EN 1991-1-4:2011 [20], ÖNORM B 1991-1-4:2019 [50] und DIN 4134:1983 [4] dar. Wie im Abschnitt 4.4.1.3 beschrieben, wird der Staudruck nach DIN 4134:1983 [4], einfacher, nach der Bauwerkshöhe ermittelt. Nach EN 1991-1-4:2011 [20] und ÖNORM B 1991-1-4:2019 [50] wurde die Böengeschwindigkeitsdruck von Bauwerken mit unterschiedlichen Höhen und



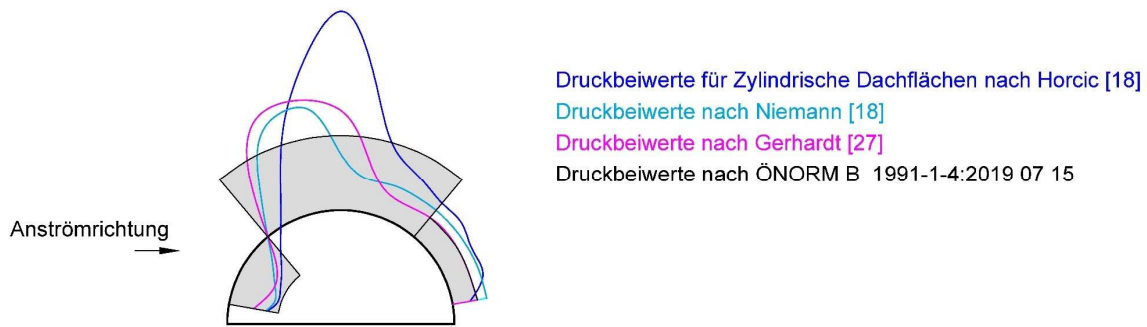
unterschiedlichen Geländekategorien ermittelt. Weil es zwei Grundwerte der Basisgeschwindigkeit in Wien gibt, wurde die Bedeutung von Basisgeschwindigkeiten auch untersucht. Die Unterschiede sind mit Farben markiert. **EN 1991-1-4:2011** [20] gibt die maßgebenden Werte in der Geländekategorie II und III. Bei der Geländekategorie IV - Stadtgebiete - sind die Ergebnisse gleichwertig mit **DIN 4134:1983** [4]. Die aerodynamischen Beiwerte  $c_{pe}$  müssen aus der aktuellen Norm entnommen werden, die Staudrücke repräsentieren die Unterschiede zwischen **ÖNORM B 1991-1-4:2019** [50] und **DIN 4134:1983** [4].

**Tab. 15:** Böengeschwindigkeitsdruck  $q_p(z)$  nach [50] und [4]

| Geländekat.<br>$z$ (m) | EN 1991-1-4:2011         |                 |                |                        |                 |                | DIN<br>4134:1983 |
|------------------------|--------------------------|-----------------|----------------|------------------------|-----------------|----------------|------------------|
|                        | Wien 1 $V_{bo}=25,1$ m/s |                 |                | Wien 2 $V_{bo}=27$ m/s |                 |                |                  |
|                        | II<br>$q_p(z)$           | III<br>$q_p(z)$ | IV<br>$q_p(z)$ | II<br>$q_p(z)$         | III<br>$q_p(z)$ | IV<br>$q_p(z)$ |                  |
| 1                      | 0,693                    | 0,683           | 0,546          | 0,818                  | 0,805           | 0,660          | 0,500            |
| 2                      | 0,693                    | 0,683           | 0,546          | 0,818                  | 0,805           | 0,644          | 0,500            |
| 3                      | 0,693                    | 0,683           | 0,546          | 0,818                  | 0,805           | 0,644          | 0,500            |
| 4                      | 0,693                    | 0,683           | 0,546          | 0,818                  | 0,805           | 0,644          | 0,500            |
| 5                      | 0,693                    | 0,683           | 0,546          | 0,818                  | 0,805           | 0,644          | 0,500            |
| 6                      | 0,725                    | 0,683           | 0,546          | 0,855                  | 0,805           | 0,644          | 0,500            |
| 7                      | 0,752                    | 0,683           | 0,546          | 0,887                  | 0,805           | 0,644          | 0,500            |
| 8                      | 0,776                    | 0,683           | 0,546          | 0,916                  | 0,805           | 0,644          | 0,500            |
| 9                      | 0,799                    | 0,683           | 0,546          | 0,942                  | 0,805           | 0,644          | 0,525            |
| 10                     | 0,819                    | 0,683           | 0,546          | 0,966                  | 0,805           | 0,644          | 0,550            |
| 11                     | 0,838                    | 0,702           | 0,546          | 0,988                  | 0,828           | 0,644          | 0,575            |
| 12                     | 0,856                    | 0,720           | 0,546          | 1,009                  | 0,849           | 0,644          | 0,600            |
| 13                     | 0,872                    | 0,736           | 0,546          | 1,029                  | 0,869           | 0,644          | 0,625            |
| 14                     | 0,888                    | 0,752           | 0,546          | 1,047                  | 0,888           | 0,644          | 0,650            |
| 15                     | 0,903                    | 0,768           | 0,546          | 1,065                  | 0,905           | 0,644          | 0,675            |
| 16                     | 0,917                    | 0,782           | 0,560          | 1,081                  | 0,923           | 0,660          | 0,700            |
| 17                     | 0,930                    | 0,796           | 0,573          | 1,097                  | 0,939           | 0,675          | 0,725            |
| 18                     | 0,943                    | 0,809           | 0,585          | 1,112                  | 0,955           | 0,690          | 0,750            |
| 19                     | 0,955                    | 0,822           | 0,597          | 1,127                  | 0,970           | 0,704          | 0,775            |
| 20                     | 0,967                    | 0,834           | 0,609          | 1,141                  | 0,984           | 0,718          | 0,800            |
| 21                     | 0,979                    | 0,846           | 0,620          | 1,154                  | 0,998           | 0,732          | 0,804            |
| 22                     | 0,990                    | 0,858           | 0,631          | 1,167                  | 1,012           | 0,745          | 0,808            |
| 23                     | 1,000                    | 0,869           | 0,642          | 1,180                  | 1,025           | 0,758          | 0,811            |
| 24                     | 1,010                    | 0,880           | 0,653          | 1,192                  | 1,038           | 0,770          | 0,815            |
| 25                     | 1,020                    | 0,890           | 0,663          | 1,204                  | 1,050           | 0,782          | 0,819            |

Die nächste Abbildung (**Abb. 27**) veranschaulicht die Ergebnisse und die Unterschiede zwischen den Windkanalmessungen [18], [27], und die Druckbeiwerte nach Eurocode [20].





**Abb. 27:** Vergleich der Messungen und Eurocode

#### 4.4.2 Schneelast

##### 4.4.2.1 Allgemeines

Zu den veränderlichen Lastfällen gehören Einwirkungen infolge Niederschlags. Neben Schneelast, müssen die Lastfälle infolge Regen, Tauwasser, Hagel und Eis bei Membrankonstruktionen betrachtet werden. Bei nicht beheizte Tragwerken muss Tauwasser als Einwirkung berücksichtigt werden. Hagel kann in Abhängigkeit von der Form der Hagelkörner die beschichteten Gewebe beschädigen und zu einer lokalen Verformung führen. [46]

Die Schneelast bei pneumatischen Konstruktionen wurde bisher wenig untersucht, weil durch Betriebserfahrung festgestellt wurde, dass die Schneebelastung bei genug beheizten Traglufthallen vernachlässigbar klein ist. Laut [27] muss Schneebelastung einer über 12 °C beheizten Halle nicht berücksichtigt werden. Bei nicht beheizten pneumatischen Tragkonstruktionen, muss die Schneelast bei der Beurteilung der Formstabilität und der Standsicherheit in Betracht gezogen werden, obwohl Schnee die Membranspannungen abmindert und zu höherem Innendruck führt [31], [18]. Schneelast erzeugt große Verformungen bei nachgiebigen Membranen. Zufolge der Verformung der Hülle tritt Schneeansammlung auf der Konstruktion auf, die gleichzeitig mit Windbelastung einseitige Schneeablagerung verursachen kann. Einseitige Sonnenstrahlung kann Schneehäufungen und damit unsymmetrische Belastungen verursachen [46]. Mögliche Schäden können nur dann vorkommen, wenn die Verformungen zu groß sind und die Hülle mit Einbauteilen in Kontakt kommt. Um diesen Fall zu vermeiden, beinhalten die Vorschriften die Mindestabstände zwischen den Einbauteilen und der Membran, siehe **Abschnitt 7**. Schneesäcke können im Bereich der punktuellen Belastungen entstehen, und Stabilitätsverlust verursachen. [31]

Wenn der Schnee liegen bleibt, kann die Hülle (als verlorene Schalung) ein Gewölbe ausbilden. Wenn der Schneelast größer als der Innendruck ist, führt diese Belastung wegen der Gewölbewirkung nicht zum Versagen. [46]

#### 4.4.2.2 Schneelast nach EN 1991-1-3:2016 [21] und ÖNORM B 1991-1-3:2018 [49]

Nach **DIN 4134:1983** [4] wurde Schneelast bei pneumatischen Konstruktionen wenig untersucht. Für die Annahme der Schneelast ist die aktuelle Norm **EN 1991-1-3:2016** [21] und **ÖNORM B 1991-1-3:2018** [49] zu berücksichtigen, wobei die aktuelle Norm auf pneumatische Konstruktionen nicht direkt eingeht, der Einfluss der Tragwerksverformung auf die Schneelast kann daher nicht berücksichtigt werden. [18]

Der charakteristische Wert der Schneelast auf dem Boden, ist von der Geländehöhe und von dem Ort abhängig. Der charakteristische Wert der Schneelast auf dem Boden kann mittels entweder aus dem in **ÖNORM B 1991-1-3:2018** [49] **Anhang A.1** angegebene Ortsverzeichnis online (<https://hora.gv.at/>), oder nach der in [49] **Anhang B** angegebenen Formel ermittelt werden:

$$s_k = (0,642 \cdot Z + 0,009) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{A}{728} \right)^2 \right] \quad (4.33)$$

Dabei sind:

- Z - Rechenwert für die Lastzone gemäß [49] Tabelle B.1 [-]
- A - Geländehöhe über dem Meeresspiegel [m]
- $s_k$  - der charakteristische Werte der Schneelast auf dem Boden des betreffenden Ortes [kN/m<sup>2</sup>]

Schneelasten auf Dächer sind nach **Formel (4.34)** zu ermitteln [49].

$$S = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \quad (4.34)$$

Dabei sind:

- $\mu_i$  - Formbeiwert für Schneelasten [-]
- $C_e$  - Umgebungskoeffizient [-]
- $C_t$  - Temperaturkoeffizient [-]
- $s_k$  - der charakteristische Werte der Schneelast auf dem Boden des betreffenden Ortes [kN/m<sup>2</sup>]

Die Berechnung der außergewöhnlichen Schneelasten stammt aus außergewöhnlichen Schneelasten auf dem Boden nach **EN 1991-1-3:2016** [21], aber die außergewöhnlichen Bedingungen sind nach **ÖNORM B 1991-1-3:2018** [49] in Österreich nicht zu berücksichtigen [49]. Die Formel ist die Folgende:

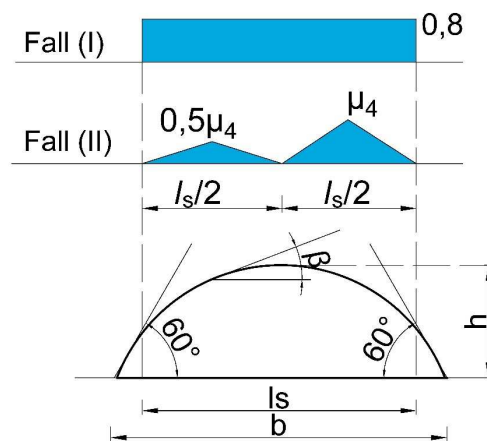
$$S = \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_{Ad} \quad (4.35)$$

Dabei sind:

- $\mu_1$  - Formbeiwert für Schneelasten [-]
- $C_e$  - Umgebungskoeffizient [-]
- $C_t$  - Temperaturkoeffizient [-]
- $s_{Ad}$  - der Bemessungswert für außergewöhnliche Schneelasten auf dem Boden für einen bestimmten Ort [kN/m<sup>2</sup>]

„Außergewöhnliche Schneeverwehungen“ gemäß EN 1991-1-3:2016 [21], Anhang B sind in Österreich nicht anzusetzen.

Die möglichen Lastfälle, und die Berechnung der Formbeiwerte stellt **Abb. 28** dar, wobei  $\mu_4 = 0,2 + 10 \cdot h/b \leq 2,0$ .



**Abb. 28:** Schneelastfälle nach EN 1991-1-3:2016 [21]

**DIN 4134:1983** [4] gibt bei mechanischer Schneeräumung für jene Hüllbereiche die weniger als 70° Neigung gegen die Horizontale aufweisen eine Schneelast von  $s = 0,25 \text{ kN/m}^2$  (Grundrissprojektion) vor. Im Vergleich zu diesem Wert, können Schneeverwehungen nach [21] und [49], mit der **Formel (4.36)** ermittelt werden:

$$S = \mu_i \cdot s_k \quad (4.36)$$

Dabei sind:

- $\mu_i$  - Formbeiwerte für abgleitenden Schnee  $\mu_s$ , und für Schnee mit Berücksichtigung von Wind  $\mu_w$  [-]
- $s_k$  - charakteristische Werte der Schneelast auf dem Boden des betreffenden Ortes [kN/m<sup>2</sup>]

Der verwehte Schnee kann nach [49] ab  $h \geq 1,0$  m berücksichtigt werden.  $\mu_s$  wird aus der maßgebenden Dachneigung der oberen Dachflächen berechnet. Die Berechnung der Formbeiwerte entspricht der Berechnung der Satteldächer, 50% der ermittelten Gesamtschneelast muss berücksichtigt werden. [21]

Der Formbeiwert  $\mu_w$  kann mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$\mu_w = (b_1 + b_2)/2 \cdot h \leq \frac{\gamma \cdot h}{s_k} \quad (4.37)$$

Dabei sind:

- $b_i$  - Abmessungen von Dachflächen
- $\gamma$  - Wichte des Schnees 2 kN/m<sup>3</sup>
- $\mu_w$  - Formelbeiwert für Schnee unter Berücksichtigung von Wind
  - $\mu_1 \leq \mu_w \leq 3$  nach [49]

Für die Länge der Schneeverwehung gilt:  $l_s = 2 \cdot h \leq 10$  m

#### 4.4.2.3 Stabilitätsverlust zufolge Windbelastung

Mit dem Stabilitätsverlust zufolge Schneebelastung hat sich *Kollár* [33] beschäftigt.

#### 4.4.3 Wärmeeinwirkung

Die Änderung der Temperatur hat auf pneumatische Konstruktionen großen Einfluss. Höhere Temperatur führt zu einer Volumenzunahme und Abkühlung kann die Vorspannung reduzieren. Beim niedrigeren Innendruck kann die Membrankonstruktion im Falle Wind instabil werden. [46] Wärmeeinwirkungen müssen auf der Seite des Konstruktionsmaterials berücksichtigt werden, siehe **Kapitel 3** und **Tab. 1**, so dass die Festigkeit nach der Lastfallkombination entspricht. Nach

**DIN 4134:1983** [4] muss die Wärmeeinwirkung bei der Ermittlung von Schnittgrößen nicht betrachtet werden.

#### **4.5 Außergewöhnliche Einwirkungen, Erdbebenlasten, Auflagerbewegungen**

Weil das Eigengewicht der pneumatischen Konstruktionen sehr gering ist und wegen der großen Flexibilität der Tragwerke müssen außergewöhnliche Einwirkungen und Erbebenlasten nicht berücksichtigt werden [35].

Auflagerbewegungen haben wenig Einfluss auf pneumatische Konstruktionen. Auflagerbewegungen verursachen kleinere Spannungen in die Membranen, wenn der Innendruck konstant bleibt. [46]

## 5 Ermittlung der Schnittgrößen

### 5.1 Formfindung

Pneumatische Konstruktionen können auch flächig stabilisierte Membrantragwerke genannt werden [18]. Die Form des Tragwerks ist unter Berücksichtigung der folgenden formgebenden Faktoren, wie Innendruck, Art der Belastung, Geometrie der Krafteinleitung, Spannungsverhältnis von Schuss- und Kettrichtung des Konstruktionsmaterials zu definieren. Weitere maßgebende Einflüsse ergeben die geometrischen Größen, wie Spannweite, Elementlänge und Austeilung der Elemente. [46] Wesentlich ist die Vermeidung von Spannungskonzentrationen im Konstruktionsmaterial [1].

Einwirkungen und Lagerbedingungen beeinflussen den Gleichgewichtszustand [46]. Pneumatische Konstruktionen bilden dabei ähnliche Formen wie minimalflächen. Als Form der pneumatisch gespannten Konstruktionen sind gleichsinnig doppelt gekrümmte Flächen zu wählen, um die Ausbildung eines Membrantragwerks zu gewährleisten. Damit nur Zugkräfte im Konstruktionsmaterial auftreten und um die Ausbildung der Falten zu verhindern, müssen Rotationflächen gewählt werden. Die meist verwendeten Formen für Tragluftbauten sind deswegen zylinderförmige Membranen mit Abschlusskuppeln über Kreis- oder Rechteckgrundrissen und kugelförmige Membranen. [18]

Bei komplexen Formen, die aus unterschiedlichen Geometrien zusammengesetzt sind, muss die Krümmung möglichst konstant sein. Kleinere Krümmungsänderungen können durch die Elastizität des Materials aufgenommen werden und führen nicht zur Faltenbildung. Die unterschiedlichen Steifigkeiten der Nähte und des Gewebes führen zu Zwängen, zusätzlich sind die Zuschnitte ungenau. Diese Ungenauigkeiten beeinflussen den Kraftverlauf, aber die auftretenden Zwänge können statisch nicht berechnet werden. In der Arbeit von *Gerhardt* [27] wurde eine Traglufthalle mit rechteckigem Grundriss untersucht, die größeren Spannungen wurden bei den Übergangsbereichen zwischen dem zylindrischen Teil und der kugeligen Stirnseite gemessen und so wurde diese Stelle als kritisch angemerkt. In den Untersuchungen von *Horcic* [18] wurde eine Halle mit kalottenförmigen Endteilen untersucht, die größeren Belastungen bei den Übergangsbereichen sind in allen Untersuchungen deutlich erkennbar, siehe **Kapitel 4.4.1.2**. Um Faltenbildung infolge Herstellungsungenauigkeiten und Steifigkeitsunterschieden zu vermeiden, dürfen die größten Membrankräfte infolge Innendruck maximal 5-mal größer sein als die minimalen Membrankräfte. [31]

Seilverstärkte Membrane sind geometrisch schwierig zu prüfen, wenn noch kein Seilnetz ausgebildet ist. Die Form kann durch die Seillänge bestimmt werden, weil die Form der Seillinie in den Gleichgewichtsbedingungen einfach bestimmt werden kann. Die Membrangeometrie wird

nach der Seillinie gewählt. Nach den vorliegenden Untersuchungen ist es erwiesen, dass die seilverstärkten Hüllen sich stärker verformen als Membrane ohne Seile. [31]

Belastungen, die nicht in den geplanten Angriffspunkten eintreten, führen zu einer geänderten Form, bis sich ein neuer Gleichgewichtszustand ausbildet. Durch die größere Verformung können kleinere Fehler in der Formfindung ausgeglichen werden. [46]

Bei dem Konstruktionsentwurf ist die gegenseitige Beeinflussung der Form, des Materials, der Belastung und auftretender Schnittgrößen zu beachten [18]. Für die Dauerbelastung ist eine Seifenhaut die ideale Membranform [31].

## 5.2 Grundlagen

Heutzutage sind die Schnittgrößen und die genauen Verformungen mit speziellen FEM-Programmen zu modellieren. Nicht alle FEM-Programme können vollkommen biegsame Materialien, die nur Zugkräfte aufnehmen können, modellieren und große Verformungen nach Theorie III. Ordnung modellieren. Für die Berechnung der flächig stabilisierten Hüllen können Programme wie ANSYS, SATS, EASY und SOFISTIK verwendet werden. Weil es in der Entwurfsphase vielleicht nicht notwendig ist, die Schnittgrößen unter Berücksichtigung der Verformungen zu modellieren, bieten die händischen Berechnungen, vereinfachte Flächentragwerkmodelle auch zuverlässige Lösungsmethoden. *Herzog* [31] hat Diagramme für die einfacheren Formen wie Kugel- und Zylindermembrane mit unterschiedlichen Belastungsfällen ermittelt, um die statischen Berechnungen zu vereinfachen.

Allgemein gültig ist, dass die Gleichgewichtsbedingungen, die geometrischen Beziehungen und das Verformungsverhalten zur Bestimmung der Spannungs- und Verzerrungszustände in einem Körper herangezogen werden. Wenn die Form der Membrankonstruktion einem Rotationkörper entspricht und die Flächenbelastung auch rotationssymmetrisch ist, ist die Lösung des Spannungszustandes ausreichend. Zugkräfte werden so auftreten, dass sie immer tangential zur Rotationsfläche wirken. Spannungen werden an der Mittelfläche des Membrantragwerks bestimmt, so bekommt man die Maßeinheit Spannung pro Längeneinheit. [18]

Für die Ableitung der geometrischen Beziehungen an vollkommen biegsamen, undehnbaren Membranen, wird eine Elementfläche aus der Membrane ausgeschnitten, deren Seiten den Hauptachsen der Rotationsfläche entsprechen. Wegen der vollkommen biegsamen undehnbaren Membrane treten nur Normalspannungen an den Rändern von Elementflächen auf. Diese Normalspannungen an den Seitenflächen sind die Hauptspannungen. Wegen der Symmetrie der Rotationsfläche, bleiben die Spannungen entlang einer Meridianebene konstant. **Abb. 29** stellt die

ausgeschnittene Elementfläche, die mit Luftdruck belastet wurde und die aufgetretenen Spannungen schematisch dar. [18]

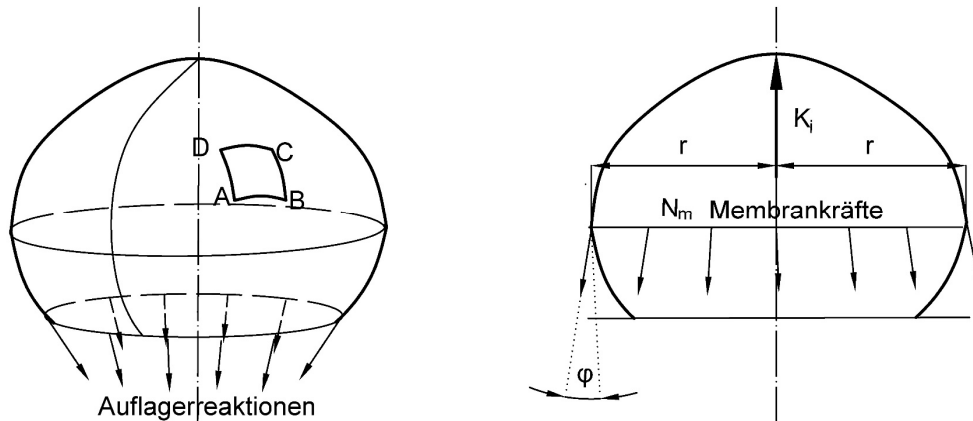


Abb. 29: Rotationssymmetrische Element [18]

Die Gleichgewichtsbedingungen können für eine doppelt gekrümmte Ausschnittfläche angesetzt werden. Die nächste Gleichung beschreibt die Gleichgewichtsbedingung in einem Punkt in der Richtung der Hauptachsen nach [18].

$$dK_i = d \cdot \left[ \sigma_r \cdot ds_2 \cdot \sin \frac{d\alpha}{2} + (\sigma_r + d\sigma_r) \cdot ds_2 \cdot \sin \frac{d\alpha}{2} + \sigma_m \cdot \left( ds_1 - \frac{1}{2} d(ds_1) \right) \cdot \sin \frac{d\beta}{2} + (\sigma_m + d\sigma_m) \cdot \left( ds_1 + \frac{1}{2} d(ds_1) \right) \cdot \sin \frac{d\beta}{2} \right] \quad (5.38)$$

Dabei sind:

- $dK_i$  - Kraft aus Luftdruck [kN]
- $\sigma_r, \sigma_m$  - Normalspannungen [kN/mm<sup>2</sup>]
- $N_r, N_m$  - Membrankräfte in Richtung der Hauptachsen pro Längeneinheit [kN/m]
- $d$  - Dicke der Membrane
- $ds_1, ds_2$  - Seitenlänge der Elementfläche
- $d\alpha, d\beta$  - Winkel entsprechend Krafrichtung [°]

Weiter gilt:

- Die Kraft  $dK_i$  kann als Produkt des Luftüberdrucks und der Elementfläche ermittelt werden:  $dK_i = p_i \cdot ds_1 \cdot ds_2$ ,
- Die Normalkräfte sind das Produkt von Normalspannungen und Schnittfläche  $N_r = \sigma_r \cdot d$  und  $N_m = \sigma_m \cdot d$ ,



- Die Seitenlängen der Elementflächen können aus dem Radius und Winkel der Rotationsfläche bestimmt werden  $ds_1 = R_1 \cdot d\alpha$  und  $ds_2 = R_2 \cdot d\beta$ .

Nach der so genannten Kleinwinkelnäherung können kleine Winkel durch den Winkel selbst aufgeschrieben werden, so ist  $\sin \frac{d\alpha}{2} = \frac{d\alpha}{2}$ ,  $\sin \frac{d\beta}{2} = \frac{d\beta}{2}$  und einfachheitshalber werden die Ausdrücke, die kleiner als Dritter Ordnung sind, vernachlässigt. Mit den vorherigen Vereinfachungen wird die **Gleichung (5.38)** umgeformt und der Luftdruck wird mit den Quotienten der Normalkräfte und Radien ausgedrückt. [18]

$$p_i = \frac{N_r}{R_1} + \frac{N_m}{R_2} \tag{5.39}$$

Die zweite Gleichung zur Bestimmung der inneren Kräfte, resultieren auch aus den Gleichgewichtsbedingungen. Am Umfang auftretende Normalkräfte in vertikaler Richtung ergeben den durch den Luftdruck erzeugte Kraft:

$$K_i = 2\pi \cdot r_1 \cdot N_m \cdot \cos \varphi \tag{5.40}$$

Wobei  $K_i$  aus der Fläche des geschnittenen Kreises, siehe **Abb. 30** und dem darauf wirkenden Luftüberdruck ausgerechnet werden kann:

$$K_i = \pi \cdot r_1^2 \cdot p_i \tag{5.41}$$

Durch das Einsetzen der **Gleichung (5.41)** in **(5.40)**, ergibt sich die folgende Gleichung für Normalkräfte:

$$N_m = \frac{r_1}{2 \cos \varphi} \cdot p_i \tag{5.42}$$

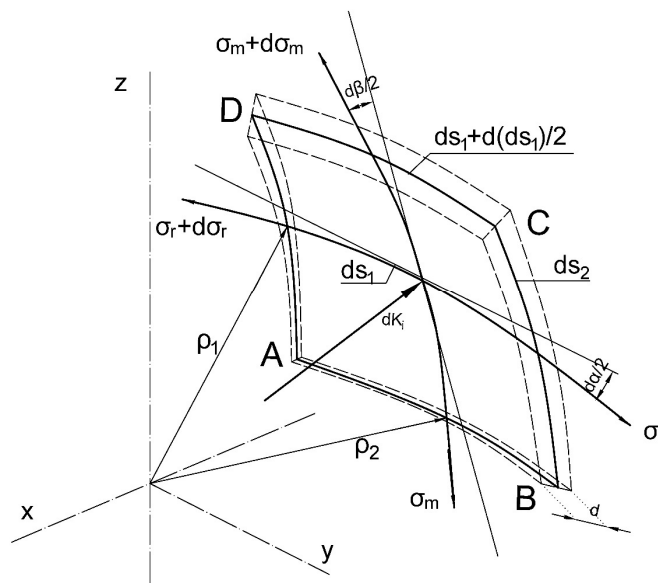
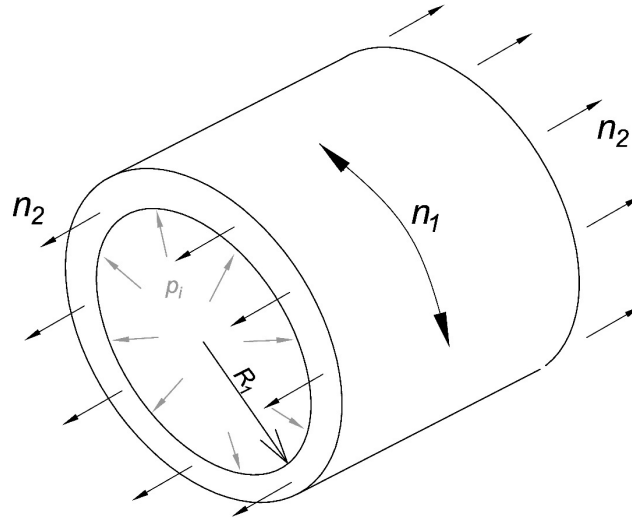


Abb. 30: Ausgeschnittene Elementfläche [18]

Mit den **Gleichungen (5.39) und (5.42)** kann der Spannungszustand in jedem Punkt einer mit Innendruck belasteten pneumatischen Konstruktion bestimmt werden, wenn eine Rotationsfläche als Form der Konstruktion gewählt wurde. [18]

Im Fall eines **Zylinders** kann die **Gleichung (5.39)** entsprechend umformuliert werden [46]:



**Abb. 31:** Spannungsrichtungen eines Zylinders [46]

Für  $R_2 = \infty$  ergibt sich die Längsspannung, nach **Abb. 31**:

$$N_r = p_i \cdot R \quad (5.43)$$

Die Längsspannungen werden mithilfe der Querschnittfläche  $A$  und des Umfangs  $U$  berechnet:

$$N_m = p_i \cdot \frac{A}{U} = p_i \cdot \frac{\pi \cdot R^2}{2\pi R} = p_i \cdot R/2 \quad (5.44)$$

**Kugelkalottenförmige Membranen** können nach der *Kesselformel* berechnet werden [46]:

Annahmen zur **Gleichung (5.39)** sind:  $N_r = N_m = N$  und  $R_1 = R_2$

$$N = p \cdot R/2 \quad (5.45)$$

Spannungen in der Kugel sind in jeder Richtung konstant, weil die Krümmungsradien der Fläche konstant sind.

Analytische Berechnung von **Hüllen mit Stützung durch Seilnetze** [46]:

Bei der Berechnung von Seilkräften infolge Innenruck wird die Flächenlast in eine Knotenkraft umgerechnet. Die Einflussfläche der Seile kann aus einer Schar ausgerechnet werden siehe **Abb. 32**.

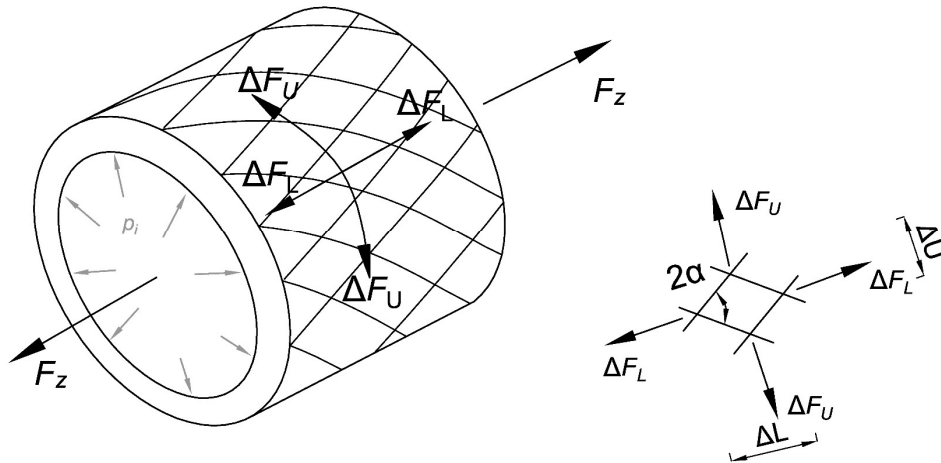


Abb. 32: Berechnung bei Stützung mit Seilnetzen

Das Gleichgewicht in Umfangs- und in Längsrichtung ( $\Delta F_U$  und  $\Delta F_L$ ) muss eingehalten werden, nach geometrischen Überlegungen ergibt sich:

$$\Delta F_U = p_i \cdot \Delta L \cdot \frac{d}{2} \quad (5.46)$$

$$\Delta F_L = \frac{d^2 \pi}{4} \cdot \frac{\Delta U}{\pi \cdot d} \cdot p_i \quad (5.47)$$

Geometrische Annahme:

$$\tan(\alpha) = \frac{\Delta U}{\Delta L} = \frac{\Delta F_U}{\Delta F_L} \quad (5.48)$$

Umgeformt ergibt sich:

$$\frac{d^2 \pi}{4} \cdot p_i \cdot (2 - \tan^2(\alpha)) = 0 \quad (5.49)$$

Gleichgewicht ist gewährleistet wenn  $\alpha = 54,7^\circ$ .

Wenn zusätzliche äußere Kräfte wirken, ändert sich die Gleichung:

$$\Delta F_L = \left( \frac{d^2 \pi}{4} \cdot p_i + F_z \right) \cdot \frac{\Delta U}{\pi \cdot d} \quad (5.50)$$

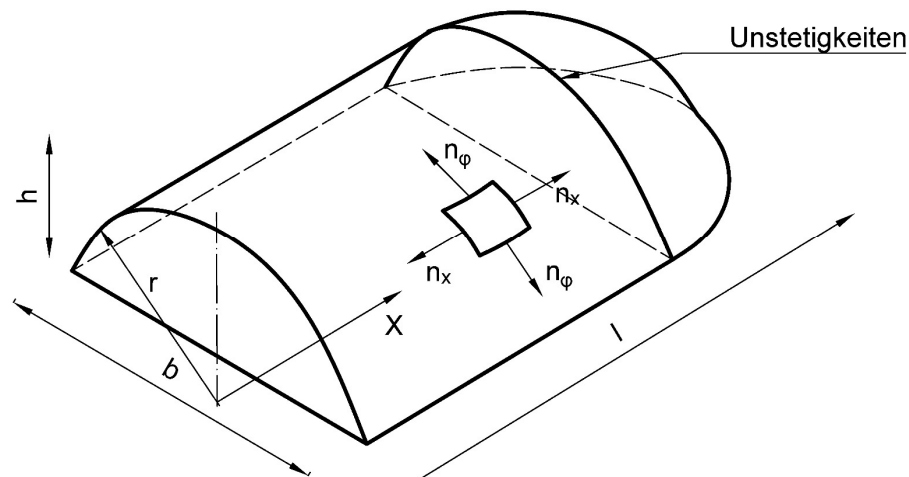
Eine zusätzliche äußere Kraft kann bei konstant bleibendem Innendruck den Winkel zwischen den Seilen und der Richtung der Längsachse verändern; damit wird die Geometrie der Fläche verändert. [46]

Bei der Ermittlung der Spannungen, die im Konstruktionsmaterial auftreten, muss der gegenseitige Einfluss zwischen Belastung und Form der Hülle berücksichtigt werden. Die Hülle ändert sich zufolge veränderlichen Belastungen so lange bis die Membran sich wieder im Gleichgewicht befindet. Weil der oben genannte Prozess große Deformationen verursacht, darf

das Überlagerungsgesetz nicht mehr für die Bestimmung des Spannungs- und Verformungszustandes herangezogen werden. [18]

### 5.3 Ermittlung der Schnittgrößen nach DIN 4134:1983

Obwohl die Systemverformungen bei der Bestimmung des Nenn-Innendrucks nicht berücksichtigt wurden, müssen sie wegen der großen Deformationen in Betracht gezogen werden. Die Formen, die **DIN 4134:1983** [4] berücksichtigt, sind zylinderförmige Membranen mit Abschlusskuppeln über Kreis- oder Rechteckgrundrissen und kugelförmige Membranen. Mögliche Unstetigkeiten an den Anschlussstellen der Teilflächen sind zu berücksichtigen. Wenn Randseile nicht rutschfest an der Hülle befestigt werden, ist die Verschiebung des Seiles relativ zur Hülle ebenfalls zu berücksichtigen. [4]



**Abb. 33:** Spannungen von zylindrischen Bauteilen nach DIN 4134:1983 [4]

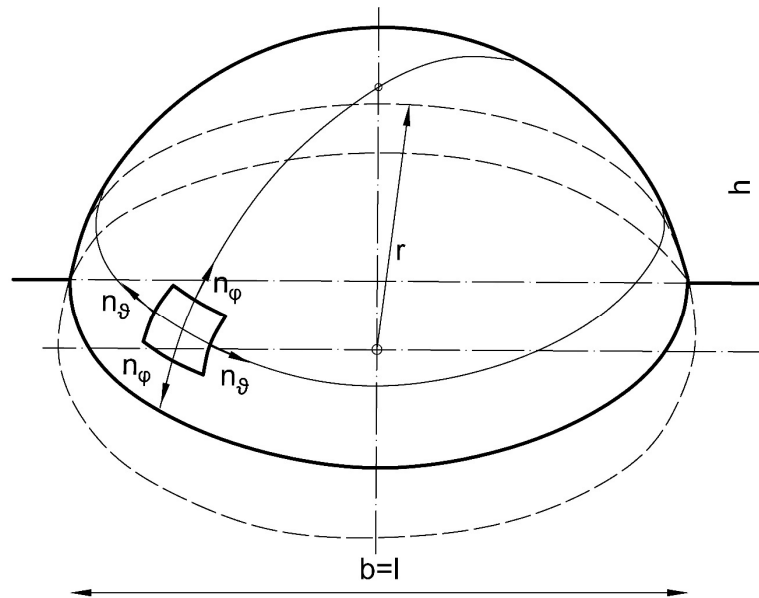


Abb. 34: Spannungen von Kuppel nach DIN 4134:1983 [4]

**DIN 4134:1983** [4] bietet eine vereinfachende Lösung zur Bestimmung der Schnittgrößen infolge veränderlicher Belastungen, wie Schnee, Wind, und infolge des Nenn-Innendrucks. Die vereinfachende Schnittgrößenermittlung nach [4] basiert auf der *Kesselformel* dazu wurden die Beiwerte  $\alpha_\varphi, \alpha_x$  für den Windlastfall festgelegt.

Die *Kesselformel* dient zur Bestimmung der Axial- und Tangentialspannungen eines Zylinders zufolge Innendruck. Die Tangentialspannungen sind aus dem Innendruck, dem Radius und der Wanddicke der Membran zu bestimmen:  $\sigma_t = \frac{p_i r}{s}$ . In der Axialrichtung wirkende Spannungen sind immer halb so groß, wie in Tangentialrichtung, also  $\sigma_a = \frac{p_i r}{2 \cdot s}$ . [2]

Bestimmung der Schnittgrößen nach [4] für:

- zylinderförmige Teil der Membranen:
  - Windbelastung in Axialrichtung:

$$n_{\varphi,w,zylinder} = \alpha_\varphi \cdot q \cdot r \quad (5.51)$$

- Windbelastung in Tangentialrichtung:

$$n_{x,w,zylinder} = \alpha_x \cdot q \cdot r \quad (5.52)$$

- Belastung aus Innendruck in Axialrichtung:

$$n_{\varphi,p,zylinder} = p_i \cdot r \quad (5.53)$$

- Belastung aus Innendruck in Tangentialrichtung:

$$n_{x,p,zylinder} = p_i \cdot \frac{r}{2} \quad (5.54)$$

- für Abschlusskuppeln über Kreis- oder Rechteckgrundriss und kugelförmige Membrane:

- Windbelastung entlang Meridian:

$$n_{\varphi,w,kugel} = \alpha_{\varphi} \cdot q \cdot r \quad (5.55)$$

- Windbelastung entlang Breitenkreis:

$$n_{\vartheta,w,kugel} = \alpha_{\vartheta} \cdot q \cdot r \quad (5.56)$$

- Belastung aus Innendruck entlang Meridian:

$$n_{\varphi,p,kugel} = p_i \cdot \frac{r}{2} \quad (5.57)$$

- Belastung aus Innendruck entlang Breitenkreis:

$$n_{\vartheta,p,kugel} = p_i \cdot \frac{r}{2} \quad (5.58)$$

Dabei sind:

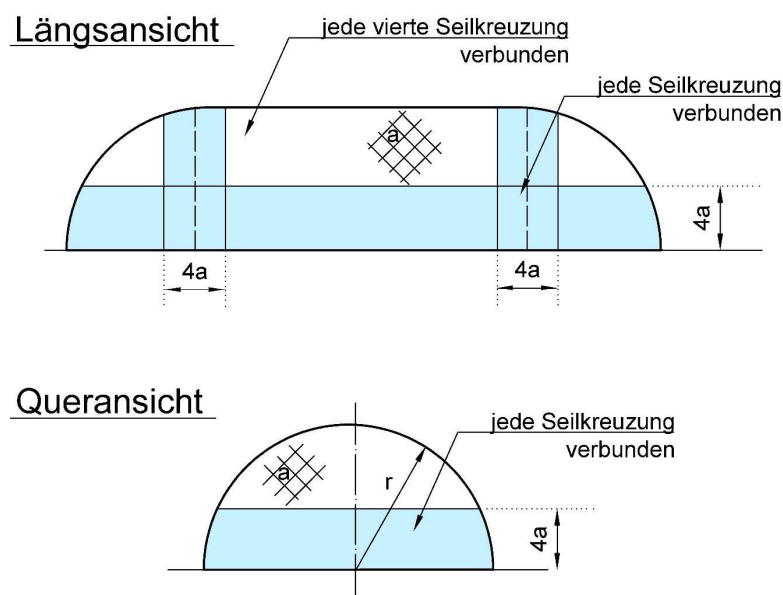
- $n$  - Membrankräfte in Richtung der Hauptachsen pro Längeneinheit [kN/m]
- $\alpha_{\vartheta}, \alpha_{\varphi}, \alpha_x$  - Beiwerte für die Membrankräfte aus Windlastfall [-]
- $\vartheta, \varphi, x$  - Indizes der Kraftrichtung
- $w, p$  - Indizes der Belastung

Die Werte für die Beiwerte  $\alpha_{\vartheta}, \alpha_{\varphi}, \alpha_x$  sind anhand von [4] **Tabelle 4** und **5** zu bestimmen, siehe **Anhang A - 1**. Die Beiwerte hängen von der Geometrie der Membrankonstruktion ab. Überlegungen zu diesen Werten und zur Beschreibung der Windbelastung beinhaltet **Abschnitt 4.4** [4].

Die oben beschriebenen **Formeln (5.51)-(5.58)** sind aus den Gleichgewichtsbedingungen, geometrischen Gleichungen nach der *Kesselformel* bestimmt. Die berechneten Schnittgrößen müssen **EN 1990:2013** [34] entsprechen, siehe **Abschnitt 2.4**. Das semiprobabilistische Sicherheitssystem basiert auf der Berücksichtigung der Sicherheitsbeiwerte und dem Vergleich der Bemessungswerte von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit [3]. Mit den Beanspruchbarkeiten der Konstruktionsmaterialien und den zu untersuchenden Lastfällen beschäftigt sich **Abschnitt 3**, und **Abschnitt 4** beschreibt die zu berücksichtigenden Einwirkungen. Die in diesem Abschnitt vorgestellten Schnittgrößen sind unter Berücksichtigung der entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte der Lastfälle nach **EN 1990:2013** [34] zu bestimmen, siehe **Kapitel 5.5**.

#### 5.4 Ermittlung der Schnittgrößen der Hüllen mit Stützung durch Seile oder Seilnetze

Die Bestimmung der Seilkräfte ist durch Kompatibilitäts- und Gleichgewichtsbedingungen möglich. Die Stützung kann entweder durch engmaschige Seilnetze gewährleistet werden oder die Hülle wird zwischen den Stützseilen gespannt. Die Seilkräfte bei engmaschigen Seilnetzen werden am unverformten Membransystem durchgeführt. Bei den Membranen, deren Seilnetze engmaschig diagonal zu den Ränder verlaufen, können die Seilkräfte  $n$  nach **Abschnitt 5.3** mit *Kesselformel* und Gleichgewichtsbedingungen bestimmt werden, wenn die Abstände von den Seilen nicht größer als  $a = r/15$  oder 1 m sind. Um die erforderliche Formstabilität zu gewährleisten, müssen die Seile durch Klemmen verbunden sein. An den Unstetigkeitsstellen, wie Verankerung- oder Krümmungsänderungsstellen, müssen alle Kreuzungen mit Klemmen verbunden sein, die mindestens 1/5 der Seilkräfte aufnehmen können. **Abb. 35** stellt die Seilnetzverbindungen schematisch dar. [4]



**Abb. 35:** Verbindung der Seilkreuzung [4]

Wenn das Membranmaterial zwischen den Seilen gespannt ist, ist die Berechnung der Seilkräfte gleich wie in **Abschnitt 5.3** beschrieben wurde, durchzuführen. Für die Bestimmung der größten Windbelastung dient **DIN 4134:1983** [4] **Tabelle 6**.

#### 5.5 Diagramme zur Membranberechnung nach Herzog

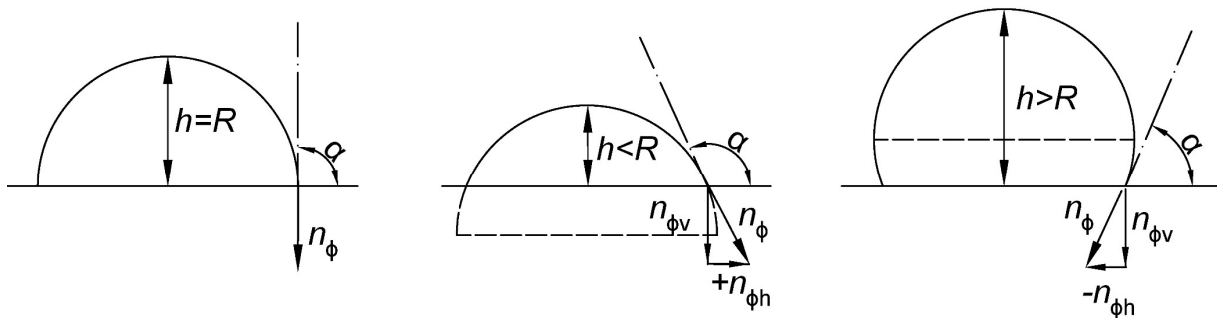
Bei speziellen Membranformen, wie Ellipsoidmembranen, und bei komplexen Belastungsschemen zufolge gleichzeitiger Wind- und Schneebelastung lassen sich die

Membrankräfte und Verankerungskräfte mit Diagrammen nach Herzog [31] ermitteln. Die Diagramme dienen zur Ermittlung der statischen Schnittgrößen von Zylinder- und Ellipsoidmembranen, die auf den linearen Gleichungen von Materialgesetzen und Gleichgewichtsbedingungen basieren. Bei zylindrischen Membranen müssen die Verformungen berücksichtigt werden, die Diagramme, siehe Tabelle in **Anhang A - 5**, ziehen mit Parametern das nichtlineare Verhalten in Betracht. Die Überlagerung der unterschiedlichen Lastfälle nach den Diagrammen ergeben die erzeugten Membrankräfte, siehe **Anhang A - 2** und **A - 3**. [31]

## 5.6 Verankerungen und Befestigungen

### 5.6.1 Allgemeines

Die Erdverankerungen müssen die in der Membran auftretenden Kräfte in den Boden einleiten können. Die Kräfte sind aus den vorgeschriebenen Lastfällen zu ermitteln, die unterschiedlichen Bemessungssituationen und unterschiedliche Formen von Membranen verursachen die Änderungen der Richtungswinkel der Verankerungskräfte. Das Verhältnis von den horizontalen und vertikalen Kraftkomponenten hängen von dem Tangentialwinkel des Membranfußpunktes ab, siehe **Abb. 36**. [31]



**Abb. 36:** Kraftkomponente der Verankerungskräfte [31]

Die Anker sind für zwei Fälle zu bemessen. Der Anker muss nur die Vertikalkräfte aufnehmen können,

- wenn der Anker als Streifenfundament ausgeführt wird, oder
- oder mit einem Betonrost verbunden wird,
- oder die Horizontalkräfte durch den Boden oder eine Betonplatte aufgenommen werden. [31]

Streifenfundamente sind besonders günstig als Verankerung, weil sie die Verdrehung der Anker verhindern können. Die Vertikalkräfte werden durch das Eigengewicht von dem Ankerkörper ausgeglichen. Im anderen Fall müssen die horizontalen Kräfte durch den passiven Erddruck oder



durch Reibung der Ankeroberfläche aufgenommen werden. Wenn die Neigung des Ankers dem Richtungswinkel der Membrankräfte entspricht, können die Anker nach den am Auflager auftretenden Membrankräfte bemessen werden. Die Tragfähigkeit von dem Anker hängt von den Bodenkennwerten ab. Die möglichen Fundamenttypen liegen im oberen Bodenbereich, in dem sich der Wasserpegel immer ändert, und Frost auftreten kann, diese Bedingungen beeinflussen die Festigkeit des Bodens. [31]

Allgemein gültig ist, dass die Einbringtiefe von Ankern min. 80 cm sein muss. Einzelfundamente müssen durch Ausziehversuche getestet werden. 5% der Anker, aber mindestens 3 Anker müssen geprüft werden, wenn die Ausziehungskraft um das 2 - fache größer als die Resultierenden Membrankräfte ist. Wenn die Ausziehungskraft nur das 1,5 - Fache der Bemessungsmembrankräfte beträgt, muss die Hälfte der Anker geprüft werden. Stahlanker müssen gegen Korrosion geschützt werden. [4]

### 5.6.2 Berechnung der Verankerungskräfte

Die Verankerungskräfte werden aus Windlasten und aus dem Nenn-Innendruck begerechnet. Weil **DIN 4134:1983** [4] das semiprobabilistische Nachweiskonzept noch nicht berücksichtigt, sind die Teilsicherheitsbeiwerte nach der aktuellen Norm, **EC EN 1990:2013** [34] anzunehmen. Die nächste Tabelle veranschaulicht den Unterschied zwischen der Ermittlung der Verankerungskräfte nach **DIN 4134:1983** [4] und nach **EC EN 1990:2013** [34] mit den vorgeschriebenen Teilsicherheitsbeiwerten.

**Tab. 16:** Verankerungskräfte bei Abschlusskuppel über Kreisgrundriss von zylinderförmigen Membranen und bei kugelförmigen Membranen nach DIN 4134:1983 [4]

| Verankerungskräfte nach DIN 4134:1983 [4]  |  |
|--|--|
| Abschlusskuppel über Kreisgrundriss von zylinderförmigen Membranen                 | kugelförmige Membranen   |
| $n_{\varphi} = 0,8 \cdot \alpha_{\varphi} \cdot q \cdot r + p_i \cdot \frac{r}{2}$ | $n_{\varphi} = 0,6 \cdot \alpha_{\varphi} \cdot q \cdot r + p_i \cdot \frac{r}{2}$ |

Membrankräfte mit der Berücksichtigung der Sicherheitsbeiwerte nach Eurocode [34]:

$$n_{\varphi,Ed} = \gamma_Q \cdot \alpha_{\varphi} \cdot q \cdot r + \gamma_G \cdot p_i \cdot \frac{r}{2} \quad (5.59)$$

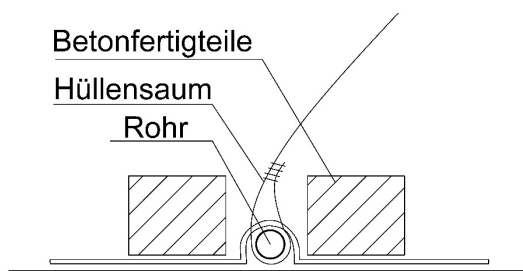
Dabei ist:

- $n_{\varphi,Ed}$  - Bemessungswerte der Membrankräfte in Richtung der Hauptachsen pro Längeneinheit [kN/m]
- $\alpha_{\varphi}$  - Beiwerte für die Membrankräfte aus Lastfall Wind [-]
- $\varphi$  - Indizes der Krafrichtung
- $w, p$  - Indizes der Belastung

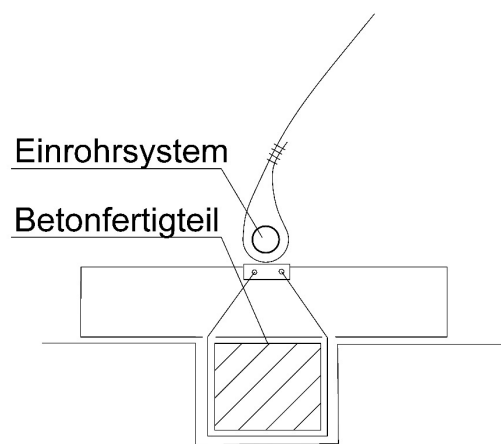
**DIN 4134:1983** [4] legt den Winkel der Verankerungskräfte unter Berücksichtigung der Membranverformung fest.

### 5.6.3 Verankerungskonstruktionen

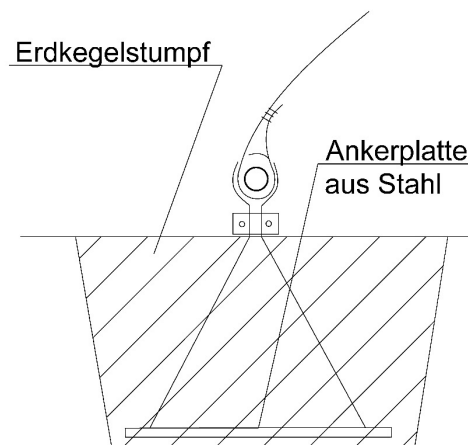
Ballastverankerungen widerstehen den auftretenden Membrankräften durch ihr Eigengewicht. Die horizontalen Kraftkomponenten werden durch die Reibungskraft zwischen dem Baugrund und der Ballastverankerung aufgenommen. Ballastbehälter können mit Schüttung oder Wasser gefüllt werden oder die gefüllten Bauteile werden eingegraben (**Abb. 37, Abb. 38**). [31]



**Abb. 37:** Ballastverankerung [31]



**Abb. 38:** Ballastverankerung durch eingegrabene Fertigteile [31]

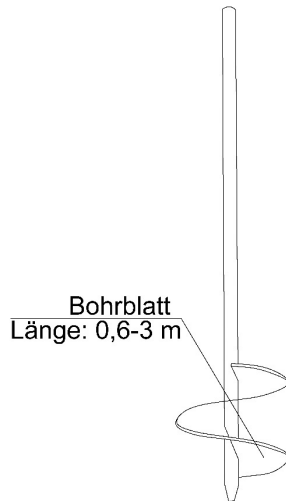


**Abb. 39:** Erdkraftverankerung [31]

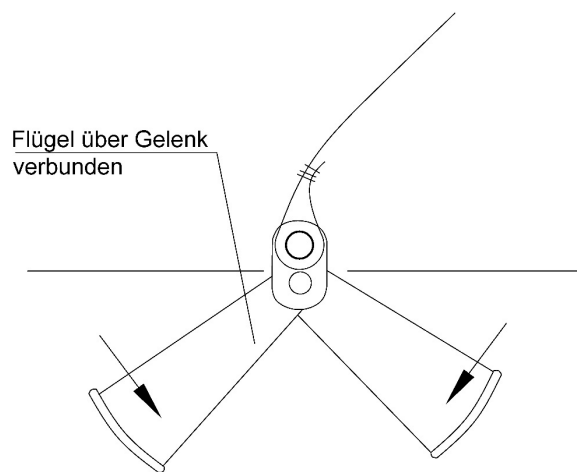
Erdkraftanker (**Abb. 39**) bestehen aus Stahl- oder Stahlbeton-Ankerplatten, die eingegraben sind. Der Widerstand stammt aus dem Eigengewicht des Bodens über der Ankerplatte. Im Fall schräger

Verankerungskraft, kann neben dem Eigengewicht mit der Mantelreibung des Erdkegelstumpfes oder passivem Erddruck gerechnet werden. [31]

Schraubenanker oder Schlaganker, siehe **Abb. 40** und **Abb. 41**, sind in Abständen von 1 m in den Boden eingeschlagen oder eingedreht. Die Anker sind durch Ankerbügel mit einem Rohrrahmen verbunden. Drehanker werden durch Ösen mit dem Rohrrahmen verbunden. [40]

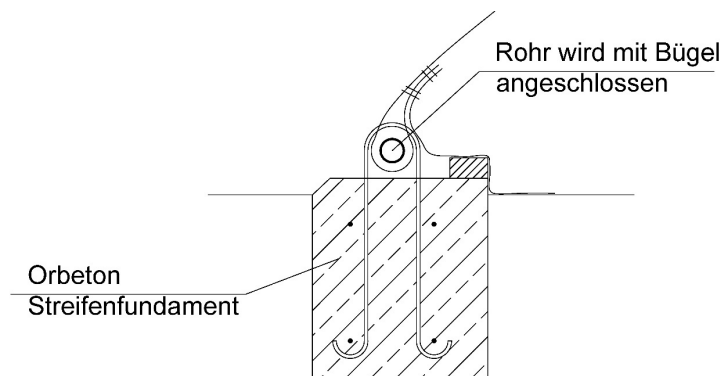


**Abb. 40:** Schraubenanker[31]



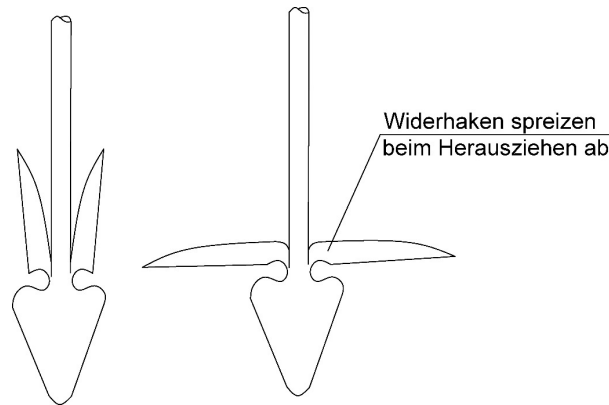
**Abb. 41:** Schlaganker [31]

Für größere Hallen oder lockeren Untergrund sind in der **Abb. 42** dargestellte Anker verwendbar [40].



**Abb. 42:** Ballastverankerung durch Ortbetonstreifen [40]

Spreizanker werden häufig verwendet, und funktionieren wie Pfähle. Sie werden in den Boden eingeschlagen oder, bei größeren Anker sind Bohrlöcher notwendig. Bei Zugbeanspruchung verhindern Widerhaken das Ausziehen, weswegen Spreizanker nur einmal verwendet werden können, siehe **Abb. 43**. [31]

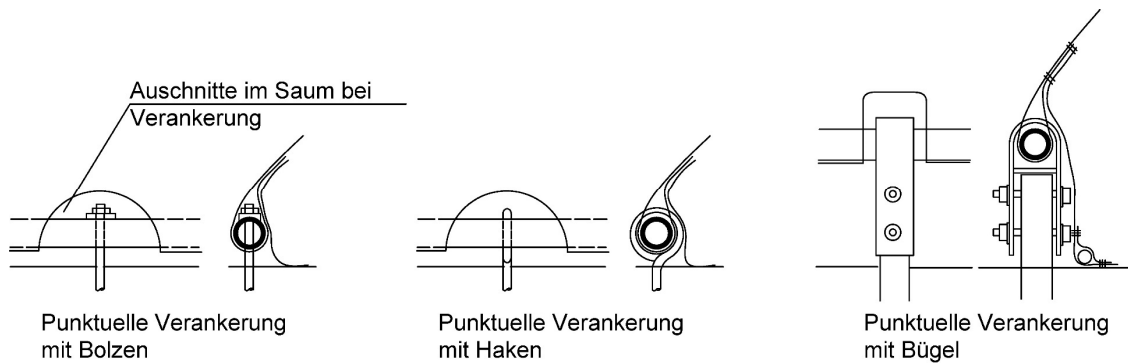


**Abb. 43:** Spreizanker [31]

Verpressanker (oder "Injektionsanker") bestehen aus einem stählernen Zugelement, das in ein Bohrloch eingebracht wird. Die Kraftübertragung in den Baugrund erfolgt über den durch Injektion mit Zementmörtel hergestellten Verpresskörper. [31]

#### 5.6.4 Befestigungen

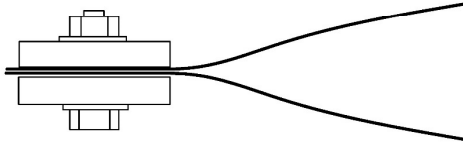
Zur Weiterleitung der Membrankräfte in das Fundament muss am Rand der Membran ein Saum geformt werden. In den Saum wird ein Stahlrohr, Seil oder Stab eingeführt. Das Stahlrohr wird punktuell durch Ösen oder Ankerbügel mit den Verankerungen verbunden. Bei kontinuierlichen Verankerungen sind Klammern, Schienen oder Laschen zu verwenden, siehe **Abb. 44**. [31]



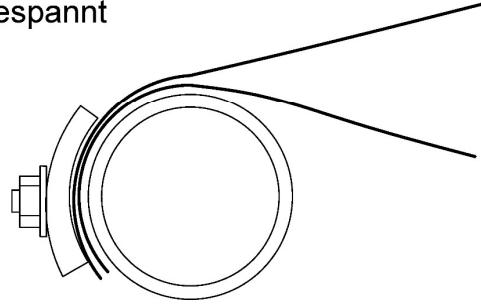
**Abb. 44:** Befestigung der Membrane über einen Rohr [31]

Die Membranspannungen müssen in andere Konstruktionen eingeleitet werden. Die Anschlüsse müssen nachgewiesen werden, grundsätzlich sind die Anbindungen ähnlich wie Verankerungen zu berechnen. Die Befestigung pneumatischer Hüllen an anderen Konstruktionen erfolgt durch Holzgerippe, Stahlring, Seile und Stoffschlaufen. Anschlüsse an Stahlprofilen oder Kunststoffprofilen sind einfach auszuführen, die nächste **Abb. 45** zeigt die unterschiedlichen Befestigungsmöglichkeiten von Kissenkonstruktionen durch Röhre und Platten oder C Profile. [31]

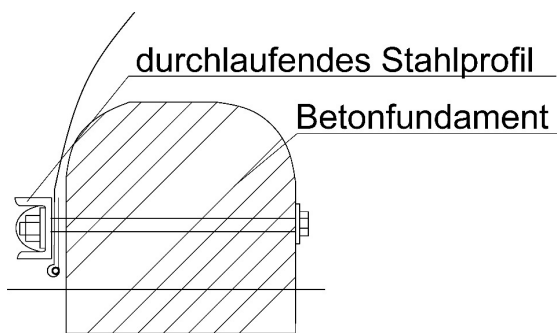
Membran wird zwischen zwei  
Stahlplatten gespannt



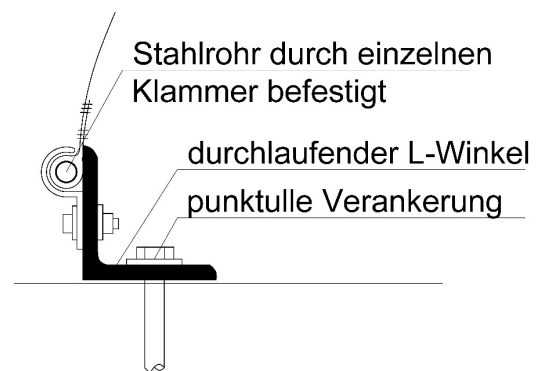
Membran wird zwischen einem  
Stahlrohr und eine Stahlplatte  
gespannt



**Abb. 45:** Befestigung Kissen [31]



**Abb. 46:** Befestigung der Membrane mit einem  
durchlaufenden Stahlprofil an Stahlbeton [31]



**Abb. 47:** Befestigung der Membrane durch  
Klammer und Stahlprofil [31]

## 6 Sicherheitsnachweise

**DIN 4134:1983** [4] beschreibt die Sicherheitsnachweise in **Abschnitt 6**. Die im **Abschnitt 6.1** ermittelten Festigkeitsnachweise müssen mit den Kurzzeitfestigkeiten und Zeitstandfestigkeiten des Gewebes verglichen werden. Die zulässigen Kurzzeitfestigkeiten  $n_0, n_\theta, n_t$  sind in den jeweiligen bauaufsichtlichen Zulassungen für die Membranwerkstoffe festgehalten. In dieser Arbeit wird beispielhaft eine Zulassung [39] behandelt.

Die Sicherheitsnachweise müssen nach **EN 1990:2013** [34] geführt werden. Die Bemessungswerte der Beanspruchungen  $E_d$  können laut **Gleichungen (4.19)-(4.26)** für die ständigen und veränderlichen Lastfälle berechnet werden. Die Nachweise erfolgen mit den entsprechenden Temperaturwerten, siehe **Tab. 11**.

### 6.1 Festigkeitsnachweis für die Hülle

Die Hülle muss nach **DIN 18204-1:2018** [5] für alle Lastfallkombinationen - **Gleichungen (4.19)-(4.26)** - und nach den entsprechenden Temperatureinwirkungen **Tab. 11** geprüft werden. Für die Materialseite siehe **Tab. 8**.

- Lastfallkombination A: Wintersturm

|             |        |                                    |          |
|-------------|--------|------------------------------------|----------|
| $f_{Ed,A1}$ | $\leq$ | $f_{t,Rd,A} = \frac{f_{u,k}}{2,5}$ | $(5.60)$ |
| $f_{Ed,A2}$ |        |                                    |          |
| $f_{Ed,A3}$ |        |                                    |          |
| $f_{Ed,A4}$ |        |                                    |          |

- Lastfallkombination B: Sommergewitter mit erhöhter Temperatur

|            |        |                                    |          |
|------------|--------|------------------------------------|----------|
| $f_{Ed,B}$ | $\leq$ | $f_{t,Rd,B} = \frac{f_{u,k}}{2,2}$ | $(5.61)$ |
|------------|--------|------------------------------------|----------|

- Lastfallkombination C1: Dauerbeanspruchung

|             |        |                                    |          |
|-------------|--------|------------------------------------|----------|
| $f_{Ed,C1}$ | $\leq$ | $f_{t,Rd,C} = \frac{f_{u,k}}{3,5}$ | $(5.62)$ |
|-------------|--------|------------------------------------|----------|

- Lastfallkombination C2: Dauerbeanspruchung mit erhöhter Temperatur

|             |        |                                    |        |
|-------------|--------|------------------------------------|--------|
| $f_{Ed,C2}$ | $\leq$ | $f_{t,Rd,C} = \frac{f_{u,k}}{3,5}$ | (5.63) |
|-------------|--------|------------------------------------|--------|

- Lastfallkombination D: Außergewöhnliche Bemessungssituation (außergewöhnliche Schneelast)

|            |        |                                       |        |
|------------|--------|---------------------------------------|--------|
| $f_{dA,D}$ | $\leq$ | $f_{t,Rd,dA,D} = \frac{f_{u,k}}{1,5}$ | (5.64) |
|------------|--------|---------------------------------------|--------|

Nähte und Verbindungen sind nach Abschnitt 3.6 und nach den entsprechenden Lastfallkombinationen nachzuweisen. Für die zulässige Tragfähigkeit des Gewebes und dessen Verbindungen ist auf die jeweilige Bauaufsichtliche Zulassung zurückzugreifen.

## 6.2 Bemessung der Seile

Die Bemessung der Seile erfolgt durch die Lastfallkombination A nach **Gleichungen (4.19)-(4.22)** und nach dem Nachweis der Zugbeanspruchung nach **EN 1993-1-1:2014** [36], oder die zulässigen Festigkeiten sind den gültigen Zulassungen zu entnehmen.

|                                 |        |  |        |
|---------------------------------|--------|--|--------|
| $N_{Ed,A1} = f_{Ed,A1} \cdot A$ | $\leq$ | $N_{t,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \\ N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \end{array} \right.$ | (5.65) |
| $N_{Ed,A2} = f_{Ed,A2} \cdot A$ |        |  |        |
| $N_{Ed,A3} = f_{Ed,A3} \cdot A$ |        |  |        |
| $N_{Ed,A4} = f_{Ed,A4} \cdot A$ |        |  |        |

## 6.3 Bemessung der Rand- und Anschlussbauteile

Rand- und Anschlussbauteile müssen nach aktuellen Normen [36] und nach dem Lastfall „Wintersturm“ geprüft werden [4].

Die Randanschlüsse sind von der Gründung abhängig. Die häufigsten Befestigungsmöglichkeiten sind Befestigungen an punktuellen Verankerungen über ein Rohr, ein durchlaufende Verankerungsprofil oder an einem Stahlprofil durch Klammern, siehe **Abb. 44** [31]. Die Profile sind durch ein Mehrfeldträgersystem zu modellieren und die Nachweise erfolgen durch Spannungsnachweise.

## 6.4 Bemessung der Gründung

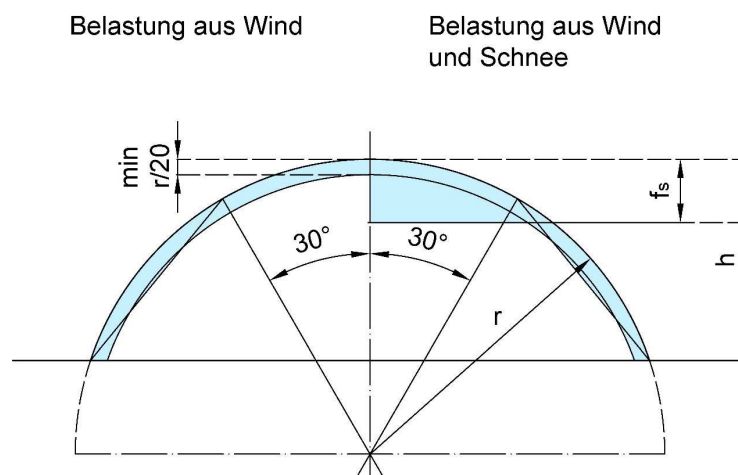
Die Nachweise der Gründungen sind nach den Normen der Reihe **EN 1997** zu führen. Bei massiven Gründungen müssen nach Lastfallkombination A „Wintersturm“ geprüft werden. Streifenfundamente sind für stationäre Tragfluthallen gut geeignet. [4] Die Berücksichtigung des Erdwiderstandes ist nur dann zulässig, wenn die Bodenkennwerte ausreichend gut geprüft sind. [37]

Für temporäre Bauwerke ist **EN 13782:2015 Fliegende Bauten - Zelte - Sicherheit** zu Grunde zu legen. Bei fliegenden Bauwerken wird die Verwendung von Erdankern bevorzugt, damit das Bauwerk schnell umgestaltet werden kann. Die Bestimmung der Tragfähigkeit von Stabankern erfolgt durch empirisch Gleichungen nach **EN 13782:2015 [37] Tabelle 5** und **Bild 5**.

## 6.5 Verträglichkeit der Verformungen

Veränderliche Belastungen, zusammengesetzte Flächen mit unterschiedlichen Krümmungen, die unterschiedlichen Steifigkeiten der Anschlüsse und die Ungenauigkeiten des Zuschnitts erzeugen Verformungen in der Membran. Bei der Ermittlung der Schnittgrößen müssen die Systemverformungen berücksichtigt werden, deswegen müssen die Verformungen aufnehmbar sein. Feste Bauteile können Verformungen verhindern, wenn sie zu nah an der Hülle platziert sind.

**Abb. 48** zeigt die erforderlichen Abstände zwischen der Hülle und derartigen Bauteilen für zylinderförmige und kugelförmige Hüllen. [4]



**Abb. 48:** der freizuhaltenen Raum zufolge Wind und Schneebelastung [4]

Die Mindestabstände infolge Windbelastung sind  $r/20$ . Für die Ermittlung der notwendigen Einsenkung zufolge Schneelast müssen die Geometrie und der Nenn-Innendruck in Abhängigkeit



der Schneelast berücksichtigt werden. Die Werte für die Einsenkung der Hülle können aus **DIN 4134:1983 [4] Tabelle 8** genommen werden. Diese Werte dürfen reduziert werden, wenn die Bauteile oder Einbauten abgerundet oder gepolstert sind oder wenn die Bauteile die aus der Behinderung der Verformungen entstehenden Kräfte aufnehmen können. [4]

## 7 Vorschriften

### 7.1 Allgemeines

Weil Tragluftbauten besondere Konstruktionen sind, welche durch den Innendruck ihre Form und Steifigkeit erhalten, müssen die bauliche Ausbildung, die Aufrechterhaltung und Steuerung des Innendrucks, die Sicherung und Überwachung der Gebläse besonders beachtet werden. Dazu dienen die bauaufsichtlichen Zulassungen und Vorschriften. Die Normvorgaben beinhaltet **DIN 4134:1983** [4].

DGUV Vorschrift 42: Unfallverhütungsvorschrift - Zelte und Tragluftbauten beinhaltet die für den Auf- und Abbau notwendigen Bestimmungen.

### 7.2 Ausbildung der Türen und starrer Bauteile

Um den notwendigen Innendruck gewährleisten zu können, müssen Ein- und Ausgänge als Schleusen oder Drehtüren ausgebildet werden. Bei größeren Hallen ist es möglich, sogar 2 Türen zu öffnen, ohne einen allzu schnellen Senkungsvorgang zu verursachen, siehe **Abschnitt 7.5**. [40] Türen müssen so eingebaut werden, dass elektrische Türen von Hand gegen den Innendruck leicht geöffnet werden können. Um die Verträglichkeit der Verformung zu gewährleisten, dürfen starre Bauteile die Hülle nicht berühren. Schnellverschlüsse dürfen bei Notausgängen verwendet werden. Bei starren Bauteile und Verglasungen muss rechnerisch nachgewiesen werden, dass sie die aus Wind und Innendruck auftretenden Kräfte aufnehmen können. Verglasungen müssen bruchsicher ausgebildet werden. Ausschnitte wie Öffnungen müssen verstärkt werden, damit die Hülle die Schnittkräfte aufnehmen kann. [4]

### 7.3 Aufrechterhaltung und Sicherung des Innendrucks

Gebläse müssen mit Drucksteuerung und Rückschlagklappen ausgestattet werden. Das Bauwerk muss vor Feuer geschützt werden. Weil Gebläse entweder elektrisch oder durch Verbrennungsmotor funktionieren, müssen die Gebläse in einem Mindestabstand von 3 m von der Hülle, außerhalb der Konstruktion aufgestellt sein. Der Abstand kann auf 1m reduziert werden, wenn der Witterungsschutz aus nichtbrennbaren Materialien hergestellt ist. Wenn die Gebläse in der Traglufthalle aufgestellt sind, müssen sie die Feuerwiderstandsklasse F90 erfüllen. Die Zuleitungen müssen entweder aus nichtbrennbaren Baustoffen hergestellt werden oder schwer entflammbare Baustoffe sind nur dann verwendbar, wenn die Lufttemperatur 70 °C nicht übersteigt. Gegenstände, welche in der Nähe der Zuleitungen und Öffnungen angeordnet sind, sind entsprechend zu platzieren. Die Öffnungen müssen gegen Vereisung oder Schnee geschützt

werden. Die Anschlüsse der Gebläse müssen so an der Hülle befestigt sein, dass sie sich allein nicht lösen können. [4]

Die Anzahl und Art von Gebläse und Alarmanlage hängt von der Nutzung und der Personenzahl ab:

- Eine 100%ige Luftreserve ist erforderlich, wenn der Grundriss der Traglufthalle größer, als 1000 m<sup>2</sup> ist, oder die erlaubte Personenzahl zwischen 10-30 Personen liegt. 100%ige Luftreserve bedeutet, dass der erforderliche Innendruck bei Ausfall der Gebläse erhalten bleiben muss.
- Bei einer größeren Personenzahl muss mindestens ein Gebläse mit einem selbstanlaufenden Motor ausgerüstet werden. Das kann durch eine Ersatzstromversorgung oder durch einen Verbrennungsmotor gelöst werden. Für den Verbrennungsmotor muss genügend Treibstoff für mindestens 12 Betriebsstunden bereitgestellt werden.
- Traglufthallen müssen mit Alarmanlagen ausgerüstet werden, die im Fall des Druckfalles oder Ausfall der Stromversorgung Alarm schlagen können.
- Der Innendruck muss entweder selbsttätig staudruckabhängig gesteuert werden oder durch eine verantwortliche Aufsichtsperson. Der Nenn-Innendruck darf nicht um mehr als 10% überschritten und nicht um mehr als 50% (bei einem Mindestwert von 0,18 kN/m<sup>2</sup>) unterschritten werden. Der Innendruck muss überprüfbar sein. [4]

Eine Automatische Steuerung spart bei großen Hallen Strom.

## 7.4 Überwachung

Die Betriebsanweisung muss in der Halle aufgehängt werden. Eine verantwortliche Aufsichtsperson muss sowohl den Innendruck als auch die Betriebssicherheit prüfen. Wenn sich in der Halle mehr als 30 Personen befinden, muss die Aufsichtsperson anwesend sein. Die Betriebssicherheit muss laufend überprüft werden:

- mindestens einmal pro Jahr und nach jedem Sturm müssen die ganze Traglufthalle und ihre Anlagen geprüft werden,
- Gebläse müssen dauernd, Verbrennungsmotoren müssen mindestens jede Woche geprüft werden. In den Wintermonaten sollen Verbrennungsmotoren wöchentlich zweimal geprüft werden. [4]

## 7.5 Senkungsvorgang

Die Stabilität und die Verformungen von pneumatischen Konstruktionen hängen sehr stark vom Innendruck ab [38].

Obwohl der notwendige Innendruck durch mehrere Gebläse sichergestellt wird, muss der Senkungsvorgang genau untersucht werden. *Quing, Shen* und *Gong* haben den Senkungsvorgang in [38] untersucht, in welchen Fällen die Absenkung der Hülle gefährlich sein kann:

- Fehler des Steuerungssystems oder der Gebläseanlagen,
- Schneeräumung zufolge Fehler des Heizungssystems,
- Wasseransammlung,
- Öffnung der Notausgänge während Evakuierung.

Nach dem Erreichen des kritischen Innendrucks treten Zugkräfte in der Membran nicht mehr auf, die Hülle wird flexibel und das Material kann die maßgebenden Beanspruchungen nicht mehr aufnehmen. Deswegen sind der Senkungsvorgang und seine Dauer zu untersuchen. Der Absenkungsvorgang führt zum Kollaps der Hülle. In dem genannten Artikel wurden drei Absenkungsfälle untersucht:

1. Fehler der Gebläse, alle Notausgänge sind geschlossen,
2. eine Tür ist geöffnet aber Gebläse funktionieren,
3. eine Tür ist geöffnet ohne Steuerung des Innendrucks.

Die Testergebnisse zeigten, dass weder eine größere Leckage noch ein Fehler des Gebläsesystems einen stärkeren Absenkungsvorgang verursacht. Dabei wurden nur der Innendruck und das Eigengewicht berücksichtigt. Der Innendruck senkt sich zunächst rasch, bleibt aber nach dem Erreichen eines bestimmten, kleineren Innendrucks konstant. [38]

## 8 Ergebnisauswertung der Musterberechnung

Die Musterberechnung soll die Ergebnisse des ermittelten Nachweiskonzeptes validieren und die Unterschiede zwischen den Berechnungsmethoden aufzeigen. Dazu wurde eine Traglufthalle mit den Abmessungen von  $B \times L \times H = 40 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 12 \text{ m}$  mit 3 unterschiedlichen Methoden berechnet:

- nach **DIN 4134:1983** [4],
- mit den Berechnungsdiagrammen von **Herzog** [31],
- und durch das in dieser Arbeit ermittelten Nachweiskonzept mit der Berücksichtigung der aktuellen Normen.

Zusätzlich soll ein detaillierter Überblick über den Ablauf der Lastannahmen und die Sicherheitsnachweise von pneumatischen Konstruktionen gegeben werden.

Bei der Lastannahme wurde Eigengewicht und Schnee nach **DIN 4134:1983** [4] nicht berücksichtigt, weil sichergestellt ist, dass anfallender Schnee auf der Halle abtaut. Jedoch wurde der Nenn-Innendruck infolge Schneelast ermittelt, hier ist ersichtlich, dass der Innendruck infolge Schneeverwehung auf  $0,85 \text{ kN/m}^2$  erhöht werden muss. Der Nenn-Innendruck ohne Berücksichtigung der Schneelast beträgt  $0,3 \text{ kN/m}^2$ . Die ermittelten Lasten nach den unterschiedlichen Normen stellt **Tab. 17** dar:

**Tab. 17: Lastannahmen nach [4] und Eurocode**

|                  | Ergebnisse nach       |                        |            |
|------------------|-----------------------|------------------------|------------|
|                  | DIN 4134:1983[4]      | Eurocode               | Herzog[31] |
| Staudruck        | $0,60 \text{ kN/m}^2$ | $0,502 \text{ kN/m}^2$ | -          |
| char. Schneelast | $0 \text{ kN/m}^2$    | $0,969 \text{ kN/m}^2$ | -          |
| Nenn-Innendruck  | $0,30 \text{ kN/m}^2$ | $0,30 \text{ kN/m}^2$  | -          |

**Tab. 17** zeigt, dass der ermittelte Staudruck unter Berücksichtigung der aktuellen Normen kleiner ist als nach **DIN 4134:1983** [4]. Für die Ermittlung der charakteristischen Schneelast gibt **DIN 4134:1983** [4] keine Anweisung, das ergibt eine Ergebnisdifferenz bei der Ermittlung des Nenn-Innendruckes. Weil in dieser Berechnung die Schneelast nicht berücksichtigt wurde, ergeben sich identische Ergebnisse für den Nenn-Innendruck.

**Tab. 18** zeigt, dass die Schnittgrößen bei den unterschiedlichen Berechnungen um bis zu 13% abweichen. Der Grund dafür ist die Ermittlung der Schnittgrößen mit der Kesselformel (**DIN 4134:1983** [4]). Die Ergebnisse unter Verwendung der Berechnungsdiagramme von Herzog [31] ergeben bis zu 20% höhere Werte. Anhand von **Tab. 18** kann festgestellt werden, dass die Berechnungsdiagramme schnelle Ergebnisse geben, welche auf der sicheren Seite liegen, obwohl diese Diagramme weder die Tragrichtung des Gewebes noch die Bestandteile der Membran berücksichtigen.

**Tab. 18:** Vergleich der Schnittgrößen

|                 |                 |            | Schnittgrößen [kN/m] |          |
|-----------------|-----------------|------------|----------------------|----------|
|                 |                 |            | DIN 4134:1983        | Eurocode |
| Wind            | Zylinder        | axial      | 9,387                | 7,847    |
|                 |                 | tangential | 9,387                | 7,847    |
|                 | Abschlusskuppel | axial      | 10,725               | 8,968    |
|                 |                 | tangential | 9,387                | 7,847    |
| Nenn-Innendruck | Zylinder        | axial      | 6,705                | 6,705    |
|                 |                 | tangential | 3,353                | 3,353    |
|                 | Abschlusskuppel | axial      | 3,353                | 3,353    |
|                 |                 | tangential | 3,353                | 3,353    |
| Summe           | Zylinder        | axial      | 16,092               | 14,552   |
|                 |                 | tangential | 12,74                | 11,2     |
|                 | Abschlusskuppel | axial      | 14,078               | 12,321   |
|                 |                 | tangential | 12,74                | 11,2     |
| Herzog          |                 |            | 19,713               | 17,557   |

Die Verankerungskräfte sind unter Berücksichtigung der Form und der Membrankräfte am Auflager zu berücksichtigen. Die Verankerungskräfte sind bei Abschlusskuppeln über Kreisgrundrissen von zylinderförmigen Membranen maßgebend. Unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte nach dem aktuellen Eurocode **EN 1990:2013** [34] werden um 50% größere Verankerungskräfte ermittelt, diese sind jedoch kleiner als die umgerechneten Resultate aus den Berechnungsdiagrammen nach *Herzog* [31].

**Tab. 19: Die ermittelten Verankerungskräfte nach DIN 4134:1983, Herzog und Eurocode**

|        |                 | Verankerungskräfte [kN/m] |          |
|--------|-----------------|---------------------------|----------|
|        |                 | DIN 4134:1983             | Eurocode |
|        | Abschlusskuppel | 11,935                    | 17,978   |
| Herzog | H               | 11,828                    | 10,534   |
|        | V               | 17,347                    | 15,45    |
| Herzog | axial           | 20,996                    | 18,699   |

## 9 Zusammenfassung

Pneumatische Konstruktionen sind Membrantragwerke, welche durch die Druckdifferenz zwischen der Innen- und Außenseite stabilisiert werden [1]. Die Deformationen und Spannungszustände stehen bei Tragluftbauten in enger Korrelation, weil das Konstruktionsmaterial nur Zug- und eine geringe Schubfestigkeit aufweist [23]. Die Form, die Belastungen, die statischen Beanspruchungen und die Werkstoffe beeinflussen einander gegenseitig. Die veränderlichen Belastungen, wie Wind oder Schnee verändern die Form der Hülle so, dass das Konstruktionsmaterial sich wieder im Gleichgewicht befindet, unter der Voraussetzung, dass nur Zugspannungen in den Fasern auftreten, dadurch ändert sich der Spannungszustand bei jeder Veränderung der Belastung oder der Auflagerreaktionen und es bildet sich eine neue Form aus. [18]

Gewebemembranen stellen biegeweiche Werkstoffe mit visko-elastischem Materialverhalten dar [43]. Die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen hängen von den durch die Herstellung erzeugten makroskopischen Verbindungen ab sowie von weiteren Faktoren wie Temperatur, Beanspruchungszeit, Prüf- und Belastungsgeschwindigkeit, Ausnutzungsgrad, Belastungsart, Herstellungsart und Umweltbedingungen [18]. Das Materialverhalten kann nicht exakt abgebildet werden oder mit anderen klassischen Baumaterialien verglichen werden [43]. Bei beschichteten Geweben sind die last- und zeitabhängigen Verformungen noch ausgeprägter als bei herkömmlichen Materialien. Langzeitige Beanspruchungen reduzieren die Beanspruchbarkeit der Membrane. [43] Die genauen Eigenschaften von Geweben können aufgrund des Mangels an einheitlichen Normen nur durch eine versuchstechnische Bestimmung ermittelt werden. **DIN 18204-1:2018** [5] ist für Zelthallen mit Primärtragwerk geeignet. Diese Norm dient als Basis zur Ermittlung eines Nachweiskonzeptes, dieses muss aber mit spezifischen Nachweisen und einer Produktionskontrolle ergänzt werden, um mit den für Traglufthallen geltenden Anforderungen übereinzustimmen. Die Bemessungssituationen und Nachweise des Grundmaterials und die Verbindungen mit der Berücksichtigung der Belastungsdauer und Temperatur gibt **DIN 18204-1:2018** [5], **DIN 4134:1983** [4] und zutreffende bauaufsichtliche Zulassung an.

Die zu berücksichtigenden Lasten regelt **DIN 4134:1983** [4], die maßgebenden Belastungen sind der Nenn-Innendruck und die Windlasten. Der innere Luftüberdruck muss unter Berücksichtigung veränderlicher Belastungen - Schneelast und Windlast-, der Nutzung und der Umgebungseinflüsse der Traghalle sowie der Abmessungen der Traglufthalle festgelegt werden. Der Innendruck hat großen Einfluss auf Formstabilität und Standsicherheit des Bauwerks. Nach



den Untersuchungen ergibt sich ein idealer Überdruckbereich, welcher zwischen 294 - 490 N/m<sup>2</sup> liegt. Wenn der Innendruck zu niedrig gewählt wird, ist die Formstabilität gefährdet. [18] Die durch **DIN 4134:1983** [4] definierten Werte des Nenn-Innendrucks sollen zu starke Verformungen der Membran verhindern [27].

Das aerodynamische Verhalten von derartigen zylindrischen oder kugeligen Flächen ist wenig untersucht. Windkanalmessungen von *Horcic* [18] und *Gerhardt* [27] zeigten, dass ein Halbzylinder eine größere Belastung infolge Wind erfährt. Bei den kugeligen Endteilen treten die größten Deformationen auf, diese zusammengesetzten Flächen sind besonders zu sichern. Nach genaueren Untersuchungen wurde festgestellt, dass die gefährlichste Belastungsrichtung bei 0°-15° zur Senkrechten auf die Längsachse liegt (in Abhängigkeit der Form der Traglufthalle), diese Stelle ist für das Konstruktionsmaterial maßgebend. Die Ergebnisse von [18] und [27] dienen auch als Bestätigung der Ansätze in **DIN 4134:1983**. [4] Diese Arbeit gibt einen Überblick über die Ergebnisse von Windkanalversuchen und stellt zusätzlich die Lastannahmen nach DIN und Eurocode vor.

Nach **DIN 4134:1983** [4] werden die Schnittgrößen aus den Gleichgewichtsbedingungen und den geometrischen Gleichungen nach der *Kesselformel* bestimmt. Die Schnittgrößen und Verankerungskräfte können nach **DIN 4134:1983** [4] aber auch über die Berechnungsdiagramme von Herzog [31] ermittelt werden. Das semiprobabilistische Nachweiskonzept bei den Sicherheitsnachweisen kann nach **DIN 4134** aus dem Jahr 1983 nicht berücksichtigt werden, jedoch basiert die Norm für Bauteile aus textilen Flächengebilden und Folien (**DIN 18204-1:2018** [5]) auf den Eurocodes.

Diese Arbeit hat die Aufgabe, die Sicherheitsnachweise von **DIN 4134:1983** [4] mit Teilsicherheitsbeiwerten nach dem semiprobabilistischen Sicherheitkonzept zu ergänzen, die Formeln entsprechend den Anforderungen des Eurocodes zu überarbeiten. Zusätzlich sollen die Resultate die Notwendigkeit der Überarbeitung der Materialeigenschaften, der Sicherheitsnachweise der Materialien und die Bedeutsamkeit der einheitlichen Regelungen aufzeigen. Die durchgeführte Musterberechnung, siehe **Anhang B**, hat die Aufgabe, die unterschiedlichen Ergebnisse und den Lastannahmen zu vergleichen und das erstellte Nachweiskonzept zu validieren.

## Formelverzeichnis

### Großbuchstaben

|                        |   |  |
|------------------------|---|--|
| $A$                    | - | Geländehöhe über dem Meeresspiegel [m]                             |
| $A$                    | - | Querschnittsfläche [m <sup>2</sup> ]                               |
| $A_{\text{mod}}$       | - | Werkstoffspezifischer Modifikationsfaktor [-]                      |
| $C_e$                  | - | Umgebungskoeffizient [-]   |
| $C_d$                  | - | Bemessungswert des Gebrauchstauglichkeitskriteriums                |
| $C_t$                  | - | Temperaturkoeffizient [-]  |
| $\Delta F_U$           | - | Kräften in den Seilscharen in Umfangsrichtung                      |
| $\Delta F_L$           | - | Kräften in den Seilscharen in Längsrichtung                        |
| $E_d$                  | - | Bemessungswert der Beanspruchung                                   |
| $F$                    | - | durch Wandschubspannung belastete Teilfläche der Traglufthalle     |
| $I_v(z)$               | - | Turbulenzintensität  |
| $L$                    | - | charakteristische Länge [m]  |
| $N$                    | - | Normalspannungen in Membranebene [kN/m]                            |
| $N_r, N_m$             | - | Membrankräfte in Richtung der Hauptachsen pro Längeneinheit [kN/m] |
| $R$                    | - | Die Gas-Konstante  |
| $R$                    | - | Widerstand   |
| $R_d$                  | - | Bemessungswert des Tragwiderstands                                 |
| $R_i$                  | - | Radius [m]   |
| $\sigma_{\text{vorh}}$ | - | Vorhandene Spannungen [kN/m <sup>2</sup> ]                         |
| $\sigma_{\text{zul}}$  | - | Zulässige Spannungen [kN/m <sup>2</sup> ]                          |
| $S_i$                  | - | Beanspruchung  |
| $T$                    | - | Die Temperatur des eingeschlossenen Gases [K]                      |
| $U$                    | - | Umfang [m]   |
| $V_i$                  | - | Volumen der eingeschlossene Hülle [m <sup>3</sup> ]                |
| $Z$                    | - | Nummer der in der Karte angegebenen Zone [-]                       |

### Kleinbuchstaben

|   |   |   |
|---|---|---|
| $\alpha_w$                                | - | Abminderungsfaktor für Schweißnähte [-]             |
| $\alpha_\theta, \alpha_\varphi, \alpha_x$ | - | Beiwerte für die Membrankräfte aus Windlastfall [-] |
| $b_i$                                     | - | Abmessungen von Dachflächen [m]                     |
| $c_f$                                     | - | Gesamtwiderstandsbeiwert [-]                        |

|                   |   |  |
|-------------------|---|--|
| $c_{pe}$          | - | aerodynamischer Beiwert für den Außendruck [-]   |
| $c_{pi}$          | - | aerodynamischer Beiwert für den Innendruck [-]   |
| $d$               | - | Dicke der Membrane [m]   |
| $d\alpha, d\beta$ | - | Winkel entsprechend Krafrichtung [°]   |
| $dK_i$            | - | Kraft aus Luftdruck [kN]   |
| $ds_1, ds_2$      | - | Seitenlänge der Elementfläche  |
| $f_{Ed}$          | - | Bemessungswert der Zugbeanspruchung, unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte mit Bezug auf die Bemessungssituation |
| $f_{K,u}$         | - | Festigkeit der Kederanschlüsse [kN/5 cm]   |
| $f_{t,Rd}$        | - | Bemessungswert der Zugfestigkeit   |
| $f_u$             | - | Reißkraft ohne erhöhte Temperatur (20°C) [kN/5 cm]   |
| $\varphi$         | - | Indizes der Krafrichtung   |
| $\gamma$          | - | Wichte des Schnees 2 kN/m <sup>3</sup>   |
| $\gamma_i$        | - | Teilsicherheitsbeiwert   |
| $\gamma_M$        | - | Teilsicherheitsbeiwert für den Bauteilwiderstand   |
| $\mu_1$           | - | Formbeiwert für Schneelasten [-]   |
| $\mu_i$           | - | Formbeiwerte für abgleitenden Schnee $\mu_s$ , und für Schnee mit Berücksichtigung von Wind $\mu_w$ [-]  |
| $\mu_w$           | - | Formelbeiwert für Schnee unter Berücksichtigung von Wind [-]   |
| $\nu$             | - | Kinematische Viskosität [m <sup>2</sup> /s]  |
| $m$               | - | Stoffmenge   |
| $n$               | - | Membrankräfte in Richtung der Hauptachsen pro Längeneinheit [kN/m]   |
| $n_{\varphi,Ed}$  | - | Bemessungswerte der Membrankräfte in Richtung der Hauptachsen pro Längeneinheit [kN/m]   |
| $p_i$             | - | Der Innendruck   |
| $q$               | - | Innendruck   |
| $q$               | - | Staudruck  |
| $q_p(z_e)$        | - | Böengeschwindigkeitsdruck [kN/m <sup>2</sup> ]   |
| $r$               | - | Krümmungsradius  |
| $\rho$            | - | Dichte der Luft  |
| $s_{Ad}$          | - | der Bemessungswert für außergewöhnliche Schneelasten auf dem Boden für einen bestimmten Ort [kN/m <sup>2</sup> ]                                       |
| $s_k$             | - | der charakteristische Werte der Schneelast auf dem Boden des betreffenden Ortes [kN/m <sup>2</sup> ]   |

|                         |   |  |
|-------------------------|---|--|
| $\sigma_r, \sigma_m$    | - | Normalspannungen [kN/mm <sup>2</sup> ] |
| $v$                     | - | Bezugsgeschwindigkeit [m/s]            |
| $v_m$                   | - | mittlere Windgeschwindigkeit           |
| $w, p$                  | - | Indizes der Belastung                  |
| $z_e$                   | - | Bezugshöhe [m]                         |
| $\vartheta, \varphi, x$ | - | Indizes der Krafrichtung               |

## Literaturverzeichnis

- [1] Stimpfle B., Schäffer M.: *Stahlbau- Kalender 2015: Eurocode 3 – Grundnorm, Leichtbau.* CHAPTER 8 Membrantragwerke, S.517-566, 2015
- [2] <https://www.dai.org/oeffentlichkeitsarbeit/baukultur/beitraege/555-bauen-mit-membranen>
- [3] Kolbitsch A.: *E+E : Erhaltung Und Erneuerung Von Hochbauten : Geschichtliche Entwicklung, Anwendung Des Aktuellen Sicherheitskonzeptes, Lastannahmen Und Materialkennwerte, Ausgewählte Bauteile/Konstruktionen, Dachkonstruktionen/Dachausbauten.* Technische Universität Wien, 2015
- [4] DIN 4134: *Tragluftbauten: Berechnung, Ausführung und Betrieb*, 1983
- [5] DIN 18204-1:2018-11: *Bauteile aus textilen Flächengebilden und Folien - Teil 1: Hallen und Zelte*
- [6] DIN 18204-1:2018-11: *Bauteile aus textilen Flächengebilden und Folien - Teil 101: Konformitätsnachweis für Hallen und Zelte nach DIN 18204-1*
- [7] Adamczewski P.: *Hochhausfassaden aus Membranen Untersuchung transparenter Folien als vorgespanntes Membrantragwerk bei Hochhausfassaden.* Berlin, 2008  
Electronic Theses and Dissertations  
<https://depositonce.tu-berlin.de/handle/11303/2130>
- [8] Brandt H.: *Maßnahmen zur Schadenverhütung bei Tragluftbauten (Gedanken zur Norm DIN 4134)* Schadenprisma Ausgabe 3/1981, S.41-48, 1981  
[https://www.schadenprisma.de/wp-content/uploads/pdf/1981/sp\\_1981\\_3\\_2.pdf](https://www.schadenprisma.de/wp-content/uploads/pdf/1981/sp_1981_3_2.pdf)
- [9] Sundaram S.: *Analysis of air supported structures.* Windsor, 1990  
Electronic Theses and Dissertations. 1158.  
<https://scholar.uwindsor.ca/etd/1158/>
- [10] <http://jdpecon.com/expo/wfbrussels1958.html>
- [11] <http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/DOMES/OSAKA/cable.html>
- [12] <http://www.tensinet.com/index.php/component/tensinet/?view=project&id=3765>
- [13] B.P.Füzes.: *Tudományos diákköri Konferencia*, 2011  
(<https://tdk.bme.hu/EPK/DownloadPaper/Feszitett-membranok-szerkezeti-megoldasai>)  
([https://tdk.bme.hu/EPK/Tarto/Feszitett-membranok-szerkezeti-megoldasai?fbclid=IwAR1\\_GGIQVypdzFiKQXVpo1dqsg4T0FECg7A4mznzC0xVqr\]qCGcCwZ-XGUul](https://tdk.bme.hu/EPK/Tarto/Feszitett-membranok-szerkezeti-megoldasai?fbclid=IwAR1_GGIQVypdzFiKQXVpo1dqsg4T0FECg7A4mznzC0xVqr]qCGcCwZ-XGUul))
- [14] <http://www.tensairitysolutions.com/#concept>
- [15] Franz G., Hampe E., Schäfer K.: *Konstruktionslehre des Stahlbetons.* Band II: Tragwerke, Teil B: Entstehen und Bestehen der Bauwerke, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991  
ISBN 978-3-540-522454
- [16] Grunwald G.: *Mechanisch vorgespannte, doppellagige Membranmodule in ihrer Anwendung als zweite Gebäudehülle.* Berlin, 2007  
Electronic Theses and Dissertations  
[https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/1997/1/Dokument\\_7.pdf](https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/1997/1/Dokument_7.pdf)

- [17] Schlaich J., Bergermann R., Sobek W.: *Tensile membrane Structures*. Invited lecture in the IASS-Congress in Madrid, 1989  
<http://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/7246/1/sob12.pdf>
- [18] Horcic M.: *Windbelastung und Berechnung des Spannungs-und Verformungszustandes im zylindrischen Teil von Traglufthallen mit besonderer Berücksichtigung des Konstruktionsmaterials*, aku-Fotodruck, Zürich, 1974
- [19] <https://baulexikon.beuth.de/MEMBRAN.HTM>
- [20] ÖNORM EN 1991-1-4:2011 05 15: *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten*
- [21] ÖNORM EN 1991-1-3:2016 01 15: *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten*
- [22] [http://wandinger.userweb.mwn.de/TM2/v2\\_2.pdf](http://wandinger.userweb.mwn.de/TM2/v2_2.pdf)
- [23] [https://www.researchgate.net/publication/326673085\\_Design\\_and\\_Analysis\\_of\\_Pneumatic\\_Structures](https://www.researchgate.net/publication/326673085_Design_and_Analysis_of_Pneumatic_Structures)
- [24] [https://www.researchgate.net/publication/245529080\\_Some\\_issues\\_on\\_the\\_design\\_and\\_analysis\\_of\\_pneumatic\\_structures](https://www.researchgate.net/publication/245529080_Some_issues_on_the_design_and_analysis_of_pneumatic_structures)
- [25] Kassem M., Novak M.: *Response of Hemispherical, Air-supported Structures to Wind*. Journal of Engineering Mechanics - ASCE, Vol. 117 No. 8, S.1718-1737, 1991  
ISSN 0733-9399/91/0008/1718
- [26] [https://openaccess.city.ac.uk/id/eprint/7408/1/WIND\\_LOADING\\_AND\\_DYNAMIC\\_RESPONSE\\_OF.pdf](https://openaccess.city.ac.uk/id/eprint/7408/1/WIND_LOADING_AND_DYNAMIC_RESPONSE_OF.pdf)
- [27] Gerhardt H. J.: *Traglufthallen unter Windbelastung*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Opladen, 1977.  
ISBN 978-3-663-05302-6
- [28] [https://www.researchgate.net/publication/307528081\\_Ontario\\_Celebration\\_Zone\\_Pavilion\\_A\\_Large\\_Pneumatic\\_Structure](https://www.researchgate.net/publication/307528081_Ontario_Celebration_Zone_Pavilion_A_Large_Pneumatic_Structure)
- [29] ÖNORM EN 1991-1-1:2011 09 01: *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau*
- [30] Firt V.: *Statics, Formfinding and Dynamics of Air-Supported Membrane Structures*, Publishing house of the Czechoslovak academy of science. Prague, 1982
- [31] Herzog T.: *Pneumatische Konstruktionen: Bauten aus Membranen und Luft*. Verlag Gerd Hatje, Stuttgart, 1976  
ISBN 377-5-700-838
- [32] Holmes J. D.: *Wind Loading of Structures*. CRC Press, Australia, 2015  
ISBN 978-1-482-229196
- [33] Kollár L.: *A mérnöki stabilitáselmélet különleges problémái*. Akadémia Kiadó, Budapest, 1991
- [34] ÖNORM EN 1990:2013 03 15: *Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung*
- [35] ÖNORM EN 13782:2015 06 01: *Fliegende Bauten - Zelte - Sicherheit*

- [36] ÖNORM EN 1993-1-1:2014 10 15: *Eurocode: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*
- [37] EN 13782:2015 *Fliegende Bauten - Zelte - Sicherheit*
- [38] <https://www.researchgate.net/publication/324819658> *Deflation behavior and related safety a sssessment of an air-supported membrane structure*
- [39] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/Allgemeine Bauartgenehmigung Nr. Z-10.5-35. Deutsche Institut für Bautechnik, Berlin, 2019
- [40] Brylka, R: *Pneumatische Konstruktionen =Structures gonflables = Pneumatic Structures.* Band 22, Heft 6, Bauen + Wohnen = Construction + habitation= Buliding + home: internationale Zeitschrift S.213-216, 1968  
<https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=buw-001:1968:22::2185>
- [41] <https://www.researchgate.net/publication/326658607> *AN OUTLINE OF THE EVOLUTION OF PNEUMATIC STRUCTURES*
- [42] DIN 55543-5:2017 10: *Verpackungsprüfung - Prüfverfahren für Verpackungsfolien - Teil 5: Bestimmung der Verbundhaftung*
- [43] Seidel M.: *Textile Hüllen, Bauen mit biegeweichen Tragelementen.* Ernst & Sohn, Berlin, 2008 ISBN 978-3-433-01865
- [44] <https://de.wikipedia.org/wiki/Kesselformel>
- [45] [https://www.ibb.uni-stuttgart.de/dokumente/abschlussarbeiten/poster/2014/2014-10\\_Szczugiel.pdf](https://www.ibb.uni-stuttgart.de/dokumente/abschlussarbeiten/poster/2014/2014-10_Szczugiel.pdf)
- [46] Wagner R.: *Bauen Mit Seilen Und Membranen.* Berlin : Wien : Zürich : Beuth Verlag GmbH, 2016 ISBN 978-3-410-217190
- [47] [http://www.gerd-pfeffer.de/atm\\_luftdichte.html](http://www.gerd-pfeffer.de/atm_luftdichte.html)
- [49] ÖNORM B 1991-1-3:2018 12 01: *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen - Schneelasten - Nationale Festlegungen zur ÖNORM EN 1991-1-3, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen*
- [50] ÖNORM B 1991-1-4:2019 07 15: *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-4 und nationale Ergänzungen*

## Anhang A



| Berechnung der Membrankräfte zufolge Winbelastung von zylinderförmigen Membranen mit Abschlusskuppel über <u>Rechteckgrundriss</u> - <b>Zylinderteil</b> |  |                       |                       |                                |
|--|--|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Abmessungen  | Ermittlung der Membrankräfte: $n = \alpha \cdot q \cdot r$ |                       |                       |                                |
|  | $h/r$  |                       |                       |                                |
| $b/l$  | 0,5<br>$n_{\varphi}$                                       | 0,75<br>$n_{\varphi}$ | 1<br>$n_{\varphi}$    | 0,5-1<br>$n_{\vartheta} = n_x$ |
| 0,25   | $0,9 \cdot q \cdot r$                                      | $q \cdot r$           | $1,1 \cdot q \cdot r$ | $0,9 \cdot q \cdot r$          |
| 0,5  | $0,8 \cdot q \cdot r$                                      | $0,9 \cdot q \cdot r$ | $q \cdot r$           | $0,8 \cdot q \cdot r$          |
| 0,75   | $0,7 \cdot q \cdot r$                                      | $0,9 \cdot q \cdot r$ | $0,9 \cdot q \cdot r$ | $0,7 \cdot q \cdot r$          |

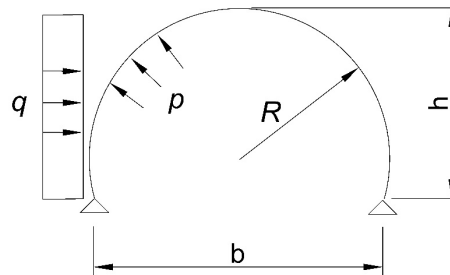
| Berechnung der Membrankräfte zufolge Winbelastung von zylinderförmigen Membranen mit Abschlusskuppel über <u>Kreisgrundriss</u> - <b>Zylinderteil</b> |  |                       |                       |                                   |                            |
|---|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| Abmessungen   | Ermittlung der Membrankräfte: $n = \alpha \cdot q \cdot r$ |                       |                       |                                   |                            |
|   | $h/r$  |                       |                       |                                   |                            |
| $b/l$   | 0,5<br>$n_{\varphi}$                                       | 0,75<br>$n_{\varphi}$ | 1<br>$n_{\varphi}$    | 0,5-0,75<br>$n_{\vartheta} = n_x$ | 1<br>$n_{\vartheta} = n_x$ |
| 0,25  | $0,9 \cdot q \cdot r$                                      | $q \cdot r$           | $1,1 \cdot q \cdot r$ | $1,3 \cdot q \cdot r$             | $1,3 \cdot q \cdot r$      |
| 0,5   | $0,8 \cdot q \cdot r$                                      | $0,9 \cdot q \cdot r$ | $q \cdot r$           | $1,2 \cdot q \cdot r$             | $1,2 \cdot q \cdot r$      |
| 0,75  | $0,7 \cdot q \cdot r$                                      | $0,9 \cdot q \cdot r$ | $q \cdot r$           | $1,1 \cdot q \cdot r$             | $1,2 \cdot q \cdot r$      |

| Berechnung der Membrankräfte zufolge Winbelastung von Abschlusskuppel über <u>Rechteckgrundriss</u> - <b>Abschlusskuppel</b> |  |                       |                       |                       |
|--|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Abmessungen  | Ermittlung der Membrankräfte: $n = \alpha \cdot q \cdot r$ |                       |                       |                       |
|  | $h/r$  |                       |                       |                       |
| $b/l$  | 0,5<br>$n_{\varphi}$                                       | 0,75<br>$n_{\varphi}$ | 1<br>$n_{\varphi}$    | $n_{\vartheta} = n_x$ |
| 0,25   | $1,2 \cdot q \cdot r$                                      | $1,2 \cdot q \cdot r$ | $1,2 \cdot q \cdot r$ | $0,9 \cdot q \cdot r$ |
| 0,5  | $q \cdot r$  | $q \cdot r$           | $1,1 \cdot q \cdot r$ | $0,8 \cdot q \cdot r$ |
| 0,75   | $0,8 \cdot q \cdot r$                                      | $0,9 \cdot q \cdot r$ | $q \cdot r$           | $0,7 \cdot q \cdot r$ |
| 1  | $0,8 \cdot q \cdot r$                                      | $0,9 \cdot q \cdot r$ | $q \cdot r$           | $0,7 \cdot q \cdot r$ |

| Berechnung der Membrankräfte zufolge Winbelastung von Abschlusskuppel über <u>Kreisgrundriss</u> - <b>Abschlusskuppel</b> |  |                       |                       |                       |                       |                       |
|---|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Abmessungen   | Ermittlung der Membrankräfte: $n = \alpha \cdot q \cdot r$ |                       |                       |                       |                       |                       |
|   | $h/r$  |                       |                       |                       |                       |                       |
| $b/l$   | 0,5  |                       | 0,75                  |                       | 1                     |                       |
|   | $n_{\varphi}$  | $n_{\vartheta} = n_x$ | $n_{\varphi}$         | $n_{\vartheta} = n_x$ | $n_{\varphi}$         | $n_{\vartheta} = n_x$ |
| 0,25  | $1,5 \cdot q \cdot r$                                      | $1,2 \cdot q \cdot r$ | $1,6 \cdot q \cdot r$ | $1,3 \cdot q \cdot r$ | $1,6 \cdot q \cdot r$ | $1,3 \cdot q \cdot r$ |
| 0,5   | $1,4 \cdot q \cdot r$                                      | $1,1 \cdot q \cdot r$ | $1,4 \cdot q \cdot r$ | $1,1 \cdot q \cdot r$ | $1,5 \cdot q \cdot r$ | $1,2 \cdot q \cdot r$ |
| 0,75-1  | $1,3 \cdot q \cdot r$                                      | $q \cdot r$           | $1,4 \cdot q \cdot r$ | $1,1 \cdot q \cdot r$ | $1,5 \cdot q \cdot r$ | $1,2 \cdot q \cdot r$ |

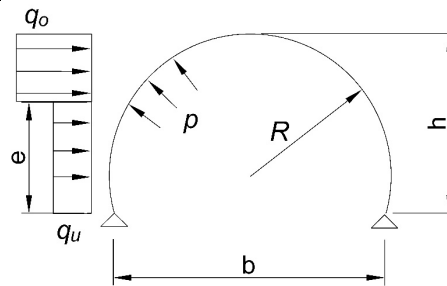
**A - 1:** Beiwerte für die Berechnung der Schnittgrößen aus Lastfall Wind nach DIN 1434:1983 Tabelle 4 und 5 [4]

| Berechnung der Membrankräfte des Zylinders unter Windbelastung |          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $n_{\phi}/(p+q)/R$   |          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| $p/q$<br>$h/b$   | $\infty$ | 10   | 5    | 3    | 2    | 1,5  | 1    | 0,8  | 0,6  | 0,4  | 0,2  | 0    |
| 0,1  | 1,0      | 1,03 | 1,05 | 1,07 | 1,09 | 1,12 | 1,13 | 1,15 | 1,17 | 2    | 1,22 | 1,26 |
| 0,2  | 1,0      | 1,01 | 1,02 | 1,03 | 1,04 | 1,05 | 1,05 | 1,06 | 1,08 | 1,08 | 1,1  | 1,13 |
| 0,3  | 1,0      | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,97 | 0,97 | 0,97 |
| 0,4  | 1,0      | 0,99 | 0,98 | 0,96 | 0,96 | 0,95 | 0,95 | 0,94 | 0,94 | 0,92 | 0,9  | 0,89 |
| 0,5  | 1,0      | 0,98 | 0,97 | 0,95 | 0,93 | 0,91 | 0,89 | 0,88 | 0,86 | 0,85 | 0,82 | 0,78 |
| 0,6  | 1,0      | 0,97 | 0,96 | 0,94 | 0,9  | 0,89 | 0,86 | 0,85 | 0,82 | 0,79 | 0,77 | 0,72 |
| 0,7  | 1,0      | 0,97 | 0,95 | 0,93 | 0,89 | 0,87 | 0,84 | 0,81 | 0,79 | 0,77 | 0,73 | 0,67 |
| 0,8  | 1,0      | 0,98 | 0,95 | 0,9  | 0,87 | 0,85 | 0,81 | 0,79 | 0,77 | 0,73 | 0,69 | 0,64 |
| 0,9  | 1,0      | 0,98 | 0,93 | 0,9  | 0,86 | 0,84 | 0,8  | 0,77 | 0,75 | 0,71 | 0,66 | 0,62 |
| 1  | 1,0      | 0,99 | 0,94 | 0,9  | 0,85 | 0,83 | 0,79 | 0,75 | 0,73 | 0,69 | 0,65 | 0,59 |



A - 2: Berechnung der Membrankräfte nach Herzog [31]

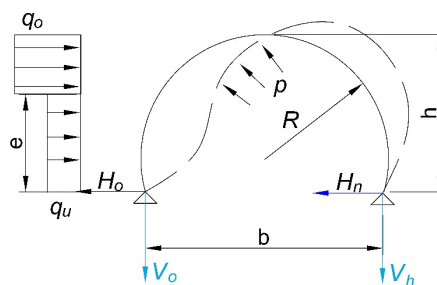
|               |      | Berechnung des Faktors $\alpha$ bei Stufenweise Windbelastung                            |       |       |      |      |      |      |
|---------------|------|--|-------|-------|------|------|------|------|
|               |      | $n_{\phi}(q, p) = \lambda \cdot n_{\phi}(q_u, p) + (1 - \lambda) \cdot n_{\phi}(q_o, p)$ |       |       |      |      |      |      |
| h/b \ / \ e/h | 0,5  | 0,6  | 0,7   | 0,8   | 0,85 | 0,9  | 0,95 |      |
|               | 0,1  | 0,00   | 0,12  | 0,18  | 0,25 | 0,35 | 0,42 | 0,60 |
| 0,2           | 0,00 | 0,12   | 0,18  | 0,25  | 0,35 | 0,42 | 0,60 |      |
| 0,24          | 0,00 | 0,12   | 0,18  | 0,25  | 0,35 | 0,42 | 0,60 |      |
| 0,26          | 0,00 | -  | 0,18  | 0,25  | 0,35 | 0,42 | 0,60 |      |
| 0,32          | 0,00 | -  | -     | 0,25  | 0,35 | 0,42 | 0,60 |      |
| 0,3           | 0,00 | 0,08   | 0,15  | 0,25  | 0,35 | 0,42 | 0,60 |      |
| 0,33          | 0,00 | -  | -     | 0,25  | 0,35 | 0,42 | 0,60 |      |
| 0,34          | 0,00 | -  | -     | 0,25  | 0,35 | -    | -    |      |
| 0,4           | 0,00 | 0,05   | 0,10  | 0,19  | 0,26 | 0,35 | 0,50 |      |
| 0,5           | 0,00 | 0,01   | 0,05  | 0,14  | 0,20 | 0,30 | 0,45 |      |
| 0,6           | 0,00 | -0,01  | 0,02  | 0,10  | 0,17 | 0,26 | 0,42 |      |
| 0,7           | 0,00 | -0,04  | -0,02 | 0,07  | 0,15 | 0,23 | 0,40 |      |
| 0,8           | 0,00 | -0,06  | -0,04 | 0,04  | 0,10 | 0,20 | 0,38 |      |
| 0,9           | 0,00 | -0,08  | -0,06 | 0,00  | 0,08 | 0,18 | 0,36 |      |
| 1             | 0,00 | -0,09  | -0,08 | -0,30 | 0,05 | 0,15 | 0,35 |      |



A - 3: Berechnung des Faktors  $\lambda$  bei stufenweiser Windbelastung nach Herzog [31]

| <i>Berechnung der Auflagerkräfte des Zylinders max <math>H_o/n_\phi</math></i> |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
|--|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| $p/q_u$<br>h/b   | 0,00 | 0,20 | 0,40 | 0,60 | 0,80 | 1,00 | 1,50 | 2,00  | 3,00  | 5,00  | 10,00 |
| 0,1  | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95  | 0,95  | 0,95  | 0,95  |
| 0,2  | 0,83 | 0,82 | 0,81 | 0,80 | 0,79 | 0,78 | 0,77 | 0,76  | 0,75  | 0,74  | 0,72  |
| 0,3  | 0,69 | 0,66 | 0,63 | 0,60 | 0,58 | 0,57 | 0,55 | 0,54  | 0,52  | 0,51  | 0,49  |
| 0,35   | 0,60 | 0,57 | 0,55 | 0,51 | 0,50 | 0,50 | 0,49 | 0,47  | 0,47  | 0,47  | 0,46  |
| 0,4  | 0,65 | 0,57 | 0,53 | 0,49 | 0,46 | 0,43 | 0,40 | 0,37  | 0,36  | 0,29  | 0,25  |
| 0,5  | 0,75 | 0,62 | 0,54 | 0,47 | 0,40 | 0,37 | 0,30 | 0,24  | 0,19  | 0,12  | 0,08  |
| 0,6  | 0,84 | 0,68 | 0,56 | 0,45 | 0,37 | 0,31 | 0,20 | 0,15  | 0,06  | -0,02 | -0,10 |
| 0,7  | 0,90 | 0,74 | 0,58 | 0,45 | 0,35 | 0,28 | 0,15 | 0,06  | -0,05 | -0,15 | -0,22 |
| 0,8  | 0,95 | 0,78 | 0,61 | 0,46 | 0,35 | 0,26 | 0,10 | 0,00  | -0,12 | -0,24 | -0,32 |
| 0,9  | 0,99 | 0,83 | 0,64 | 0,47 | 0,35 | 0,25 | 0,07 | -0,05 | -0,19 | -0,32 | -0,41 |
| 1  | 1,00 | 0,85 | 0,66 | 0,50 | 0,36 | 0,25 | 0,05 | -0,09 | -0,23 | -0,36 | -0,48 |

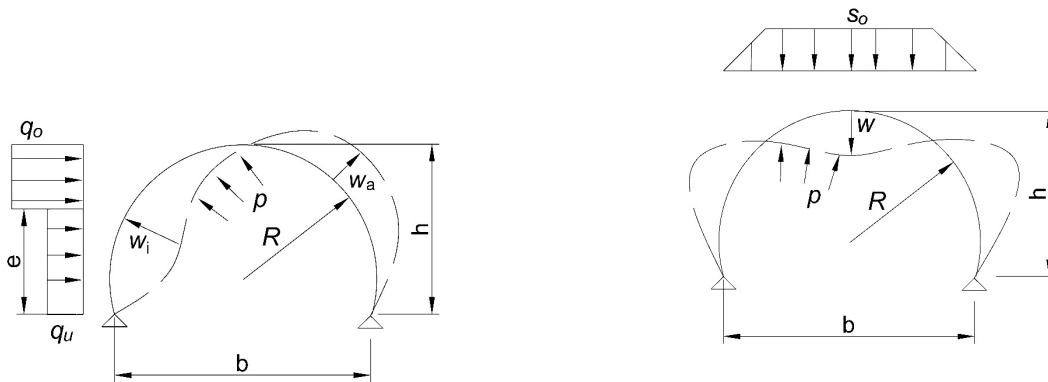
|                |  | <i>Berechnung der Auflagerkräfte<br/>des Zylinders max <math>V_o/n_\phi</math> und max<br/><math>V_n/n_\phi</math></i> | <i>Berechnung der Auflagerkräfte<br/>des Zylinders max <math>H_n/n_\phi</math></i> |
|----------------|--|--|--|
| $p/q_u$<br>h/b |  | alle   | alle   |
| 0,1            |  | 0,40   | -  |
| 0,2            |  | 0,71   | -  |
| 0,3            |  | 0,87   | -  |
| 0,4            |  | 0,97   | -  |
| 0,5            |  | 1,00   | 0,05   |
| 0,6            |  | 1,00   | 0,18   |
| 0,7            |  | 1,00   | 0,32   |
| 0,8            |  | 1,00   | 0,45   |
| 0,9            |  | 1,00   | 0,58   |
| 1              |  | 1,00   | 0,70   |



A - 4: Berechnung der Auflagerkräfte nach Herzog [31]

*Berechnung der größte Zylinderverformung unter  
Windbelastung:  $\max lwl / R$*

| $h/b$<br>$p/q_u$ | 0,1       | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,43 | 0,5  | 0,6       | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1    |
|------------------|-----------|------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|
| 0                | 0,01      | 0,04 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,17 | 0,30      | 0,42 | 0,55 | 0,67 | 0,76 |
| 0,2              | 0,01      | 0,04 | 0,06 | 0,07 | 0,07 | 0,14 | 0,24      | 0,35 | 0,45 | 0,55 | 0,65 |
| 0,4              | 0,01      | 0,04 | 0,06 | 0,07 | 0,06 | 0,11 | 0,20      | 0,29 | 0,38 | 0,48 | 0,56 |
| 0,6              | 0,01      | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,09 | 0,17      | 0,25 | 0,32 | 0,40 | 0,49 |
| 0,8              | 0,01      | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,05 | 0,08 | 0,15      | 0,21 | 0,28 | 0,35 | 0,43 |
| 1                | 0,01      | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,05 | 0,08 | 0,13      | 0,19 | 0,25 | 0,31 | 0,38 |
| 1,5              | 0,01      | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,04 | 0,06 | 0,09      | 0,15 | 0,19 | 0,25 | 0,29 |
| 2                | 0,00      | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,08      | 0,11 | 0,15 | 0,19 | 0,23 |
| 3                | 0,00      | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,06      | 0,08 | 0,11 | 0,15 | 0,17 |
| 5                | 0,00      | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,05      | 0,06 | 0,07 | 0,09 | 0,10 |
| 10               | 0,00      | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,02      | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 |
|                  | max $w_a$ |      |      |      |      |      | max $w_i$ |      |      |      |      |



*Berechnung der größte Zylinderverformung unter  
Schneebelastung:  $\max lwl / R$*

| $h/b$<br>$p/s_o$ | 0,05 | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1    |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| voll             | 0,00 | 0,15 | 0,54 | 1,1  |      |      |      |      |      |      |      |
| 0,5              |      |      |      | 0,92 | 0,98 | 1,03 |      |      |      |      |      |
| 0,6              |      |      | 0,71 | 0,75 | 0,80 | 0,86 | 0,93 | 1,00 |      |      |      |
| 0,7              |      |      | 0,50 | 0,55 | 0,59 | 0,65 | 0,70 | 0,77 | 0,83 | 0,89 | 0,94 |
| 0,8              |      |      | 0,35 | 0,39 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,61 | 0,67 | 0,71 | 0,77 |
| 0,9              |      | 0,19 | 0,23 | 0,27 | 0,33 | 0,39 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,64 |
| 1                | 0,00 | 0,04 | 0,11 | 0,19 | 0,25 | 0,31 | 0,36 | 0,41 | 0,46 | 0,50 | 0,54 |
| 1,2              |      | 0,00 | 0,05 | 0,11 | 0,17 | 0,23 | 0,26 | 0,30 | 0,35 | 0,38 | 0,40 |
| 1,4              |      | 0,00 | 0,04 | 0,07 | 0,13 | 0,17 | 0,20 | 0,24 | 0,27 | 0,30 | 0,32 |
| 1,6              |      | 0,00 | 0,02 | 0,05 | 0,09 | 0,13 | 0,16 | 0,19 | 0,22 | 0,24 | 0,26 |
| 2                |      |      | 0,00 | 0,04 | 0,06 | 0,09 | 0,12 | 0,14 | 0,16 | 0,17 | 0,19 |
| 3                |      |      | 0,00 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,07 | 0,08 | 0,09 | 0,10 | 0,11 |
| 5                |      |      | 0,00 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,06 |

A - 5: Berechnung der Zylinderverformung nach Herzog [31]

## Anhang B - Musterberechnung

## Musterberechnung einer Traglufthalle

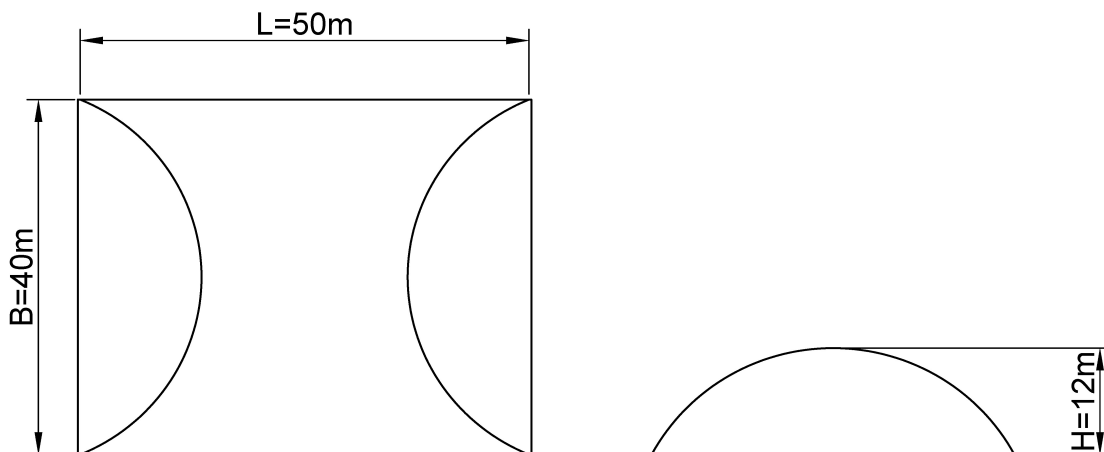
### 1. Allgemeines

Zu berechnen ist eine Traglufthalle mit einem rechteckigen Grundriss.

Standort: Wien, 4. Bezirk  
Abmessungen des Grundrisses: 50m x 40m (L x B)  
Höhe der Halle: Kreisabschnitt mit einer Höhe von 12m

Gegeben ist:

|              |                         |
|--------------|-------------------------|
| Breite:      | $B := 40\text{m}$       |
| Länge:       | $L := 50\text{m}$       |
| Höhe:        | $H := 12\text{m}$       |
| Radius:      | $R := 22.35\text{m}$    |
| Grundfläche: | $A_g := 2000\text{m}^2$ |
| Umfang:      | $U := 180\text{m}$      |



## 2. Grundlagen der Berechnung

- [4] DIN 4134:1983** : *Tragluftbauten: Berechnung, Ausführung und Betrieb*
- [5] DIN 18204-1:2018-11**: *Bauteile aus textilen Flächengebilden und Folien - Teil 1: Hallen und Zelte*
- [21] ÖNORM EN 1991-1-3:2016 01 15**: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten
- [20] ÖNORM EN 1991-1-4:2011 05 15**: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten
- [29] ÖNORM EN 1991-1-1:2019 09 01**: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau
- [34] ÖNORM EN 1990:2016 03 15**: Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung
- [36] ÖNORM EN 1993-1-1:2014 10 15**: Eurocode: Bemessung und Konstruktion v Stahlbauten -  
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- [39] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-10.5-35/11**. DIBt, Berlin, 2019
- [49] ÖNORM B 1991-1-3:2018 12 01**: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen - Schneelasten - Nationale Festlegungen zur ÖNORM EN 1991-1-3, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen
- [50] ÖNORM B 1991-1-4:2019 07 15**: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-4 und nationale Ergänzungen
- [31] Herzog T.: Pneumatische Konstruktionen**: Bauten aus Membranen und Luft. Verlag Gerd Hatje, Stuttgart, 1976



### 3. Lastannahmen

Die Festlegung des Innendruckes und die Lastannahmen erfolgen gemäß **DIN 4134 [4]**. Die Wind- und Schneelasten werden nach **DIN 4134:1983 [4]** und mittels der Berechnungsdiagrammen von **Herzog [31]** ermittelt und verglichen. Das Eigengewicht wird nach **DIN 4134:1983 [4]** vernachlässigt.

Die Traglufthalle wird mit einem Warmluftgebläse betrieben, damit es sichergestellt werden kann, dass anfallender Schnee auf der Halle abtaut. Bei Ausfall der Heizung muss der Schnee durch andere geeignete Vorrichtungen geräumt werden. Schneelasten werden nach **DIN 4135:1983 [4]**, **ÖNORM B 1991-1-3:2019 [49]** nach **Herzog [31]** berechnet, die Ergebnisse bei der Ermittlung der Schnittgrößen werden nicht berücksichtigt, weil Schneelasten die Membranspannungen abmindert. Mögliche Schäden können nur dann vorkommen, wenn die Verformungen infolge Schneelast zu groß sind, deswegen bei Schneefall muss der Innendruck erhöht werden.

#### 3.1 Berechnung der Windlast

Standort: Wien, 4. Bezirk  
Geländekategorie: IV.

##### 3.1.1 Berechnung nach DIN 4134

Der Staudruck ist nach **DIN 4134:1983 [4] Tabelle 2** zu berechnen:

$$\text{Staudruck: } q_{p,\text{DIN}} := 0.3 + 0.025 \cdot H = 0.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Aerodynamische Beiwert für Zylindrische Dachflächen sind nach **EN 1991-1-4:2011 [20]** zu berechnen (identisch für die Werte nach **DIN** und **ÖNORM**):

$$\text{Geometrie: } \frac{H}{B} = 0.3$$

abgelesene Beiwerte nach **EN 1991-1-4:2011 [20]**:

$$C_{pe,10.A} := 0.5 (\text{Druck})$$

$$C_{pe,10.B} := -1.0 (\text{Sog})$$

$$C_{pe,10.C} := -0.4 (\text{Sog})$$

#### Windlasten nach **DIN 4134:1983 [4]**

$$w_e := q_p(z_e) \cdot c_{pe}$$

$$w_{e,\text{DIN}.A} := q_{p,\text{DIN}} \cdot C_{pe,10.A} = 0.3 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$w_{e,\text{DIN}.B} := q_{p,\text{DIN}} \cdot C_{pe,10.B} = -0.6 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$w_{e,\text{DIN}.C} := q_{p,\text{DIN}} \cdot C_{pe,10.C} = -0.24 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

### 3.1.2 Berechnung nach ÖNORM B 1991-1-4:2019 [50]

Grundwerte nach ÖNORM B 1991-1-4:2019 [50] Anhang A:

$$\text{Basiswindgeschwindigkeit:} \quad v_{b0} := 25.1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Basisgeschwindigkeitsdruck:} \quad q_{b,0} := 0.39 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Spitzengeschwindigkeitsdruck:} \quad q_{p,EN} := 1.2 \cdot \left(\frac{H}{10}\right)^{0.38} \cdot q_{b,0} = 0.502 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

### Windlasten nach ÖNORM B 1991-1-4:2019 [50]

$$w_e := q_p(z_e) \cdot c_{pe}$$

$$w_{e,EN,A} := q_{p,EN} \cdot C_{pe,10,A} = 0.251 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$w_{e,EN,B} := q_{p,EN} \cdot C_{pe,10,B} = -0.502 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$w_{e,EN,C} := q_{p,EN} \cdot C_{pe,10,C} = -0.201 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

### 3.2 Berechnung der Schneelast

Lastzone: Zone 2

Geländehöhe (angenommen): A := 160m

Rechenwert für die Lastzone: Z := 2.0

charakteristische Schneelast auf dem Boden:

$$s_k := (0.642 + 0.009) \cdot \left(1 + \frac{A}{728}\right)^2 = 0.969 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Schneelasten auf Dächer nach **ÖNORM B 1991-1-3:2019 [49]**:

$$\mu_4 := 2$$

$$s_{\text{Fall.I}} := 0.8 \cdot s_k = 0.775 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$s_{\text{Fall.II1}} := 0.5 \mu_4 \cdot s_k = 0.969 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$s_{\text{Fall.II2}} := \mu_4 \cdot s_k = 1.937 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

(Nach DIN 4134:1983 sind  
Schneelast im Falle  
Schneeverwehung 0,25kN/m<sup>2</sup>  
anzunehmen)

Bei der angenommenen Traglufthalle ist es sichergestellt, dass anfallender Schnee auf der Halle abtaut. Bei Ausfall der Heizung muss der Schnee durch andere geeignete Vorrichtungen geräumt werden und der Innendruck muss erhöht werden.

### 3.3 Berechnung des Nenn-Innendrucks

Nach **DIN 4134:1983 [4]** ist der Nenn-Innendruck ist so zu wählen, dass die Hülle ohne Seilstützung die ungünstigsten Lasten aufnehmen kann.

Bei zylinderförmigen Membranen mit Abschlusskuppeln über Rechteckgrundriss kann der Nenn-Innendruck nach **DIN 4134:1983 [4] Tabelle 1.** bestimmt werden, mit der Annahme, dass der Nenn-Innendruck 30kN/m<sup>2</sup> nicht unterschreiten darf.

Gestalt der Membran:  $\frac{H}{R} = 0.537 \quad \rightarrow \quad p_i := \max(0.5q_p, 1.1s)$

Berechnung der Nenn-Innendruck:

$$p_i := \max\left(0.5 \cdot \max(q_{p.EN}, q_{p.DIN}), 0.30 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right) = 0.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Nenn-Innendruck im Falle Schnee muss erhöht werden:

$$p_{i.schnee} := \max\left(0.5 \cdot \max(q_{p.EN}, q_{p.DIN}), 1.1 \cdot s_{\text{Fall.I}}, 0.30 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right) = 0.852 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

#### 4 Ermittlung der Schnittgrößen

##### 4.1 Ermittlung der Schnittgrößen nach **DIN 4134:1983 [4]**

###### 4.1.1 Schnittgrößen infolge Wind

Die Beiwerte für die Membrankräfte aus Windlastfall sind in Abhängigkeit von  $b/l$  und  $h/r$  nach **DIN 4134:1983 [4] Tabelle 4 und Tabelle 5** zu ermitteln:

Geometrie:  $\frac{H}{R} = 0.537$   $\frac{B}{L} = 0.8$

Schnittgrößen infolge Windlast für den zylindrischen Teil:

$$n_{\phi.w.DIN.zyl} := 0.7 \cdot q_{p.DIN} \cdot R = 9.387 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad n_{x.w.DIN.zyl} := 0.7 \cdot q_{p.DIN} \cdot R = 9.387 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$n_{\phi.w.EN.zyl} := 0.7 \cdot |q_{p.EN}| \cdot R = 7.847 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad n_{x.w.EN.zyl} := 0.7 \cdot q_{p.EN} \cdot R = 7.847 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Schnittgrößen infolge Windlast für Abschlusskuppeln:

$$n_{\phi.w.DIN.abs} := 0.8 \cdot q_{p.DIN} \cdot R = 10.728 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad n_{x.w.DIN.abs} := 0.7 \cdot q_{p.DIN} \cdot R = 9.387 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$n_{\phi.w.EN.abs} := 0.8 \cdot q_{p.EN} \cdot R = 8.968 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad n_{x.w.EN.abs} := 0.7 \cdot q_{p.EN} \cdot R = 7.847 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

#### 4.1.2 Schnittgrößen infolge Nenn-Innendruck

Schnittgrößen infolge Innendruck für den zylindrischen Teil:

$$n_{\phi.p.zyl} := p_i \cdot R = 6.705 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$n_{x.p.zyl} := p_i \cdot \frac{R}{2} = 3.353 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Schnittgrößen infolge Innendruck für Abschlusskuppeln:

$$n_{\phi.p.abs} := p_i \cdot \frac{R}{2} = 3.353 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$n_{\theta.p.abs} := p_i \cdot \frac{R}{2} = 3.353 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

#### 4.2 Ermittlung der Schnittgrößen mittels Berechnungsdiagramme von Herzog

Eingangsparameter:  $\frac{p_i}{|q_{p.DIN}|} = 0.5$   $\frac{p_i}{|q_{p.EN}|} = 0.598$

abgelesener Wert der Membrankräfte des Zylinders nach Windbelastung aus Diagram nach Herzog [31]: 0,98

$$n_{\phi.w.Herzog.DIN} := 0.98 \cdot (p_i + q_{p.DIN}) \cdot R = 19.713 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$n_{\phi.w.Herzog.EN} := 0.98 \cdot (p_i + q_{p.EN}) \cdot R = 17.557 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

### 5. Berechnung der Verankerungskräfte

Abschlusskuppel immer maßgebend

#### 5.1 Verankerungskräfte nach DIN 4134:1983 [4]

$$n_{\phi.verankerung.DIN.abs} := 0.8 \cdot \alpha_{\phi} \cdot q_{p.DIN} \cdot R + p_i \cdot \frac{R}{2} = 11.935 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

#### 5.2 Verankerungskräfte nach Eurocode

einführung Teilsicherheitsbeiwerte:  $\gamma_Q := 1.5$   $\gamma_G := 1.35$

$$n_{\phi.verankerung.Ed.abs} := \gamma_Q \cdot \alpha_{\phi} \cdot q_{p.EN} \cdot R + \gamma_G \cdot p_i \cdot \frac{R}{2} = 17.978 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

### 5.3 Verankerungskräfte nach Herzog [31]

abgelesener Werte der Auflagerkräfte des Zylinders unter Windbelastung aus Diagramm nach Herzog [31]:

0.6 für  $H_o$

0.88 für  $V_n, V_o$

$$H_{o,DIN} := 0.6 \cdot n_{\phi,w,Herzog,DIN} = 11.828 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \text{nach außen gerichtet}$$

$$V_{DIN} := 0.88 \cdot n_{\phi,w,Herzog,DIN} = 17.347 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$H_{o,EN} := 0.6 \cdot n_{\phi,w,Herzog,EN} = 10.534 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \text{nach außen gerichtet}$$

$$V_{EN} := 0.88 \cdot n_{\phi,w,Herzog,EN} = 15.45 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

### 6 Sicherheitsnachweise

Gewählte Material: 717 Polyplan Architecture Type IV

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| Flächengewicht:                 | $1350 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$                                    |
| Höchstzugkraft: (Kette/Schuss)  | $8400 \frac{\text{N}}{5\text{cm}} / 7300 \frac{\text{N}}{5\text{cm}}$ |
| Weiterreißkraft: (Kette/Schuss) | $1400\text{N} / 1300\text{N}$   |
| Haftung:                        | $150 \frac{\text{N}}{5\text{cm}}$                                     |
| Kältebeständigkeit:             | $-30^\circ\text{C}$   |
| Wärmebeständigkeit:             | $70^\circ\text{C}$  |

angegeben ist Höchstzugfestigkeit (in Schussrichtung):

$$7300 \frac{\text{N}}{5\text{cm}}$$

Zugfestigkeit definiert als 5% Fraktilwert der Kurzzeitfestigkeit bei 23°C Prüftemperatur

$$f_{u,k} := 0.8 \cdot 7300 \frac{\text{N}}{5\text{cm}} = 116.8 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

6.1 Sicherheitsnachweise nach DIN 4134:1983 [4]

A "Wintersturm"

$$f_{E.d.DIN.A} := 1.6 \cdot n_{\phi.w.DIN.abs} + 1.1 \cdot n_{\phi.p.zyl} = 24.54 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} < \frac{f_{u.k}}{2.5} = 46.72 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

B "Sommergewitter"

$$f_{E.d.DIN.B} := 0.7 \cdot n_{\phi.w.DIN.abs} + 1.1 \cdot n_{\phi.p.zyl} = 14.885 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} < \frac{f_{u.k}}{2.2} = 53.091 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

C "Dauerbeanspruchung"

$$f_{E.d.DIN.C} := 1.3 \cdot n_{\phi.p.zyl} = 8.717 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} < \frac{f_{u.k}}{3.5} = 33.371 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Nachweis wurde erbracht!

6.2 Sicherheitsnachweise mit der Berücksichtigung des Eurocodes

$$n_{Ed} \leq R_d = \frac{f_{u.k}}{A_{mod} \cdot \gamma_M}$$

6.2.1 Grundmaterial**Lastfallkombination A: Wintersturm**

für den zylindrischen Teil in Axialrichtung:

$$n_{Ed.A1} := \gamma_G \cdot n_{\phi.p.zyl} + \gamma_Q \cdot n_{\phi.w.EN.zyl} = 20.822 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

für den zylindrischen Teil in Tangentialrichtung:

$$n_{Ed.A2} := \gamma_G \cdot n_{x.p.zyl} + \gamma_Q \cdot n_{x.w.EN.zyl} = 16.297 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

für die Abschlusskuppel in Axialrichtung:

$$n_{Ed.A3} := \gamma_G \cdot n_{\phi.p.abs} + \gamma_Q \cdot n_{\phi.w.EN.abs} = 17.978 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

für die Abschlusskuppel in Tangentialrichtung:

$$n_{Ed.A4} := \gamma_G \cdot n_{\theta.p.abs} + \gamma_Q \cdot n_{x.w.EN.abs} = 16.297 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\max(n_{Ed.A1}, n_{Ed.A2}, n_{Ed.A3}, n_{Ed.A4}) = 20.822 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

&lt;

$$\frac{f_{u.k}}{2.5} = 46.72 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

**Lastfallkombination B: Sommergewitter**

für den zylindrischen Teil in Axialrichtung:

$$\psi_0 := 0.6$$

$$n_{\text{Ed.B1}} := \gamma_G \cdot n_{\phi.p.zyl} + \gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot n_{\phi.w.EN.zyl} = 16.114 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

für den zylindrischen Teil in Tangentialrichtung:

$$n_{\text{Ed.B2}} := \gamma_G \cdot n_{x.p.zyl} + \gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot n_{x.w.EN.zyl} = 11.588 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

für die Abschlusskuppel in Axialrichtung:

$$n_{\text{Ed.B3}} := \gamma_G \cdot n_{\phi.p.abs} + \gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot n_{\phi.w.EN.abs} = 12.597 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

für die Abschlusskuppel in Tangentialrichtung:

$$n_{\text{Ed.B4}} := \gamma_G \cdot n_{\theta.p.abs} + \gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot n_{x.w.EN.abs} = 11.588 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\max(n_{\text{Ed.B1}}, n_{\text{Ed.B2}}, n_{\text{Ed.B3}}, n_{\text{Ed.B4}}) = 16.114 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$



$$\frac{f_{u.k}}{2.2} = 53.091 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

**Lastfallkombination C1: Dauerbeanspruchung**

für den zylindrischen Teil in Axialrichtung:

$$n_{\text{Ed.C11}} := \gamma_Q \cdot n_{\phi.p.zyl} = 10.058 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

für den zylindrischen Teil in Tangentialrichtung:

$$n_{\text{Ed.C12}} := \gamma_Q \cdot n_{x.p.zyl} = 5.029 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

für die Abschlusskuppel in Axialrichtung:

$$n_{\text{Ed.C13}} := \gamma_Q \cdot n_{\phi.p.abs} = 5.029 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

für die Abschlusskuppel in Tangentialrichtung:

$$n_{\text{Ed.C14}} := \gamma_Q \cdot n_{\theta.p.abs} = 5.029 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\max(n_{\text{Ed.C11}}, n_{\text{Ed.C12}}, n_{\text{Ed.C13}}, n_{\text{Ed.C14}}) = 10.058 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$



$$\frac{f_{u.k}}{3.5} = 33.371 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$



**Lastfallkombination C2: Dauerbeanspruchung**

für den zylindrischen Teil in Axialrichtung:

$$n_{\text{Ed.C21}} := \gamma_Q \cdot n_{\phi, \text{p.zyl}} = 10.058 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

für den zylindrischen Teil in Tangentialrichtung:

$$n_{\text{Ed.C22}} := \gamma_Q \cdot n_{\chi, \text{p.zyl}} = 5.029 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

für die Abschlusskuppel in Axialrichtung:

$$n_{\text{Ed.C23}} := \gamma_Q \cdot n_{\phi, \text{p.abs}} = 5.029 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

für die Abschlusskuppel in Axialrichtung:

$$n_{\text{Ed.C24}} := \gamma_Q \cdot n_{\theta, \text{p.abs}} = 5.029 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\boxed{\max(n_{\text{Ed.C21}}, n_{\text{Ed.C22}}, n_{\text{Ed.C23}}, n_{\text{Ed.C24}}) = 10.058 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}} \quad \leq \quad \boxed{\frac{f_{\text{u.k}}}{3.5} = 33.371 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}}$$

**Lastfallkombination D:** Außergewöhnliche Schneebelastung muss in Österreich nach ÖNORM B 1991-1-3:2019 [49] nicht berücksichtigt werden.

Die Nachweise des Grundmaterials wurden erbracht!

### 6.2.2 Schweißnähte

$$f_{t.Ed} \leq f_{t.Rd} = \frac{f_u \cdot \alpha_w}{A_{mod} \cdot \gamma_M}$$

Gewählte Schweißnaht: Schweißnahtbreite  $b > 40 \text{ mm}$

Lastfallkombination A: Wintersturm

$$\max(n_{Ed.A1}, n_{Ed.A2}, n_{Ed.A3}, n_{Ed.A4}) = 20.822 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} < \frac{f_{u.k} \cdot 0.8}{2.5} = 37.376 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Lastfallkombination B: Sommergewitter

$$\max(n_{Ed.B1}, n_{Ed.B2}, n_{Ed.B3}, n_{Ed.B4}) = 16.114 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} < \frac{f_{u.k} \cdot 0.55}{2.2} = 29.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Lastfallkombination C: Dauerbeanspruchung

$$\max(n_{Ed.C11}, n_{Ed.C12}, n_{Ed.C13}, n_{Ed.C14}) = 10.058 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} < \frac{f_{u.k} \cdot 0.35}{3.5} = 11.68 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

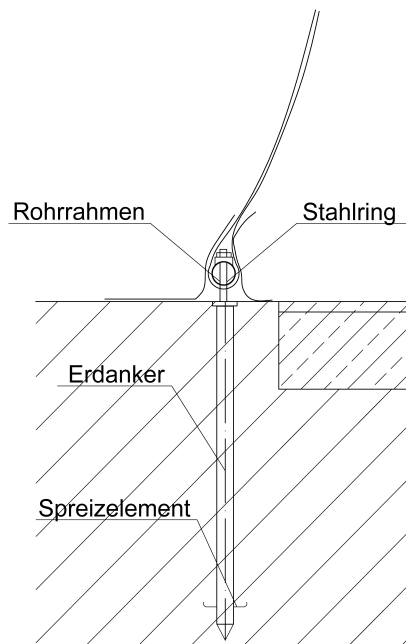
Die Nachweise für die Schweißnähte wurden erbracht.

### 6.2.3 Kederanschlüsse

Kederanschlüsse sind nach **DIN 18204-1:2018-11 [5] Bild 3** ausgebildet, so wird die Schweißnaht maßgebend, Kederanschluss muss nicht zusätzlich berechnet werden

## 7. Berechnung der Hallenverankerung

### 7.1 Darstellung der Hallenverankerung



### 7.2 Berechnung der Stahlrohre

Berechnung der maximalen Kräfte für die Stahlrohre:

$$n_{\phi.verankerung.Ed.abs} = 17.978 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad n_{\phi.verankerung.DIN.abs} = 11.935 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$n_{\phi.verankerung} := \max(n_{\phi.verankerung.DIN.abs}, n_{\phi.verankerung.Ed.abs}) = 17.978 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Winkel der Verankerung:  $\beta := 58.1 \text{deg}$

Die Stahlrohre werden in einem Abstand von 1m mit Bodenankern verankert.

$$n_{\phi.horizontal} := n_{\phi.verankerung} \cdot \cos(\beta) = 9.5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$n_{\phi.vertikal} := n_{\phi.verankerung} \cdot \sin(\beta) = 15.263 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Gewähltes Stahlrohr: Rohr 60.3 x 3.2 S235

$$A_{rohr} := 5.74 \text{cm}^2$$

$$A_{v.rohr} := 3.03 \text{cm}^2$$

$$W_{v.rohr} := 7.78 \text{cm}^3$$

Berechnung des Durchlaufsystems:

$$M_{\text{Ed.rohr}} := n_{\phi.\text{verankerung}} \cdot \frac{(1\text{m})^2}{12} = 149.817 \cdot \text{kN} \cdot \text{cm}$$

$$Q_{\text{Ed.rohr}} := n_{\phi.\text{verankerung}} \cdot \frac{1\text{m}}{2} = 8.989 \cdot \text{kN}$$

Maximale Spannungen:

$$\sigma_{\text{rohr}} := \sqrt{\left(\frac{M_{\text{Ed.rohr}}}{W_{\text{v.rohr}}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{Q_{\text{Ed.rohr}}}{A_{\text{v.rohr}}}\right)^2} = 19.931 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} < 23.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Nachweis wurde erbracht!

### 7.3 Berechnung der Stahlringe

Gewähltes Stahlring: Ring 80 x 12 S235

$$V_{\text{Ed.ring}} := n_{\phi.\text{verankerung}} \cdot 1\text{m} = 17.978 \cdot \text{kN}$$

$$\sigma_{\text{N}} := \frac{V_{\text{Ed.ring}}}{2 \cdot (0.6\text{cm})^2 \cdot \pi} = 7.948 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} < 23.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Nachweis wurde erbracht!

### 7.4 Berechnung der Bodenanker

Die Berechnungswerte der Erdanker werden nach Pfahlprobelastungen ermittelt. Um die Nachweise durchzuführen werden realistische Werte angenommen.

|                              |                                  |
|------------------------------|----------------------------------|
| Abstand der Erdanker:        | $e := 1\text{m}$                 |
| Einbindetiefe:               | $t := 1\text{m}$                 |
| Zug axial:                   | $R_{\text{t.k}} := 38\text{kN}$  |
| Quer zur Achse (in 2m Höhe): | $R_{\text{tr.m}} := 10\text{kN}$ |
| Querkraft in Ankerkopf:      | $R_{\text{tr.k}} := 40\text{kN}$ |
| Abminderungsfaktor:          | $\eta := 2$                      |

Kontrolle Zug Axial:

$$\frac{R_{t.k}}{\eta} = 19 \cdot \text{kN} > n_{\phi.\text{vertikal}} \cdot 1\text{m} = 15.263 \cdot \text{kN}$$

Kontrolle Quer zur Achse:

$$\frac{R_{tr.k}}{\eta} = 20 \cdot \text{kN} > n_{\phi.\text{horizontal}} \cdot 1\text{m} = 9.5 \cdot \text{kN}$$

Nachweis wurde erbracht!