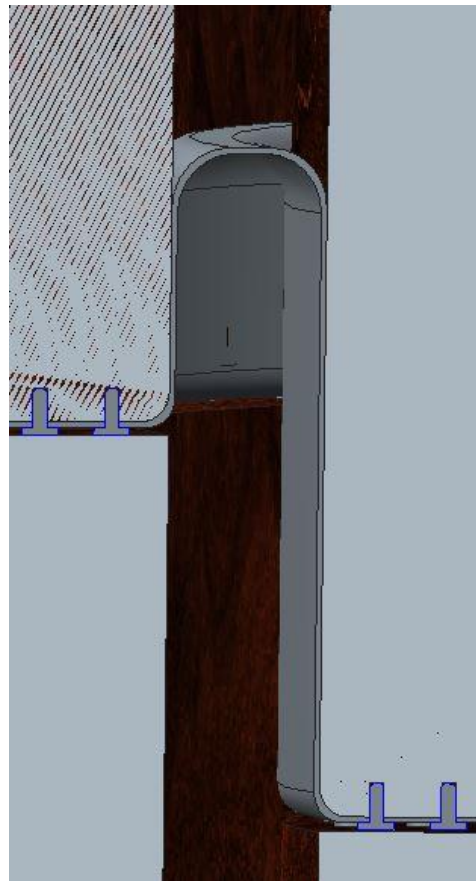


Projektarbeit im Fach Energietechnik

Konzeption einer langlebigen Stülpmembran bezüglich Festigkeitsanforderungen, Belastungen, Aufbau und Herstellungsprozessen



Kurztitel: Stümemtion

Thema: Entwurf einer Stülpmembran

Hochschule: Technische Hochschule Nürnberg

Fakultät: Maschinenbau und Versorgungstechnik

Bachelorstudiengang: Maschinenbau

Fachrichtung: Energietechnik

Wissenschaftlicher Betreuer: Dr. Prof. Matthias Popp

Projektbearbeiter: Markus Lohr

E-Mail: lohrma59034@th-nuernberg.de

Tel.: +4915757162855

Zusammenfassung

Die Konzeption der Membran ist auf einen Stülpmembranspeicher mit den Abmessungen Kolbendurchmesser: 126 m, Zylinderhöhe: 430 m und einer Spaltbreite von 2 m ausgelegt worden. Dieser Speicher ermöglicht die Stromversorgung eines Forchheimer Stadtteils mit 15645 Einwohnern über einen Zeitraum von 10 Tagen.

Aufgrund der Wirtschaftlichkeit ist es von Vorteil auf vorhandenen Ressourcen eine Stülpmembran zu entwerfen. Der Hersteller germanBelt® verspricht mit seinen 122 Stahlgurttförderbänder das größte Potential für dieses Projekt. Diese weisen die besten Anforderungen gegenüber der starken Zugbeanspruchung und ebenso eine lange Lebensdauer von bis zu 20 Jahren auf. Die hohen Kräfte ($F_{ab} = 47155 \text{ MN}$) die der Kolben auf die Zylinderfläche ausübt, bedingen spezielle Förderbänder, sogenannte Stahlseilförderbänder. Diese können durch ihre *Stahlcorde*¹, welche wiederum in *Stahlseilkonstruktionen* von 7x19 Stahlseilen ausgeführt sind, hohen Zugbelastungen standhalten. Diese Förderbänder werden mithilfe der 2-Komponenten-Kontaktklebstoffe der Firma BESTKlebstoffe® verklebt. Bei einer ordnungsgemäßen Verklebung der Bänder entsteht eine hochfeste Verbindung, welche den dynamischen Belastungen standhält. Diese werden somit zweilagig verklebt und trennen die beiden Druckkammern hermetisch ab. Somit ist eine funktionsfähige Stülpmembran entstanden, der mithilfe der *Gewichtsspannvorrichtung* im Spalt des Stülpmembranspeichers „umgestülpt“ wird. Um an den Befestigungsvorrichtungen in der Kolben- und Zylinderwand eine wasserdichte Verbindung zu gewährleisten wird die Membran wasserdicht und dauerbetriebssicher mit der Kolbenverkleidung verbunden. Diese Membran gewährleistet neben der Abdichtung der Druckschichten auch eine optimale Führung des Kolbens bei seiner Auf und Ab Bewegung.

Eine 3-D Modell wurde in CAD konstruiert und in ein FEM-Programm übergeführt, jedoch konnte dies aufgrund von Zeitmangel nicht in diese wissenschaftliche Arbeit mit einfließen.

¹ Die hochgestellten Zahlen verweisen auf Begriffserklärungen, welche im Kapitel 7 auf der Seite 21 zu finden sind

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
Inhaltsverzeichnis	3
1. Einleitung	6
2. Stand der Technik	7
2.1 Materialauswahl und Befestigung	7
2.2 Herstellungsprozess.....	8
3. Stahlseilfördergurte	10
3.1 Deckplatte	11
3.2 Haftmischung	11
3.3 Stahlseile.....	11
3.4 Gurtkonstruktion.....	12
4. Klebstoff	13
4.1 Aufbau und Auswahlverfahren	13
4.2 2-Komponenten-Kontaktklebstoff (2k-Klebstoff).....	14
5. Theoretische Berechnungen	16
5.1 Berechnung der Spannung in der Membran, sowie die Dimensionierung....	16
5.2 Berechnung der Mindestbruchkraft (F_{bmin}) und Festigkeitsnachweis.....	18
5.3 Berechnung der Klebstofffestigkeit.....	19
5.4 Berechnung der Förderbandanzahl.....	20
6. Vergleich der Hersteller	21
6.1 Vergleich von Stahlseilfördergurtunternehmen	21
6.2 Vergleich von Klebstoffunternehmen.....	22
7. Begriffserklärungen	23
8. Literaturnachweis	24
Eidesstattliche Erklärung	26
Anhang	27

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vereinfachtes Stahlseilförderband mit a: obere Deckplatte, b: Kautschukkante, c: Haftmischung, d: verzinkten Stahldrähte, e: untere Deckplatte, \longleftrightarrow d: Stahlseildurchmesser, \longleftrightarrow t: Seilteilung	10
Abbildung 2: Unterteilung der Klebstoffarten nach ihrem Reaktionsmechanismus (Nur relevante Klebstoffgruppe hier ausführlich dargestellt), abgeleitet von Klaus-Gerhard Scholz – Elastomere in Tribologischen Systemen.....	13
Abbildung 3: 7x19 Stahlseilkonstruktion.....	23

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Relevante Auswahlkriterien zur Beurteilung der optimalen Klebvariante Legende: ++++++ = Note 1, +++++ = Note 2, ++++ = Note 3, +++ = Note 4, ++ = Note 5, + = Note 6.....	14
Tabelle 2: Vergleich verschiedener Förderbandunternehmen hinsichtlich der wichtigsten Merkmale.....	21
Tabelle 3: Vergleich verschiedener Klebstoffhersteller hinsichtlich der wichtigsten Merkmale.....	22
Tabelle 4: Wichtigste Abmessungen des Stülpmembranspeichers zur Stromversorgung eines Forchheimer Stadtteils mit ca. 15645 Einwohnern für 10 Tage.....	27
Tabelle 5: Stülpmembranspeicherberechnung.....	27
Tabelle 6: spezifische Stülpmembranauslegung.....	28

1. Einleitung

„Die Energiewende ist unser Weg in eine sichere, umweltverträgliche und wirtschaftlich erfolgreiche Zukunft. Wir haben uns entschieden, Deutschlands Energieversorgung grundlegend umzustellen: Weg von nuklearen und fossilen Brennstoffen, hin zu erneuerbaren Energien. Bis 2025 sollen 40 bis 45 Prozent und bis 2050 mindestens 80 Prozent unserer Energie aus regenerativen Quellen kommen. Und wir setzen darauf, immer effizienter mit Energie umzugehen.“

(Dossier: Energiewende, unter: <https://www.bmwi.de>, abgerufen am 03.04.2017)

Der Weg zur „grünen“ Versorgung mit regenerativen Energien ist im vollen Gange, was die Suche nach wirtschaftlicheren und platzsparenden Energiespeichern vorantreibt. Eine mögliche Lösung zur Energiewende bringt der Stülpmembranspeicher mit sich, welcher kostengünstiger, unauffälliger, sowie verlustärmer als andere Energiespeichersysteme ist.

Der Kerngedanke dieser Vorrichtung ist es einen beweglichen, eingefassten Kolben aus dem Boden freizuschneiden und gegenüber seiner Einfassung durch eine sogenannte Stülpmembran abzudichten. Diese Membran ist sowohl am Kolben, als auch an der Einfassung befestigt, wodurch dieser einen Fluid-/ Materieaustausch zwischen den abgetrennten Räumen verhindert.

Im Verlauf dieses Projektes wird diese Stülpmembran konzipiert, welche bestimmten Festigkeitsanforderungen und Belastungen standhalten soll. Ebenso wird der Aufbau und der Herstellungsprozess näher betrachtet.

Da dies noch ein wenig erforschtes Themengebiet ist, wird vorerst auf den aktuellen Stand der Technik eingegangen, um im Folgenden wichtige Forschungsfragen zu beantworten. Die Bedeutsamkeit der Thematik für den forschungswissenschaftlichen Fortschritt in der Energietechnik wird zum Ende der Arbeit anhand einer Zukunftsprognose aufgezeigt.

Folgende Forschungsfragen werden in dieser Arbeit beantwortet:
Wie ist der aktuelle Stand der Technik, bezüglich vorhandenen Konzepten?
Welche Materialien bieten den größten Widerstand gegen die Belastung und sind zugleich langlebig (Ausgleich zwischen Steifigkeit und Dehnbarkeit)?

Kann man Förderbänder zu einer Stülpmembran umfunktionieren, oder muss eine neue Materialkombination erfunden werden?

2. Stand der Technik

2.1 Materialauswahl und Befestigung

In diesem Abschnitt wird auf den aktuellen Stand der Technik eingegangen, welcher auf der Vorarbeit von Prof. Herrn Popp aufbaut. Dies beinhaltet mögliche Befestigungsarten, Materialien und Produktionsarten.

Die Aufgabe der Membran ist die hermetische Trennung des Fluides, in diesem Fall Wasser und der Führung des beweglichen Kolbens. Dabei muss diese den unterschiedlich großen Drücken standhalten, sowie eine hohe Reißfestigkeit, beziehungsweise gleichermaßen eine hohe Dehnfähigkeit haben.

Ausschlaggebend für den Langzeitbetrieb, bzw. eine hohe Lebensdauer ist eine hohe Zugfestigkeit. Zur Wahl der Materialien gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten: Einerseits eine Neuerung der Materialkombination aus stahl-/metall-/glas und/oder kohlefaserverstärktem, biegeelastischem Gummi, bzw. Kunststoff, andererseits bestehende Materialien aus der Förderbandindustrie zu verwenden, da diese kostengünstiger, beziehungsweise in der Serie herstellbar sind.

Ein weiterer Vorteil ist, dass die Materialien der Förderbänder eine hohe Zugfestigkeit in Längsrichtung, bei gleichzeitiger geringer Dehnung, bzw. ausreichender Dehnfähigkeit aufweisen. Dies ist wichtig um die Umlenkung/Verlagerung innerhalb des Spalts bei der Kolbenbewegung ohne Materialschäden zu überstehen.

Jedoch muss sich eine Befestigung der einzelnen Stülpmembranbänder konzipiert werden, da diese nur bis maximal 3,2 Meter Breite gefertigt werden.

Die Verbindung der Membranbänder kann mehrlagig, gegebenenfalls versetzt zu einander aufgebaut sein und muss möglichst in einem automatisierbaren Prozess durchgeführt werden. Weitere Bearbeitungsverfahren, wie z. B. die Optimierung der Membran bezüglich erforderlichen Oberflächeneigenschaften, zulässigen Biegeradien, Zugfestigkeitsanforderungen, Verklebungsmöglichkeiten, oder Ähnlichen, können ebenso stattfinden.

Die Membran weist mehrere Vorteile im Vergleich zu anderen Dichtsystemen, da unter anderem Lackströmungen ausgeschlossen werden können, die bei gleitenden Dichtsystemen unvermeidbar sind. Ebenso muss einerseits der Kolben und andererseits die Einfassung nicht bestimmten Oberflächenbeschaffenheiten vorweisen, um eine möglichst reibungsfreie Bewegung durchzuführen. Durch die Konzeption einer Stülpmembran für einen derartigen Speicher kann die Wirtschaftlichkeit deutlich gesteigert werden, wodurch die Energiewende wieder ein Stück näher rückt.

2.2 Herstellungsprozess

Um Kosten und Aufwand zu verringern, werden die Bänder vor Ort zusammengefügt und entsprechend angepasst. Dies erspart hohe Transportkosten und erweist sich als deutlich flexibler.

Die zweilagigen Membranbänder werden an der Kolbenseite (Hülle) sauber parallel ausgerichtet. Somit hängen diese an Kolbenseite herab und werden dementsprechend durch geeignete Vorrichtungen gesichert. Um den hohen Zugkräften standzuhalten müssen die Bänder mittig versetzt zu einander angebracht werden.

Es wird vorab ein mikrogekapselter Klebstoff auf die jeweilige Innenseite der Bänder aufgetragen, um sie anschließend unter Druck aufzuschließen. Da das Zusammenfügen im Ringspalt des Zylinders erfolgt, muss die Beschaffenheit des Klebstoffes möglichst einfach gestaltet sein, um die Arbeiten nicht unnötig zu verkomplizieren.

Damit der Wirkungsgrad des Speichers über lange Zeit konstant bleibt, muss der Klebstoff eine hohe Lebensdauer aufweisen. Daher wird ein Zweikomponenten-Klebsystem mit einer Komponente auf der unteren Lage und einer auf der oberen Lage verwendet.

Über ein bewegliches Anpresssystem wird der Klebstoff unter hohem Druck aufgeschlossen. Dieses System kann dabei an der gegenüberliegenden Zylinderwandverkleidung (der Einfassung) abgestützt werden und sukzessive in einem automatisierten Prozess alle Membranbänder miteinander verknüpfen.

Am Ende des Herstellungsprozesses wird der Teil der Membran, welcher sich oberhalb der Kolbenkante befindet, umgestülpt. Dazu werden Stahlbänder, die sich in einem Abstand von ca. 0,5 m befinden, am oberen Rand der Membran befestigt und anschließend über Zugbänder in Richtung der Verkleidung umgebogen.

Um das Vorhaben durchzuführen müssen Aufwickelvorrichtungen (Gewichtsspannvorrichtung) entlang der Einfassung des Zylindermantels angebracht werden. Um ein gleichmäßiges Aufwickeln gewährleisten zu können, werden lange biegeelastische Rohre entlang des Zylinders in einem Abstand von 0,5 m angebracht. Wenn die Stülpmembran in ihre finale Position umgestülpt wurde, wird diese wasserdicht und dauerbetriebssicher mit der Kolbenverkleidung verbunden. Somit ist eine hermetisch abgeschlossene untere Druckkammer entstanden.

Abschließend können die Montagmaterialien über den Druckstollen nach oben transportiert werden und die Herstellung der Membran ist beendet.

3. Stahlseilfördergurte

Bevorzugt werden Förderbänder mit integrierten Stahlseilen verwendet, welche vollständig die hohen Zugkräfte aufnehmen. Vorteile dieser Art von Förderband, sind eine hohe Festigkeit von $1000 \frac{N}{mm}$ bis zu $7500 \frac{N}{mm}$, ebenso wie eine sehr niedrige Bruchdehnung (ca. 2 %) im Betrieb, wodurch niedrige Spannwege entstehen. Ein weiterer positiver Aspekt ist die höchstmögliche Festigkeitsausnutzung im Verbindungsbereich, was vor allem beim Zusammenfügen der Bänder essentiell ist. Betrachtet man die Lebensdauer so kann mit 20 Jahren und mehr gerechnet werden, was das Ziel einer Langlebigkeit der Membran gewährleistet. Beim Wechsel der Membran können die alten Stahlseilförderbänder für den Boden von Pferdeställe weiterverwendet werden, da diese eine warme Unterlage für die Pferde bieten, sowie hufschonend, schlag- und rutschfest sind. Der Gurtaufbau und die Konstruktion soll in folgender Abbildung dargestellt werden.

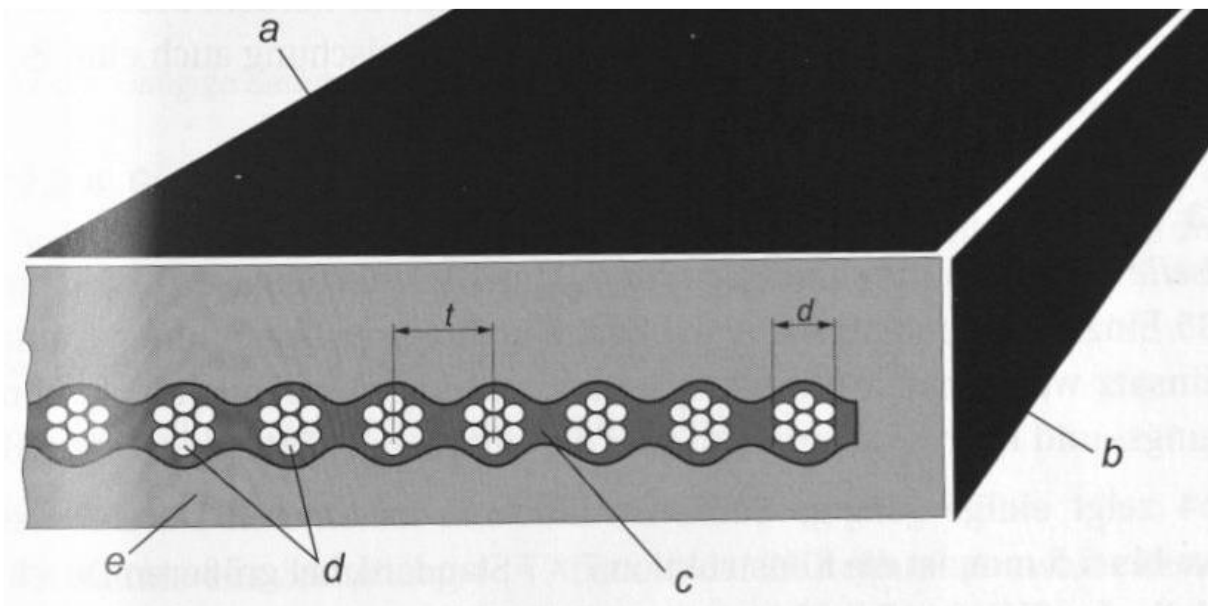


Abbildung 1: Vereinfachtes Stahlseilförderband mit a: obere Deckplatte, b: Kautschukkante, c: Haftmischung, d: verzinkten Stahldrähte, e: untere Deckplatte, \longleftrightarrow d: Stahlseildurchmesser, \longleftrightarrow t: Seilteilung
 (entnommen aus: Fritz Röthemeyer, Franz Sommer, Kautschuk Technologie, 2013, S. 1155)

Weitere Möglichkeiten die Festigkeit des Fördergurtes hinsichtlich der Quersteifigkeit zu verbessern wurden nicht berücksichtigt, da diese Ausführungsform als Membranband nicht verwendet werden kann.

Im Folgenden wird auf die einzelnen Bestandteile des Stahlseilfördergurtes eingegangen.

3.1 Deckplatte

Auf beiden Seiten des Bandes wird derselbe Werkstoff verwendet, da ähnliche Umgebungsbedingungen herrschen. Vorrangig ist hier die Witterungsbeständigkeit, sowie eine möglichst hohe Verschleißfestigkeit.

Für die *Polymerbasis* steht Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (NBR), aufgrund seiner guten Hitzebeständigkeit, bzw. SBR zur Verfügung. Des Weiteren werden die Verschleißigenschaften durch Ruße oder Silica optimiert.

3.2 Haftmischung

Die Zusammensetzung der Haftmischung ist so gewählt, dass die chemische Haftung zur verzinkten Seiloberfläche ohne Metallvorbehandlung erzeugt werden kann. Während der *Vulkanisation* muss eine homogene Verbindung (Verschweißung) zur außen anliegenden Deckplattenmischung ermöglicht werden. Um eine optimale Seildurchdringung zu gewährleisten, muss die Mischung im unvulkanisierten Zustand eine hohe Fließfähigkeit aufweisen. Ebenso muss das Vulkanisat neben hoher Strukturfestigkeit ein möglichst hohes Schubmodul bekunden. Am vulkanisierten Gurt wird unter Wärmezufuhr die Verbindung hergestellt, was mehrfach reproduziert werden kann, sodass von der Haftmischung auch eine Beständigkeit gegen thermische Beanspruchung gewährleistet wird.

3.3 Stahlseile

Da die Stahlseile, sogenannte Stahlcorde, ausschlaggebend für die Aufnahme der Zugbeanspruchung sind, müssen diese eine Dicke von min. 10 mm aufweisen. Sie bestehen aus 49-135 Einzeldrähten, wobei deren Durchmesser sogar unter 1 mm liegen können. Dadurch können Wechselbiegebeanspruchungen standgehalten werden. Um die Eigenschaften der Haftung, bzw. der Korrosion zu verbessern, werden die Drähte feuerverzinkt.

Ein weiterer Aspekt zur Prävention einer Ausbreitung der Korrosion ist der Einsatz von unterschiedlich großen Durchmessern der Drähte, was auch „offene“ Konstruktion genannt wird. Dadurch wird beim Fertigungsprozess das Eindringen der Haftmischung optimiert. Um das Produkt perfekt auf die Zielanforderung auszulegen, muss ein Kompromiss zwischen den Zielgrößen möglichst kleiner Seildurchmesser, möglichst hoher Bruchfestigkeit, möglichst offener Konstruktion, sowie Kosten gefunden werden. Um einen fehlerlosen Geradlauf im Gurt zu bekommen, liegen immer Seile unterschiedlicher Schlagrichtung nebeneinander, wobei man hier den S-Schlag (linksdrehend) und den Z-Schlag (rechtsdrehend) unterscheidet.

3.4 Gurtkonstruktion

Um die rechnerische Mindestbruchkraft zu verbessern, gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Viele eng nebeneinanderliegende Seile
2. Dickere, dafür aber wenige Seile

Hierfür muss das Verhältnis zwischen dem Seildurchmesser d und der Seilteilung t (entspricht dem Abstand der Mittelpunkte von zwei nebeneinanderliegenden Seilen) passend gewählt werden. Ferner sollte die Deckplattendicke mindestens $0,7 \times d$ betragen, was große Auswirkung auf die Gurtgeometrie hat. Somit bestimmt der Seildurchmesser den Kautschukbedarf und damit die Gesamtdicke des Gurtes und hat dadurch einen maßgeblichen Einfluss auf die Kosten des Endproduktes.

4. Klebstoff

4.1 Aufbau und Auswahlverfahren

Um die beiden Druckschichten hermetisch voneinander zu trennen muss eine geeignete Klebtechnik gefunden werden.

Nach der DIN 16902 ist der Klebstoff ein nicht metallischer Werkstoff, welcher bestimmte Körper durch Adhäsion (Oberflächenhaftung), sowie innere Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) verbindet, ohne dass eine wesentliche Gefügeänderung im Körper stattfindet.

Um den geeigneten Klebstoff für die Verbindung der einzelnen Membranbänder zu finden, muss ein Kleber mit hohen Festigkeiten, sowie einer langen Lebensdauer gewählt werden.

In Abbildung 3 ist eine grobe Unterteilung der Klebstoffarten aufgezeigt.

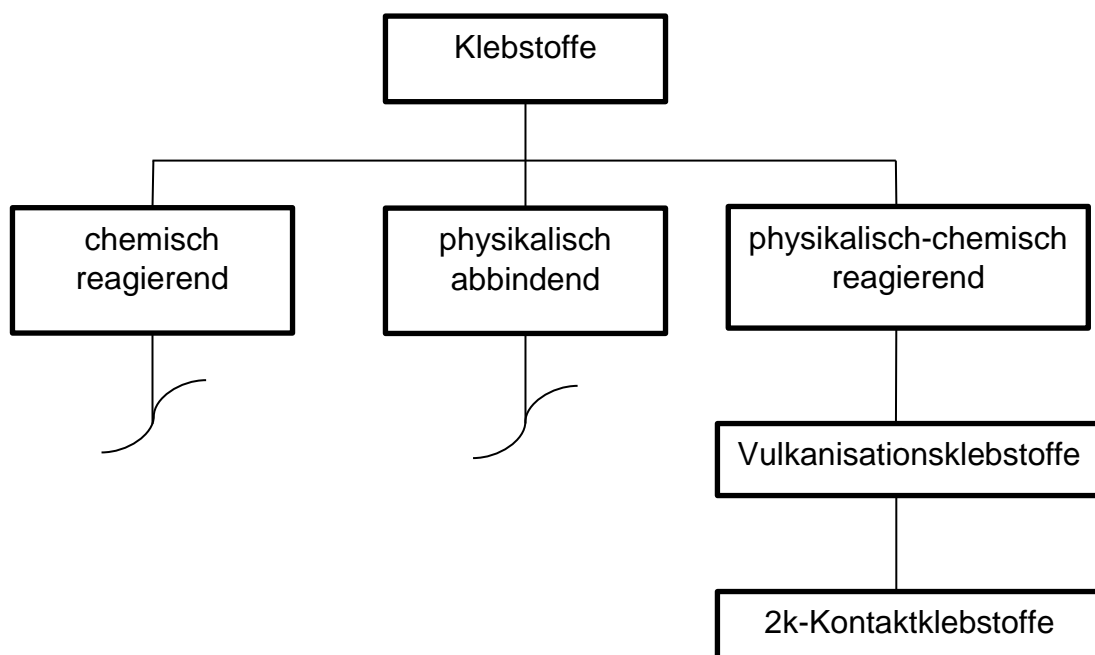


Abbildung 2: Unterteilung der Klebstoffarten nach ihrem Reaktionsmechanismus (Nur relevante Klebstoffgruppe hier ausführlich dargestellt), abgeleitet von Klaus-Gerhard Scholz – Elastomere in Tribologischen Systemen

Die für diesen Fall in Frage kommenden Klebstoffe sind die physikalisch-chemisch reagierenden.

Daher stehen die Vulkanisationsklebstoffe und der 2 Komponenten-Kontaktklebstoffe (2k-Klebstoff) zur Auswahl. Folgende Tabelle liefert den Vergleich.

Tabelle 1: Relevante Auswahlkriterien zur Beurteilung der optimalen Klebvariante

Legende: ++++++ = Note 1, +++++ = Note 2, +++++ = Note 3, +++ = Note 4, ++ = Note 5, + = Note 6

Bewertungsmatrix Klebverfahren		
Bewertungskriterien	2k-Kleben	Vulkanisieren
Festigkeiten	++++++	++++++
Betriebsfestigkeit	+++++	++++++
Widerstand gegen Umgebungsbedingungen	++++	+++++
Fertigungszeit	+++	++++
Große Flächen	+++++	+++
Wertigkeit bei Störung	++++++	++++
Wertigkeit bei Reparatur	++++++	++++
Umweltverträglichkeit	+++++	+++++
Energieverbrauch	++++++	+++

Wie sich erkennen lässt, ist die optimale Klebevariante der 2-Komponenten-Kontaktklebstoff.

4.2 2-Komponenten-Kontaktklebstoff (2k-Klebstoff)

Der *Kontaktklebstoff* ist mit Abstand der leistungsfähigste Klebstoff, wenn es um die Verbindung von Elastomeren mit Metallen, Geweben, Kunststoffen, etc. gibt. Dieser arbeitet auf Basis kristallisationsfähiger Polychloropren-Kautschuke, welche vom Ablauf der Klebschichtverfestigung und dem Aufbau der Bindungskräfte zwischen Klebstoff und Körper in [45] näher beschrieben wird. Um die Klebstoffschichten miteinander (fest) zu verknüpfen ist unter anderem ein Kontaktdruck nötig, damit die Makromoleküle (Kristallisation) und die kohäsive Verfestigung der aufgetragenen Klebschicht beginnen kann. Um die Chance eines Bruchs zwischen den Phasen zu minimieren, müssen die Materialien sauber präpariert sein, sodass der reaktionsfähige Klebstoff seine volle Leistung ausbreiten kann.

Da der Vorgang des chemisch-physikalischen Aufbaus der Bindungskräfte den Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit sprengen würde, wird hier nicht weiter darauf eingegangen. Fachliteratur hierzu ist in [1] in Kapitel 8 zu finden. Aufgrund des benötigten Fachwissens in der Fügetechnik mit Klebstoffen ist ein Fachmann hinzuzuziehen. Dieser überwacht den Vorgang damit die Kontaktklebezeit (Zeitpunkt des Fügens) präzise eingehalten wird, damit es nicht zu einer sogenannten „Übertrocknung“ kommt. Um den Vorgang zu vereinfachen wird eine weitere Komponente als *Härter* verwendet. Diese verzögern die Kristallisationszeit und optimieren somit die Kohäsions- und Adhäsionsfestigkeit.

Da große Kontaktflächen nötig sind, steigt auch die Kontaktklebezeit, wodurch der Vorgang der Diffusion der Makromoleküle optimiert wird. Eine wichtige Kenngröße ist hier die *Anfangsfestigkeit*.

5. Theoretische Berechnungen

Die theoretische Auslegung der Membran erfolgt auf Basis folgender Daten des Stülpmembranspeichers: $D_z = 130 \text{ m}$, $D_k = 126 \text{ m}$, $Z_h = 430 \text{ m}$, $b_s = 2 \text{ m}$.

Es wird vorab auf die Berechnung der Spannungen in den Stahlseilen, sowie deren Bruchkraft, und auf die Festigkeit der Klebeverbindung eingegangen. Im Anschluss werden verschiedene Hersteller der Stahlseilförderbänder und Klebstoffhersteller verglichen, um diese dann anschließend mit den Belastungsanforderungen im Spalt zu vergleichen. Berechnungen wurden mithilfe der angehängten Excel Tabellen, siehe Anhang, durchgeführt, welche auf der Vorarbeit von Prof. Popp aufbauen. Es wurde mit gerundeten Werten gerechnet.

5.1 Berechnung der Spannung in der Membran, sowie die Dimensionierung

Um die Druckdifferenz der beiden Schichten zu ermitteln, muss zuerst die Fläche berechnet werden, auf die der Kolben seine Abtriebskraft ausübt.

Kolbenkraftwirkungsfläche (A_{kkw}):

$$A_{kkw} = \frac{\pi}{4} * D_z^2 = \frac{\pi}{4} * (130 \text{ m})^2 = 13273 \text{ m}^2$$

Druckdifferenz an der Membran (P_{DM}):

$$P_{dm} = \frac{F_{ab}}{A_{kkw}} = \frac{47155 * 10^6 \text{ N}}{13273 \text{ m}^2} = 3552700,97 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 3,55 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} = 3,55 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 35,50 \text{ bar}$$

mit Kolbenabtriebskraft (F_{ab}) = 47155 MN

$$F_{ab} = (\rho_{boden} - 1) * V_k * g = \frac{(2,5 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} - 1) * 3204528 \text{ m}^3 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{1000} = 47154,63 \text{ MN}$$

Um auf die Mindestdicke der Membran zu schließen, wird über die Druckdifferenz an der Membran die längenspezifische Zugkraft (F_{Lz}) berechnet:

$$F_{Lz} = P_{dm} * \frac{b_s}{2} = 3,55 \frac{MN}{m^2} * \frac{2 m}{2} = 3,55 \frac{MN}{m}$$

Nun ist die zulässige Zugspannung in der Membran (σ_{zulM}) festzulegen.

$$\sigma_{zulM} = 10 \frac{N}{mm^2}$$

Daraus resultiert die erforderliche Membrandicke (h_{erf}), zu der noch ein 3,0 mm dicker Abriebszuschlag (ARZ) addiert wird.

$$h_{erf} = \frac{F_{Lz}}{\sigma_{zulM}} = \frac{3,55 * 1000 \frac{N}{mm}}{10 \frac{N}{mm^2}} = 355 mm$$

Somit beträgt die Membrandicke (h_M):

$$h_M = h_{erf} + ARZ = 355 mm + 3,0 mm = 358 mm$$

Mit einer Länge der Membranbänder von $l_M = 118,6 m$ ergibt sich ein Volumen von $V_M = 16873 m^3$.

Mit der Annahme, dass der Zugkraft aufnehmende Gewebeanteil in der Membran bei ca. 50 % liegt (Stahlgewebeanteil liegt bei ca. 50 %), lässt sich auf die Zugspannung in den Stahlseilen (σ_s) schließen.

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{zulM}}{50\%} = \frac{10 \frac{N}{mm^2}}{0,5} = 20 \frac{N}{mm^2}$$

5.2 Berechnung der Mindestbruchkraft (F_{bmin}) und Festigkeitsnachweis

Da die Stahlseileinlagen die komplette Zugkraft in der Membran aufnehmen, muss die Mindestbruchkraft berechnet werden. Dies ist nur eine annähernde Berechnung da mehrere Faktoren wie der Verseilfaktor (k), der Füllfaktor (f), welcher sich wiederum aus einem weiteren Faktor zusammensetzt, einen Einfluss auf die Bruchkraft ausübt. Es wird mit einem angenommenen Drahtseildurchmesser von $d = 10 \text{ mm}$, einer Festigkeit (R_m) von $1770 \frac{N}{mm^2}$, ca. 150 Stahlseilen (n_s) in einem Stahlseilförderband der Breite (b_F) 2,5 m und einer Seilkonstruktion von 6x19 WC gerechnet:

$$F_{bmin} = \frac{f * R_m * k * d^2 * \pi}{4} = \frac{0,5322 * 1770 \frac{N}{mm^2} * 0,84 * (10mm)^2 * \pi}{4} = 62146,6 \text{ N}$$

$$\approx 62147 \text{ N}$$

$$f = \frac{A}{A_u} = \frac{C * d^2}{\frac{\pi}{4} * d^2} = \frac{0,418 * 10^2}{\frac{\pi}{4} * 10^2} = 0,5322$$

mit A = metallischer Nennquerschnitt aller Drähte im Seil (Annahme)

A_u = Fläche des Stahlseilkreises

$C \approx 0,418 \leftarrow$ Annahme

$k \approx 0,84 \leftarrow$ Annahme

$$F_{bges} = F_{bmin} * n_s = 62147 \text{ N} * 150 = 9,32 \text{ MN}$$

mit n_s = Anzahl der Stahlseile pro Förderband (Annahme)

Um eine Festigkeitsberechnung durchzuführen muss die Kraft (F_{bges}) auf die Wirkfläche (A_{ws}) im Spalt bezogen werden um so die Spannung (σ_{Fw}) zu bekommen.

$$A_{ws} = b_s * b_F = 2 \text{ m} * 2,5 \text{ m} = 5 \text{ m}^2$$

$$\sigma_{Fw} = \frac{F_{bges}}{A_{ws}} = \frac{9,32 \text{ MN}}{5 \text{ m}^2} = 1,86 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} = 1,86 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Nun kann die längenspezifische Zugkraft des Förderbandes (F_{LZF}) berechnet werden und wir können die Anforderungen des Förderbandes den Anforderungen des Speichers gegenüberstellen.

Mit einer zweilagigen „Förderbandmembran“ ergibt sich folgende F_{LZF} :

$$F_{LZF} = 2 * \sigma_{FW} * \frac{b_S}{2} = 2 * 1,86 \frac{MN}{m^2} * \frac{2m}{2} = 3,72 \frac{MN}{m}$$

Der Vergleich mit den Anforderungen an die Membran zeigt, dass die 150 Stahlseile in dem 2,5 m breitem Förderband (b_F) der Kraft $F_{LZ} = 3,55 \frac{MN}{m}$ standhält. Um einen höheren Sicherheitsfaktor zu erlangen kann die Anzahl der Stahlseile, sowie der Durchmesser der Stahlseile variiert werden. Ebenso gibt es auf dem Markt Modelle mit Stahlseilen, welche eine Festigkeit von bis zu $3000 \frac{N}{mm^2}$ aufweisen.

5.3 Berechnung der Klebstofffestigkeit

Zuletzt werden die Klebeverbindungen der einzelnen Membranbänder überprüft. Die Beanspruchungsart ist nur die Zugscherbeanspruchung.

Festigkeitsnachweis auf Zugbeanspruchung in der Klebefläche (A_K):

$$\frac{\tau_{KB}}{S} \geq \tau_K = \frac{F_Z}{A_K} = \frac{8,88 MN}{5m^2} = 1,78 \frac{MN}{m^2} = 1,78 \frac{N}{mm^2}$$

mit $F_Z = F_{LZ} * b_F = 3,55 \frac{MN}{m} * 2,5m = 8,88 MN$ $A_K = b_F * b_S = 2,5m * 2m = 5 m$

$$\sigma_{kb} \geq 2 * 1,78 \frac{N}{mm^2} = 3,56 \frac{N}{mm^2}$$

Somit muss der Kleber aufgrund der gewählten Sicherheit von 2 eine größere Zugspannung als $3,56 \frac{N}{mm^2}$ aushalten.

Daher kommt dem Klebstoff hauptsächlich die Aufgabe der Dichtigkeit der Membran zu gewährleisten.

5.4 Berechnung der Förderbandanzahl

Die Stülpmembran hat eine Länge von 118,6 m, was aus der Tabelle 4 im Anhang ersichtlich wird. Somit beträgt die Fläche eines Förderbandes 296,5 m² unter der Annahme, dass die Förderbänder 2,5 m breit sind. Dies ergibt sich ausfolgender Rechnung:

$$A_M = \frac{\pi}{4} * ((D_K + l_M)^2 - D_K^2) = \frac{\pi}{4} * ((126 \text{ m} + 118,6 \text{ m})^2 - (126 \text{ m})^2) = 34520,7 \text{ m}^2$$

mit A_M = Fläche der entfalteten Membran

Um nun auf die Anzahl der benötigten Förderbänder zu ermitteln, wird die Fläche eines Bandes (A_{einzel}) berechnet, und anschließend ein Flächenverhältnis gebildet.

$$A_{\text{einzel}} = b_{\text{einzel}} * l_M = 2,5 \text{ m} * 118,6 \text{ m} = 296,5 \text{ m}^2$$

mit b_{einzel} = Breite eines Bandes.

$$n_{FB} = 2 * \left(\frac{A_M}{A_{\text{einzel}}} \right) = \frac{34520,7 \text{ m}^2}{296,5 \text{ m}^2} * 2 = 232,85 \approx 233$$

mit n_{FB} = Anzahl an benötigten Förderbänder bei einer Förderbandbreite von 2,5 m.

6. Vergleich der Hersteller

6.1 Vergleich von Stahlseilfördergurtunternehmen

Es gibt eine Vielzahl von Herstellern, die diverse Stahlseilförderbänder produzieren, jedoch sind nicht alle zur Nutzung bei derart hohen Zugkräften geeignet. Im Folgenden ist eine Bewertungsmatrix aufgebaut.

Tabelle 2: Vergleich verschiedener Förderbandunternehmen hinsichtlich der wichtigsten Merkmale

Stahlseilfördergurthersteller:	germanBelt®	Continental Stahlcord®	Ambelt®
Typ	ST 6300	ST 7100 V	St 5400
Mindestbruchkraft [N/mm]	6300	7100	5400
Preis [€/Stk]			
Seildurchmesser [mm]	12,8	13,1	11,3
Seilteilung [mm]	20	19	17
Deckplattendicke [mm]	8,5	10	8
Bandbreite [mm]	2400	1200	3200
Stahlseilanzahl	116		184
Seilkonstruktion	7x7, 7x19		

Es wurden alle Fördergurte hinsichtlich der Zugfestigkeit überprüft. Der wirtschaftlichste Hersteller ist der Typ ST 6300 von germanBelt® da dieser mit dem Preis-Leistungs-Verhältnis überzeugt. Datenblätter befinden sich im Anhang. Da dieses Förderband einer längenspezifischen Zugkraft von $6,3 \frac{MN}{m}$ standhält und man dadurch einen Sicherheitsfaktor von knapp zwei bekommen. Somit werden auch nur 122 Stahlseilförderbänder benötigt um den Kräften im Spalt gegen zu wirken. Um aus den Bändern eine Membran zu konstruieren, werden noch weitere Förderbänder benötigt, welche jedoch keine Zugkräfte mehr aufnehmen müssen, sondern nur die Funktion Dichtigkeit gewährleisten müssen. Somit können günstigere Kautschukförderbänder herangezogen werden, wodurch der Gesamtpreis sinkt.

6.2 Vergleich von Klebstoffunternehmen

Als letztes sind diverse Klebstofffabrikate in folgender Bewertungsmatrix aufgelistet.

Tabelle 3: Vergleich verschiedener Klebstoffhersteller hinsichtlich der wichtigsten Merkmale

Klebstoffhersteller:	REMA TIP TOP®	REMA TIP TOP®	BESTklebstoffe®	BESTklebstoffe®
Typ	CEMENT MC 2000	CEMENT SC 4000	BEST-MA 1044	Quickmix 1104
Festigkeiten [N/mm ²]			9	7
Topfzeit [h]	2	2	0,03	0,3
Belastbar ab [h]	12	ca. 1	24	48
spez. Gewicht [g/cm ³]	1,6	0,96	Mischung: 0,99	Mischung: 1,15
Polymerbasis	CR	CR	Methacrylatesters	Epoxidharz
Viskosität [mPas]			58000	44500
Härte			78 Shore D	
Preis [€/kg]			68,55	75,00
Eigenschaften	Hohe dyn. Belastbarkeit Hochfeste Verbindung gute Beständigkeit gegen Wasser exzellente Haftfestigkeiten	Hohe dyn. Belastbarkeit Hochfeste Verbindung gute Beständigkeit gegen Wasser exzellente Haftfestigkeiten	Hochfeste Verbindung hoher Viskosität gute Beständigkeit gegen Wasser	Hohe dyn. Belastbarkeit Hochleistungsklebstoff gute Beständigkeit gegen Wasser schlagzäh

Da es schwierig ist an die vollständigen Datensätze hinsichtlich der Festigkeit oder der Härte zu ermitteln, werden die fehlenden Werte direkt bei den Unternehmen erfragt. Datenblätter zu den angegebenen Produkten sind im Anhang aufgeführt.

Da nur Daten von dem Hersteller des BEST-MA 1044 bereitgestellt wurden und dieser mit einer Festigkeit von $9 \frac{N}{mm^2}$ weit aus über der der Mindestfestigkeit von $3,56 \frac{N}{mm^2}$ liegt, kann dieser zum Verkleben der Förderbänder angewandt werden.

7. Begriffserklärungen

Mechanische Adhäsion: mechanische Verankerung des Klebstoffs in Oberflächenporen

Spezifische Adhäsion: Zwischenmolekulare oder chemische Bindungskräfte

Gewichtsspannvorrichtung: Die Spanntrommel wird durch das Spannseil, an welchem die Spanngewichte hängen, gespannt

Stahlcorde: Drahtseil, welches aus einem verzinkten Stahldraht besteht. Dadurch können sehr hohe Festigkeiten von über $2500 \frac{N}{mm^2}$ übertragen werden

Stahlseilkonstruktionen: verschiedenartige Kombination der Stahldrähte, in diesem Fall 7x19:

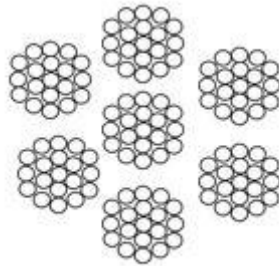


Abbildung 3: 7x19 Stahlseilkonstruktion

Kontaktklebstoff: Dieser wird beidseitig auf die zu fügenden Flächen aufgetragen und anschließend in einer sogenannten Kontaktklezeit unter starkem Druck zusammengefügt

Vulkanisation: Umwandlung von Kautschuk in Gummi, Erfinder: Thomas Hancock 184

Härter: Zusatzstoff der bei starken Anforderungen an Wasser- oder Wärmefestigkeit benutzt wird

6x19: 6 Drahtseile mit je 19 Einzeldrähten

WC: Stahleinlage, eine weitere Variante ist zum Beispiel WSC (Drahtlitzeneinlage)

8. Literaturnachweis

Thomas Ziller und Peter Hartlieb-Wallthor– Fördergurte in der Praxis, Know How und Know Why; Fördergurt Herstellung, Montage und Verbindungstechnik, Inspektion, Wartung und Instandsetzung, Maschinen, Hilfs- und Prüfmittel, Wirtschaftlichkeit und Kostenkontrolle, Ressourcenschonung und Umweltschutz, Arbeitsschutz und Unfallverhütung, 2. Auflage, VGE Verlag GmbH, 2010

Rudolf Griemert, Peter Römisch – Fördertechnik, Auswahl und Berechnung von Elementen und Baugruppen, 11. Auflage, Springer Vieweg-Verlag Wiesbaden 2014

Fritz Röthemeyer Franz Sommer – Kautschuk Technologie, Werkstoffe, Verarbeitung, Produkte, 3. Auflage Carl Hanser Verlag München 2013

Klaus-Gerhard Scholz und 5 Mitautoren – Elastomere in Tribologischen Systemen, Der Leitfaden für den Einsatz von Elastomeren im industriellen Verschleißschutz, expert Verlag 2011

DIN 16920: Klebstoffe, Klebstoffverarbeitung, Begriffe, Beuth Verlag Berlin und Köln, Ausgabe Juni 1982

[1] G. Habenicht: Kleben – Grundlagen, Technologie, Anwendungen, 4. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003

Aufgerufen am 12.06.2017

<http://www.foerdergurtservice-gross.de/reiterhof.php>

© Fördergurt-Service Gebrüder Groß GmbH - Fachbetrieb für Fördergurte

Herbert Wittel, Dieter Muhs, Dieter Jannasch, Joachim Voßiek, Roloff/Matek, Maschinenelemente, Normung Berechnung Gestaltung, 21. Auflage, Springer-Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2013

Fritz Röthemeyer & Franz Sommer – Kautschuktechnologie: Werkstoffe, Verarbeitung, Produkte. Carl Hanser Verlag, München 2006

Aufgerufen am 13.06.2017

http://www.ramb.net/tl_files/contentelemente/downloads/Seile_Katalog_Kapitel1.pdf,
2015

Aufgerufen am 18.06.2017

<http://www.vornbaeumen.de/de/service/technische-anmerkungen/berechnungsgroessen.html>, 2017

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt, nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, alle benutzten Quellen und Hilfsmittel angegeben, sowie wörtliche und sinngemäße Zitate gekennzeichnet habe.

Ort, Datum

Markus Lohr

Anhang

Tabelle 4: Wichtigste Abmessungen des Stülpmembranspeichers zur Stromversorgung eines Forchheimer Stadtteils mit ca. 14000 Einwohnern für 10 Tage

Abmessungen Stülpmembran		Einheit	Erklärung
DK	126,0	m	Kolbendurchmesser
ZH	430,0	m	Zylinderhöhe
zKH	215,0	m	zylindrische Kolbenhöhe
ZH/zKH	2,0		Verhältnis
Bs	2,0	m	Spaltbreite
KWS	0,5	m	Kolbenwandstärke
ZWS	0,5	m	Zylinderwandstärke
MBB	4	m	Membranbefestigungsbreite
MD	0,83	m	Membrandicke
VK	3.204.528	m ³	Kolbenvolumen
VW	3.398.680	m ³	Wasservolumen
ΔT	20	°C	Temperaturspiel
Fab	47.155	MN	Kolbenabtriebskraft
Kap	10.138	GJ	Speicherkapazität
	2.816,2	MWh	
	2,8	GWh	
KHW	215,0	m	Kolbenhubweg
MBH	-161,2	m	Membranbefestigungshöhe
DZ	130,0	m	Zylinderdurchmesser

Tabelle 5: Stülpmembranspeicherberechnung

Stromspeicherberechnung	Einheit	
Reichweitenforderung	10	Tage
Durchschnittsverbrauch	750	W/Kopf
Kapazitätsbedarf	180	kWh/Kopf
Stromspeicher für	15.645	Einwohner
el. Nennleistungsfaktor	2	
Pmittel	11,73	MW
Pnenn	23,47	MW

Tabelle 6: spezifische Stülpmembranauslegung

Abkürzungen:		Einheit	Name	Formel	Erklärung
Akkw	13.273	m ²	Kolbenkraftwirkungsfläche		
Pdm	3,55	MN/m²	Druckdifferenz/ Spannung an der Membran		
	35,53	bar			
Flz	3,55	MN/m	längenspezifische Zugkraft in der Membran		
σ_{zulM}	10	N/mm ²	zulässige Zugspannung in der Membran		
herf	355,26	mm	erforderliche Membrandicke		
ARZ	3,00	mm	Abriebszuschlag		
hM	358,26	mm	Stülpmembrandicke		
SMU	397,0	m	Stülpmembranumfang	$SMU = (DK + SMD) \cdot \pi$	Die Stülpmembran umschließt dabei die Betonschale um Kolben
KHW	215,0	m	Kolbenhubweg	$KHW = ZH - zKH$	Aus der Konstruktion resultierender maximaler Kolbenhubweg zwischen unterem und oberem Totpunkt
SMH	118,6	m	Stülpmembranhöhe	$SMH = KHW/2 + 2 \cdot MBB + Bs \cdot \pi/2$	halber Kolbenhubweg, Membranbefestigungsbreite am Kolben und an der Außenschale und Halbtorus der Umstülpung

Tabelle 6: spezifische Stülpmembranauslegung

Abkürzungen:		Einheit	Name	Formel	Erklärung
VM	16.873	m ³	Stülpmembranvolumen	VM=SMU*SMH*SMD	
MSGa	50%		Stahlgewebeanteil	konstruktive Annahme	Gewebeaufbau und Material der Stülpmembran erfordert Forschung und Entwicklung
MZGA	50%		Zugkraft aufnehmender Gewebeanteil	Annahme	
σ_S	20	N/mm ²	Zugspannung im Stahlgewebe der Membran		von den tragenden Gewebeanteilen aufzunehmende Spannung
ρ_{St}	8	t/m ³	Dichte von Edelstahl	Annahme	
ρ_{Gu}	1	t/m ³	Dichte von Gummi	Annahme	
ρ_{Mem}	4,5	t/m ³	Dichte des Membranaufbaus	$\rho_{Mem} = \rho_{St} * MSGa + \rho_{Gu} * (1 - MSGa)$	Dichte, die sich über die angenommene Mischung von Stahlgewebe und Gummi ergäbe
mMem	75.926	t	Masse der Membran	mMem=SMV* ρ_{Mem}	