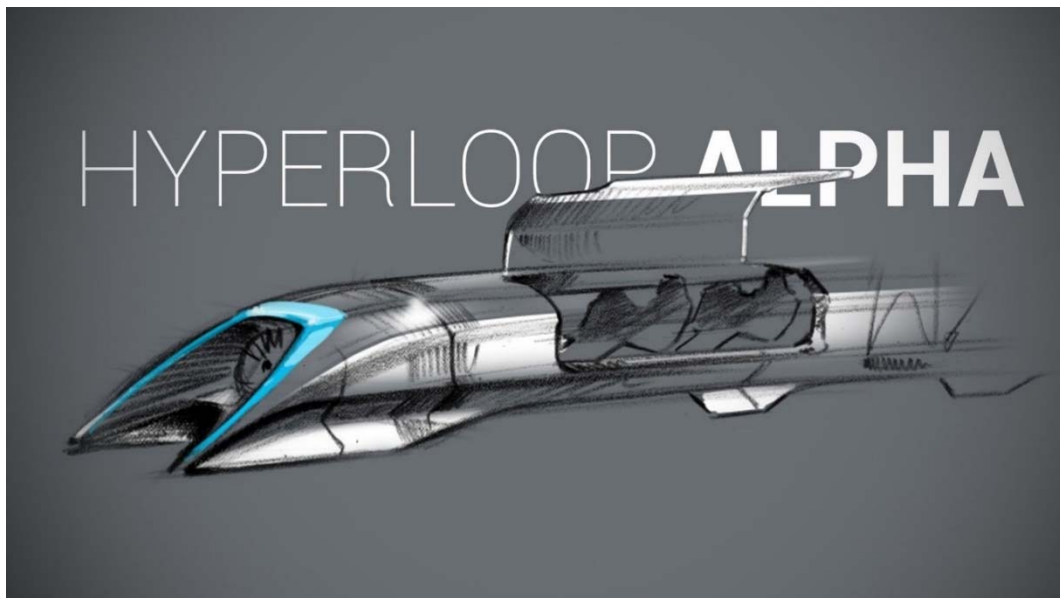




Analyse von Strukturkonzepten für das Transportsystem Hyperloop

Semesterarbeit



Verfasser: Maximilian Springer
Matrikelnummer: 03634130
Ausgabedatum:
Abgabedatum:
Betreuer: Dipl.-Ing. Joachim Sturm

Abstract

The present thesis discusses structure concepts for the proposed transportation system “Hyperloop” which allows people to travel 500 km in less than 30 minutes.

The thesis has two main objectives. In the first part the concept of the Hyperloop is described and the critical subsystems are explained as published in the alpha study by Elon Musk. The two central Versions of the Hyperloop called “People Version” and “Vehicle Plus Version” are displayed including their similarities and differences. The risks and challenges for the safety of the system are explained and state of the art solutions for the specific problem are provided. By using the information gained out of the alpha study specific requirements for a Hyperloop vehicle are brought up with a special interest in the structural design.

Furthermore possible materials for the structural design are displayed and based on the requirements the fatigue design of a pressurized cabin is shown. The reader is guided through the calculation for the relevant materials. With the help of the calculation the mass of the structure for a “test body” and the costs for a prototype structure are determined.

To create an overview of the construction methods used in the automotive and aviation industry several methods are explained, showing their advantages and disadvantages.

Taking these information and requirements into account, a final concept for a possible Hyperloop structure is derived.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Semesterarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Garching, 16. August 2016

Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
F_G	[-]	Größeneinflussfaktor
F_L	[N]	Luftwiderstandskraft
F_O	[-]	Oberflächenfaktor
F_R	[N]	Radwiderstandskraft
F_W	[N]	Fahrwiderstandskraft
F_a	[N]	Beschleunigungswiderstandskraft
F_{st}	[N]	Steigungswiderstandskraft
N_D	[-]	Grenzlastspiel
N_i	[-]	Lastspielzahl
P_F	[W]	Fahrleistung
R_m	$[\frac{N}{m^2}]$	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	$[\frac{N}{m^2}]$	Dehngrenze
S_{Berst}	[-]	Sicherheit gegen bersten
S_{Dehn}	[-]	Sicherheit gegen dehnen
a	$[\frac{m}{s^2}]$	Beschleunigung
c_w	[-]	Widerstandsbeiwert
d_m	[m]	Mittlerer Durchmesser
f_r	[-]	Rollwiderstandsbeiwert
g	$[\frac{m}{s^2}]$	Erdbeschleunigung
m_F	[kg]	Masse Fahrzeug
s_b	[m]	Bremsweg
t	[s]	Zeit
ε	[%]	Dehnung
λ	[-]	Drehmassenzuschlagsfaktor
ρ_L	$[\frac{kg}{m^3}]$	Dichte Luft
σ_1	$[\frac{N}{m^2}]$	Hauptspannung

σ_D	$[\frac{N}{m^2}]$	Dauerfestigkeitswert
σ_{ai}	$[\frac{N}{m^2}]$	i-te Spannung
σ_o	$[\frac{N}{m^2}]$	Oberspannung
σ_u	$[\frac{N}{m^2}]$	Unterspannung
σ_v	$[\frac{N}{m^2}]$	Kesselspannung
A	$[m^2]$	Fläche
E	$[\frac{N}{m^2}]$	E-Modul
k	$[-]$	Exponent mit $k = \tan \alpha$
p	$[\frac{N}{m^2}]$	Druck im Kessel
s	$[m]$	Blechdicke des Kessels
v	$[\frac{m}{s}]$	Geschwindigkeit
α	$[^\circ]$	Steigungswinkel der Fahrbahn

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung

CFK

GFK

LCC

TSA

VR

Erklärung

Carbonfaser verstärkter Kunststoff

Glasfaser verstärkter Kunststoff

Lehrstuhl für Carbon Composites

Transportation Security Administration

Virtual Reality

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Aufgabenstellung	2
3	Hyperloop allgemein.....	3
3.1	Fahrzeugkonzept (Kapsel).....	3
3.1.1	Personen Version	6
3.1.2	Cargo Version.....	7
3.2	Streckenkonzept.....	7
3.2.1	Streckenverlauf.....	7
3.2.2	Röhre.....	10
3.2.3	Sicherheit.....	12
4	Anforderungen an den Hyperloop.....	14
4.1	Allgemeine Anforderungen	14
4.2	Anforderungen an die Struktur	18
4.2.1	Gewicht.....	18
4.2.2	Stückzahl	19
4.2.3	Lastwechsel.....	19
4.2.4	Struktursteifigkeit und Eigenfrequenzen	23
4.2.5	Ökologische Anforderungen an die Struktur	26
4.2.6	Herstellungsverfahren.....	26
4.2.7	Vakuumtauglichkeit.....	26
4.3	Zusammenfassung der Strukturanforderungen.....	27
5	Strukturkonzepte	29
5.1	Werkstoffe.....	29
5.1.1	Stahl	29
5.1.2	Aluminiumlegierungen	33
5.1.3	Magnesiumlegierungen	37
5.1.4	Kunststoffe.....	38
5.1.5	Faserverstärkte Kunststoffe.....	40

5.2	Strukturbauweisen	44
5.2.1	Schalenbauweise	44
5.2.2	Hybridbauweise	46
5.2.3	Multimaterialbauweise	46
5.2.4	Space-frame und Gitterrohrrahmen	47
5.2.5	Monocoque	49
6	Hyperloop Struktur Konzept	50
6.1	Auswahl von Werkstoff und Bauart	50
6.2	Analyse des ausgewählten Strukturkonzepts	52
7	Zusammenfassung und Ausblick	55
	Abbildungsverzeichnis	i
	Tabellenverzeichnis	iii
	Literaturverzeichnis	iv
	Anhang	vii

1 Einleitung

In Deutschland wurden bereits in den frühen 1920er Jahren das Verkehrsnetz und insbesondere das Autobahnnetz angelegt und stetig weiter ausgebaut [1]. Trotz dieser kontinuierlichen Weiterentwicklung des Straßennetzes kommt es vermehrt zu einer Überlastung der Verkehrswege und damit zu Staus und Blockaden. Vor allem bei langen Strecken strapaziert dies den Fahrer und stellt zusätzlich eine große Umweltbelastung durch Emissionen dar.

Alternativ zum Auto ist es möglich, mit dem Flugzeug oder Zug zu reisen, um Zeit einzusparen. Gerade bei Kurzstrecken bis zu 1500 km stellt sich die Frage, ob das Fliegen tatsächlich eine Zeitersparnis darstellt. Durch Sicherheitskontrollen und andere Vorschriften verliert man sehr viel Zeit am Flughafen, die während des Fluges nicht mehr eingeholt werden kann. Problem beim Zug ist, dass er durch viele Zwischenhaltestellen auch in kleineren Ortschaften Zeit verliert und dadurch nur bedingt schneller als das Auto ist. Abbildung 1.1 zeigt die Problematiken des Fernverkehrs auf Straßen und Flughäfen.

Das von Elon Musk 2013 veröffentlichte Projekt Hyperloop, welches mit einem Hochgeschwindigkeitszug in einer Röhre mit verringertem Umgebungsdruck arbeitet, stellt hierfür eine mögliche Lösung dar und wird in dieser Semesterarbeit näher beschrieben.



Abbildung 1.1: Zusammenstellung aus Stau auf Autobahnen und Warteschlangen am Flughafen.

2 Aufgabenstellung

Zur Emissionsreduktion und Steigerung der Wirtschaftlichkeit im Transportwesen werden immer effizientere Fortbewegungsmittel gefordert. Dies zwingt Entwickler von Flugzeugen und Fahrzeugen zu immer besseren Innovationen im Bereich der Gewichtsreduzierung bei gleichzeitig konstanter oder verbesserter Festigkeit und Belastbarkeit der Strukturkomponenten. Hochfeste Stähle, neue Aluminiumlegierungen und faserverstärkte Kunststoffe sind die heute gängigsten Vertreter hoch belasteter Strukturbauteile.

Auch in einem neuen Fortbewegungsmittel wie dem Hyperloop wird zur Verbindung der Komponenten eine tragende Struktur benötigt. In dieser Semesterarbeit sollen nach eingehender Beschreibung des Systems Hyperloop die Anforderungen an die Struktur herausgearbeitet und ein passendes Strukturkonzept erarbeitet werden.

Dabei wird wie folgt vorgegangen:

- Vorstellung des Konzept Hyperloop
- Definition von Anforderungen
- Beschreibung und Evaluation verschiedener Strukturkonzepte
- Analyse und Auswahl eines Konzeptes
- Zusammenfassung der Ergebnisse

Ziel dieser Arbeit ist es, den Leser über die neueste Technologie im Transportwesen, den Hyperloop, zu informieren und dessen Chancen aufzuzeigen. Neben der Beschreibung des Gesamtkonzeptes ist die Auswahl einer geeigneten Struktur für dieses Transportsystem ein weiteres Ziel.

3 Hyperloop allgemein

Im folgenden Kapitel wird zunächst die allgemeine Funktionsweise des Konzepts erklärt und das Vorhaben genauer beschrieben. Die Informationen sowie Bilder beziehen sich - sofern nicht anders angegeben - auf die angesprochene Alpha Studie [2].

Hyperloop stellt eine neue Art von Transportmittel dar. Nach Schiffen, Autos, Flugzeugen und Zügen setzt Hyperloop auf eine neue Technologie für zukünftige Verkehrsmittel. Allgemein lässt sich das Konzept mit einem Zug vergleichen, der in einer Röhre mit geringem Luftdruck von einem Punkt A zu einem bis zu 1500 km entfernten Punkt B schweben kann. Durch das Schweben in einer Röhre mit reduzierter Atmosphäre ist es möglich, sehr hohe Reisegeschwindigkeiten von bis zu 1200 km/h zu erreichen. Für die Beispielstrecke von ca. 560 km zwischen Los Angeles und San Francisco soll die Reisedauer nicht länger als 35 Minuten betragen.

3.1 Fahrzeugkonzept (Kapsel)

Hauptbestandteil des Systems ist die Transporteinheit, welche in der Alpha Studie auch als Kapsel oder Pod (englisch Hülse/ Schale) bezeichnet wird.

Abbildung 3.1 zeigt die Hyperloop Kapsel aus der Alpha Studie.

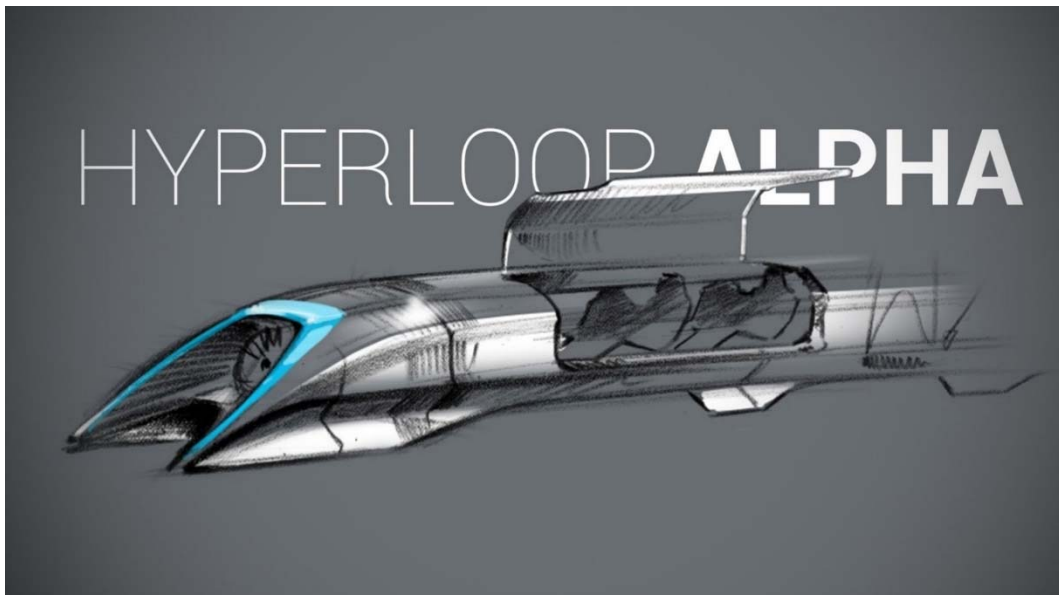


Abbildung 3.1: Hyperloop Prototypendesign.

Aerodynamik und Fahrwerk

Die größten Neuerungen im Vergleich zu den bestehenden Transportmitteln finden sich in den beiden Themengebieten Aerodynamik und Fahrwerk.

Mit den unten dargestellten Gleichungen 3.1 – 3.6 werden im Fahrzeugbau die Aspekte der Aerodynamik, des Fahrwerks und des Antriebs dargestellt. Im Folgenden dienen diese Gleichungen als Grundlage für die Beschreibung der Systeme des Hyperloop. [3]

Mit dem Hyperloop will man sehr hohe Geschwindigkeiten von etwa 1200 km/h realisieren. Dazu wird eine entsprechende Fahrleistung benötigt.

Die Fahrleistung berechnet sich wie folgt:

$$P_F = F_w v \quad (3.1)$$

Bei hohen Geschwindigkeiten ist es also nötig, immer mehr Leistung in das System zu bringen oder F_w zu reduzieren. F_w ist der so genannte Fahrwiderstand und setzt sich aus den Gleichungen 3.3 bis 3.6 zusammen.

$$F_w = F_R + F_{St} + F_L + F_a \quad (3.2)$$

Dieser setzt sich zusammen aus dem Radwiderstand:

$$F_R = m_f g \cos(\alpha) f_r \quad (3.3)$$

Dem Steigungswiderstand:

$$F_{St} = m_f g \sin(\alpha) \quad (3.4)$$

Dem Luftwiderstand:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_L c_w A v^2 \quad (3.5)$$

Sowie dem Beschleunigungswiderstand:

$$F_a = m_f a \quad (3.6)$$

Das Konzept des Hyperloops befasst sich damit, F_w zu reduzieren um hohe Reisegeschwindigkeiten zu erreichen. In einem ersten Schritt wird dazu der Atmosphärendruck verringert, in dem man die Fahrzeuge des Hyperloops in Röhren mit verringertem Druck bei 100 Pa betreibt.

Bauraumbedingt ist zwischen den Tunnelwänden und der Kapsel nur wenig Platz. Bei sehr hohen Geschwindigkeiten ist der Spalt zwischen Tunnel und Kapsel zu eng, das Fluid kann den Körper nicht mehr umströmen und staut sich davor auf. Dieser Effekt wird durch Arthur Kantrowitz und Coleman Donaldson in [4] beschrieben und wird im Allgemeinen als Kantrowitz Limit bezeichnet. Das Resultat

ist ein Luftpolster vor der Kapsel, welches den Luftwiderstand erhöht und damit die Höchstgeschwindigkeit beeinträchtigt. Durch die sich vor der Kapsel anstauende Luft kann es zusätzlich zu Stößen in der Strömung kommen. Diese Stöße sollten aber vermieden werden, da sie eine zusätzliche Belastung für die Struktur darstellen.

An der Vorderseite der Kapsel soll sich deshalb ein Kompressor befinden. Dieser hat den Zweck, die sich vor der Kapsel stauende Luft abzusaugen und somit das Fahrzeug in einem Betriebszustand zu halten, indem das Kantrowitz-Limit nicht erreicht wird.

Wie Gleichung 3.1, 3.4 und 3.6 zeigen, ist der Luftwiderstand die Hauptursache für die relativ langsame Fortbewegung mit Zügen und Autos an Land. Beim Luftwiderstand geht die Geschwindigkeit quadratisch ein. Die Fahrleistung definiert sich über den Fahrwiderstand multipliziert mit der Geschwindigkeit (Gleichung 3.1). Die Leistung, die also für eine bestimmte Geschwindigkeit benötigt wird, hängt mit der dritten Potenz von der Geschwindigkeit ab.

Neben dem Luftwiderstand hat auch der Radwiderstand Einfluss auf den Fahrwiderstand und somit auf die Fahrleistung. Um diesen Einfluss auf ein Minimum zu reduzieren soll die Kapsel laut Alpha Studie auf einem Luftkissen schweben. Dabei kann zum Betrieb der Luftlager beispielsweise die Abluft des Kompressors verwendet werden. Durch die berührungsfreie Führung kann auf die Verwendung von Verschleißteilen, wie Schienen bei Zügen oder Reifen bei Autos, verzichtet werden. Für eine kontaktlose Führung sind ebenfalls Magnetlager denkbar. Diese haben allerdings den Nachteil, dass die Magnete einen hohen Widerstand gegen die Bewegungsrichtung induzieren und somit den Fahrwiderstand negativ beeinflussen [5].

Sollte es zu einem Ausfall des Schwebesystems kommen, werden Räder ausgeklappt und die Kapsel kann zu einer Haltebucht oder einem Notausgang gefahren werden. Im Notbetrieb ist die Geschwindigkeit deutlich verringert (ca. 100 km/h).

Ein weiterer Grund weshalb man auf Räder an der Kapsel verzichtet, ist die schwierige technische Umsetzung. Bei hohen Geschwindigkeiten haben die Räder, abhängig von ihrer Größe, sehr hohe Drehzahlen. Aus den hohen Drehzahlen resultieren hohe Flieh-Kräfte, hochfrequente Anregungen und hohe Walkarbeiten. Diese stellen einen Belastungszustand dar, der für einen Dauerbetrieb nicht geeignet ist.

Ein weiterer Punkt in der Fahrwiderstandsgleichung ist der Steigungswiderstand. Der Winkel α bezieht sich auf die Steigung der Fahrbahn. Da die Streckenführung nur sehr geringe Steigungen zulässt und diese für eine konstante Geschwindigkeit mit zusätzlichen Linearmotoren ausgestattet ist, kann im Fall des Hyperloops der

Steigungswiderstand vernachlässigt werden. Im Punkt 3.2 wird darauf näher eingegangen.

Die letzte Komponente der Gleichung 3.2 ist der Beschleunigungswiderstand. Hier stellt m_f die Masse der Kapsel dar, a ist die Beschleunigung des Fahrzeugs. Der Beschleunigungswiderstand kann am besten durch eine möglichst leichte Kapsel, also durch m_f beeinflusst werden. Die Beschleunigung wurde bereits abhängig von Fahrzustand festgelegt.

Energieversorgung

Die Energieversorgung der Kapsel ist zweigeteilt. Die für den Kompressorbetrieb benötigte Leistung wird von der Onboard-Batterie, der Antrieb wird von einer externen Energiequelle bereitgestellt.

Mit Hilfe von Linearmotoren, die nach dem Rotor-Stator-Prinzip arbeiten, ist es möglich, die Kapsel von außen zu beschleunigen. Der Rotor befindet sich in diesem Fall an Bord des Fahrzeugs. Er kann als einfaches Blechteil ausgeführt werden, spart somit Gewicht und benötigt keine Energiezufuhr. Der Stator kann in der Röhre untergebracht werden und dient als Energielieferant. Der Stator wird in Kapitel 3.2 weiterführend beschrieben.

3.1.1 Personen Version

Grundsätzlich existieren zwei Konzepte der Kapseln: zum einen die Personen Version und zum anderen die Cargo Version. Die Personen Version soll dazu dienen, bis zu 28 Personen sicher und schnell zu transportieren, dafür sind 40 Kapseln vorgesehen, die bei Stoßzeiten bis zu 840 Passagiere pro Stunde befördern.

Interieur

Um einen Überlebensraum im Vakuum für die Fahrgäste zu schaffen, muss die Kapsel bedrückt werden. Realisiert werden kann dies entweder mit Hilfe eines Druckspeichers oder mit Zapfluft aus dem Kompressor.

Aufgrund der fehlenden Fenster kann es im menschlichen Körper zu Störungen in der Wahrnehmung kommen und dadurch Übelkeit und Erbrechen hervorgerufen werden. Dieser Problematik kann man mit einem Virtual Reality System entgegenwirken.

Das VR-System zeigt dem Passagier virtuelle Projektionen der Landschaft, um das menschliche Gleichgewichtsorgan zu stabilisieren und so Übelkeit und Erbrechen entgegenzuwirken.

3.1.2 Cargo Version

Neben der in Kapitel 3.1.1 angesprochenen Personen Version ist es eine Überlegung wert, das System von Anfang an etwas größer zu dimensionieren und zusätzlich eine Transportmöglichkeit für Güter zu integrieren. In der Alpha Studie wird diese Version als „Vehicle Plus“ bezeichnet. „Vehicle Plus“ bedeutet, dass 14 Personen inklusive 7500 kg Zuladung, beispielsweise in Form von drei Autos, befördert werden können.

Im Wesentlichen unterscheidet sich diese Art von Kapsel hauptsächlich in den Abmessungen. Die anderen Teilbereiche wie Antrieb, Fahrwerk und Interieur bleiben gleich oder werden entsprechend den Außenabmessungen skaliert.

3.2 Streckenkonzept

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil des Hyperloops ist die Röhre. Auf Abbildung 3.2 ist das Konzept für die Strecke abgebildet.

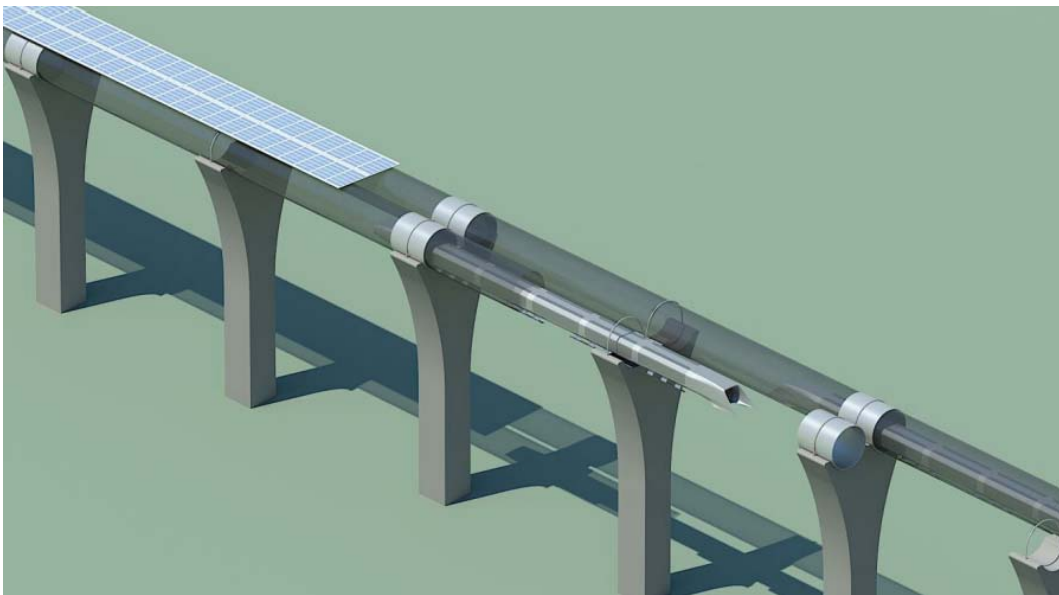


Abbildung 3.2: Aufbau der Strecke auf Pfeilern – mit Energieversorgung.

3.2.1 Streckenverlauf

Um möglichst wirtschaftlich zu sein und damit möglichst wenig in die Umwelt eingegriffen werden muss, wird in der Alpha Studie vorgeschlagen, den gesamten Aufbau der Röhre auf Pfeiler zu stellen. Diese Pfeiler können beispielsweise zwischen zwei Highway-Fahrbahnen gebaut werden. Auf Abbildung 3.3 ist ein beispielhafter Streckenabschnitt zwischen San Francisco und Los Angeles abgebildet. Der High Speed Abschnitt verläuft hier nahe des Highways I-5.

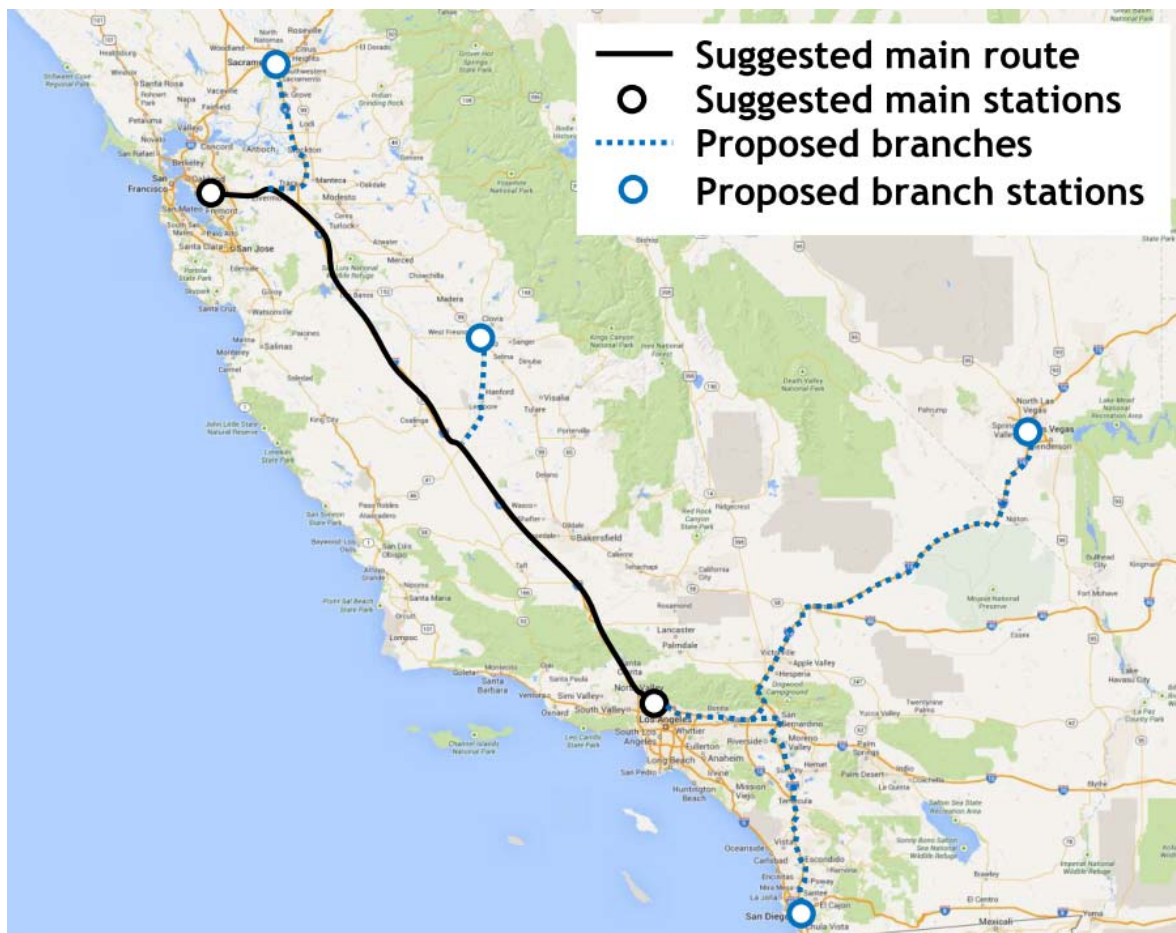


Abbildung 3.3: Vorläufige Streckenführung des Hyperloops.

Um den Streckenverlauf möglichst geradlinig und eben zu gestalten, wird die Höhe der Stützen an die Umgebung angepasst, sodass sich möglichst geringe Steigungen ergeben.

Da hohe Querschleunigungen von Menschen als unangenehm empfunden werden, muss bei der Auswahl des Streckenverlaufs darauf geachtet werden, den Kurvenradius des Fahrweges groß zu halten. In der Alpha Studie werden ein Radius von 1,6 km bei Fahrten bis 480 km/h im urbanen Raum und ein Radius von mehr als 4,8 km bei Fahrten bis 1220 km/h auf dem High – Speed – Abschnitt vorgeschlagen. Diese Radien stellen sicher, dass auf den Passagier eine maximale Querschleunigung von nicht mehr 0,5 g einwirkt.

In Abbildung 3.4 ist das voraussichtliche Geschwindigkeitsprofil der Strecke Los Angeles – San Francisco abgebildet.

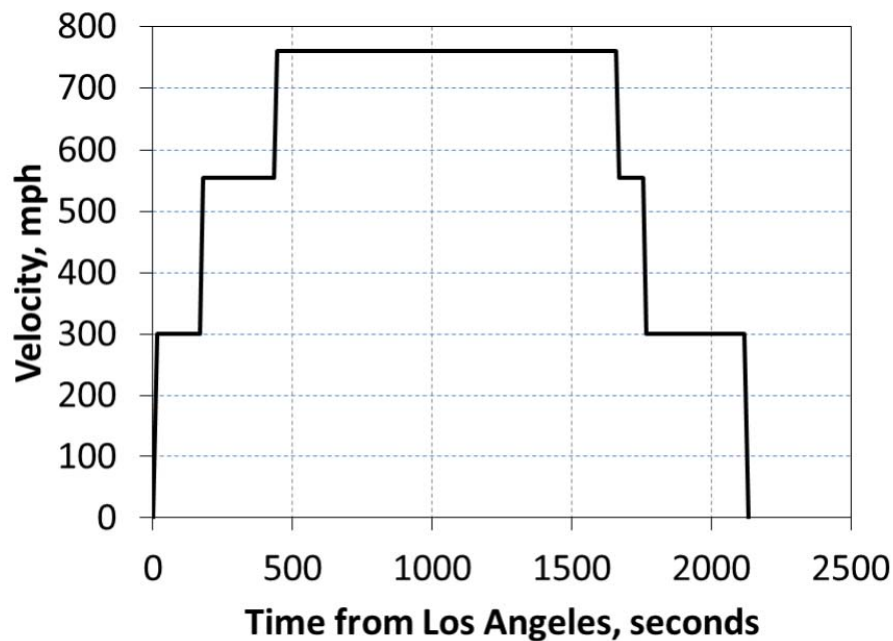


Abbildung 3.4: Geschwindigkeit der Kapsel als Funktion der Zeit von Los Angeles aus.

Wie in Abbildung 3.5 mit der rot gestrichelten Linie dargestellt, verläuft durch Kalifornien die Grenze zweier tektonischer Platten. Die Erdbebengefahr ist somit deutlich erhöht. Die Strecke des Hyperloops würde diese Grenze überqueren und damit die zwei Platten „verbinden“. Denkbar wäre, entsprechende Feder-Dämpfer-Elemente an den Pfeilern vorzusehen und die Röhre schwingungsentkoppelt auf den Stützen zu lagern. Diese Sicherheitsmaßnahme schützt die Strecke nicht nur vor Erdbeben, sondern auch vor potenzieller Anregung durch Wind. Ein weiterer Punkt, der bei der Lagerung der Röhren eine wichtige Rolle spielt, ist die Wärmeausdehnung der Stahlröhre bei hoher Sonneneinstrahlung. Ähnlich zu den Schienen einer Bahnstrecke ist es möglich, dass die Röhren aufgrund der Ausdehnung knicken. Mit Hilfe von verschiebbaren Lagern in den Stationen und an bestimmten Übergangsstellen kann diesen Einflüssen entgegengewirkt werden.



Abbildung 3.5: Tektonischer Aufbau der Westküste Kaliforniens. [6]

3.2.2 Röhre

Die Konstruktion der Röhre stellt eine Herausforderung dar. Der Grund ist, dass die Röhre einer schwankenden Druckdifferenz zwischen 100 Pa (im Inneren) und je nach Wetter ca. 101325 Pa (in der Umgebung) ausgesetzt ist.

Basisdaten für Personen und Cargo Version

Für die Personenversion ist eine Röhre aus Stahl mit einer Stärke von 20 - 23 mm geplant, um der Druckdifferenz Stand zu halten. Der Innendurchmesser soll 2,23 m betragen und eine Schnittfläche von ca. 3,9 m² aufweisen. Damit das System möglichst störungsfrei arbeiten kann, ist es sinnvoll, die Vakuumpumpen zur Erzeugung des Unterdruckes möglichst verteilt entlang der Strecke zu platzieren. Am besten an Stellen, an denen die entstehenden Schall-Emissionen der Maschinen nicht die Umgebung stören.

Der Innendurchmesser der Cargo Röhre liegt bei 3,3 m und weist eine Querschnittsfläche von 8,55 m² auf.

In Tabelle 3.1 werden die Daten für die Personen Version als auch für die Cargo Version zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Zusammenfassung der technischen Daten der Röhren Versionen.

Spezifikation	Personen Version	Cargo Version	Einheit
Innendurchmesser	2,23	3,3	[m]
Querschnittsfläche	3,9	8,55	[m ²]
Materialstärke	20-23	21-25	[mm]
Druck in der Röhre	100	100	[Pa]
Leistung der Solarpaneele auf der Röhre	285	446	[MW]

Energieversorgung und Antriebskonzept (Linearmotoren)

Um die Energie für den Betrieb der Strecke bereitzustellen, besteht die Möglichkeit auf dem Dach der Röhren Solarflächen zu installieren. Bei einer Breite von 4,25 m und einer Länge von 560 km ist die Fläche ausreichend groß um 285 MW Leistung bereit zu stellen. Bedingt durch die breitere Röhre ist es bei der Cargo Version möglich, größere Solarpaneele auf dem Dach der Röhren anzubringen. Diese schaffen aufgrund einer Breite von 6,6 m und derselben Länge eine Leistung von maximal 446 MW bei einer Flächenleistung von 120 W/m². Der dabei erzeugte Überschuss kann in das öffentliche Stromnetz gespeist werden, sodass an sonnenarmen Tagen die erforderliche Leistung aus dem Netz abgerufen werden kann.

Eine weitere Idee, um Energie in den erforderlichen Strom zu wandeln, sind Windkraftanlagen. Diese kann man entweder neben der Strecke oder aber auf ausgewählten Pfeilern der Bahntrasse aufstellen. Windenergie ist sonnenunabhängig und ebenso eine Schlechtwetteralternative. Der auf dem Track erzeugte Strom kann über Leitungen in die umliegenden Umspannwerke transportiert werden, sodass Leitungsverluste durch lange Stromleitungen vermieden werden können.

Um die elektrische Energie in Bewegungsenergie umzuwandeln, wird ein Stator in die Röhre mit eingebaut und an das Stromnetz angeschlossen. Dieser Stator bildet das Gegenstück zum Rotor in der Kapsel. Das Statorelement dient dabei nicht nur als Antrieb, sondern kann ebenso zur zusätzlichen lateralen Stabilisierung genutzt werden.

Beschleunigt werden die Kapseln mit den oben angesprochenen Linearmotoren, siehe Abbildung 3.6.

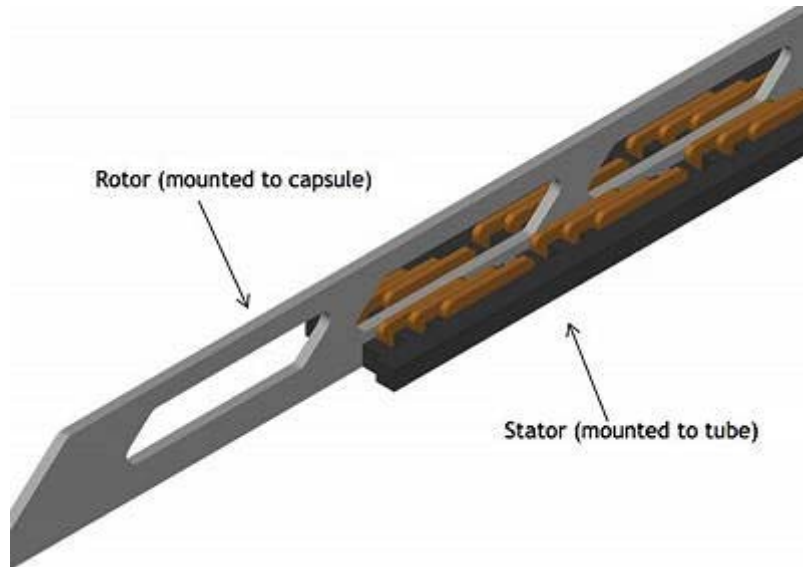


Abbildung 3.6: Rotor Stator Prinzip.

Diese lineare Antriebseinheit ist nur zum Beschleunigen an den Stationen und an Steigungen nötig. Den Rest der Strecke gleitet die Kapsel antriebsfrei durch die Röhre bis zur nächsten Beschleunigungsstation.

Stationen

Am Anfang und am Ende der zusammengesetzten Röhre befinden sich die Stationen. Diese werden vom Rest der Strecke druckisoliert, damit sich die Passagiere frei darin bewegen können. Die Stationen sollen möglichst minimalistisch und praktisch ausgestattet sein. Tickets und Gepäck werden elektronisch bearbeitet, dabei ist das Gepäck pro Fahrgast auf zwei Koffer mit einem Gesamtgewicht von 50 kg beschränkt. Angelehnt an die TSA-Standards am Flughafen sind Sicherheitskontrollen vorgesehen, um die Sicherheit aller zu gewährleisten.

Für eine schnelle Abwicklung des Aus- und Einsteigens werden zwei Luftschleusen benötigt: Eine für ankommende Züge und eine für abfahrende. Sind ankommende Züge bereit zum „turnaround“, werden sie auf eine Wendeplatte gefahren und gedreht. Bis zu drei Kapseln können gleichzeitig be- oder entladen werden. Zusätzlich ist es möglich, das Gepäckfach vom Rest der Kapsel zu trennen, um mehr Zeit für den Ladevorgang zu haben.

3.2.3 Sicherheit

Generell kann das Hyperloop-Konzept als ein sicheres Fortbewegungsmittel angesehen werden. Als erstes Transportsystem stellt der Hyperloop die gesamte Infrastruktur als geschlossenes System dar. Unter anderem kommen Fahrzeuge,

Antrieb, Weg, Energiemanagement und Zeitplan aus einem Konzept und wurden erstmals von Anfang bis Ende systematisch aufeinander abgestimmt.

Durch die beschriebenen Sicherheitsmerkmale ist das System immun gegen Wind und Wetter. Mit autonomen Fahrzeugen und Streckenüberwachung sowie redundanten Sicherheitsmaßnahmen ist es möglich, menschliches Versagen aus dem System auszuschließen. Trotzdem werden im Folgenden vier mögliche Notfallsituationen beschrieben und Lösungsansätze genannt.

Druckabfall

Schon beim Bau der Fahrzeuge werden die höchsten Sicherheitsstandards verwendet und möglichst viele Zwischenkontrollen durchgeführt. Sollte es dennoch zu einem Druckabfall in der Kabine kommen, sollen ähnlich wie beim Flugzeug, Sauerstoffmasken von der Decke fallen. Die Passagiere können bis eine Station erreicht wird normal weiteratmen.

Kapsel bleibt in der Röhre stehen

Zunächst ist anzumerken, dass dieses Szenario sehr unwahrscheinlich ist, da die Kapsel mehr als 90% der Zeit antriebsfrei gleitet. Das bedeutet, dass der Hyperloop beim Antriebsausfall auch bis zur nächsten Station gleiten könnte. Bleibt er dennoch in der Röhre stehen, fahren die vor ihm fahrenden Kapseln weiter in die Station. Die rückwärtigen Kapseln erhalten vom System unverzüglich ein Signal und eine Notbremsung wird eingeleitet. Die gestrandete Kapsel klappt sein Notradsystem aus und fährt auf Rädern zu einer Nothaltebucht oder zur nächsten Station.

Erdbeben

Ereignet sich ein Erdbeben, so greifen zunächst alle konstruktiven und baulichen Maßnahmen um ein Unglück zu verhindern. Zusätzlich werden alle in den Röhren befindlichen Kapseln notgebremst und über Ausstiege bei den Pylonen evakuiert.

Menschliches Versagen

Ein gewisses Restrisiko bleibt in allen Systemen mit menschlichen Schnittstellen. Um trotzdem ein größtmögliches Maß an Sicherheit zu bieten, werden Sicherheitschecks und Wartungsarbeiten strikt nach Plan durchgeführt. Redundante Pumpen und Energiequellen sichern das Gesamtsystem gegen Produktions- und Baufehler ab.

Stromausfall

Akkumulatoren in der Nähe der Linearmotoren sorgen dafür, dass bei einem Stromausfall alle Züge in die Endstation gelangen und evakuiert werden können.

4 Anforderungen an den Hyperloop

In diesem Kapitel werden die Anforderungen für das Transportsystem Hyperloop erst allgemein und dann strukturbezogen aufgezeigt.

4.1 Allgemeine Anforderungen

In der Fahrrohre herrscht ein Druck von 100 Pa (vgl. Atmosphärendruck von 101.325 Pa). Dieser Druckunterschied hat materialspezifisch unterschiedliche Auswirkungen und muss bei der Auslegung und Konstruktion berücksichtigt werden. Ähnlich zu einem Flugzeug sind lebenserhaltende Maßnahmen erforderlich, welche dem geringen Druck und der geringen Menge an Sauerstoff gerecht werden.

Neben der Atmosphäre gibt die Röhre limitierende Faktoren für die Konstruktion vor: Gemäß [2] ist die maximale Breite der Kapsel 1,35 m und die maximale Höhe 1,1 m. Daraus ergibt sich für die Personenversion eine vordere Querschnittsfläche von 1,4 m². Für die Cargo Version ist eine maximale Querschnittsfläche von 4 m² in [2] angegeben. Abhängig von der Gestaltung der Stationen kann ebenso eine Beschränkung der Länge erforderlich sein.

Eine der wichtigsten Größen im Transportbereich ist die Nutzlastkapazität des Transportmittels. Diese wird unter anderem auch durch das Eigengewicht der Struktur beeinflusst. So ermöglicht eine leichte Struktur eine höhere Nutzlast bei gleicher Leistung im Schwebesystem.

Beim Personentransportsystem soll sich die Zuladung auf 28 Personen mit max. 50 kg Gepäck beschränken und in Summe ein Gesamtgewicht von 2800 kg nicht überschreiten.

In der zweiten Version, die neben den Personen auch noch Fahrzeuge mitführen kann, beschränkt sich die Anzahl der Personen auf 14 mit einem Gesamtgewicht von 1400 kg. Zusätzlich sollen noch 7500 kg Güter/ Fahrzeuge transportiert werden können. So ergibt sich im zweiten Fall eine Gesamtnutzlast von 8900 kg.

Der Hyperloop ist dazu gedacht, Mittelstrecken von max. 1500 km einfach zurückzulegen. Als Beispielstrecke dient die Verbindung San Francisco – Los Angeles (563 km). Dabei soll alle zwei Minuten eine Kapsel aus der Station fahren, damit bis zu 840 Passagiere pro Stunde transportiert werden können. Um die Laufleistung einer Kapsel für ihre Lebensdauer von 100 Jahren zu ermitteln, wird von folgendem Tagesbetrieb ausgegangen: 20 Stunden lang alle 15 Minuten eine Abfahrt und vier Stunden lang alle zwei Minuten eine Abfahrt. Das ergibt eine Tagesgesamtkilometerzahl von 225.200 km pro Tag in beide Richtungen. Auf 40 Kap-

seln verteilt sind das 5.630 km pro Tag. Auf eine Lebensdauer von 100 Jahren hochgerechnet, ergibt sich eine Laufleistung von 205 Millionen Kilometer. Dies ist eine entscheidende Angabe zur Auslegung des Gesamtfahrzeuges und somit auch ein bestimmender Faktor in der Struktur- und Materialenauswahl. Als Vergleichsrechnung kann ein Langstreckenflugzeug betrachtet werden. Dieses fliegt innerhalb von rund 3,5 Tagen von Frankfurt nach Tokio und wieder zurück, sowie von Frankfurt nach Los Angeles und wieder zurück. Das sind ca. 40.000 km in 3,5 Tagen, also 80.000 km in der Woche. Bei 52 Wochen ergibt das eine Laufleistung von 4.160.000 km pro Jahr. Hochgerechnet auf eine Lebensdauer von bis zu 50 Jahren hat ein Flugzeug also 208 Millionen Kilometer zurückgelegt. [7] An dieser Stelle sei angemerkt, dass eine solche Betrachtung in der Luftfahrt nicht üblich ist. Im Regelfall werden nicht die zurückgelegten Kilometer, sondern Flugstunden betrachtet. Umgerechnet ergeben sich für ein Fahrzeug des Hyperloops ca. 228.000 h und für ein Flugzeug 231.000 h. Für den Hyperloop heißt das, dass die Langlebigkeitsannahme in der Alpha Studie durchaus im realistischen Bereich liegt.

Mit einer Reisegeschwindigkeit von bis zu 1.220 km/h ist die Kapsel während ihrer Betriebszeit großen Belastungen ausgesetzt und muss diesen mit ausreichender Sicherheit standhalten können. Dabei wird unter anderem ein besonderes Augenmerk auf die Dauerfestigkeit gelegt. Im Auslegungsprozess wird die noch nicht bekannte Verzögerung der Kapseln einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Dauerfestigkeit haben. Es muss davon ausgegangen werden, dass die negative Beschleunigung beim Bremsen (Nothalt) deutlich höher als 0,5 g ausfällt.

Als Grundlage für die weitere Betrachtung, wird an dieser Stelle die maximale Bremsverzögerung, aus den Eckdaten der Alphastudie hergeleitet. Dazu wird folgendes Koordinatensystem zugrunde gelegt (Abbildung 4.1):

- Ursprung: Schwerpunkt der Kapsel
- Positive x – Richtung: In Fahrtrichtung
- Positive y – Richtung: Nach rechts
- Positive z – Richtung: Nach unten

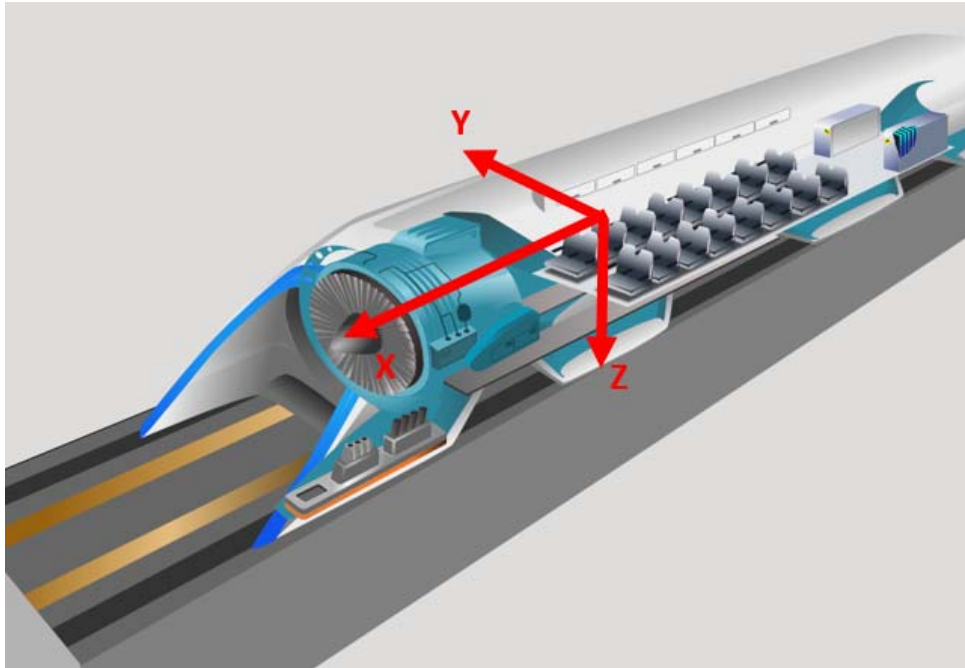


Abbildung 4.1: Koordinatensystem im Pod.

Die Züge sind mit einem minimalen Abstand von 30 Sekunden auf der Strecke unterwegs. Setzt man dies und die maximale Geschwindigkeit in Gleichung 4.1 ein, so ergibt sich eine maximale Verzögerung von $11,29 \frac{m}{s^2} = 1,15 g$.

$$a = \frac{v}{t} \quad (4.1)$$

Mit Gleichung 4.2 ergibt sich damit ein Bremsweg s_b von 5081,85 m.

$$s_b = \frac{1}{2}at^2 \quad (4.2)$$

Dieser Bremsweg lässt die Kapseln gerade nicht aufeinander auffahren. Berücksichtigt man einen Sicherheitsabstand zwischen den Kapseln von 500 m, so verkürzt sich der Bremsweg auf 4581,85 m. Mit dem neuen Bremsweg ergibt sich eine neue maximale Verzögerung von $11,9 \frac{m}{s^2} = 1,21 g$.

Ein in Deutschland fahrender ICE 3 hat bei einer so genannten Schnellbremsung aus 300 km/h einen Bremsweg von 2800 m [8]. Das ergibt eine Bremsverzögerung von $1,24 \frac{m}{s^2} = 0,126 g$. Die 1,21 g Verzögerung beim Hyperloop erscheinen in diesem Zusammenhang relativ hoch. Zu beachten ist allerdings, dass es in der Kapsel, anders als beim Zug, nur Sitzplätze mit Gurten geben wird, so dass die Passagiere während der Fahrt angeschnallt sind. Das macht es möglich, die Belastung mit einer Notbremsung im Auto zu vergleichen. Als grober Richtwert gilt in der Automobilindustrie eine Belastung von 1,3 g bei einer vom Auto unterstützten

Notbremsung [9]. Der Hyperloop sollte also keine größere Belastung auf den Körper und die Struktur erfahren, als bereits aus dem Automobilbau bekannt.

Zusätzlich ergeben sich Anforderungen bezüglich der Wirtschaftlichkeit des Systems. Die Kosten einer Kapsel belaufen sich auf ca. 1.350.000 \$ für die Passagier Version und ca. 1.525.000 \$ für die Cargo Version. Alleine für die Struktur ist ein Budget von etwa 245.000 \$ bzw. 275.000 \$ vorgesehen. Diese Kosten beinhalten das Material sowie die Fertigungskosten von jeweils einer Kapsel.

Zusammengefasst können diese Daten aus Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 entnommen werden.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung Anforderungen Personen Version.

Spezifikation	Wert	Einheit
Länge	N/A	[m]
Max. Breite	1,35	[m]
Max. Höhe	1,1	[m]
Querschnittsfläche	1,4	[m ²]
Gesamtgewicht	15000	[kg]
Strukturgewicht	3100	[kg]
Gewicht Passagiere und Gepäck	2800	[kg]
Anzahl Passagiere	28	-
Volumen zusätzliche Güter	N/A	[m ³]
Max. Beschleunigung in pos. X- Richtung	1 g	[m/s ²]
Max. Beschleunigung in Y- Richtung	0,5 g	[m/s ²]
Max. Beschleunigung in neg. X- Richtung	1,15 g	[m/s ²]
Fahrzeuggeschwindigkeit	Max. 1220	[km/h]
Atmosphäre	100 - 101325	[Pa]
Fahrleistung/ einfach	max. 1500 (620)	[km]
Lebensdauer	100	[a]
Fahrleistung für ges. Lebensdauer	205495000	[km]
Anzahl der Fahrzeuge	40	-
Kosten	1350000	[\$]
Kosten Struktur	245000	[\$]

Tabelle 4.2: Zusammenfassung Anforderungen Cargo und Personen Version.

Spezifikation	Wert	Einheit
Länge	N/A	[m]
Max. Breite	N/A	[m]
Max. Höhe	N/A	[m]
Querschnittsfläche	4	[m ²]
Gesamtgewicht	26000	[kg]
Strukturgewicht	3500	[kg]
Gewicht Passagiere und Gepäck	1400	[kg]
Gewicht zusätzliche Güter	7500	[kg]
Anzahl Passagiere	14	-
Volumen zusätzliche Güter	N/A	[m ³]
Max. Beschleunigung in pos. X- Richtung	1 g	[m/s ²]
Max. Beschleunigung in Y- Richtung	0,5 g	[m/s ²]
Max. Beschleunigung in neg. X- Richtung	1,15 g	[m/s ²]
Fahrzeuggeschwindigkeit	Max. 1220	[km/h]
Atmosphäre	100 - 101325	[Pa]
Fahrleistung/ einfach	max. 1500 (620)	[km]
Lebensdauer	100	[a]
Fahrleistung für ges. Lebensdauer	205495000	[km]
Anzahl der Fahrzeuge	40	-
Kosten	1525000	[\$]
Kosten Struktur	275000	[\$]

4.2 Anforderungen an die Struktur

Nach den allgemeinen Anforderungen werden in diesem Abschnitt die speziellen an die Struktur betrachtet.

4.2.1 Gewicht

Für den Betrieb der Luftlager des Hyperloops muss ein Luftstrom bereitgestellt werden. Mit steigender Masse des Fahrzeugs wird mehr Energie für das Schwebesystem benötigt.

Durch die Minimierung der Strukturmasse der Kapsel kann somit sowohl der Energiebedarf für das Schwebesystem minimiert als auch die Nutzlastkapazität maximiert werden.

Dies spielt vor allem bei der Cargo Version eine entscheidende Rolle. Wegen der größeren Nutzlast muss die Struktur höhere Lasten aushalten und gleichzeitig möglichst leicht ausgeführt werden, um das Verhältnis von Nutzlast und Energieaufwand zu erhöhen.

4.2.2 Stückzahl

Einen wesentlichen Einfluss auf die Bauweise sowie auf die Materialauswahl der Struktur haben die angestrebten Stückzahlen. Bei Kleinst- sowie Kleinserien empfehlen sich Fertigungsverfahren mit kostengünstigem Werkzeug, wie GFK- oder CFK- Formen oder Gitterrohrkonstruktionen. Mit steigender Stückzahl steigt der Einfluss der Fertigungskosten an. Für hohe Stückzahlen lohnt es sich, auf eine Schalenbauweise mit entsprechend teurerem Werkzeug umzusteigen. In der Automobilbranche wird dieses Fertigungsverfahren ab etwa 50.000 Stück/Jahr eingesetzt. [9]

Auf der geplanten Teststrecke sollen 40 Fahrzeuge in der Röhre operieren bzw. in der Station stehen, um beladen zu werden.

4.2.3 Lastwechsel

Lastwechsel teilen sich beim Hyperloop in zwei Teilbereiche: Zum einen kommt es beim Übergang zwischen Vakuum und Standardatmosphäre zum Drucklastwechsel durch die Druckdifferenz zwischen dem Innenraum der Kapsel und der Umgebung im Inneren der Röhre, zum anderen treten beim Beschleunigen und Bremsen wechselwirkende Lasten auf, die beim Design der Struktur und der Anbindungspunkte berücksichtigt werden müssen.

Beschleunigungsbelastung

Eine Kapsel macht am Tag fünf Fahrten. Während einer Strecke lasten dabei mehrere Beschleunigungs- und Abbremsphasen auf der gesamten Struktur und den Anbindungspunkten. Als Grundlage für die Häufigkeit der Lastwechsel dient die im **Bild 3.5** beschriebene Beschleunigungskurve. [2] In diesem Beispiel bedeutet dies:

- Von 0 auf 480 km/h für die Los Angeles Grapevine South Area
- Von 480 auf 890 km/h für die Los Angeles Grapevine North Area
- Von 890 auf 1220 km/h neben dem I – 5 Highway
- Von 1220 auf 890 km/h neben dem I – 580
- Weiteres abbremsen auf 480 km/h
- Von 480 – 0 km/h in der San Francisco Area

Die Beschleunigungen überschreiten im Normalfall weder in positiver noch negativer Richtung den Grenzwert von 0,5 g. Für die Auslegung der Struktur muss dies vor allem bei der Wahl der Knoten- und Anbindungspunkte berücksichtigt werden,

stellt aber im Vergleich zu den Drucklastwechseln keine wesentliche Herausforderung dar. Aufgrund dessen wird in Kapitel 5 nur die Auslegung der Druckkapsel betrachtet.

Um den reibungslosen Betrieb über 100 Jahre beurteilen zu können, wird an dieser Stelle der Begriff der Betriebs- bzw. Ermüdungsfestigkeit eingeführt und am Beispiel der Drucklastwechsel erläutert.

Ermüdungsfestigkeit

Die Betriebsfestigkeit, sowie die Schwingfestigkeit sind Unterformen der Ermüdungsfestigkeit, siehe Abbildung 4.2.

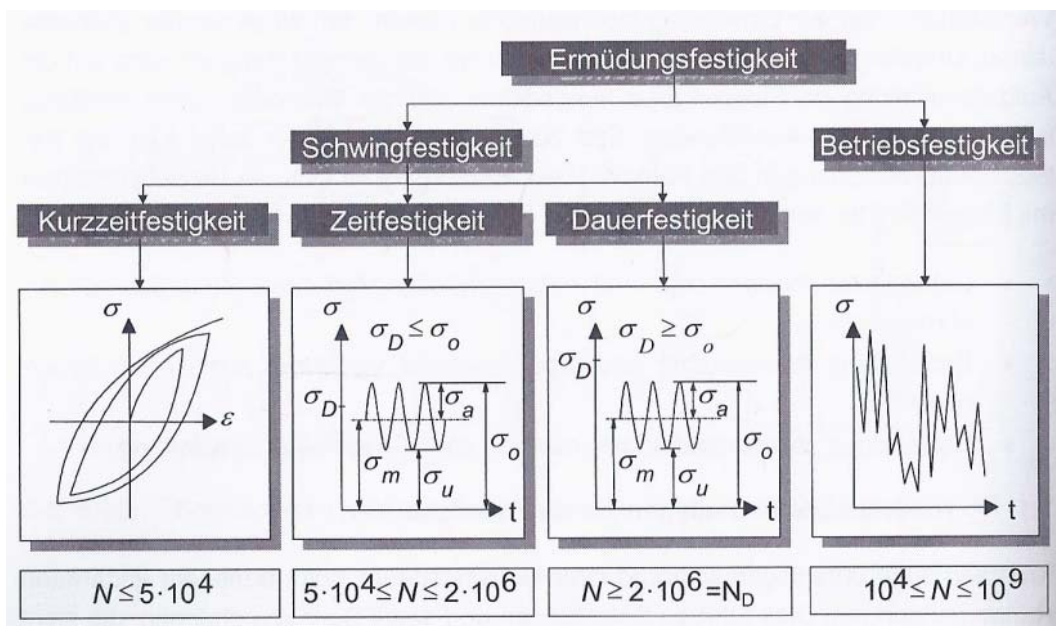


Abbildung 4.2: Einteilung der Ermüdungsfestigkeit. [10]

Bei der Betriebsfestigkeit werden stochastisch verteilte Belastungsverläufe betrachtet, während bei der Schwingfestigkeit periodische Belastungen der Probe bzw. des Bauteils betrachtet werden.

Die bekannteste Art zur Untersuchung von Bauteilen auf Ermüdungsfestigkeit sind die sog. Wöhlerversuche. Bei diesem Verfahren werden bei Einstufenversuchen sinusförmige Lasten auf eine Probe aufgebracht und dabei eine materialspezifische Kennlinie generiert. Beispielhaft ist eine solche Kennlinie in Abbildung 4.3 dargestellt.

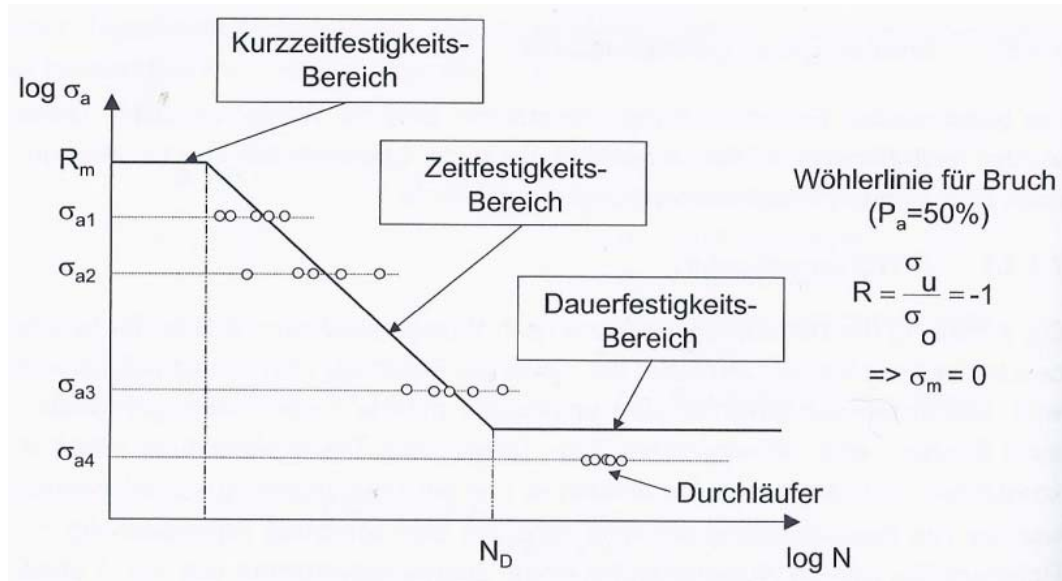


Abbildung 4.3: Wöhlerlinie für Stahlwerkstoffe. [10]

Die x - Achse beschreibt die Spannung und wird logarithmisch aufgetragen. Die y - Achse zeigt die zu ertragenden Lastwechsel N , ebenfalls logarithmisch. Im Kurzzeitfestigkeitsbereich entspricht die zulässige Belastungsfähigkeit des Bauteils (bzw. der Probe), wie im statischen Belastungsfall, der Streckgrenze R_m . Im Zeitfestigkeitsbereich sinkt die Belastungsfähigkeit linear ab. Die Steigung dieses linearen Abfalls kann mit Gleichung 4.3 beschrieben werden. [10]

$$\sigma_{ai} = \left(\frac{N_D}{N_i} \right)^{-k} \sigma_D \quad (4.3)$$

Das heißt, eine endliche Anzahl von Belastungen führt zu einem Bruch bis zum Erreichen von N_D , dem sogenannten Grenzlastspiel. Die Gerade der Wöhlerlinie geht hier in eine neue Steigung über. Ab der Grenzlastspielzahl wird der Bereich der Dauerfestigkeit erreicht. Im Dauerfestigkeitsbereich ist die Belastungsfähigkeit unabhängig von der Anzahl der Lastspiele. Das Verhältnis zwischen der Belastungsfähigkeit im Dauerfestigkeitsbereich und der Streckgrenze R_m wird durch den R-Wert beschrieben, dieser liegt meist zwischen -1 und 1 (siehe Abbildung 4.3). [10]

Wöhlerlinien werden in dehnungsgesteuerte und spannungsgesteuerte Linien unterteilt. Dehnungsgesteuerte Wöhlerlinien werden in dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen mit konstanter Dehnungsamplitude ermittelt. Diese Wöhlerkurven werden im Zug-Druck-Bereich angewendet und haben oft einen R-Wert von -1. Spannungsgeregelte Wöhlerlinien werden bei konstanter Spannungsamplitude ermittelt. Sie finden vor allem im Zug-Schwellbereich Verwendung und haben einen R-Wert von 0,1. Bei einem R-Wert von -1 ist die spannungsgeregelte Wöhlerlinie eine Wechsel-Biege-Wöhlerlinie. [11], [12]

Die Wöhlerlinie gibt zwar eine erste Einschätzung über die Festigkeit von Materialien, kann aber nicht direkt auf Bauteile übertragen werden. Dazu ist die Ermittlung einer Bauteil-Wöhlerlinie nötig. Bei der Ableitung der Bauteil- aus der Proben-Wöhlerlinie müssen Größen- und Oberflächeneinflüsse des Bauteils mitberücksichtigt werden. [11]

Es werden sogenannte Einflussfaktoren F für die Größe und die Oberfläche der Bauteile bestimmt und mit in die Kennliniengleichung eingearbeitet. Die neue Bauteilkennlinie verläuft dann parallel zur Probenkennlinie im konservativen Bereich, siehe Abbildung 4.4. [10]

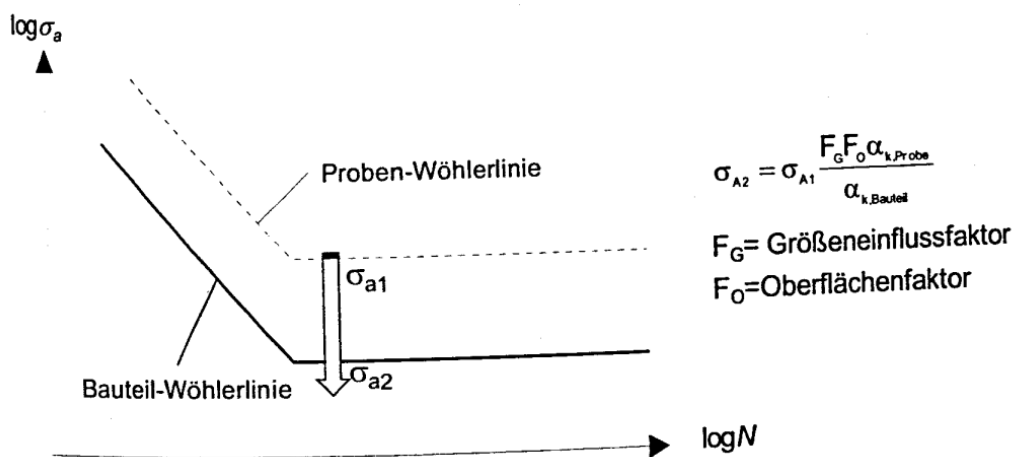


Abbildung 4.4: Bauteil Wöhlerlinie. [10]

Um diese Erkenntnisse auf die Struktur der Hyperloop Fahrzeuge anwenden zu können, werden im Folgenden die Lastwechsel ermittelt und die auftretenden Spannungen berechnet.

Bei dem oben angenommenen Tagesverlauf, bei dem 20 Stunden lang alle 15 Minuten ein Zug und 4 Stunden lang alle zwei Minuten ein Zug die Röhre durchquert, ergeben sich in Summe 400 Lastwechsel von „Vakuum“ auf Umgebungsdruck und umgekehrt. Verteilt auf 40 Züge ergeben sich für jede einzelne Kapsel 10 Lastwechsel pro Tag – 3650 pro Jahr und 365.000 für die gewünschte Lebensdauer von 100 Jahren.

Verglichen mit einem Flugzeug, das eine ähnliche Laufleistung gemessen an Kilometern hat, stellen insbesondere die vielen Drucklastwechsel eine neue Form der Belastung dar. Im Flug werden deutlich mehr Kilometer pro Drucklastwechsel zurückgelegt als beim Hyperloop. Ebenso wird die Druckdifferenz beim Hyperloop deutlich schneller auf- bzw. abgebaut. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit besonders auf die Auslegung des Druckbehälters eingegangen.

Die Spannungen auf Grund des Druckunterschieds können mit der sogenannten Kesselformel berechnet werden.

Gleichung 4.4 zeigt die Kesselformel nach DIN 2413. Unter der Annahme, dass die größte Materialbeanspruchung bei der maximalen Schubspannung auftritt und die Hauptspannungen gleiche Vorzeichen aufweisen, wird σ_1 als größte Hauptspannung angenommen und mit der Vergleichsspannung gleichgesetzt. Hier ist der Druck mit p , der mittlere Durchmesser mit d_m und die Wanddicke der Kapsel mit s bezeichnet.

$$\sigma_v = \frac{p d_m}{2 s} \quad (4.4)$$

Die Auslegung für die verschiedenen Werkstoffe wird materialspezifisch im Kapitel 5 betrachtet und durchgeführt.

4.2.4 Struktursteifigkeit und Eigenfrequenzen

Die Struktursteifigkeit setzt sich zusammen aus Biege- und Torsionssteifigkeit des Rahmens, der Karosserie oder einer Kombination aus Beidem. Sie beeinflusst maßgeblich die Fahrsicherheit und den Komfort für die Passagiere [10].

In Abbildung 4.5 sowie 4.6 werden die zwei Belastungssituationen gezeigt.

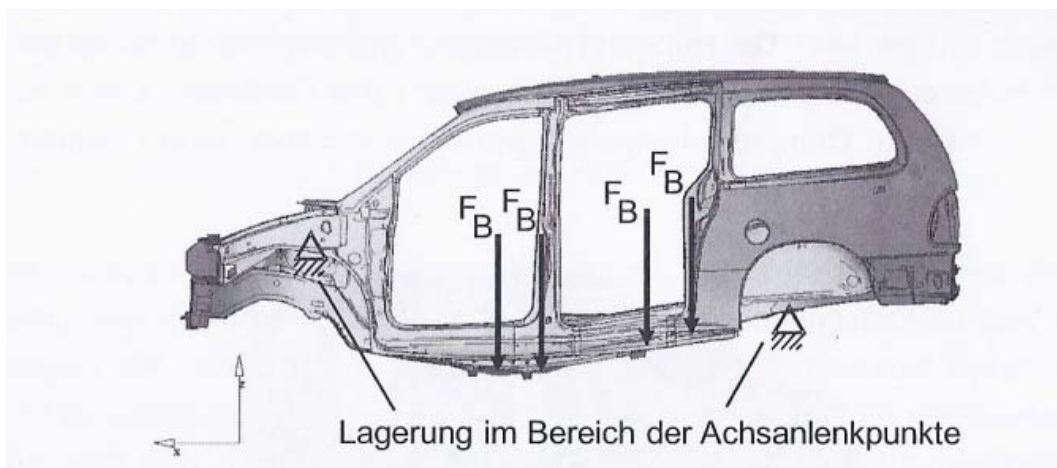


Abbildung 4.5: Verformung einer Karosserie bei Biegebelastung. [10]



Abbildung 4.6: Verformung einer Karosserie bei Torsionsbelastung. [10]

Die größte Steigerung der Festigkeit einer Fahrzeugstruktur wird durch die Verstärkung der Seitenstruktur erreicht. Wie in Abbildung 4.5 zu sehen ist, wird bei der Biegebelastung der Bereich der Türschweller und Längsträger beeinträchtigt. Eine wirksame Gegenmaßnahme ist es, diesen Bereich besonders zu verstärken, beispielsweise mit einer entsprechend steifen Profilgeometrie. [10]

Für die Struktur des Hyperloops tritt dieses Problem bei den Türausschnitten auf. Dazu ist ein Kompromiss aus komfortablem, schnellem Einsteigen, versteifenden Elementen und der daraus resultierenden Gewichtszunahme nötig.

Die Torsionsbelastung beansprucht sowohl die Seitenteile als auch die Querverbindungen.

Da die Kurvenradien der Fahrstrecke für den Hyperloop sehr groß gewählt sind, ist die Torsionsbelastung durch Kurvenfahrt als sehr gering einzuschätzen. Dennoch ist eine steife Struktur nötig, um beispielsweise die Kräfte der Luftlager aufzunehmen und gleichmäßig in die Struktur zu leiten. Eine verwindungssteife Konstruktion erleichtert ebenso die Regelung der Luftlager, da Störungen durch Biegung verringert werden.

Jede Karosserie wird durch eine Vielzahl von äußeren und inneren Einflüssen angeregt und beginnt zu schwingen. Ziel der Auslegung einer Struktur ist es, die einzelnen Subsysteme so abzustimmen, dass die einzelnen Eigenfrequenzen sich nicht negativ beeinflussen oder sich im besten Fall gegenseitig aufheben. Tabelle 4.3 zeigt eine Auswahl der für den Hyperloop relevanten Schwingungen und den dazugehörigen Frequenzbereichen. [10]

Tabelle 4.3: Aufteilung der Eigenfrequenzen eines Hyperloops.

Spezifikation	Wert [HZ]
Fahrzeug Federn	1 – 2
Fahrgast Sitz	2 – 3
Kopf Wirbelsäule	3 – 5
Lagerung des Kompressors	6 – 8
Torsionsschwingung der Struktur	20 – 30
Biegeschwingung der Struktur	30 – 50
Anbauteile	50 – 100
Kompressor Drehzahl (17000 1/min)	ca. 280

Nimmt man vereinfacht an, dass alle wesentlichen Massen starr oder schwingungsentkoppelt mit der Struktur verbunden sind, kann man die erste Biegefrequenz mit ca. 30-35 Hz abschätzen. Die erste Torsionsfrequenz liegt unter denselben Voraussetzungen bei ca. 20-25 Hz. Im Hinblick auf Torsionseigenschwingung ist die Auslegung besonders kritisch, da bei geringer Torsionssteifigkeit und der damit einhergehenden niedrigen Eigenfrequenz die Struktur zum sogenannten „body shake“ gebracht wird. Body shake bezeichnet den Resonanzfall der Struktur und wird im Deutschen auch als Karosseriezittern bezeichnet. In Abbildung 4.7 ist die Eigenform der Struktur als Prinzipbild dargestellt. [10]

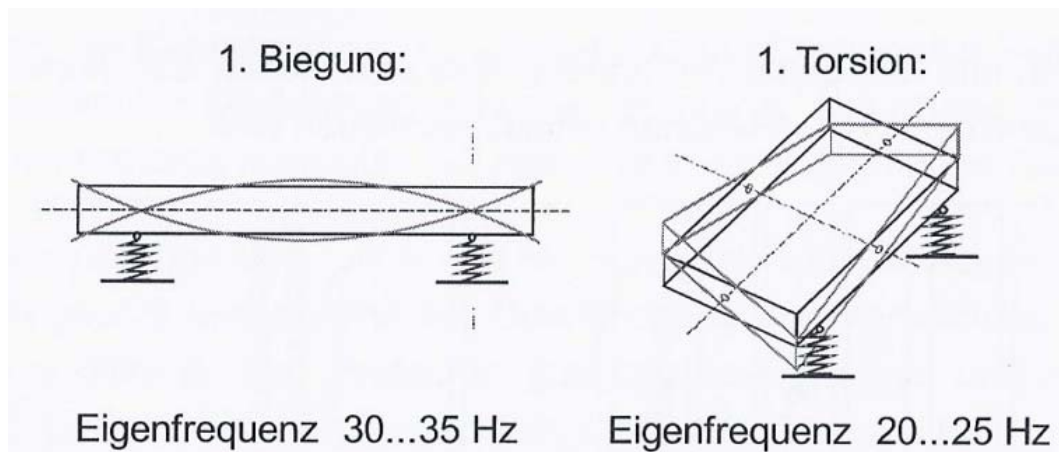


Abbildung 4.7: Erste Biegung und Erste Torsion der Struktur. [10, p. 66]

Ein Erhöhen der Eigenfrequenzen wird durch eine steifere Konstruktion der Struktur erreicht. Dadurch wird auch eine Anregung der Karosserie verhindert bzw. eingeschränkt.

Neben Versteifungen helfen auch Verbundmaterialien beim Eindämmen der Geräusche und Schwingungen. Beispielsweise wird zwischen zwei Stahlblechen ein

viskoelastischer Kern eingebracht und schub- sowie zugfest mit den Deckschichten verbunden. Eine weitere Möglichkeit der Versteifung bietet die Verwendung von Rippen, Wölbungen oder Sicken. [10]

Beim Hyperloop müssen diese Möglichkeiten je nach Werkstoff und Einsatzgebiet geprüft und angewandt werden.

4.2.5 Ökologische Anforderungen an die Struktur

Zusätzlich zu Aspekten der Wirtschaftlichkeit müssen auch ökologische Gesichtspunkte bezüglich des Produktes und dessen Lebenszyklus betrachtet werden. Gerade beim Hyperloop, einem System, das an sich selbst höchste Ansprüche in Bezug auf Nachhaltigkeit stellt, ist das ein wichtiges Kriterium.

Ausgehend von der Materialauswahl, gilt es Herstellung, Betriebszeitraum sowie Entsorgung und Recycling der Rohstoffe mit zu berücksichtigen.

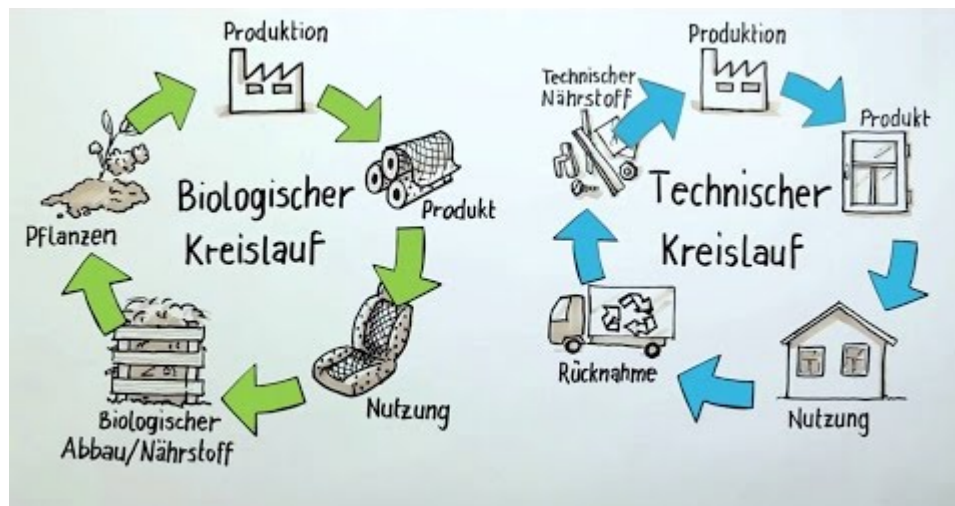


Abbildung 4.8: Geschlossene Produktkreisläufe als Ziel. [13]

4.2.6 Herstellungsverfahren

Die Herstellungsverfahren definieren sich durch viele der bereits genannten Unterpunkte. Neben der Stückzahl, den Kosten und der Ökologie spielt auch die Herstellungszeit eine wichtige Rolle.

Auf die in Frage kommenden Herstellungsverfahren wird in Kapitel 6 näher eingegangen und deren Vor- und Nachteile werden erläutert.

4.2.7 Vakuumtauglichkeit

Wie bereits bei den allgemeinen Anforderungen angesprochen, muss bei der Materialauswahl auf die Vakuumtauglichkeit geachtet werden.

In der Röhre herrscht kein Hochvakuum, sondern ein reduzierter Druck von 100 Pa. Trotzdem können bei niedrigen Drücken Materialien ausgasen, dabei eine für die Verwendung notwendige Eigenschaft verlieren oder gar zerstört werden. Darüber hinaus können ungewollte Emissionsprodukte entstehen. Bei Metallen stellt dies kein Problem dar. Bei Kunststoffen bzw. faserverstärkten Kunststoffen ist jedoch darauf zu achten, dass die einzelnen Komponenten vakuumgeeignet sind.

4.3 Zusammenfassung der Strukturanforderungen

In nachfolgender Tabelle 4.4 werden alle relevanten Anforderungen an die Struktur der Hyperloop-Fahrzeuge dargestellt.

Tabelle 4.4: Zusammenfassung der Strukturanforderungen.

Spezifikation	Wert	Einheit
Gesamtgewicht	15000	[kg]
Strukturgewicht	3100	[kg]
Gewicht Passagiere und Gepäck	2800	[kg]
Max. Beschleunigung in pos. X- Richtung	1 g	[m/s ²]
Max. Beschleunigung in Y- Richtung	0,5 g	[m/s ²]
Max. Beschleunigung in neg. X- Richtung	1,15 g	[m/s ²]
Fahrzeuggeschwindigkeit	1220	[km/h]
Eigenfrequenz der Struktur	100 – 280	[Hz]
Anzahl der Druckwechsel	365000	-
Atmosphäre	100 - 101325	[Pa]
Fahrleistung/ einfach	max. 1500 (560)	[km]
Fahrleistung/ Lebensdauer	205495000	[km]
Lebensdauer	100	[a]
Anzahl der Fahrzeuge	40	-
Kosten	1350000	[\$]
Kosten Struktur	245000	[\$]
Herstellungsverfahren	ökologisch und wirtschaftlich	-

Gesucht wird also eine möglichst leichte und steife Struktur. Je leichter und steifer die Struktur, desto weniger Leistung ist zum Schweben nötig und desto leichter lassen sich die Luftlager regeln. Zusätzlich sollten möglichst wenig Wartung bei sehr langer Lebensdauer ermöglicht werden und dabei alle anderen Randbedin-

gungen mit in die Auswahl einbezogen werden. Neben der Vakuumtauglichkeit ist ebenso auf die Nachhaltigkeit der Rohstoffe zu achten.

5 Strukturkonzepte

In diesem Kapitel werden zunächst die verschiedenen Werkstoffe für möglichen Hyperloop Strukturen erläutert. Darauf folgend werden die in der Automobil- und Flugzeugindustrie verwendeten Bauweisen näher betrachtet.

5.1 Werkstoffe

Im Anschluss an die Beschreibung der Werkstoffe werden an dieser Stelle die signifikanten Eigenschaften zusammengefasst und mit Hilfe von Wöhlerlinien in Bezug zur Dauerfestigkeit gebracht. Das Gewicht für die fertige Struktur wird näherungsweise ermittelt. Dadurch können die Vergleichskosten für die Druckkabine in Abhängigkeit vom Werkstoff ermittelt werden.

5.1.1 Stahl

Stahl ist der am meisten genutzte Werkstoff im Karosseriebau. In den Achtzigerjahren wurde fast die gesamte Struktur von Automobilen aus Qualitätsstahl ST14 gefertigt [14]. Im Flugzeugbau wurde neben Stahl und Aluminium auch Holz verwendet.

Auf Grund der jahrelangen Erfahrungen mit Stahl, hat sich dieser auch in den modernsten Fertigungsmethoden etabliert und wird heute vor allem in der Großserienfertigung eingesetzt. Mittlerweile gibt es bei den Stählen eine Vielzahl an Variationen. Diese reichen vom einfachen Baustahl S235 bis hin zu hochlegierten martensitischen Stählen. Eine Auswahl von Stählen in Bezug auf deren Festigkeit ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

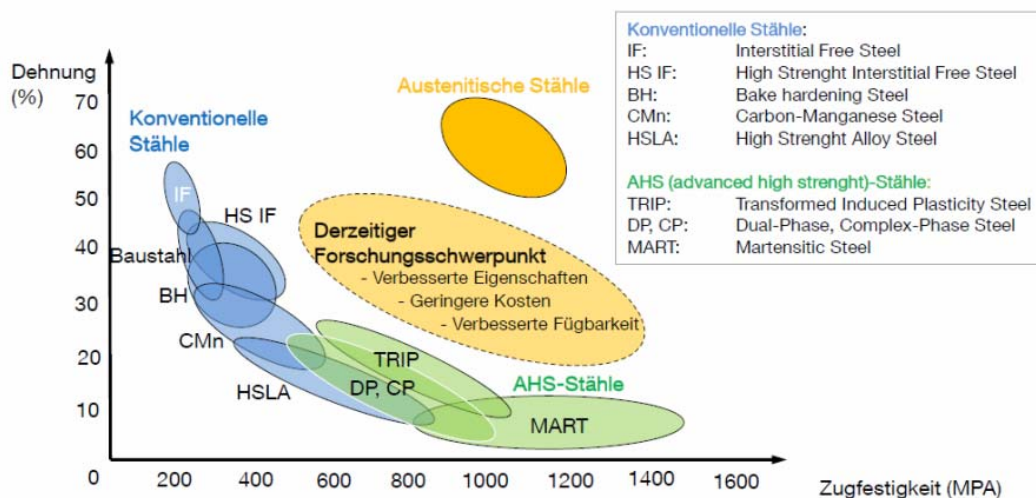


Abbildung 5.1: Dehnung/ Zugfestigkeit bei Stählen. [15]

Stahl gilt mit einer Dichte von $7,8 \text{ kg/dm}^3$ als vergleichsweise schwerer Werkstoff, allerdings wurden in den letzten Jahren zur Reduzierung des Strukturgewichts und wegen des Wettbewerbs mit anderen Leichtbauwerkstoffen immer bessere Stahlsorten entwickelt. Bei kaltgewalzten Blechen haben Stähle eine Festigkeit von 120 MPa (bei Tiefziehsorten) und steigen bis zu einer Festigkeit von 420 MPa (bei mikrolegierten Sorten). Warmgewalzte Stähle erreichen bereits jetzt Zugfestigkeiten im Bereich von 1200 MPa. Eine weitere Gruppe der Stähle bilden die sog. „Bake Hardening Stähle“. Sie zeichnen sich durch eine besonders gute Umformbarkeit im weichen Zustand aus und gewinnen in Verbindung mit einer Wärmebehandlung an Festigkeit. Diese Eigenschaft macht sie besonders attraktiv für den Bau von Außenhüllen im Automobilbereich. Dazu werden die Stähle im weichen Zustand in Form gepresst und erfahren beim Härten der Lackierung (mit einer Wärmebehandlung) eine weitere Festigkeitssteigerung. Bei IF-Stählen oder Y-Stählen ist die Kaltverfestigung, vor allem bei kaltumgeformten Geometrien, deutlich größer als die der Bake Hardening. Die letzte Gruppe bilden die so genannten Dualphasen-Stähle, mit Zugfestigkeiten ab 270 MPa bis etwa 900 MPa. Diese Stähle haben ebenfalls einen bake hardening-Effekt, dieser bewirkt allerdings erst bei sehr hohen Umformraten eine Festigkeitssteigerung. [14]

Gerade im Formenbau und in der Großserie ist man auf Simulationstools in der Prozessplanung angewiesen. Da Stahl als einer der am meisten erforschten Werkstoffe im Maschinenbau gilt, bietet er sich in diesem Bereich besonders an. Mit etwa 3 €/kg Karosseriegewicht zählt Stahl zu den günstigsten Werkstoffen. [16]

Berechnung

Um einen vergleichbaren Wert für die Kosten einer Kabine zu erhalten, werden im Folgenden für alle hier betrachteten Materialien „Testkörper“ berechnet. Sie haben die gleichen Innenabmessungen und die Form eines Druckbehälters. Die genauen Abmessungen können der jeweiligen Tabelle entnommen werden.

Tabelle 5.1: Eigenschaften eines DC 04 Stahls für die Außenhaut [17].

Eigenschaft	Wert
R_m	270-350 N/mm ²
$R_{p0,2}$	140-210 N/mm ²

Zunächst wird die Wandstärke des Druckbehälters ermittelt. Dazu ist in Abbildung 5.2 der Zusammenhang zwischen Spannung und Innendruck für verschiedene Wandstärken aufgetragen.

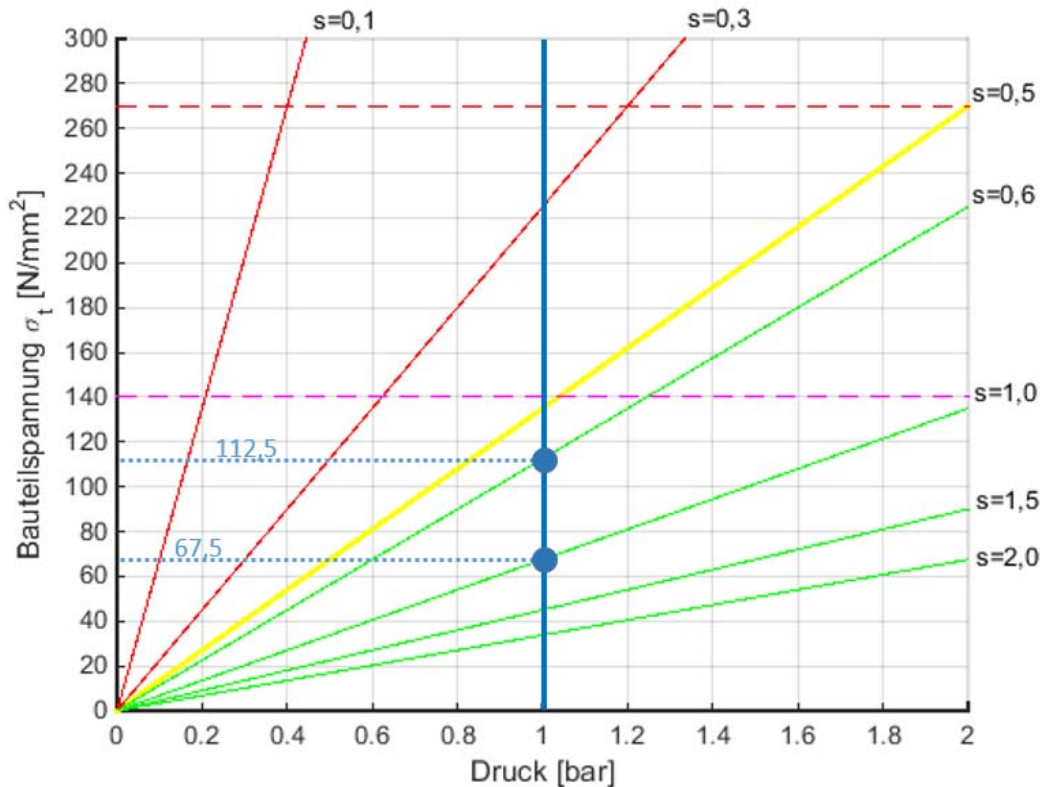


Abbildung 5.2: Bauteilspannungen in Abhängigkeit von der Blechstärke in mm.

Mit einer Stärke von 0,5 mm hält das Blech dem Druck von 1 bar stand. Mit einer konservativen Auslegung, wird hier mit der Stärke von 0,6 mm weitergerechnet, um die Spannung im Bauteil und die dazugehörige Sicherheit zu berechnen. Da eine lange Lebensdauer gefordert ist, wird eine Sicherheit von 2 verlangt.

$$\sigma_v = \frac{p d_m}{2 s} = \frac{0,1 \frac{N}{mm^2} * 1350 \text{ mm}}{2 * 0,6 \text{ mm}} = 112,5 \frac{N}{mm^2} \quad (4.3)$$

Damit ergeben sich die Sicherheiten für Dehnen und Bersten aus folgenden Formeln:

$$S_{Dehn} = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_v} = 1,24 \quad (5.1)$$

$$S_{Berst} = \frac{R_m}{\sigma_v} = 2,4 \quad (5.2)$$

Da für die Ermüdung S_{Dehn} mit 1,24 nicht ausreicht, wird die Wandstärke an dieser Stelle auf $s = 1 \text{ mm}$ erhöht. Daraus ergeben sich bei den Sicherheiten die Werte $S_{Dehn} = 2,07$ und $S_{Berst} = 4$.

Die Versagensdrücke sind entsprechend der umgestellten Kesselformel $p_{dehn} = 2,07 \text{ bar}$ und $p_{berst} = 4 \text{ bar}$. Die Vergleichsspannung beträgt $67,5 \text{ N/mm}^2$.

Mit Hilfe der spannungsgeregelten Wöhlerkurve des Stahls DC 04, mit einem R-Wert von -1, können nun die Lastspielzahl und der Betriebsbereich ermittelt werden. Abbildung 5.3 zeigt die Wöhlerkurve für das Material.

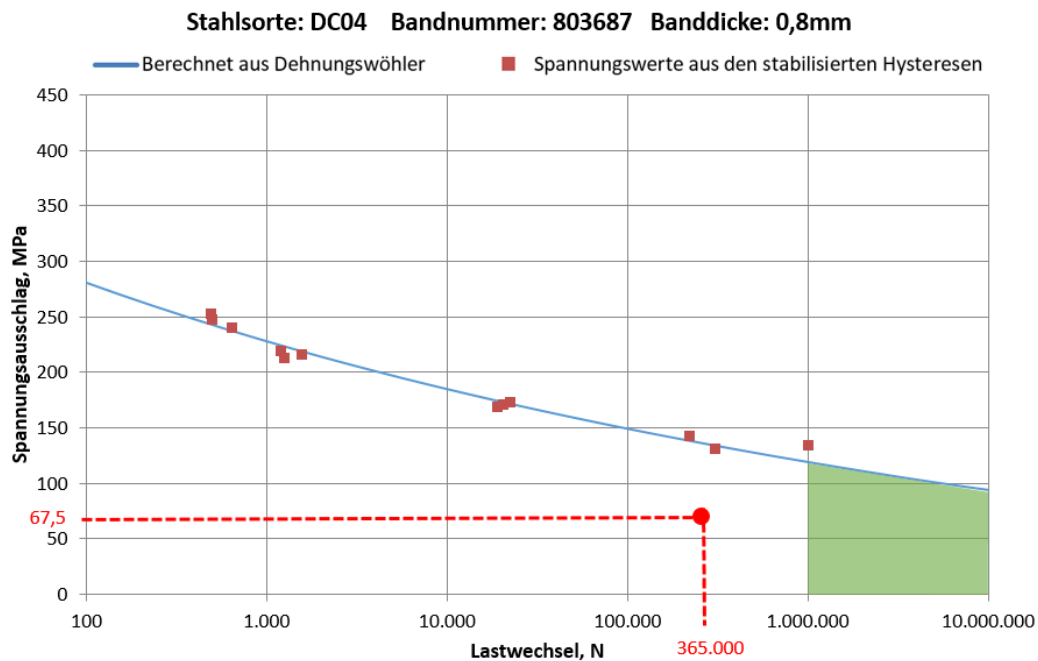


Abbildung 5.3: Wöhlerlinie DC04 [11].

Der dauerhafteste Bereich des Stahls (ab ca. $N_D=10^6$) geht bis etwa 120 N/mm^2 . Das bedeutet, dass der betrachtete Fall mit der vorliegenden Spannung von $67,5 \text{ N/mm}^2$ dauerhaft ist. Ein Betrieb über die geforderten 100 Jahre ist bei dem Druckbehälter realisierbar. Bei den geforderten 365.000 Lastspielen ist eine Bauteilspannung von über 120 N/mm^2 möglich.

Um die Kosten für die Struktur zu ermitteln, ist in CatiaV5R19 der Testkörper modelliert und das Gewicht mit Hilfe des Programms erfasst worden. Die gesamten Parameter des Testkörpers sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst. Die Kesselform ähnelt dem Körper einer Hyperloopkapsel. Da es sich um eine Gewichtsabschätzung handelt, ist die Länge des Modells nicht bedeutend. Das Gewicht wird linear mit der Länge für alle Werkstoffe hochskaliert.

Genauso wie im Flugzeugbau, werden Spanten und Stringer vorgesehen, die Lasten aufnehmen und verteilen können. Eine einfache Version der Spanten und Stringer ist in das CAD-Modell integriert und wird in der Gewichtsrechnung miteinbezogen. Anzumerken ist, dass diese Versteifungsstruktur für alle Testkörper gleich bleibt, lediglich der Werkstoff wird geändert. Abbildung 5.4 zeigt den Schnitt des Testkörpers entlang der Längsachse.

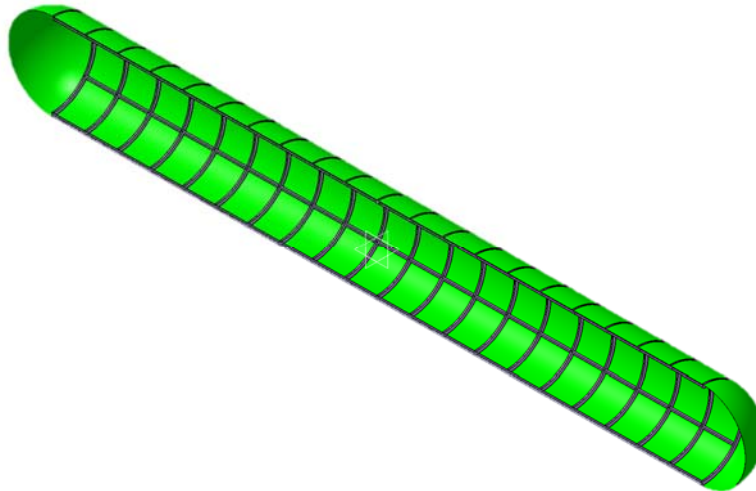


Abbildung 5.4: CAD-Schnitt durch den Testkörper.

Tabelle 5.2: Konstruktionsparameter des Testkörpers.

Größe	Wert [mm]
Durchmesser	1350
Länge	10000
Wandstärke	variabel
Anzahl Spanten	21
Anzahl Stringer	6
Breite x Tiefe der Spanten	20 x 50
Breite x Tiefe der Stringer	20 x 50

Mit einem Gewicht von 1364,8 kg und einem Preis von 3 €/kg ergibt sich ein Vergleichspreis von 4094,4 € für die Hyperloop Druckkapsel mit Stahl als Basiswerkstoff.

5.1.2 Aluminiumlegierungen

Aluminiumlegierungen eignen sich wegen ihrer Dichte von $2,7 \text{ g/cm}^3$ ebenfalls für Leichtbaustrukturen. Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit gepaart mit guten Gießigenschaften wird Aluminium nicht nur als Blech, sondern auch als Werkstoff für integrale Gussbauteile im Flugzeugbau sowie in der Automobilindustrie bevorzugt eingesetzt. Während unlegiertes Aluminium keine nennenswerte Festigkeit besitzt, ist es möglich, diese durch das Hinzulegieren der Elemente Mangan oder Magnesium erheblich zu steigern. Diese Legierungen werden auch naturhart genannt. Der einzige Nachteil ist das Bilden von so genannten Fließfiguren. Dieses Phänomen ist abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit und wird auch als Portevin-

Le-Chatelier-Effekt oder dynamische Reckalterung bezeichnet. Mit Hilfe von Silizium in der AlMg-Legierung ist es möglich, diese Reckalterung zu unterbinden. [18] Dennoch tendieren Aluminiumlegierungen vor allem beim Tiefziehen zur Rissbildung. Aus diesem Grund sind eine genaue Planung der Werkzeuge und eine möglichst exakte Simulation erforderlich.

Aluminium, erhältlich als Knet- und Gusslegierungen, eignet sich sehr gut zur plastischen Umformung. Neben der guten Verarbeitbarkeit im warmen Zustand ist Aluminium zur spanenden Verarbeitung im ausgekühlten Zustand geeignet.

Mit einem Preis von ca. 8 €/kg fertige Struktur ist Aluminium im Vergleich zu anderen Materialien günstig. [16] Jedoch sind die Werkzeuge und die Auslegung der Werkzeuge teuer und müssen bei der Wahl des Werkstoffs mit berücksichtigt werden. Aluminium bildet an der Luft eine Oxidschicht, die das fertige Bauteil vor Korrosion und weiteren Umwelteinflüssen schützt.

Der Punkt Recycling ist bei Aluminium besonders wichtig. Die Gewinnung des Rohaluminiums ist besonders energieaufwändig und teuer. Das Verarbeiten und Wiederaufbereiten von bereits gewonnenem Aluminium ist aber signifikant weniger energieaufwändig und lohnt sich daher besonders. [18]

Aluminium wird im Flugzeugbau für die Struktur der Druckkabine verwendet. Deshalb kann Aluminium auch für den Hyperloop als ein relevanter Werkstoff in Betracht gezogen werden. Im Folgenden werden die Berechnungen der Kesselgleichung und die daraus resultierenden Ergebnisse auf die in **Bild 5.5** dargestellten Aluminiumlegierungen angewandt, um das Potenzial für den Druckkörper zu untersuchen.

Berechnung

Analog zur Auslegung des Stahl-Testkörpers wird an dieser Stelle, mit gleicher Vorgehensweise derselbe Körper aus Aluminium ausgelegt. Die Daten der Aluminiumlegierung können **Tabelle 5.3** entnommen werden.

Tabelle 5.3: Eigenschaften eines AlMg3,5Mn für die Außenhaut [19].

Eigenschaft	Wert
R_m	280-320 N/mm ²
$R_{p0,2}$	230-280 N/mm ²

Zuerst wird eine Wandstärke des Druckbehälters ermittelt. Dazu ist in Abbildung 5.5 der Zusammenhang zwischen Spannung und Innendruck für verschiedene Wandstärken aufgetragen.

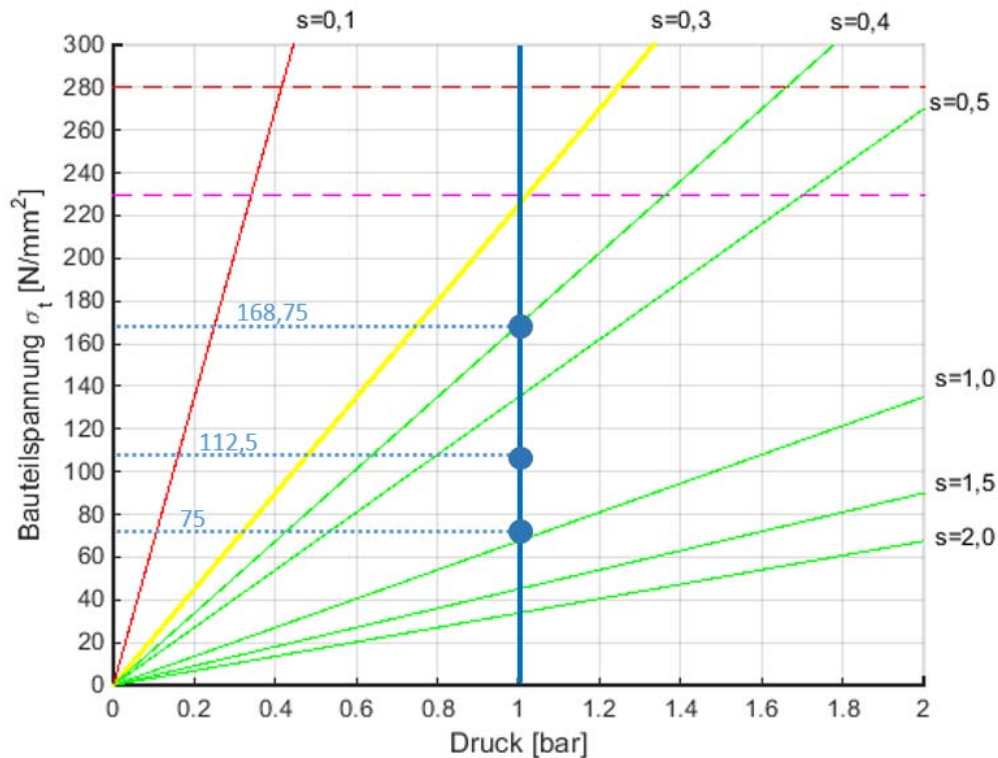


Abbildung 5.5: Bauteilspannungen in Abhängigkeit von der Blechstärke in mm.

Da bei dieser Aluminiumlegierung R_m und $R_{p0,2}$ höher sind als beim DC 04 kann laut Diagramm bereits eine Stärke von 0,4 mm ausreichend sein. Das ergibt eine Spannung von:

$$\sigma_v = \frac{p d_m}{2 s} = \frac{0,1 \frac{N}{mm^2} * 1350 \text{ mm}}{2 * 0,4 \text{ mm}} = 168,75 \frac{N}{mm^2} \quad (4.3)$$

Damit ergeben sich die Sicherheiten für Dehnen und Bersten aus folgenden Formeln:

$$S_{Dehn} = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_v} = 1,36 \quad (5.1)$$

$$S_{Berst} = \frac{R_m}{\sigma_v} = 1,66 \quad (5.2)$$

Bei Ermüdung reicht S_{Dehn} mit 1,36 nicht aus, deshalb wird auch beim Aluminium die Wandstärke an dieser Stelle auf $s = 0,6$ mm erhöht. Daraus ergeben sich bei den Sicherheiten die Werte $S_{Dehn} = 2,04$ und $S_{Berst} = 2,48$. Das kleine Delta zwi-

schen den Sicherheiten liegt an der Charakteristik des Aluminiums, da schon R_m und $R_{p0,2}$ nicht weit auseinanderliegen.

Die Versagensdrücke liegen entsprechend der umgestellten Kesselformel bei $p_{dehn} = 2,04$ bar und $p_{Berst} = 2,48$ bar. Die Vergleichsspannung beträgt $112,5 \text{ N/mm}^2$.

Die Wöhlerlinie Abbildung 5.6 wird zur Ermittlung der Dauerfestigkeit herangezogen. Um besser vergleichen zu können, wird auch hier die Kurve bei $R = -1$ verwendet.

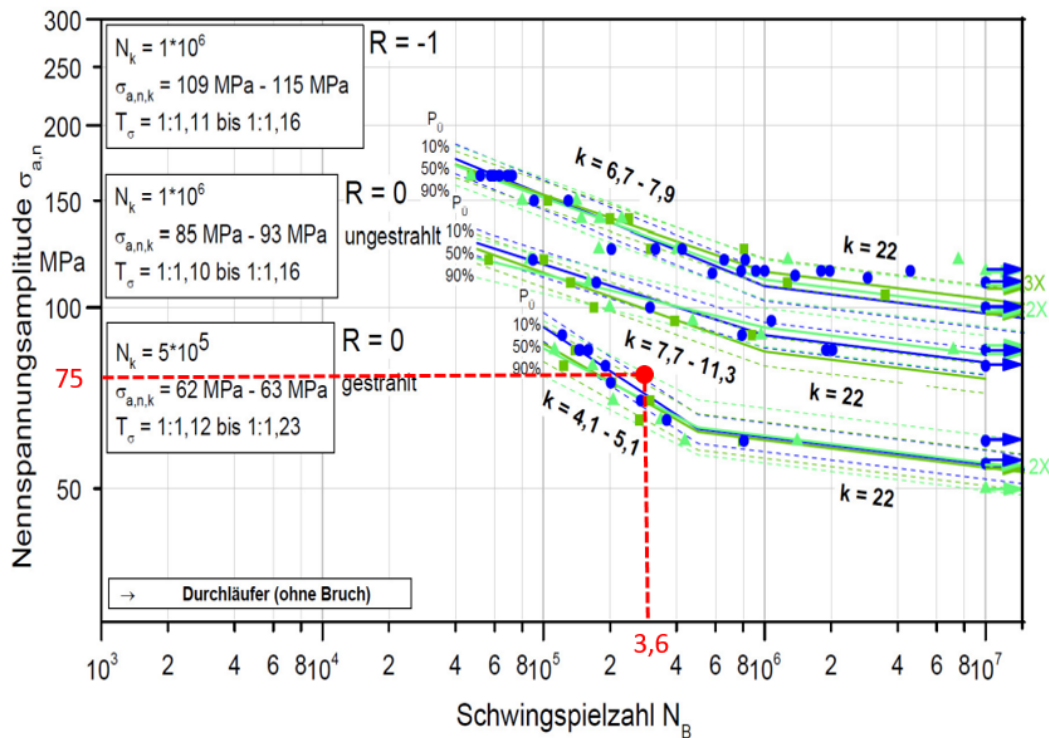


Abbildung 5.6: Wöhlerlinie AIMg3,5Mn [20].

Bei dem hier betrachteten AIMg3,5Mn geht der dauerfeste Bereich bis etwa 110 N/mm^2 . Für die Spannungen von $112,5 \text{ N/mm}^2$, welche ermittelt wurden, ist das nicht ausreichend. Aus diesem Grund muss die Wandstärke erneut erhöht werden. Bei einer Erhöhung der Wandstärke auf $s = 0,9 \text{ mm}$ ergibt sich eine maximale Bauteilspannung von 75 N/mm^2 (rote Linien). Diese Spannung ist klein genug, um den dauerfesten Bereich zu erreichen.

Eine Aluminiumhülle mit $0,9 \text{ mm}$ hält theoretisch die Spannungen aus. Jedoch ergibt sich aus Erfahrungswerten vom Prototypenbau des Hyperloops, dass die Blechstärke, aufgrund der geringeren Steifigkeit des Aluminiums gegenüber der des Stahls, auf $2,5 \text{ mm}$ angehoben werden muss. Dies erleichtert das Handling und die Verschraubungsmöglichkeiten an der Hülle.

Der Testkörper (Abbildung 5.4) wird für Aluminium angepasst und ein Gewicht von 663,8 kg ermittelt.

Mit dem ermittelten Gewicht und einem Preis von 8 €/kg ergibt sich ein Vergleichspreis von 5310,4 € für die Hyperloop Druckkapsel mit Aluminium als Basiswerkstoff.

5.1.3 Magnesiumlegierungen

Mit einer Dichte von $1,7 \text{ g/cm}^3$ ist Magnesium das leichteste der betrachteten Strukturmetalle. Magnesium hat in Vergleich zu Stahl oder Aluminium eine geringere Festigkeit und Härte und ein kleineres E-Modul von etwa 45 GPa. Bei einer geeigneten Konstruktion sind dennoch Gewichtseinsparungen von bis zu 50% verglichen mit Stahl möglich. [18]

Magnesium und Magnesiumlegierungen sind grundsätzlich als Guss- und Knetlegierungen erhältlich. Die Hauptanwendungsgebiete sind aber mit ca. 80% die Gusslegierungen. Grund dafür ist die schlechte Verarbeitbarkeit von Magnesium in der spanenden Fertigung. [18]

Neben dem Vorteil der Gewichtsreduktion haben Magnesiumlegierungen einige Nachteile, die sie für große Karosserieteile ausschließen. Wegen der hexagonalen Molekularstruktur ist die Umformbarkeit sehr gering. Außerdem neigt Magnesium sehr zur Korrosion, so dass Beschichtungen oder aufwändige Nachbehandlungen nötig sind. Ebenso ist Kontaktkorrosion mit Stahl unbedingt konstruktiv oder durch Materialsubstitution zu vermeiden. Wirtschaftlich betrachtet hat Magnesium zwar eine hohe Verfügbarkeit, ist aber dennoch auf dem Markt sehr teuer und erschwert dadurch den gewinnbringenden Einsatz als Strukturmaterial. [18], [14]

Abbildung 5.7 zeigt ein Diagramm zur Gegenüberstellung der verschiedenen Strukturmetalle. Magnesium ordnet sich hier im unteren Bereich der Festigkeit ein, auch die Duktilität fällt geringer aus als bei den meisten Stahl- oder Aluminiumsorten.

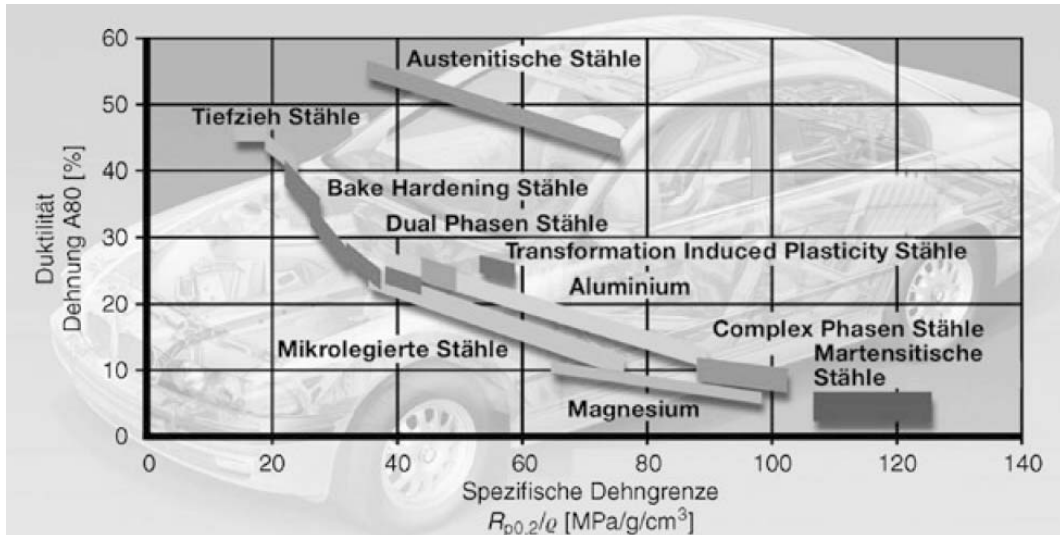


Abbildung 5.7: Duktilität über Dehngrenze für unterschiedliche Materialien im Vergleich zu Magnesium. [14]

5.1.4 Kunststoffe

Kunststoffe gewinnen in der Industrie immer mehr an Bedeutung. Durch die Entwicklung von neuen Kunststoffen können deren mechanische, thermische und chemische Eigenschaften gezielt an den vorgesehenen Anwendungsbereich angepasst werden. Unter anderem werden Bauteile aus Metall mit Kunststoffen substituiert, wenn Sie vergleichbare oder bessere Eigenschaften in den Punkten Kosten, Gewicht, Integration, Bruchverhalten oder Korrosion vorweisen.

Generell werden Kunststoffe in drei Bereiche eingeteilt: Die Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere. Diese unterscheiden sich anhand des Vernetzungsgrades. Abbildung 5.8 zeigt deren Vernetzungsgrad schematisch.

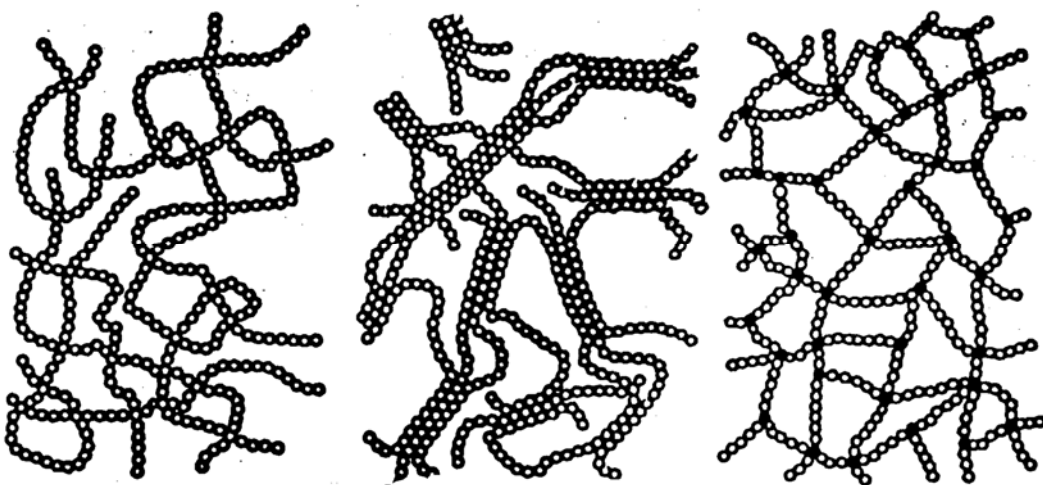


Abbildung 5.8: Vernetzungsgrad von Thermoplast, Elastomer und Duroplast. [21]

Thermoplaste

Die Thermoplaste bestehen meist aus langen Molekülketten, sind nicht- bis teilkristallin und unvernetzt. Oberhalb der Glasübergangstemperatur weisen Sie eine geringe Festigkeit und hohe Duktilität auf, darunter sind sie weniger duktil. Allgemein weisen teilkristalline Thermoplaste eine höhere Festigkeit auf als amorphe. Durch ihre hervorragende Schmelzbarkeit eignen sie sich besonders zur Warmumformung und zum Recycling. [22], [14]

Thermoplaste werden im Automobilbau unter anderem für Außenverkleidungen und Stoßfänger verwendet.

Duroplaste

Duroplaste haben einen hohen Vernetzungsgrad und sind nicht kristallin. Sie sind aus zweidimensionalen Gittern oder dreidimensionalen Raumstrukturen zusammengesetzt. Dadurch erreichen sie hohe Festigkeitswerte, verhalten sich aber meist spröde. Nach der Formgebung härten diese Kunststoffe aus und sind weder schmelzbar noch schweißgeeignet und somit auch nicht gut rezyklierbar. [22], [14]

Bei den Duroplasten gibt es eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten, hauptsächlich wegen ihrer großen Formfreiheit, Funktionsintegrität und Wirtschaftlichkeit schon bei niedrigen Stückzahlen. Mit dem heutigen Stand der Technik ist es möglich, bei vergleichbarem Gewicht, die Funktionalität eines Metallbauteils zu erreichen.

Elastomere

Elastomere sind schwach vernetzte Makromoleküle. Als bekanntestes Beispiel dieser Gruppe zählt Gummi oder synthetischer Kautschuk. Der schwach vernetzte Aufbau erlaubt es dem Material große Verformungen ohne bleibende Schäden zu überstehen. [22]

Im Fahrzeugbau werden Elastomere wegen ihren guten Dämpfungseigenschaften bei der Schwingungsdämpfung oder Bauteilentkopplung eingesetzt. Aufgrund ihrer hohen Elastizität sind sie als Strukturwerkstoff nicht geeignet.

Abbildung 5.9 zeigt eine Veranschaulichung von verschiedenen Einsatzgebieten der Kunststoffe in einem Automobil.



Abbildung 5.9: Kunststoffe im Automobilbau. [23]

Wegen der geringen Festigkeiten und, der geringen thermischen Beständigkeit, sowie der Gefahr des Ausgasens von einigen Kunststoffen sind diese für den Bau der Druckkapsel nicht empfehlenswert. Für strukturelle Anwendungen im Inneren des bedruckten Körpers lassen sie sich ohne Probleme verwenden.

5.1.5 Faserverstärkte Kunststoffe

Faserverstärkte Kunststoffe bestehen immer aus zwei Komponenten, einer Faser und einer Matrix. Zweck der Matrix ist es die Faser an ihrem Ort zu stabilisieren und sie vor Umwelteinflüssen zu schützen. [24]

Faserverstärkter Kunststoff erreicht extrem hohe Festigkeiten und Steifigkeiten. Je nachdem welche Eigenschaft gebraucht wird, kann man zwischen den speziellen Fasern wählen oder das benötigte Gewebe mischen. Wegen des hervorragenden Dichte/Festigkeitsverhältnisses, werden im Strukturbereich hauptsächlich Carbonfasern eingesetzt. In Abbildung 5.10 sind verschiedene Fasern (Kohlefaser) und deren Festigkeiten dargestellt.

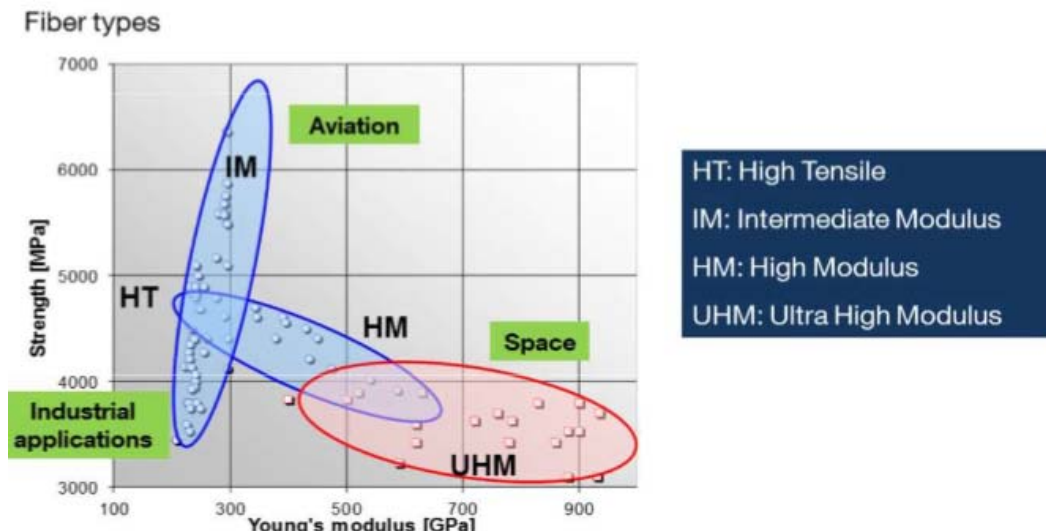


Abbildung 5.10: Carbonfasern. [24]

Müssen Bauteile vor durchschlagenden Flammen geschützt werden, werden anstelle der Carbonfasern Aramidfasern verwendet. Für Verkleidungsteile und gering beanspruchte Teile kann auf Glasfaser zurückgegriffen werden.

Bei der Verwendung von faserverstärkten Kunststoffteilen, muss schon bei der Konstruktion auf Besonderheiten im Zusammenhang mit Fasern geachtet werden. Grundsätzlich sind Bauteile aus Faser verstärkten Kunststoffen anisotrop, d.h. ihre Eigenschaften sind richtungsabhängig. Grund dafür ist, dass die Fasern in Längsrichtung im Vergleich zur Matrix, welche die Kräfte quer zur Faser aufnimmt und verteilt, wesentlich belastungsfähiger sind. In Abbildung 5.11 sind zwei Zugbelastungen zur Veranschaulichung dargestellt.

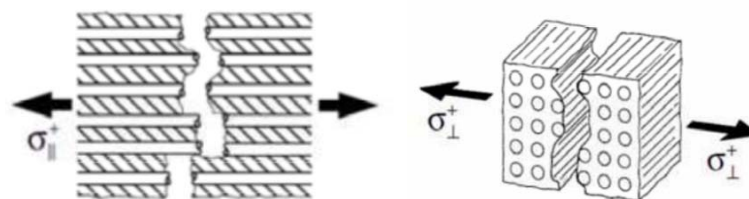


Abbildung 5.11: Rechts Zugbelastung auf eine Probe längs zur Faser. Links Zugbelastung quer zur Faser. [24]

Ein Bauteil besteht in der Regel nicht aus einer Lage Fasergewebe, sondern wird aus mehreren sog. Plys hergestellt. Durch einen geeigneten Lagenaufbau ist es so möglich, die Richtungsabhängigkeit etwas zu verbessern und quasi isotrope Lamine zu generieren. Diese quasi isotropen Gelege haben zumindest theoretisch richtungsunabhängige Eigenschaften. In Abbildung 5.12 sind zwei verschiedene Lamine und deren Eigenschaftsrichtungen dargestellt.

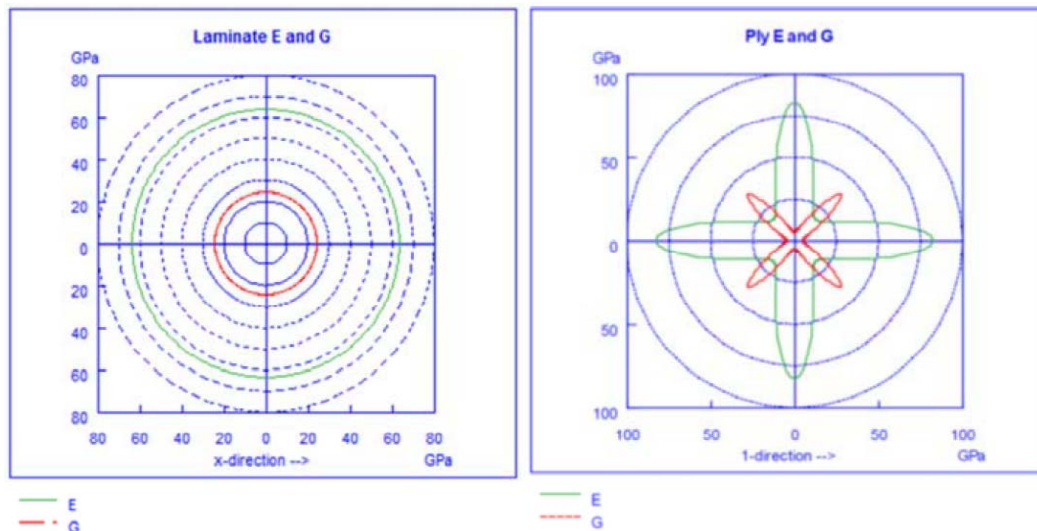


Abbildung 5.12: Links quasiisotroper Lagenaufbau. Rechts anisotroper Lagenaufbau. [24]

Ein Beispiel für einen quasiisotropen Laminataufbau sind acht „unidirektionale“ Lagen in der Anordnung $[+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_{\text{sym}}$. Ein solcher Laminataufbau wird häufig in der Luftfahrtindustrie eingesetzt, um allen auftretenden Lasten mit annähernd gleicher Festigkeit entgegenzustehen.

Gefertigt werden CFK-Komponenten je nach Komplexitätsgrad von Hand. Die aufwändige Fertigung und die teure Herstellung der Faser treibt den Preis der fertigen CFK Struktur auf etwa 50€/kg. Bis 2020 wird ein Preis von etwa 30€/kg prognostiziert [16]. Günstig an der Fertigung von faserverstärkten Kunststoffen ist der Werkzeugbau. Im Vergleich zu einem Presswerkzeug, welches mit Entwicklungskosten mehrere Millionen Euro kostet, kommt ein Werkzeug für CFK-Teile mit ein paar zehntausend aus und kann für etwa 150 Bauteile verwendet werden. [25]

Ein weiteres, sehr spezielles Kapitel bei CFK Strukturen ist die Ermittlung von Schäden, das Bestimmen von Versagenskriterien und die Auslegung auf Dauerfestigkeit. Bauteile aus Kohlefaser zeigen praktisch keine Ermüdungserscheinungen. Im Zugversuch ist im makroskopischen Bereich fast keine Dehnung bis kurz vor dem Bruch sichtbar. Diese Eigenschaft macht es sehr schwierig, das Versagen unter Zugspannungen im Vorhinein zu bestimmen. Deshalb werden bei der Auslegung besonders kritischer Teile spezielle Proben gefertigt und diese bis zum tatsächlichen Versagen getestet. Die experimentell ermittelten Werte zusammen mit einer konservativen Auslegung, genügen in der Praxis als Kriterium für die Dauerfestigkeit. Ausgelegt werden die Bauteile auf Dehnung. Die Hauptdehnung soll dabei, unabhängig vom Lagenaufbau, den Wert von 0,2 % nicht überschreiten. [26]

Eine weitere Auslegungsart ist ähnlich der Auslegung von metallischen Körpern, die Verwendung von Wöhlerlinien. Diese können aber nicht einfach für die Fasern aufgenommen und auf ein Bauteil übertragen werden, da wie oben angesprochen, nicht nur die Faser, sondern auch die Matrix Kräfte überträgt und dabei deutlich schlechtere Eigenschaften bei der Festigkeit aufweist. Wöhlerkurven müssten also für die Auslegung für jedes einzelne Laminat neu aufgenommen werden. Der Aufwand einer solchen Auslegung ist im Moment in der Industrie noch nicht standardisiert, da diese mit enormen Kosten und viel Zeit verbunden ist. Mit steigender Forderung nach immer leichteren Strukturen ist es jedoch nur eine Frage der Zeit, bis sich der Aufwand lohnt und die oben beschriebene konservative Auslegung überholt wird. [26]

Berechnung

Die Berechnung der CFK Lagenstärke und der Kosten für das Material wird auch hier nicht über Wöhlerkurven bestimmt. Es wird die Dehnung des Bauteils betrachtet. Als Grenze gilt die 0,2 % Dehnung.

Durch die sehr hohen Festigkeiten von CFK ist es weniger sinnvoll, das gleiche Diagramm wie bei Stahl und Alu zu verwenden. Vielmehr Aufschluss gibt hier der Lagenaufbau des Laminats. Ein symmetrisches Laminat besteht aus 8 Lagen CFK und wird meist mit einer Stärke von etwa 0,2 mm (200g/m² Gewebe) pro Lage verarbeitet. Bei 8 Lagen ergibt das eine minimale Wandstärke von 1,6 mm Kohlefasern.

Im vorliegenden Fall kann die Spannung durch die Kesselformel, mit der ermittelten Dicke $s = 1,6$ mm berechnet werden.

$$\sigma_v = \frac{0,1 \frac{N}{mm^2} * 1350 \text{ m}}{2 * 1,6 \text{ mm}} = 42,19 \frac{N}{mm^2} \quad (4.3)$$

Die Formel für die Dehnsteifigkeit mit Bezug auf die Spannung lautet:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_v}{E} \quad (5.3)$$

Mit dem E-Modul von etwa 50.000 MPa ergibt sich eingesetzt in Gleichung 5.3 eine Dehnung von $8,44 \times 10^{-4}$. Dieser Wert ist deutlich unter der 0,2 % Dehngrenze. Daraus folgt, dass die oben berechnete Materialstärke auf jeden Fall auch die Dauerfestigkeitskriterien in der Industrie erfüllt.

Daraus folgt für das Gewicht des Testkörpers $m = 364,8$ kg und für die Vergleichskosten ein Preis von 18.240 € (2016) oder 10.944 € (2020).

5.2 Strukturbauweisen

Neben dem Material ist die Wahl des Fertigungsverfahrens bzw. der Strukturbauweise im Hinblick auf Stückzahl, Kosten und Wirtschaftlichkeit von großer Bedeutung. Folgend sind diverse Anforderungen aufgelistet, die an die Struktur eines Fahrzeugs gestellt werden:

- Hohe Torsions- und Biegesteifigkeit.
- Leichtbau
- Automatisierungsgrad
- Produktionskosten
- Stückzahl
- Sicherheit
- Recycling
- etc.

In dem folgenden Unterkapitel werden die gebräuchlichsten Bauweisen erklärt und deren Vor- und Nachteile aufgezeigt.

5.2.1 Schalenbauweise

Als die heute dominierende Strukturbauweise, zählt die Schalenbauweise. Diese zeichnet sich besonders durch ihre hohe Festigkeit sowie Steifigkeit aus [27]. Die Schalen bilden eine leichte und selbsttragende Struktur, die mit unterschiedlichsten Fügeprozessen zusammengefügt wird. Vorherrschender Werkstoff für diese Bauart ist Stahl. Ein hoher Automatisierungsgrad garantiert vor allem bei hoher Stückzahl geringe Herstellungskosten. Bedingt durch die hohen Werkzeugkosten für Press- und Umformwerkzeuge, die sich erst bei hohen Stückzahlen amortisieren, ist eine Variantenvielfalt nur sehr eingeschränkt möglich.

5.2.1.1 Mittragende Bauweise

Die mittragende Bauweise ist eine Sonderform der Schalenbauweise. Hier werden Kunststoffe eingesetzt, um weitere Gewichtsreduzierungen vor allem im Bereich der Bodenstruktur zu erreichen. Die mittragende Bodengruppe wird mit der Karoseriestructur verklebt oder verschraubt, siehe Abbildung 6.1. [10]

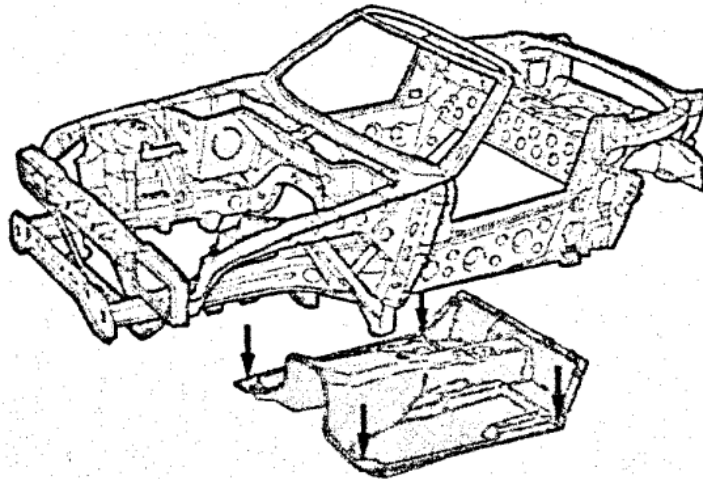


Abbildung 6.1: Mittragende Bauweise BMW Z1. [10, p. 18]

5.2.1.2 Spantenbauweise

Die Spantenbauweise zählt ebenfalls zu den Schalenbauweisen. Sie findet sich vor allem im Schiffs- und Flugzeugbau wieder. Die Quer- und Längsspanen übernehmen die tragende Funktion, die Außenhaut sorgt für eine aerodynamische Form und hat keine tragende Funktion. In der Luftfahrt wird für Spanten und die äußere Hülle oft Aluminium eingesetzt, um die ohnehin schon sehr gewichtsoptimierte Bauweise mit einer geschickten Materialkombination noch leichter zu machen. Die neuesten Flugzeuge, wie der A350X lightweight von Airbus, setzen beispielsweise bereits auf CFK als Spanten- bzw. Hüllen- Material. [28]

In Abbildung 6.2 zu erkennen sind sowohl die Längs- als auch die Querspanen aus CFK.

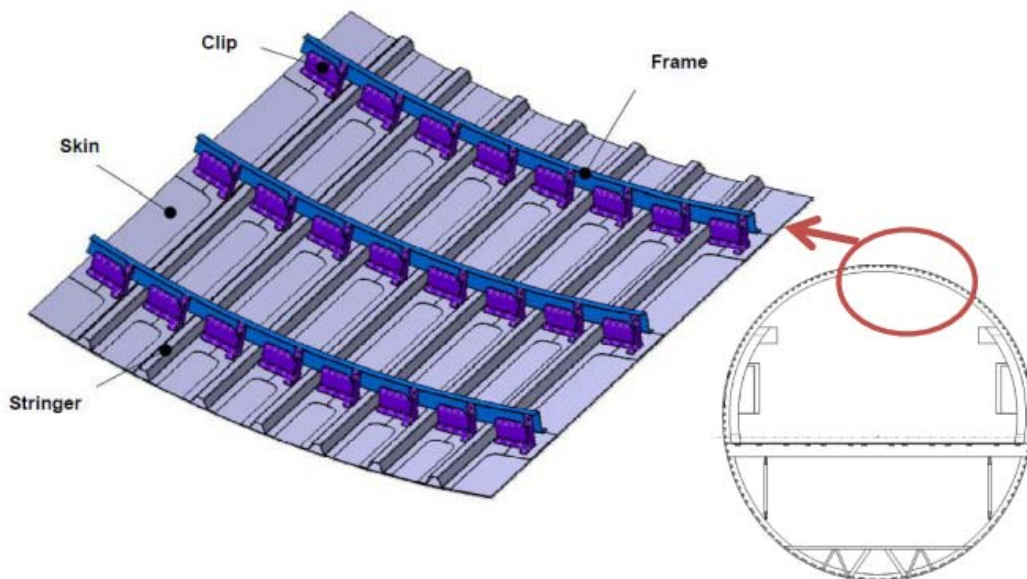


Abbildung 6.2: Detailsicht Seitenteil in Spantenbauweise. [28]

5.2.2 Hybridbauweise

Bei der Hybridbauweise werden genau zwei unterschiedliche Materialien verwendet. Als Beispiel dient die Karosserie der Mercedes C-Klasse, wie in Abbildung 6.3 abgebildet.

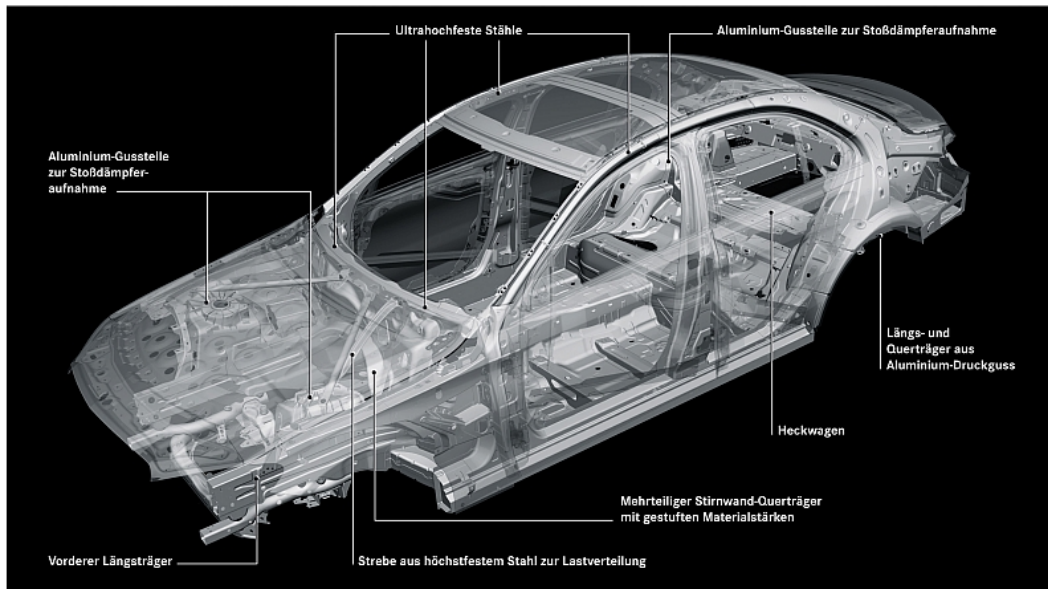


Abbildung 6.3: Mercedes-Benz C-Klasse Limousine (W205) 2013 – Stahl-Aluminium-Hybrid. [29]

Vorteile dieser Bauart sind unter anderem Gewichtsvorteile und die Möglichkeit, das Gewicht durch verschiedene Materialanordnung im Gesamtfahrzeug so zu verteilen, dass der Schwerpunkt an die gewünschte Stelle rückt.

Allerdings muss bei dieser Konstruktion darauf geachtet werden, Kontaktkorrosion zwischen Stahl und Aluminium zu vermeiden. Zu diesem Zweck sind spezielle Füge-techniken nötig, welche zum Teil aufwändig und/oder teuer sind. Je nach eingesetztem Material können auch die Fertigungskosten weiter ansteigen. [10]

5.2.3 Multimaterialbauweise

Die Multimaterialbauweise zeichnet sich durch eine gezielte Kombination von Materialien zur bestmöglichen Ausnutzung ihrer Eigenschaften aus. Ziel ist es, wie bei allen anderen Bauarten, das Gewicht zu reduzieren, die Steifigkeiten zu erhöhen und die Kosten gering zu halten. In der Luftfahrtindustrie, aber auch im Automobilbau werden dazu am häufigsten Stahl, Aluminium und Magnesium eingesetzt. Immer mehr kommen auch faserverstärkte Kunststoffe zum Einsatz und verringern das Gewicht, bei gleichzeitiger Steigerung der Festigkeit. [10]



Abbildung 6.4: Verwendung der verschiedenen Werkstoffe im PKW. [30]

Als Nachteil dieser vielen Werkstoffkombinationen stellt sich der Preis für die Materialvielfalt heraus. Ebenso ist die Fertigung, bedingt durch verschiedenste Materialien, sehr aufwändig und erfordert eventuell neue Fügetechniken. Ein deutlich höherer Aufwand bei der Verwertung der Fahrzeuge darf nicht unberücksichtigt bleiben. [10]

5.2.4 Space-frame und Gitterrohrrahmen

Meistens wird ein Space-frame aus Aluminium gefertigt. Die Strangpressprofile übernehmen hier die tragende Struktur und erlauben eine gute Verteilung der auftretenden Lasten, sowie die Konstruktion einer steifen Fahrgastzelle. Ein für ihren Space-frame bekanntes Unternehmen ist der deutsche Autobauer Audi. In manchen ihrer Derivate liegt der Anteil der Strangpressprofile bei 70% der Aluminium Komponenten [31]. Bleche zwischen den Profilen dienen im Space-frame als Schubfedern. Vorteile dieser Bauart bestehen aus der Gewichtsersparnis sowie den niedrigen Investitionskosten. Besonders gut gelingt die Versteifung der Karosserie mit den Strangpressprofilen. Durch ihre einteilige, schweißpunktfreie Ausführung sind sie steif und neigen weniger zu Schwingungen. Auch das Recycling ist besonders einfach, da meist nur ein Werkstoff, bevorzugt Aluminium zum Einsatz kommt.

Einziger Nachteil beim Space-frame ist die sinkende Rentabilität bei steigender Stückzahl, bedingt durch die Rohstoffkosten.

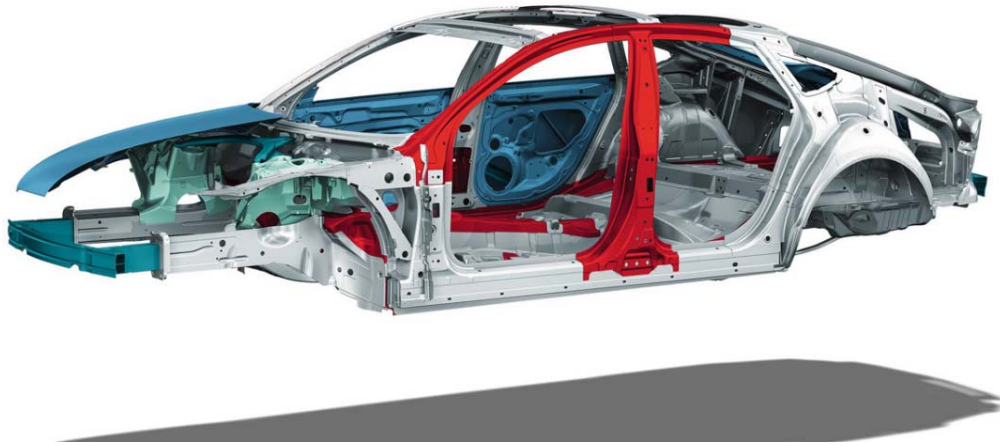


Abbildung 6.5: Audi Space-frame aus hochfestem Aluminium. [31]

Als Sonderform des Space-frames gilt der Gitterrohrrahmen. Er besteht aus Rohren, die an den Knotenpunkten zusammengeschweißt werden. Da die Stäbe alle Zug- und Druckkräfte, sowie die Biege- und Torsionsmomente aufnehmen und verteilen, ist es sinnvoll, immer Knoten aus drei Stäben zu bilden. Daraus ergibt sich ein Rahmen, der aus vielen Dreiecken zusammengesetzt ist, siehe Abbildung 6.6. Idealerweise werden externe Kräfte auch an solchen Knoten eingeleitet, um eine möglichst gute Verteilung der Lasten über den gesamten Rahmen zu gewährleisten.

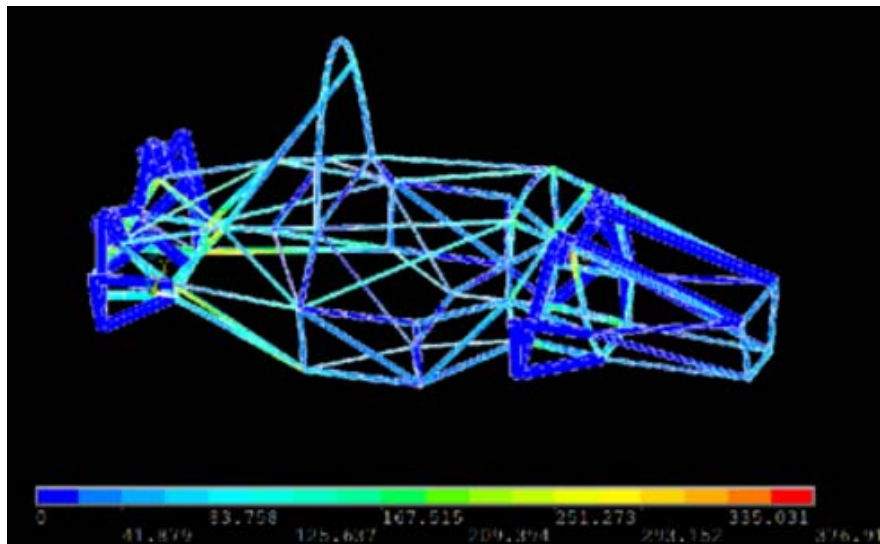


Abbildung 6.6: Gitterrohrrahmen des Formula Student-Teams der ETH Zürich. [32]

Durch das Einfügen von Blechen zwischen die Dreiecksstrukturen ist es möglich, die Torsionssteifigkeit noch weiter zu erhöhen.

Da der Rahmen geschweißt werden muss, ist die Fertigung nicht immer einfach und bedarf einer genauen Planung. Die Vielzahl an Schweißnähten fordert eine

besondere Beachtung von Verzug durch das Schweißen. Ebenso ist auf kurze Stäbe zu achten, um ein Knicken durch äußere Lasten zu vermeiden. [33]

5.2.5 Monocoque

Das Monocoque erlaubt einen hohen Grad der Integration und bildet daher die komplexeste Form der Strukturvarianten. Als Werkstoff bietet sich in den meisten Fällen faserverstärkter Kunststoff an. Durch die hohe Flexibilität des Werkstoffes sind höchst komplizierte Geometrien möglich, die ein großes Spektrum an Funktionsintegrität zulassen. Je nach Belastung, kann an bestimmten Stellen die Faser, das Gewebe oder die Gelegerichtung variiert und an den speziellen Lastfall angepasst werden. Mit sogenannten Tapes können die Lastpfade im Bauteil genau nachgefahen werden. Dies stellt eine effiziente Ressourcennutzung sicher, da das Material nur an der wirklich belasteten Stelle aufgedickt wird. In Abbildung 6.7 ist ein Voll-CFK-Monocoque zu sehen. [10]

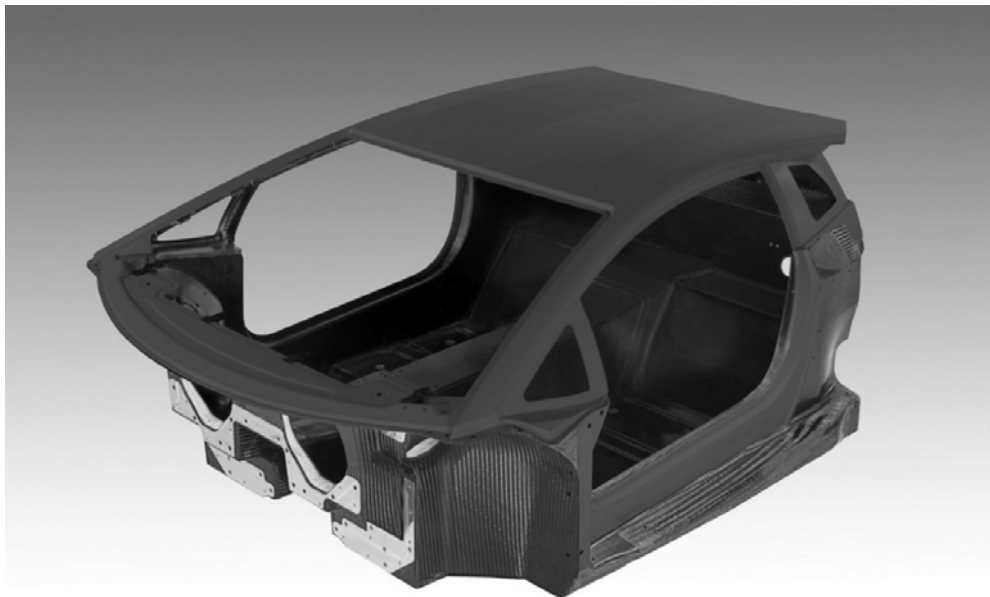


Abbildung 6.7: Lamborghini CFK Monocoque. [34]

Als Nachteile der Monocoque-Bauweise gelten besonders bei CFK die hohen Materialkosten, sowie die aufwendige Fertigung, welche meistens per Handarbeit ausgeführt werden muss [27]. Es wird zwar an automatisierten Fertigungsverfahren für CFK-Monocoques geforscht, allerdings ist es mit dem aktuellen Stand der Technik noch nicht möglich, ein gesamtes Monocoque wirtschaftlich rentabel automatisiert zu fertigen. Diese Bauweise eignet sich also am besten für geringe Stückzahlen und den Prototypenbau, da hier der Nutzen von Steifigkeit und Festigkeit den Aufwand rechtfertigt.

6 Hyperloop Struktur Konzept

Nachdem in den beiden vorherigen Kapiteln die verschiedenen Werkstoffe und Bauweisen für eine mögliche Struktur des Hyperloops erklärt wurden, folgt nun die begründete Auswahl einer möglichen Werkstoff-/Bauart Kombination für den Hyperloop.

6.1 Auswahl von Werkstoff und Bauart

Zunächst werden in Tabelle 7.1 die Ergebnisse aus dem Berechnungsteil der verschiedenen Materialien zusammengefasst.

Tabelle 7.1: Ergebnisse des Berechnungsteils.

Material	Stahl	Aluminium	CFK
Dichte [kg/m ³]	7850	2700	1800
Gewicht Hülle ideal [kg]	377,5	116,88	139,85
Gewicht gesamte Struktur [kg]	1364,8	663,8	364,8
Kosten [€/kg]	3	8	50 (30)
Kosten Hülle ideal [€]	1132,5	935,1	6922,5 (4153,5)
Kosten gesamte Struktur [€]	4094,4	5310,4	18240 (10944)

Aus den in Kapitel 5 beschriebenen Eigenschaften für die betrachteten Werkstoffe resultiert folgende Bewertungsmatrix (siehe Tabelle 7.3). In der Matrix werden lediglich die nachgerechneten Werkstoffe betrachtet. Die Gewichtung- und Bewertungspunkte sind in Tabelle 7.2 dargestellt.

Tabelle 7.2: Bedeutung der Gewichtungs- und Bewertungspunkte.

Gewichtung G	Bedeutung	Bewertungspunkt B	Bedeutung
0	Ignoriert	0	Unbefriedigend
1	Unwichtig	1	Gerade noch tragbar
2	Weniger wichtig	2	Ausreichend
3	Wichtig	3	Gut
4	Sehr wichtig	4	Sehr gut

Tabelle 7.3: Bewertungsmatrix der Werkstoffe.

Kategorien	Gewichtung	Stahl		Aluminium		Faserverstärkte Kunststoffe		Idealfall	
		B	B*G	B	B*G	B	B*G	B	B*G
Gewicht	4	2	8	3	12	4	16	4	16
Kosten	3	4	12	3	9	2	6	4	12
Verarbeitungsmöglichkeiten	2	4	8	4	8	3	6	4	8
Recycling	3	4	12	4	12	2	6	4	12
E-Modul	4	3	12	2	8	4	16	4	16
Zugfestigkeit	4	3	12	3	12	4	16	4	16
Anfälligkeit gegenüber Ausgasen	3	4	12	4	12	3*	9	4	12
Ergebnis		76		73		75		92	
%		82,6		79,3		81,52		100,0	
		1		5				0	

*Abhängig vom Matrix Werkstoff.

So unterschiedlich die Ergebnisse in den einzelnen Kategorien sind, zum Schluss liegen die Werkstoffe bis auf wenige Prozentpunkte in der Bewertungsmatrix zusammen.

Daher macht es Sinn, die Kategorien mit einer Bewertung von 4 genauer zu untersuchen. Im vorliegenden Fall sind das Gewicht, Zugfestigkeit und E-Modul. Faserverstärkte Kunststoffe schneiden bei diesen drei Kategorien besonders gut ab und bieten sich für die Fertigung der ersten Fahrzeuge an. Auch wenn der Preis des Werkstoffes im Moment noch sehr hoch ist, ist wie bereits oben beschrieben, eine Preissenkung nur noch eine Frage der Zeit. Da sich die Konstruktionsphase noch in einem sehr frühen Stadium befindet, ist ein niedrigerer Rohstoffpreis der Carbonfaser zum Zeitpunkt der Herstellung der Fahrzeuge zu erwarten.

Neben dem Werkstoff spielt vor allem auch die Bauweise eine wesentliche Rolle bei der Auswahl der Struktur. Mit einer geeigneten Konstruktion können die Vor- und Nachteile der Werkstoffe voll ausgeschöpft oder kompensiert werden. Mit den Ergebnissen, der in Kapitel 6 beschriebenen Bauweisen, lässt sich analog zum Werkstoff eine Bewertungsmatrix aufstellen, um die theoretisch beste Bauart zu wählen. Dargestellt ist diese Matrix in Tabelle 7.4, wobei dieselben Bewertungs- und Gewichtungspunkte wie in Tabelle 7.2 dargestellt, gelten. Die Multimaterialbauweise, sowie das Monocoque wurden bei der Bewertung aller Konzepte mit betrachtet. Aufgrund der schlechten Ergebnisse wurden sie in der zusammenge-

fassten Tabelle 7.4 nicht weiter berücksichtigt. Eine gesamte Aufstellung ist im digitalen Anhang zu finden.

Tabelle 7.4: Bewertungsmatrix der Bauweisen.

Kategorien	Gewichtung	Schalen/ Spanten		Hybrid - Misch- bauweise		Spaceframe/ Gitterrohr		Idealfall	
		B	B*G	B	B*G	B	B*G	B	B*G
Gewicht	4	4	16	4	16	3	12	4	16
Steifigkeit	4	3	12	3	12	4	16	4	16
Technische Um- setzbarkeit	4	4	16	2	8	3	12	4	16
Automatisierung	2	4	8	3	6	4	8	4	8
Recycling	3	4	12	3	9	4	12	4	12
Kosten	3	2	6	3	9	3	9	4	12
Ergebnis			70		60		69		80
%			87,50		75,00		86,25		

Wie bei den Werkstoffen, gibt es auch hier zwei Konzepte, welche sich nur durch sehr wenige Prozentpunkte unterscheiden. Lediglich die Hybridbauweise zeigt deutlich weniger Potential unter den geforderten Kriterien.

Es ist nicht verwunderlich, dass Space-frame und Spanten eine fast gleiche Gewichtung haben. Ein Skelett aus Spanten hat durchaus ähnliche Eigenschaften wie ein Space-frame.

6.2 Analyse des ausgewählten Strukturkonzepts

Aus der in Punkt 7.1 ausgewählten Material- und Werkstoffkombination ergibt sich eine in Schalen-/Spanten-Bauweise, aus dem Werkstoff CFK hergestellte Struktur. An dieser Stelle werden die Vor- und Nachteile dieser Kombination betrachtet und analysiert.

CFK-Strukturen sind hinsichtlich der teuren Herstellung der Faser und des geringen Automatisierungsgrades sehr teuer. Aufgrund der hervorragenden Eigenschaften bezüglich Zugfestigkeit, E-Modul und Dichte, verlieren die hohen Herstellungskosten als Gegenargument an Gewicht. Die geringe Stückzahl von 40 Fahrzeugen spricht zusätzlich für die Fertigung der Rumpfteile aus CFK. Das Tooling kann relativ günstig aus Blockmaterial gefräst werden. Diese halten für etwa 150 Bauteile, Aluminiumformen halten sogar an die 500 Bauteile lang, somit sind keine teuren Presswerkzeuge nötig. [35] Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass bedingt

durch das geringere Gewicht mehr Nutzlast, bei gleicher Antriebsleistung der Luftlager, transportiert werden kann.

Bei der Automatisierung des Herstellungsprozesses verliert die Kohlefaser im Vergleich zum Space-frame. Viele Prozesse bei der Herstellung von Carbonbauteilen sind Handarbeit und bedingen eine menschliche Hilfe im Prozess. Vorreiter in der Automatisierung der CFK-Verarbeitung gibt es im Flugzeugbau, dort werden Druckkörper bereits von Robotern mit „Automated Fiber Placement“ gelegt, vergleiche Abbildung 7.1.

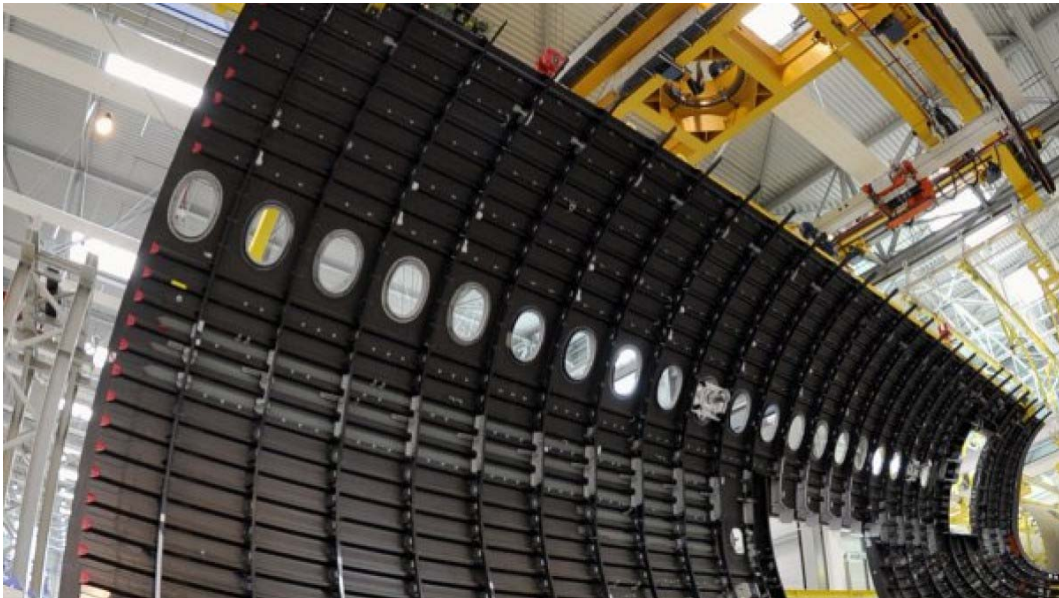


Abbildung 7.1: Seitenteil des A350X. [36]

Ein Punkt, der speziell beim Hyperloop betrachtet werden muss, ist die Gefahr des Ausgasens der Harze im CFK. Wie bereits bei den Anforderungen erläutert, kann es bei der Verwendung des falschen Harzsystems zum Ausgasen der Matrix in der reduzierten Atmosphäre kommen. Das kann zu Defekten in der Matrix und somit zu einer signifikanten Schwächung des Bauteils führen. Bei der richtigen Auswahl der einzelnen Komponenten sollte die Verwendung im Vakuum kein Problem darstellen.

Der letzte Punkt der an dieser Stelle kritisch betrachtet wird, ist das Thema Recycling. In Kapitel 4 wird auf die Nachhaltigkeit des gesamten Konzeptes verwiesen, welche einen hohen Stellenwert beim Projekt Hyperloop hat. Stand der Technik ist, dass eine 100-prozentige Wiederverwertung (noch) nicht möglich ist. Teile der Faser können aufbereitet werden, allerdings nicht in ihrer vollen Länge, sondern nur als kleine Stückchen oder Bruchmaterial. Eine Ausnahme bilden die Thermoplastmatrix Werkstoffe, welche allerdings noch sehr teuer sind. Bei den meist chemischen Trennverfahren wird die Matrix aufgelöst und die Faser zurückge-

wonnen. Dabei geht die Matrix verloren und die Faser kann geschwächt werden. Derzeit werden verschiedenste Anstrengungen unternommen, um dieses Problem zu lösen und die Kohlefaser mit Hilfe von besseren Recyclingmethoden rentabler und umweltfreundlicher zu machen. Bei der Verwendung von Kohlefaser im Hyperloop ist dieses Thema wegen der geringen Stückzahl und der geforderten Lebensdauer von 100 Jahren trotzdem vertretbar. Vor allem, wenn man davon ausgeht, dass bei der Wiederverwertung in 100 Jahren die Recyclingprozesse bessere Ergebnisse erzielen werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Um ein besseres Verständnis für die Thematik zu entwickeln, wurde zunächst die Technologie allgemein mit Hilfe der Alpha Studie erläutert. Anhand der einzelnen Baugruppen im Fahrzeug wurden die Eigenschaften und Funktionsweisen erklärt und die speziellen Herausforderungen aufgezeigt. Neben dem Fahrzeug an sich, wurde ebenso näher auf die Ausführung der Strecke und die damit verbundenen Anforderungen eingegangen. Subsysteme wie Stationen, Energieversorgung und Sicherheit wurden thematisiert.

Auf Basis der ersten drei Kapitel war es möglich, eine allgemeine Anforderungsliste zu erstellen. Die groben Abmessungen, sowie die Betriebsgrößen sind das Resultat dieser Betrachtung.

Im Anschluss wurde auf die speziellen Anforderungen an die Struktur eingegangen. Anhand signifikanter Kenngrößen wie Gewicht, Stückzahl und Ermüdungsfestigkeit wurden die wichtigsten Kriterien erklärt und auf den Hyperloop bezogen. Besondere Herausforderungen, wie die Ermüdungsfestigkeit oder die Struktursteifigkeit wurden genauer erklärt. Für die darauffolgende Betrachtung der Betriebsfestigkeit, wurden die wichtigsten Zusammenhänge und Formeln allgemein erläutert. Um den Rahmen der Arbeit nicht zu sprengen, wurde die Auslegung der Struktur auf den Druckbehälter (Kabine des Fahrzeugs) beschränkt.

Im weiteren Verlauf wurden die aus dem Automobil- und Flugzeugbau bekannten Materialien auf deren Eignung als Strukturkomponenten untersucht. Hierbei wurde folgendermaßen vorgegangen: Zunächst wurden allgemeine Eigenschaften der Werkstoffe beschrieben und deren Vor- und Nachteile aufgezeigt. Mit den drei vielversprechendsten Materialien Stahl, Aluminium und faserverstärkte Kunststoffe wurden die Auslegungsberechnungen für einen Druckbehälter an Hand eines „Testkörpers“ durchgeführt. Mit Hilfe eines in Catia V5 erstellten Modells dieses Körpers konnten das Gewicht und somit die Kosten für den jeweiligen Strukturtyp festgelegt werden. An dieser Stelle soll noch einmal angemerkt werden, dass die Berechnung der Ermüdungsfestigkeit bei CFK-Bauteilen sehr komplex ist. Deshalb wurde durch die Unterstützung des LCC (Lehrstuhl für Carbon Composites an der Technischen Universität München) eine spezielle, in der Industrie übliche Berechnungsmethode für die Auslegung gewählt. Das überraschende Ergebnis ist, dass die ideale äußere Hülle des Druckkörpers aus Aluminium am leichtesten und günstigsten ist. Da aufgrund der geringen Steifigkeit des Aluminiums eine Stützstruktur für weitere Anbaukomponenten benötigt wird, wurde der Berechnungsteil überarbeitet und es wurden einige Spanten und Stringer eingebaut. Mit Berücksichtigung dieser Struktur ist CFK die leichteste Konstruktion.

Nach der Beschreibung der Werkstoffe, wurden die verschiedensten Strukturbauweisen mit ihren Vor- und Nachteilen beschrieben, ihre Haupteinsatzbereiche gezeigt und auf deren Eignung für den Hyperloop untersucht. Diese Betrachtung lieferte die Basis für die abschließende Auswahl der Werkstoff-/Bauweisen-Kombination. Mit Bewertungsmatrizen wurden der Werkstoff und die Bauweisen mit Hilfe der vorherigen Kapitel bewertet und untereinander verglichen.

Als abschließendes Ergebnis folgte ein Kompromiss aus den bedeutendsten Kriterien Gewicht, Kosten und Steifigkeit. Demzufolge ist eine Schalen-/Spanten-Bauweise aus CFK die bestmögliche Kombination für die hier verlangten Anforderungen.

Schlussendlich ist zu beachten, dass die hier vorliegende Arbeit einen groben Überblick über die gesamte Thematik gibt. Die Auslegung der CFK-Komponenten ist hier nur in einer sehr vereinfachten Grundlagenrechnung dargestellt und sollte in einem nächsten Schritt genauer betrachtet werden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Zusammenstellung aus Stau auf Autobahnen und Warteschlangen am Flughafen.	1
Abbildung 3.1: Hyperloop Prototypendesign.	3
Abbildung 3.2: Aufbau der Strecke auf Pfeilern – mit Energieversorgung.	7
Abbildung 3.3: Vorläufige Streckenführung des Hyperloops.	8
Abbildung 3.4: Geschwindigkeit der Kapsel als Funktion der Zeit von Los Angeles aus.	9
Abbildung 3.5: Tektonischer Aufbau der Westküste Kaliforniens. [5]	10
Abbildung 3.6: Rotor Stator Prinzip.	12
Abbildung 4.1: Koordinatensystem im Pod.	16
Abbildung 4.2: Einteilung der Ermüdungsfestigkeit. [9]	20
Abbildung 4.3: Wöhlerlinie für Stahlwerkstoffe. [9]	21
Abbildung 4.4: Bauteil Wöhlerlinie. [9]	22
Abbildung 4.5: Verformung einer Karosserie bei Biegebelastung. [9]	23
Abbildung 4.6: Verformung einer Karosserie bei Torsionsbelastung. [9]	24
Abbildung 4.7: Erste Biegung und Erste Torsion der Struktur. [9, p. 66]	25
Abbildung 4.8: Geschlossene Produktkreisläufe als Ziel. [12]	26
Abbildung 5.1: Dehnung/ Zugfestigkeit bei Stählen. [14]	29
Abbildung 5.2: Bauteilspannungen in Abhängigkeit von der Blechstärke in mm.	31
Abbildung 5.3: Wöhlerlinie DC04 [10]	32
Abbildung 5.4: CAD-Schnitt durch den Testkörper.	33
Abbildung 5.5: Bauteilspannungen in Abhängigkeit von der Blechstärke in mm.	35
Abbildung 5.6: Wöhlerlinie AlMg3,5Mn [19]	36
Abbildung 5.7: Duktilität über Dehngrenze für unterschiedliche Materialien im Vergleich zu Magnesium. [13]	38
Abbildung 5.8: Vernetzungsgrad von Thermoplast, Elastomer und Duroplast. [20]	38
Abbildung 5.9: Kunststoffe im Automobilbau. [22]	40

Abbildung 5.10: Carbonfasern. [23]	41
Abbildung 5.11: Rechts Zugbelastung auf eine Probe längs zur Faser. Links Zugbelastung quer zur Faser. [23]	41
Abbildung 5.12: Links quasiisotroper Lagenaufbau. Rechts anisotroper Lagenaufbau. [23]	42
Abbildung 6.1: Mittragende Bauweise BMW Z1. [9, p. 18]	45
Abbildung 6.2: Detailansicht Seitenteil in Spantenbauweise. [27]	45
Abbildung 6.3: Mercedes-Benz C-Klasse Limousine (W205) 2013 – Stahl- Aluminium-Hybrid. [28]	46
Abbildung 6.4: Verwendung der verschiedenen Werkstoffe im PKW. [29]	47
Abbildung 6.5: Audi Space-frame aus hochfestem Aluminium. [30]	48
Abbildung 6.6: Gitterrohrrahmen des Formula Student-Teams der ETH Zürich. [31]	48
Abbildung 6.7: Lamborghini CFK Monocoque. [33]	49
Abbildung 7.1: Seitenteil des A350X. [34]	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Zusammenfassung der technischen Daten der Röhren Versionen..	11
Tabelle 4.1: Zusammenfassung Anforderungen Personen Version.	17
Tabelle 4.2: Zusammenfassung Anforderungen Cargo und Personen Version...	18
Tabelle 4.3: Aufteilung der Eigenfrequenzen eines Hyperloops.	25
Tabelle 4.4: Zusammenfassung der Strukturanforderungen.....	27
Tabelle 5.1: Eigenschaften eines DC 04 Stahls für die Außenhaut [17].	30
Tabelle 5.2: Konstruktionsparameter des Testkörpers.	33
Tabelle 5.3: Eigenschaften eines AlMg3,5Mn für die Außenhaut [19].	34
Tabelle 7.1: Ergebnisse des Berechnungsteils.....	50
Tabelle 7.2: Bedeutung der Gewichtung- und Bewertungspunkte.....	50
Tabelle 7.3: Bewertungsmatrix der Werkstoffe.....	51
Tabelle 7.4: Bewertungsmatrix der Bauweisen.....	52
Tabelle A1.: Zusammenfassung der Bauweisen.....	xiii

Literaturverzeichnis

- [1] o. N., „<http://www.autobahn-online.de/>“, [Online]. Available: <http://www.autobahn-online.de/geschichte.html>. [Zugriff am 10.05.2016].
- [2] E. Musk, „Hyperloop Alpha“, 12 August 2013. [Online]. Available: http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha.pdf.
- [3] Lehrstuhl für Maschinenelemente, Vorlesung Antriebssystemtechnik, Garching b. München, Bayern, 2009.
- [4] National Advisory committee for aeronautics, „<http://www.dtic.mil/>“, Mai 1945. [Online]. Available: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/b184216.pdf>. [Zugriff am 1. Juni 2016].
- [5] H. Rezaei und S. Vaez-Zadeh, „[jpier.org](http://www.jpier.org/)“, 2014. [Online]. Available: <http://www.jpier.org/PIERM/pierm36/08.14032407.pdf>.
- [6] H. Wefing, „Das nächste Beben kommt bestimmt“, *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, pp. <http://media1.faz.net/ppmedia/video/medien/interaktiv-1/1000445700/1.349257/default/san-andreas-graben.gif>, 18 April 2006.
- [7] o. N., „<http://www.gutefrage.net/>“, 27 März 2012. [Online]. Available: <http://www.gutefrage.net/frage/wie-viele-kilometer-fliegt-ein-langstreckenflugzeug-in-seinem-ganzen-leben>. [Zugriff am 10.06.2016].
- [8] o. N., „Eine Sekunde bis zum Stopp“, *Spiegel Online*, Nr. 24.11.2012, 24.03.2012.
- [9] M. Lienkamp, Fahrzeugkonzepte: Entwicklung und Simulation, Garching b. München, Bayern, 2015.
- [10] L. Eckstein, Strukturentwurf von Kraftfahrzeugen, Aachen: Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, 2010.
- [11] J. Hinterdorfer, *Telefonat zum Thema Wählerlinien*, Garching/Linz, 2016.
- [12] S. 1240, *Prüf- und Dokumentationsrichtlinie für die experimentelle*, Düsseldorf: Stahleisen GmbH, 2016.
- [13] o. N., „[umweltgutachter.de](http://www.umweltgutachter.de/)“, 23 Dezember 2014. [Online]. Available: <http://www.umweltgutachter.de/blog/i-co-gewinnt-cradle-to-cradle-systems-innovator-award>.

- [14] H.-H. Braes und U. Seifert, Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 7. Auflage, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013.
- [15] M. Lienkamp, Grundlagen des Fahrzeugbaus, Garching b. München, 2014.
- [16] R. Kochhan, S. Fuchs, B. Reuter und M. Lienkamp, „<https://www.researchgate.net/>“, Februar 2014. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/260339436_An_Overview_of_Costs_for_Vehicle_Components_Fuels_and_Greenhouse_Gas_Emissions.
- [17] voestalpine, „Kaltgewalztes Stahlband“, Linz, 2016.
- [18] E. Werner, *Werkstoffkunde 2*, Garching b. München, 2013.
- [19] Leiber Group, „Spezielle Anwendungen von Aluminium-Legierungen“, Emmingen-Liptingen, 2016.
- [20] Forschungsvereinigung Automobiltechnik E. V., „Qualifizierung von Aluminiumwerkstoffen“, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., Darmstadt, 2013.
- [21] M. Häberlein, „[mhaeberlein.de](http://www.mhaeberlein.de/)“, 1998. [Online]. Available: <http://www.mhaeberlein.de/KUT/11Einfuehrung.htm>.
- [22] E. Werner, *Werkstoffkunde 1*, Garching b. München, 2012.
- [23] o. N., „<http://www.chemie-am-auto.de/>“, Wirtschaftsgesellschaft des Kfz-Gewerbes mbH, 2014. [Online]. Available: http://www.chemie-am-auto.de/img/content/kunststoffe/kunststoff_auto.jpg. [Zugriff am 10 Juni 2016].
- [24] K. Drechsler, E. Ladstätter und H. Köbler, Composite Materials and Structure-Property-Relationship, Garching bei München, 2015.
- [25] B. Christian, Interviewee, *Gespräch über das Thema Dauerfestigkeitsauslegung von CFK Bauteilen*. [Interview]. 16 Juni 2016.
- [26] T. Robin, Interviewee, *Gespräch über das Thema Dauerfestigkeitsauslegung von CFK Bauteilen*. [Interview]. 16.06.2016.
- [27] H. Wallentowitz, A. Freialdenhoven und I. Olschewski, Strategien in der Automobilindustrie, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2009.
- [28] D. Klaus und R. Taubert, *Composite Bauweisen Praktikum*, Garching b. München, 2013.
- [29] Daimler AG, „media.daimler.com/“, 2016. [Online]. Available:

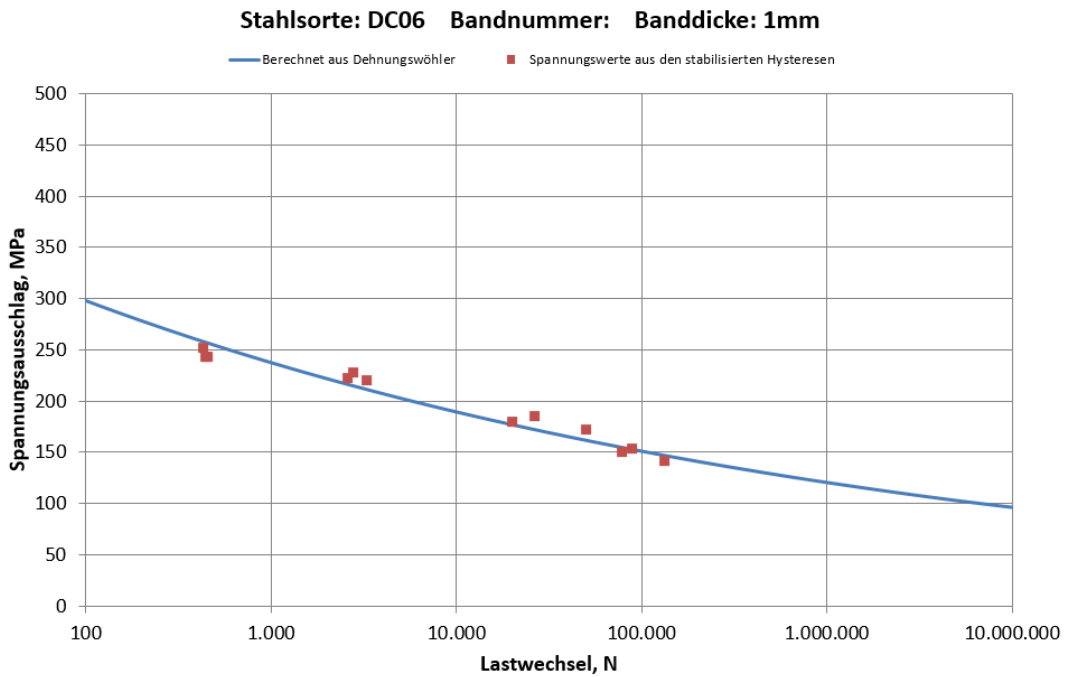
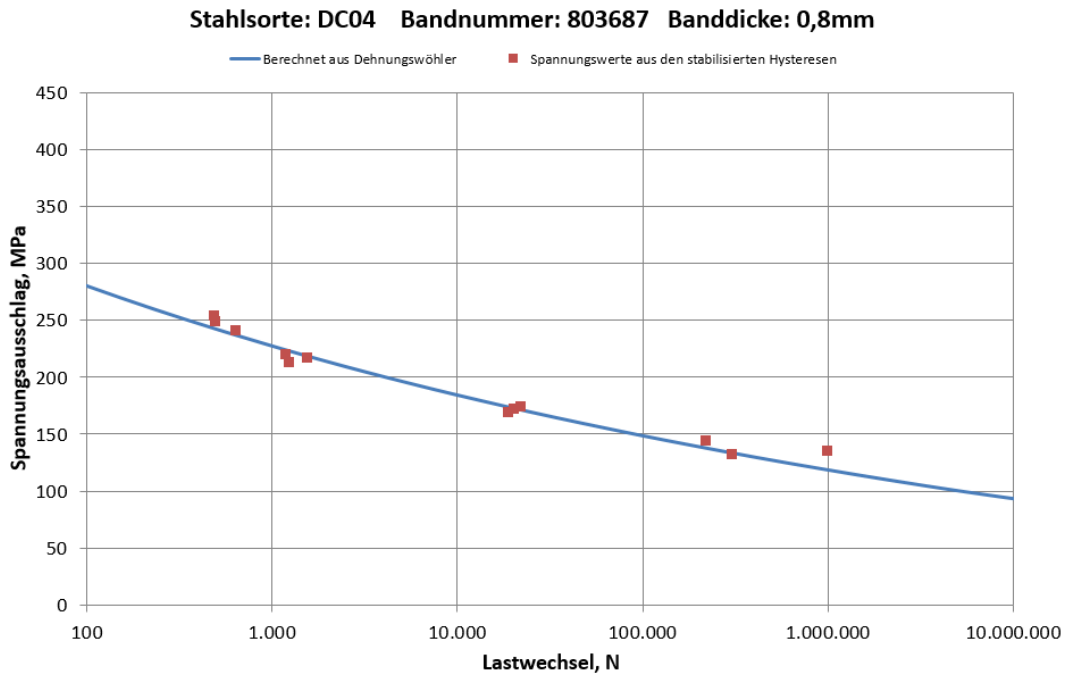
<http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Rohbau-Stabiler-Rohbau--leicht-gemacht.xhtml?oid=9903839>.

- [30] Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, „<http://www.iktd.uni-stuttgart.de>,“ 2016. [Online]. Available: http://www.iktd.uni-stuttgart.de/lehre/studentische_arbeiten/?id=817.
- [31] Audi AG, „<http://www.audi-technology-portal.de>,“ 2014. [Online]. Available: <http://www.audi-technology-portal.de/de/karosserie/aluminiumkarosserien/audi-space-frame-asf>.
- [32] o. N., „<http://www.formula-hybrid.ethz.ch>,“ 2008. [Online]. Available: <http://www.formula-hybrid.ethz.ch/HS09/pegasus/Chassis/090316.html>.
- [33] M. Trzesniowski, Rennwagentechnik, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012.
- [34] G. Braas, „<http://www.billiger-autofahren24.de>,“ 11 Februar 2011. [Online]. Available: <http://www.billiger-autofahren24.de/tag/cfk/>.
- [35] C. Becker, Interviewee, *Auslegung von CFK Bauteilen auf Dauerfestigkeit*. [Interview]. 16 Juni 2016.
- [36] Augsburgener Allgemeine, „<http://www.augsburger-allgemeine.de/>,“ 29 September 2015. [Online]. Available: <http://bilder.augsburger-allgemeine.de/img/incoming/crop35630092/3284782572-ctopTeaser-w1200/Seitenschale-A50.jpg>. [Zugriff am 10 Juni 2016].
- [37] Heißing, Fahr, München: Bla, 2008.
- [38] o. N., „<https://swissmetro.ch/>,“ Swissmetro, [Online]. Available: <https://swissmetro.ch/de/projekt/details/geschichte>. [Zugriff am 10 05 2016].

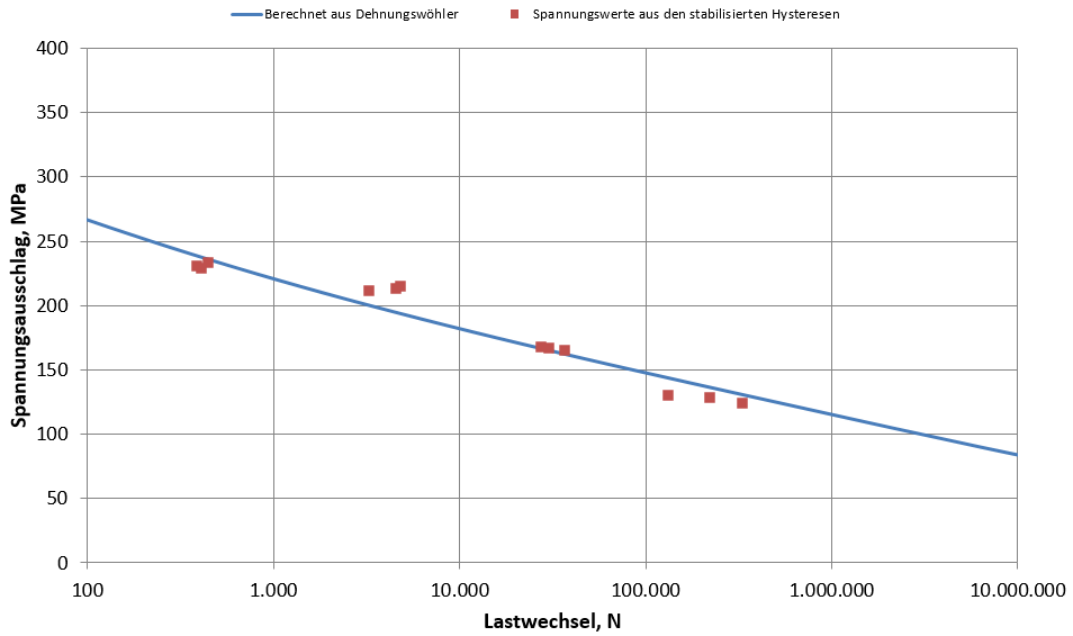
Anhang

Anhang A: Wählerlinien	viii
Anhang B: Gesprächsprotokolle	x
Anhang C: Bewertungsmatrix der Bauweisen	xiii

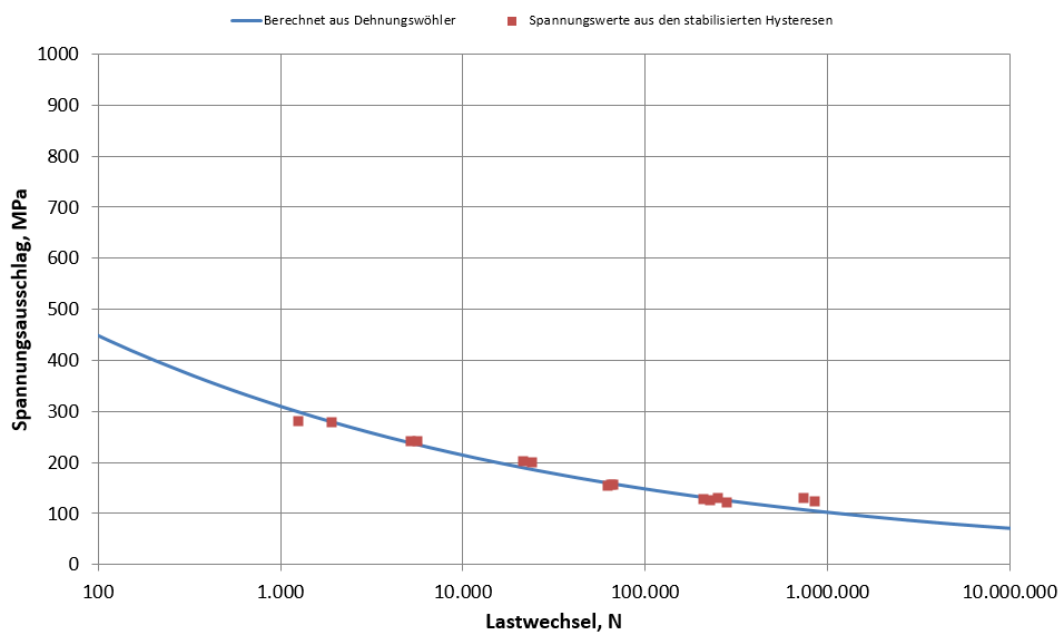
Anhang A: Wöhlerlinien



Stahlsorte: DX54D Z140 Bandnummer: 786829 Banddicke: 0,95mm



Stahlsorte: DX56D Z110MB Bandnummer: 516339 Banddicke: 1mm



Anhang B: Gesprächsprotokolle

Datum: 14.06.2016 und 16.06.2016

Gesprächspartner: Robin Taubert, LCC

Ort: Garching Forschungszentrum

Thema: Auslegung von CFK Bauteilen auf Dauerfestigkeit

- Auslegung von CFK Bauteilen auf Dauerfestigkeit eher schwierig
- Keine 100% richtige Methode bekannt
- Wöhlerlinien sind nur bedingt zu Auslegung geeignet
- Für jeden Laminat Aufbau wird extra Wöhlerlinie benötigt → Aufwand extrem hoch
- Analyse ist analytisch nicht möglich → Numerische Verfahren (Abakus etc.)
- In der Praxis wird auf andere Versagenskriterien ausgelegt:
 - o Firstplyfehler
 - o Delamination
 - o Fallen lassen eines Werkzeugs
- Für den vorliegenden Fall und nur für eine grobe Abschätzung kann man ein Dehnkriterium als Auslegungshilfe annehmen:
 - o Spannungen über Dehnungen berechnen
 - o 0,02-Dehngrenze als Grenze für die erlaubte Dehnung wählen
 - o Steifigkeitswert für Faser inkl. Matrix 50000 MPa
- 0,02 – Dehngrenze ist ebenso ein übliches Kriterium in der Industrie
- Unterlagen von Herrn Taubert wie Paper und Vorlesungen befinden sich im digitalen Anhang

Datum: 16.06.2016

Gesprächspartner: Christian Becker, Becker Carbon, Telefonat

Ort: Garching Forschungszentrum, Offenberg

Thema: Auslegung von CFK Bauteilen auf Dauerfestigkeit

- Auslegung von CFK Bauteilen auf Dauerfestigkeit eher schwierig
- Keine 100% richtige Methode bekannt
- Firmenintern werden CFK Bauteile nur statisch und konservativ ausgelegt und halten
- Beispiel: C-Spange für Schweißroboter, dieser fährt seit über sechs Jahren mit sehr kurzer Zykluszeit und weist keine Schäden oder Formänderungen auf
- Auslegung basiert im Wesentlichen auf Erfahrungswerten der firmeneigenen Berechnungsabteilung
- Formen halten bis zu 500 Zyklen → Form tauschen
- Ein Bild und Artikel zu der angesprochenen C-Spange befindet sich im digitalen Anhang

Datum: 04.07.2016 und 07.07.2016

Gesprächspartner: Josef Hinterdorfer, voestalpine, Telefonat

Ort: Garching Forschungszentrum, Linz

Thema: Wöhlerlinien

- Wöhlerlinien werden sehr spezifisch aufgenommen
- Grundsätzlich wird zwischen dehnungsgesteuerten und spannungsgesteuerten Wöhlerlinien unterschieden
- Dehnungsgesteuerte werden in dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen mit konstanten Dehnungsamplituden ermittelt
- Spannungsgeregelte werden mit konstanter Spannungsamplitude ermittelt
- Bei spannungsgeregelten liegt die Dauerfestigkeit höher als die Streckgrenze → Schwingungen führen zu Verfestigung
- R-Werte geben Aussagen über Belastungen
- Dehnungsgeregelte werden für Zug-Druck-Bereich verwendet $R=-1$
- Spannungsgeregelte werden für Zug-Schwellbereich $R=0,1$ und für Wechsel-Biege-Bereiche $R=-1$ verwendet
- Wöhlerlinien der angesprochenen Stähle ähnlich nur nach oben oder unten verschoben je nach Festigkeitseigenschaften.
- SEP 1240 Richtlinie im digitalen Anhang
- Excel – Tabellen der Wöhlerlinien im digitalen Anhang

Anhang C: Bewertungsmatrix der Bauweisen

Tabelle A1.: Zusammenfassung der Bauweisen.

Kategorien	Schalen/Spanten		Hybrid-Mischbauweise		Multimaterial		Spceframe Gitterrohr		Monocoque		Idealfall		
	Gewichtung	Bewertung	B*G	Bewertung	B*G	Bewertung	B*G	Bewertung	B*G	Bewertung	B*G	Bewertung	B*G
Gewicht	4	4	16	4	16	4	16	3	12	4	16	4	16
Steifigkeit	4	3	12	3	12	3	12	4	16	4	16	4	16
Technische Umsetzbarkeit	4	4	16	2	8	1	4	3	12	2	8	4	16
Automatisierung	2	4	8	3	6	3	6	4	8	1	2	4	8
Recycling	3	4	12	3	9	2	6	4	12	2	6	4	12
Kosten	3	2	6	3	9	2	6	3	9	2	6	4	12
Ergebnis			70		60		50		69		54		80
%			87,50		75,00		62,50		86,25		67,50		