



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# **Bachelorarbeit**

Sabina Rahmati

## **Entwicklung eines Flugsitzes im Rahmen des DLR-Projekts SpaceLiner**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Automotive and  
Aeronautical Engineering*

**Sabina Rahmati**

**Entwicklung eines Flugsitzes im Rahmen  
des DLR-Projekts SpaceLiner**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Fahrzeugtechnik mit dem Schwerpunkt Karosserieentwicklung  
am Department Fahrzeug und Flugzeugbau  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
Institut für Raumfahrtsysteme

████████████████████  
██████████

Erstprüfer/in: Werner Granzeier  
Zweitprüfer/in: Alexander Frenkel

Abgabedatum: 30.12.2022

# I. Zusammenfassung

**Name des Studierenden**

Sabina Rahmati

**Thema der Bachelorthesis**

Entwicklung eines Flugsitzes im Rahmen des DLR-Projekts SpaceLiner

**Stichworte**

SpaceLiner, Flugsitz, Ergonomie, Konzept

**Kurzzusammenfassung**

Ziel dieser Arbeit ist es, einen SpaceLiner-Sitz zu konzipieren, der im weiteren Verlauf der Forschung und Entwicklung als Grundlage für einen Prototyp dient, um letzten Endes damit den sogenannten Passagierakzeptanztest zu bestehen. Dabei müssen die technischen und ergonomischen Anforderungen an den Sitz im Vorfeld ermittelt werden. Diese sind unabdingbar und ausschlaggebend für den Entwurf und auch für zukünftige Arbeiten, die sich mit der Ergonomie des Sitzes auseinandersetzen werden. Der SpaceLiner-Sitz muss automatisiert funktionieren und eine Drehung um mindestens eine Achse gewährleisten, damit die Passagiere, entsprechend der Fluglage des SpaceLiners, komfortabel ausgerichtet sitzen können – und das während der gesamten Flugdauer. Der Passagierakzeptanztest setzt außerdem unter anderem voraus, dass mindestens zwei Passagiere während des gesamten (simulierten) Fluges sitzen müssen. Aufgrund des hohen finanziellen Aufwands für das Projekt des SpaceLiners und wegen der voraussichtlich kostspieligen Flugtickets müssen die Sitze im Hinblick auf Qualität und Komfort einwandfrei entworfen werden. Diese Arbeit stellt darüber hinaus weitere Grundlagen für die Forschung und Entwicklung der HAW Hamburg gemeinsam mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Bremen zur Verfügung.

**Name of Student**

Sabina Rahmati

**Title of the paper**

Development of a flight seat as part of the DLR SpaceLiner project

**Keywords**

SpaceLiner, flight seat, ergonomics, concept

**Abstract**

The aim of this paper is to design a SpaceLiner seat, that will serve as the basis for a prototype in the further course of research and development ultimately pass the called passenger acceptance test. The technical and ergonomic requirements for the seat must be determined in advance. These are essential and decisive for the design and also for future work that will deal with the ergonomics of the seat. The SpaceLiner seat shall be automated and ensure rotation around at least one axis, so that the passengers can sit comfortably aligned according to the SpaceLiner's flight attitude - for the entire duration of the flight. The passenger acceptance test also requires, among other things, that at least two passengers must be seated during the entire (simulated) flight. Due to the high financial outlay for the SpaceLiner project and because of the probably expensive flight tickets, the seats have to be designed impeccably in terms of quality and comfort. This work also provides further fundamentals/ principles for the research and development of the HAW Hamburg together with the German Aerospace Center (DLR) Bremen

.

## **II. Eigenständigkeitserklärung**

Hiermit bestätige ich, Sabina Rahmati, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und nur mit allen angegebenen Hilfsmitteln erfasst habe und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum

Unterschrift

## III. Inhaltsverzeichnis

<b>I. Zusammenfassung</b> .....	<b>I</b>
<b>II. Eigenständigkeitserklärung</b> .....	<b>III</b>
<b>III. Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>IV. Formelzeichenverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>V. Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>VI. Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>9</b>
1.1 Motivation.....	9
1.2 Aufbau der Arbeit .....	9
<b>2 Stand der Forschung</b> .....	<b>10</b>
2.1 Aktueller Stand des SpaceLiners .....	10
2.2 Anforderungen und Richtlinien .....	14
<b>3 Konzeptentwurf</b> .....	<b>25</b>
3.1 Variante 1: Hängender Sitz mit Deckenbefestigung.....	25
3.2 Variante 2: Kippender Sitz mit Drehachse am Gesamtschwerpunkt .....	28
3.3 Variante 3: Kippender Sitz mit Drehachse am Boden .....	31
<b>4 Konkretisierung</b> .....	<b>34</b>
4.1 Sitzmechanik und Drehmechanismus .....	34
4.2 Motorischer Antrieb .....	40
4.3 Auslegung und Berechnung .....	47
<b>5 Ergonomie</b> .....	<b>51</b>
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>54</b>
<b>VII. Literaturverzeichnis</b> .....	<b>58</b>
<b>VIII. Anhang</b> .....	<b>60</b>

## IV. Formelzeichenverzeichnis

$J$	Massenträgheitsmoment
$m$	Masse (allgemein)
$r$	Radius, Hebelarm, Länge (allgemein)
$M$	Drehmoment
$F$	Kraft (allgemein)
$F_{\text{Passagier}}$	Gewichtskraft des Passagiers
$F_{\text{Beschleunigung}}$	Trägheitskraft des Passagiers und des Sitzes
$F_{\text{Sitz}}$	Gewichtskraft des Sitzes
$\sigma$	Spannung (allgemein)
$\sigma_{\text{zul}}$	Zulässige Spannung (allgemein)
$R_m$	Zugfestigkeit (Festigkeitswert)
$A$	Querschnittsfläche, Flächeninhalt (allgemein)
$d$	Durchmesser
$k$	Einspannfaktor
$K_A$	Anwendungsfaktor
$\sigma_{\text{bzul}}$	Zulässige Biegespannung
$D$	Großdurchmesser, Durchmesser des Auges
$t_s$	Dicke der Stange
$t_G$	Dicke der Gabel

## V. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: <i>SpaceLiner (Passagierkapsel und Trägerrakete) vor dem Start</i> ("Explore With Us: DLR Spaceliner - YouTube," n.d.) .....	10
Abbildung 2-2: <i>SpaceLiner in Startposition</i> ("Explore With Us: DLR Spaceliner - YouTube," n.d.) .....	12
Abbildung 2-3: <i>SpaceLiner-Reise-Netzwerk</i> (Sippel, 2009).....	13
Abbildung 2-4: <i>Übergang vom senkrechten in den Horizontalflug</i> (Hildebrandt, 2018) 13	
Abbildung 2-5: <i>Passagierstufe (Orbiter) im Gleitflug</i> ("Explore With Us: DLR Spaceliner - YouTube," n.d.) .....	14
Abbildung 2-6: <i>Orbiter mit Blickrichtung nach oben; links: Passagiere in liegender Startposition</i> (Hildebrandt, 2018).....	15
Abbildung 2-7: <i>SpaceLiner mit Koordinatensystem nach</i> (Hildebrandt, 2018)....	16
Abbildung 2-8: <i>Prinzipskizze zur Veranschaulichung der Sitzneigung in Abhängigkeit von der Position des SpaceLiners (eigene Darstellung) .....</i>	20
Abbildung 2-9: <i>Prinzipskizze des Orbiters im Steig- und Sinkflug; die Sitzfläche ist jeweils parallel zum Erdboden ausgerichtet (eigene Darstellung) .....</i>	20
Abbildung 2-10: <i>Business-Class-Sitz mit Abmaßen</i> ("Flugzeugsitz Doppelsitzbank Contour-S20214 Business Class -Lang," n.d.).....	22
Abbildung 3-1: <i>Schaukel</i> ("HUDORA Schaukel Vario Basismodul V," n.d.).....	26
Abbildung 3-2: <i>Schalensitz mit Aufhängung an der Decke (Variante 1)</i> ("RECARO Podium CF – Höhepunkt der Sitzentwicklung," n.d.) .....	27
Abbildung 3-3: <i>Schalensitz mit Drehachse nah am Schwerpunkt (Variante 2)</i> ("RECARO Podium CF – Höhepunkt der Sitzentwicklung," n.d.) .....	28
Abbildung 3-4: <i>Bürostuhl mit verstellbarer Sitzneigung</i> ("LOEFFLER_Ergonomie_Aktives_Sitzen.jpg (JPEG-Grafik, 1000 x 891 Pixel) - Skaliert (69%)," n.d.) .....	29
Abbildung 3-5: <i>Variante 2 (links) und 1 (rechts) mit den zugehörigen Hebelarmen für das Drehmoment bzw. Massenträgheitsmoment (eigene Darstellung) ..</i>	30
Abbildung 3-6: <i>Schalensitz mit Drehachse und Stütze am Boden (Variante 3)</i> <i>(eigene Darstellung) .....</i>	31
Abbildung 4-1: <i>Konstruktiver Entwurf für Variante 3 (eigene Darstellung).....</i>	35
Abbildung 4-2: <i>Bolzenverbindung zwischen Kabinenboden und Stütze (eigene Darstellung).....</i>	36
Abbildung 4-3: <i>Schnitt durch die gelenkige Bolzenverbindung (eigene Darstellung).....</i>	36
Abbildung 4-4: <i>Adapterplatte zur Aufnahme der Sitzfläche(eigene Darstellung)</i>	37
Abbildung 4-5: <i>Adapterplatte zur Aufnahme der Rückenlehne; rechts: Seitenansicht mit Bolzenverbindung (eigene Darstellung) .....</i>	37
Abbildung 4-6: <i>Linearführung inkl. Bolzenverbindung auf Führungskörper (eigene Darstellung).....</i>	38
Abbildung 4-7: <i>MiniRail-Linearführung der Firma HepcoMotion</i> (hepcotion.com, n.d.).....	38
Abbildung 4-8: <i>Bolzen für die Gelenkverbindung am Boden, am Schlitten und an der Rückenlehne</i> (Gomeringer et al., 2022) .....	39
Abbildung 4-9: <i>Technische Zeichnung des MiniRails der Firma HepcoMotion</i> (hepcotion.com, n.d.).....	39
Abbildung 4-10: <i>Übersicht der Motor-Typen</i> (Weidauer, 2013) .....	40
Abbildung 4-11: <i>Linearmotor der Firma SEW Eurodrive</i> ("Synchrone Servo- Linearmotoren SL2   SEW-EURODRIVE," n.d.) .....	42

Abbildung 4-12: <i>Asynchronmotor der Firma Siemens</i> (“Niederspannungsmotor - SIMOTICS GP - Siemens Electric motors - AC / Asynchron / verstärkt,” n.d.) 43	43
Abbildung 4-13: <i>Synchronmotor der Firma ACD</i> (ACD-Gruppe, n.d.) .....	43
Abbildung 4-14: <i>Gleichstrommotor für den Spielbedarf</i> (“Gleichstrommotor, 24 mm, 1,5...4,5 V-   Pollin.de,” n.d.) .....	44
Abbildung 4-15: <i>Bürstenloser Gleichstrommotor (im PC-Lüfter)</i> (“DC 5V Silent 35mm cooling fan brushless motor chip cooling breeze Manifold motor pieces manifold mx5manifold ford - AliExpress,” n.d.) .....	44
Abbildung 4-16: <i>Torquemotor des Herstellers Wittenstein</i> (“cyber® torque motor - WITTENSTEIN cyber motor GmbH,” n.d.) .....	45
Abbildung 4-17: <i>Sitz mit Belastung und Neigungswinkel (eigene Darstellung)</i> ...	47
Abbildung 4-18: <i>Stange und Gabel (Bolzenverbindung)</i> (Wittel et al., 2021).....	50
Abbildung 5-19: <i>Menschliche Wirbelsäule</i> (“Doppel-S-Form - die Krümmung der Wirbelsäule ★ BETTEN.de Lexikon,” n.d.) .....	52
Abbildung 6-1: <i>CNC-gefertigter Motorradhelm aus einem Metallblock. (5Axis Machine Cutting HELMET / DAISHIN SEIKI CORPORATION, 2009)</i> .....	55

---

## VI. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: <i>Anforderungsliste</i> .....	24
Tabelle 3-1: <i>Zusammenfassender Vergleich zwischen allen drei Varianten</i> .....	33
Tabelle 4-1: <i>Kriterien zur Auswahl geeigneter Motor-Typen (WEIDAUER, 2013)</i> .	41

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Der Personenverkehr im weiteren Sinne zielt in erster Linie darauf ab, Personen sicher von A nach B zu transportieren. In einer global stark vernetzten Welt, in welcher die Beschleunigung immer weiter zunimmt und Landesgrenzen im Hinblick auf Reisen und Geschäfte immer weiter in den Hintergrund geraten, ist Mobilität wichtiger denn je. Immer weiter und immer schneller und jederzeit verfügbar – das ist der heutige Anspruch. Sehr weit entfernte Orte sind stärker denn je wirtschaftlich und politisch miteinander gekoppelt. Aber auch Touristen können es sich immer mehr leisten, fremde und weit entfernte Orte zu erkunden. Diesen Trend erkennt auch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und ergreift vorweg als erste Organisation die Initiative: Ein neues Verkehrsmittel soll interkontinentale Flüge in kürzester Zeit schaffen. Dies ist sicherlich ein anspruchsvolles Vorhaben mit einem gewaltigen Potential, ohne jeden Zweifel. Da der Fokus meines Studiums im Wesentlichen auf Personenverkehr und Verkehrsmittel liegt und ich auch selbst beabsichtige, später in diesem Bereich tätig zu sein, ist es mir eine große Freude, mich an dem Vorhaben des DLR im Hinblick auf den SpaceLiner zu beteiligen. Und vielleicht kann es mir sogar gelingen, mich nicht nur daran zu beteiligen, sondern auch einen Schritt zur Entwicklung des Projekts beizutragen – selbst wenn es nur ein kleiner Schritt sein würde.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist grob in drei Abschnitte gegliedert: Im ersten Teil werden die Grundlagen vorgestellt und die technischen Rahmenbedingungen des SpaceLiners ermittelt und veranschaulicht. Dadurch wird ein Gesamteindruck gegeben und die notwendigen Grundlagen werden geschaffen. Auf diesem Fundament baut der zweite Teil der Arbeit auf: Hier wird eine technisch in die Praxis umsetzbare Skizze einer Konstruktion des Sitzes entworfen, die mit den Anforderungen aus dem ersten Teil dieser Arbeit übereinstimmt. Dabei wird der Fokus insbesondere auf die Qualität, den Komfort und die Ergonomie gelegt. Der dritte Teil der Arbeit setzt sich dann kritisch mit dem Entwurf auseinander. Hier werden mögliche Stärken und Schwachstellen des Entwurfs zusammengefasst. Außerdem wird abschließend ein Blick auf eine nicht allzu weit entfernte Zukunft (des SpaceLiners) gewährt.

Da sich das SpaceLiner-Projekt noch in seiner Anfangsphase befindet, sind zahlreiche Parameter noch offen bzw. können (den Rahmenbedingungen entsprechend) frei, aber zugleich auch sinnvoll (mit)gestaltet werden. Das DLR ist, was den aktuellen Forschungsstand angeht, eher zurückhaltend mit Bezug auf mögliche Literaturquellen. Nichtsdestotrotz stützt sich diese Arbeit auf die wenigen, von dem DLR zur Verfügung gestellten Informationen. Fehlende Angaben, Parameter und Randbedingungen werden logisch erschlossen

## 2 Stand der Forschung

### 2.1 Aktueller Stand des SpaceLiners

*„SpaceLiner ist die Vision für einen suborbitalen, hyperschall-schnellen, geflügelten Passagiertransporter, der außerdem in einer Variante mit Nutzlastbuht den kostengünstigsten Transport von Satelliten in den Orbit ermöglicht.“*

(“DMG 5-Axis Machine’s Finesse Gives Daishin’s Performance Racing Helmet the Edge - World Industrial Reporter,“ n.d.)

Mit diesen Worten fasst das DLR das SpaceLiner-System kurz und knapp zusammen.



Abbildung 2-1: SpaceLiner (Passagierkapsel und Trägerrakete) vor dem Start (“Explore With Us: DLR Spaceliner - YouTube,“ n.d.)

Das SpaceLiner-System stellt ein revolutionäres Konzept für die Zukunft dar, das seit 2005 vom DLR vorangetrieben wird. Hierbei sollen 50 bis 100 Passagiere mit über 25 000 Kilometern pro Stunde beispielsweise von Europa nach Australien in nur 90 Minuten reisen können. Durch die Nutzung der Umlaufbahn der Erde als Transportraum für Passagiere lassen sich selbst die entferntesten Orte der Welt innerhalb kürzester Zeit erreichen. Abbildung 2-1 zeigt einen Entwurf für ein interkontinentales und ultraschnelles Reizenetzwerk, welches die wichtigsten globalen Knotenpunkte im Hinblick auf Wirtschaft und Tourismus miteinander verknüpft.

### Aufbau des SpaceLiners

Das SpaceLiner-System besteht aus einer Kombination eines unbemannten Boosters und einer bemannten Passagierstufe (auch Orbiter genannt, siehe Abbildung 2-1) und verfügt über insgesamt elf Flüssigkeitsraketenantriebe. Zwei dieser elf Triebwerke sind dabei in der Passagierkapsel angebracht, die restlichen neun befinden sich an der Trägerrakete. Die

Triebwerke werden mit üblichem Treibstoff für die Raumfahrt, nämlich kryogenem Sauerstoff (LOX) und Wasserstoff (LH<sub>2</sub>), betrieben. Diese beiden Bestandteile für den Treibstoff werden separat gelagert und erst beim bzw. kurz vor dem Brennvorgang miteinander gemischt. Als Abfallprodukt des Brennvorgangs bleibt somit Wasser (in gasförmigem Zustand) zurück.

### **Wissenswertes rund um den SpaceLiner**

Wie in Abbildung 2-2 zu sehen ist, steht das SpaceLiner-System senkrecht nach oben schauend in der Startposition. Der Orbiter, in dem sich die Passagiere befinden, ist an dem Booster befestigt. Der Booster wiederum ist unbemannt und dient lediglich dazu, den Orbiter zu beschleunigen und in die entsprechende Umlaufbahn zu bringen. Der Schub, der dazu benötigt wird, wird zu Beginn zunächst ausschließlich durch den Booster bereitgestellt. Der SpaceLiner startet demnach senkrecht und behält die nach oben ausgerichtete Fluglage so lange bei, bis sich kurz vor der maximalen Flughöhe die Passagierstufe von dem Booster trennt. Je nach Flugziel beträgt dabei an dieser Stelle die Flughöhe maximal 80 Kilometer. Sobald sich der bemannte Orbiter vom Booster trennt, gleitet Letzterer wieder zurück zur Erdoberfläche, wo er entweder eigenständig landet – was der Firma SpaceX vor wenigen Jahren gelungen ist – oder von einem entsprechenden „rocket receiver“ abgeholt und abgeschleppt wird. Wesentlich entscheidender ist dann jedoch, was mit dem bemannten Orbiter geschieht, wenn er sich kurz vor der maximalen Flughöhe vom Booster trennt. Während Letzterer für eine Wiederverwendung zur Erde zurückkehrt, kippt die bemannte Passagierstufe allmählich in einen waagerechten Geradeausflug. Damit ist die Passagierstufe nicht mehr wie in der Startphase nach oben ausgerichtet. In dieser Lage kann die Passagierstufe praktisch reibungsfrei mit Geschwindigkeiten von über 25 000 Kilometern pro Stunde problemlos interkontinentale Distanzen in kürzester Zeit überbrücken. In dem waagerechten Geradeausflug auf der entsprechenden Erdumlaufbahn benötigt die bemannte Passagierstufe nur vergleichsweise wenig Treibstoff. In dieser Phase legt die Passagierstufe außerdem den größten Teil der Flugdistanz zurück. Die Endphase, in welcher die Passagierstufe in die Erdatmosphäre eintritt und abschließend landet, unterscheidet sich (abgesehen von der Flughöhe) nicht wesentlich vom Landeprozess eines konventionellen Passagierflugzeugs.

Neben der Passagierbeförderung arbeitet das DLR auch an SpaceLiner-Modellen, die Waren interkontinental verschicken oder Satelliten in die Umlaufbahn bringen sollen. Diese Versionen des SpaceLiners sind im Rahmen der vorliegenden Arbeit allerdings irrelevant, da sie keine Passagiere befördern und somit auch keine Passagiersitze enthalten.



Abbildung 2-2: *SpaceLiner* in Startposition ("Explore With Us: DLR Spaceliner - YouTube," n.d.)

Das Projekt SpaceLiner wird völlig neu entwickelt, da es bisher keine vergleichbaren Verkehrssysteme gab. Dementsprechend erweisen sich die Forschungs- und Entwicklungsgebiete dieses Projekts als sehr vielfältig. Neben dem sicheren und zuverlässigen Antrieb für Booster und Orbiter und den unzähligen damit einhergehenden Problemen und Fragen müssen umso mehr grundlegende Einzelheiten untersucht werden. Der Forschungsbereich, der für diese Arbeit relevant ist, wurde 2018 vom DLR gegründet („Kabinen- und Kapselforschung“). Bedingt durch die weitreichenden Einschränkungen infolge der COVID-19-Pandemie wurde der Kabinen- und Kapselforschungsbereich des SpaceLiners seit der Gründung jedoch kaum vorangetrieben.

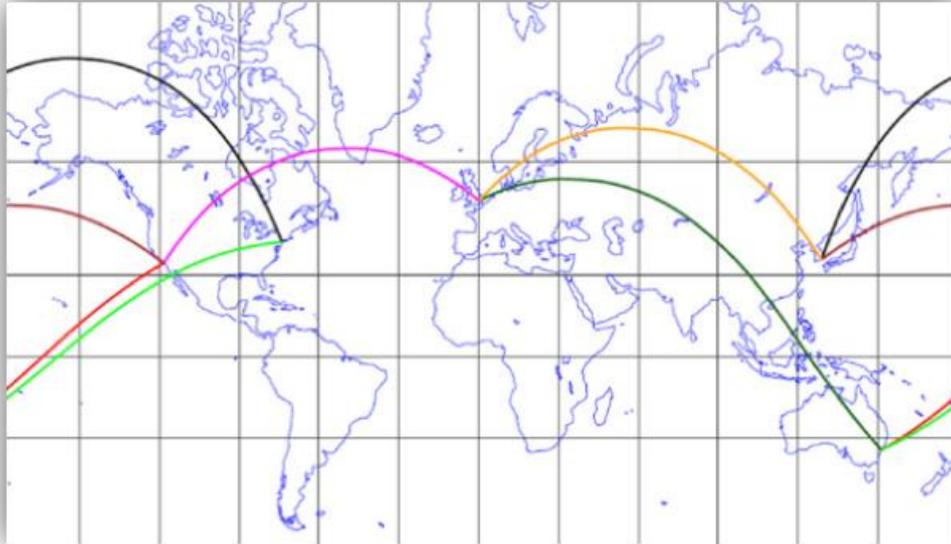


Abbildung 2-3: SpaceLiner-Reise-Netzwerk (Sippel, 2009)

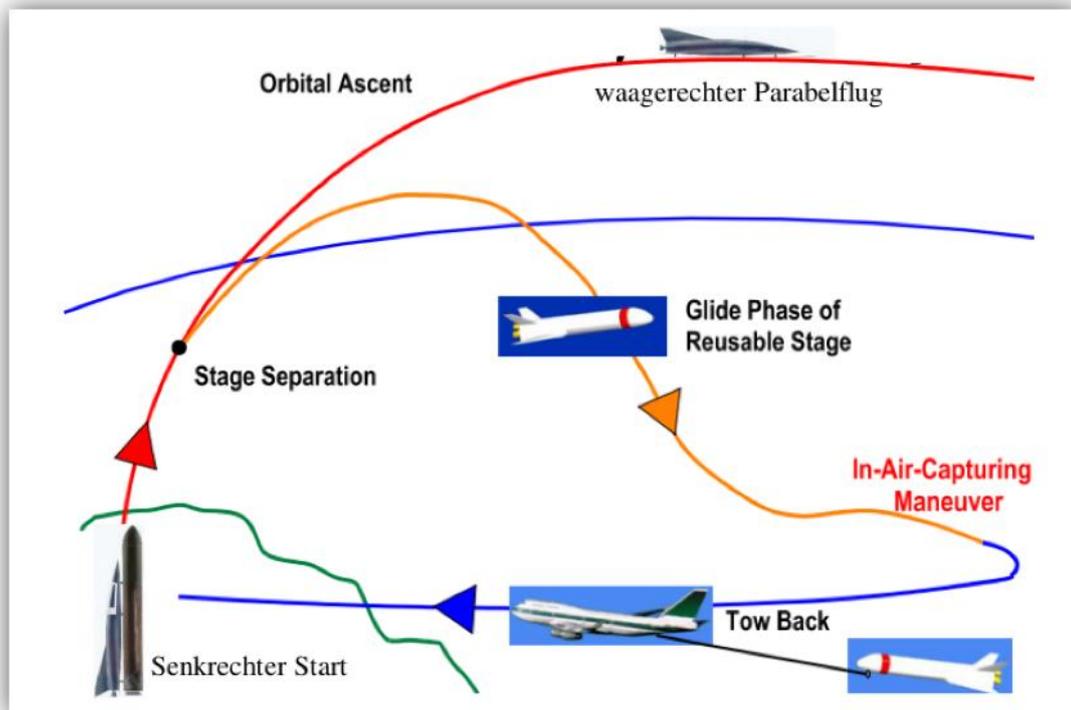


Abbildung 2-4: Übergang vom senkrechten in den Horizontalflug (Hildebrandt, 2018)

## 2.2 Anforderungen und Richtlinien

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen konstruktiven Entwurf für einen SpaceLiner-Sitz unter Berücksichtigung der Anforderungen anzufertigen. Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt nur diejenigen Anforderungen ausgearbeitet, die einen direkten Bezug zum Thema dieser Arbeit aufweisen.



Abbildung 2-5: *Passagierstufe (Orbiter) im Gleitflug* ("Explore With Us: DLR Spaceliner - YouTube," n.d.)

Wie bereits erwähnt, befinden sich die Passagiere im Orbiter in zwei wesentlichen Fluglagen: In der Startphase zeigt die bemannte Passagierstufe nach oben (siehe Abbildung 2-2) und in der Gleitphase geradeaus bzw. nach vorne, analog zur Lage eines konventionellen Passagierflugzeugs (siehe Abbildung 2-2, Abbildung 2-4 und Abbildung 2-5). Da die Hauptzielgruppe des bemannten SpaceLiners gewöhnliche Zivilisten sind, die von A nach B reisen möchten, kann nicht vorausgesetzt werden, dass von diesen entsprechenden Kenntnissen bezüglich des Weltraums mitgebracht werden. Der Interkontinentalflug muss für die Passagiere daher genauso unkompliziert ablaufen wie ein gewöhnlicher Flug mit einem herkömmlichen Passagierflugzeug. Es werden daher keine speziellen Kenntnisse oder körperlichen Fähigkeiten für die Nutzung des SpaceLiners vorausgesetzt. Im Gegenteil: Der Komfort der Gäste bzw. der Passagiere steht im Vordergrund, da (zumindest in der Anfangsphase) der Service exklusiv sein wird. Mit anderen Worten: Es besteht maximaler Komfort bei einem Minimum an Aufwand, Bürokratie und Hindernissen für die (zahlenden) Kunden. Diese Tatsache gibt buchstäblich den Rahmen für die Passagiersitze des SpaceLiners vor. Ein starrer Sitz, wie im gewöhnlichen Passagierflugzeug, kommt wegen der senkrechten Startposition und der senkrechten Flugrichtung in der Beschleunigungs- bzw. Startphase nicht infrage, da die Passagiere andernfalls diese Phase in einer unangenehmen, liegenden Position überbrücken müssen (siehe

Abbildung 2-6). Ein Kompromiss, durch welchen die Passagiere diesen liegenden Zustand „aushalten“ müssen, ist ausgeschlossen, weil die Passagiere unter Umständen vergleichsweise lange in dieser Sitz- bzw. Liegeposition verharren müssen. Vom Boarding bis zu dem Punkt, an welchem der Orbiter in seine Umlaufbahn gelangt und von welchem aus er horizontal weiterfliegt und damit die Passagiere in ihrer Sitzposition entlasten würde, kann in nicht seltenen Fällen gut eine Stunde oder sogar eine noch längere Zeit vergehen. Neben der Tatsache, dass es für die Reisenden sehr schnell ungemütlich werden kann, spielen auch gesundheitliche Faktoren eine wichtige Rolle. Verharren erkrankte Passagiere zu lange in der Position, wie in Abbildung 2-6 dargestellt, kann dies zu gesundheitlichen Problemen oder unerwünschten Nebenwirkungen führen, die nicht nur die Gesundheit der Passagiere gefährden, sondern auch den Flug selbst (Stichwort Notfalllandung). Problemen und Gefahren dieser Art lässt sich jedoch mit einem komfortablen Sitz vorbeugen.



Abbildung 2-6: Orbiter mit Blickrichtung nach oben; links: Passagiere in liegender Startposition (Hildebrandt, 2018)

Aus den zuvor gewonnenen Erkenntnissen lässt sich ableiten, dass die Passagiere möglichst aufrecht sitzen müssen – in allen Phasen des Fluges und ebenso sowohl beim Boarding als auch beim Deboarding. Das ist allerdings nur möglich, wenn die Passagiersitze ihre relative Position zum Flugkörper ändern können. Es ist also eine Mechanik notwendig, die dafür sorgt, dass die Sitzfläche stets parallel zur Erdoberfläche und damit unabhängig von der Lage des SpaceLiners ist.

## Komfort und Ergonomie

Der Komfort und die Ergonomie stehen am Anfang allerdings noch nicht im Mittelpunkt. Zunächst einmal muss eine funktionierende Mechanik vorliegen, ein Skelett des funktionierenden Sitzes sozusagen, auf dem anschließend die Ergonomie aufbaut. Daher befasst sich diese Arbeit zunächst mit einem geeigneten Mechanismus, der es den Passagiersitzen ermöglicht, ihre Lage relativ zum Flugkörper zu ändern.

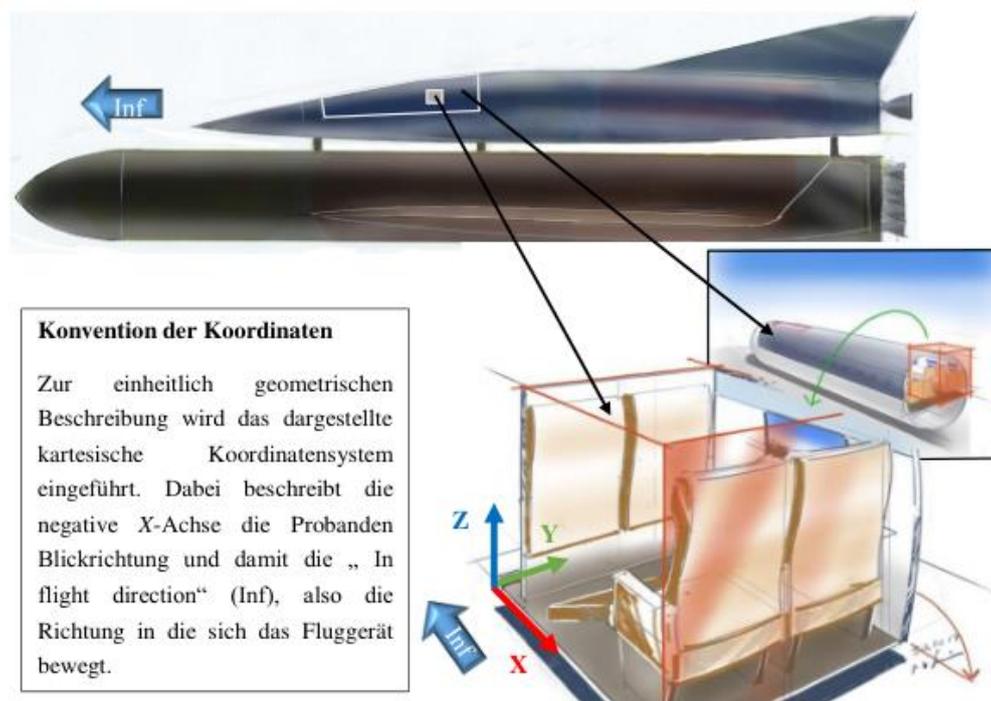


Abbildung 2-7: SpaceLiner mit Koordinatensystem nach (Hildebrandt, 2018)

Ausgehend von dem vorherigen Abschnitt wird schnell klar, dass lediglich eine Rotation kompensiert werden muss, nämlich die Drehung um die y-Achse. Der Sitz muss also einen Freiheitsgrad aufweisen, der es ihm erlaubt, sich um ebendiese Achse zu drehen. Damit wird grundsätzlich ermöglicht, dass die Sitzfläche unabhängig von der tatsächlichen Lage des Orbiters eingestellt werden kann. (Technische Details zur Umsetzung eines solchen Mechanismus folgen im nächsten Kapitel.) Der Orbiter dreht sich natürlich auch um die beiden anderen Achsen (x- und z-Achse) während eines gewöhnlichen Fluges (analog zum konventionellen Passagierflugzeug). Diese Rotationen bewegen sich allerdings im ertragbaren Rahmen, schränken nicht den Komfort

ein und gefährden auch nicht die Gesundheit der Passagiere. Daher liegt der Fokus des Entwurfs auf der Kompensation der Drehung um die y-Achse. Damit ist – selbstverständlich neben den relevanten Sicherheitsaspekten – die wichtigste Anforderung an den Passagiersitz herausgearbeitet worden.

### **Gewichtsfaktor**

Da es sich um eine Anwendung im Bereich der Luft- und Raumfahrt handelt, muss grundsätzlich das Gewicht der Konstruktion im Auge behalten werden. Nicht jeder funktionierende Mechanismus ist auch zugleich für den Einsatz im SpaceLiner geeignet. Das Gewicht der Passagiersitze wird durch den Werkstoff (genau genommen durch die Dichte des Werkstoffs) und durch das verwendete Volumen des Materials bestimmt, aber auch durch die Komplexität der technischen Lösung für den Drehmechanismus. Insofern ist ein leichter Werkstoff mit hoher Festigkeit ratsam. Auf diese Weise lässt sich sowohl die Dichte als auch das Volumen der Konstruktion – und somit auch die Masse – reduzieren. Darüber hinaus muss der Drehmechanismus möglichst kompakt, schlank und einfach gestaltet werden. So lässt sich vermeiden, dass das Gesamtgewicht aufgrund eines technisch funktionierenden, aber im Hinblick auf die Komplexität ungünstigen Entwurfs unnötig erhöht wird. Außerdem sei angemerkt, dass eine einfache Lösung nicht nur in der Herstellung, sondern auch dank höherer Robustheit wartungsärmer und damit kostengünstiger ist.

### **Gesundheit des Passagiers**

Obwohl der Drehmechanismus ein Problem von vielen auf der Liste der Probleme, die mit der Konstruktion des SpaceLiners verbunden sind, löst, so erzeugt er ein neues: Bei der Drehung kann der Sitz Hände, Füße oder andere Körperteile des zugehörigen Passagiers oder von benachbarten Passagieren quetschen und/oder verletzen. Beim Entwurf ist dieser Sicherheitsaspekt mitzubedenken, denn es darf bei der Drehung natürlich nicht zu Quetschungen oder anderen Verletzungen kommen. Zu den Sicherheitsaspekten gehört auch die einwandfreie Funktion des Sitzmechanismus zu jeder Zeit. Damit ist nicht nur gemeint, dass der Drehmechanismus sich nicht verkeilen oder steckenbleiben darf. Vielmehr ist auch darauf zu achten, dass der Mechanismus nicht ungedämpft und lose umherschwingen darf. Ein ungedämpfter/loser Sitz kann in Kombination mit der eigentlichen Bewegung des SpaceLiners Übelkeiten und Kopfschmerzen hervorrufen. Besonders problematisch kann diese Situation dann sein, wenn der Passagier kopfüber oder in einer ungünstigen Lage steckenbleibt. Daher muss der Drehmechanismus „von Natur aus“ derartige Schwingungen und Kopfüber-Lagen verhindern.

## **Notfallmaßnahmen**

Neben solchen Sicherheitsaspekten gilt es auch grundsätzlich zu berücksichtigen, dass die Passagiere – im Falle eines Notfalls – weiterhin zuverlässig an die Sauerstoffmasken, Lebenswesten etc. gelangen können. Der Ausstieg aus den Sitzen im Falle eines Notfalls und die Flucht zum Notausgang müssen ebenfalls gewährleistet sein. Beim Ein- und Aussteigen dürfen die Sitze möglichst nicht im Weg stehen oder gar das Potential zum Stolpern oder Behindern aufweisen. Diese und weitere Aspekte sollen im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter untersucht werden, weil hierbei nicht nur der Sitz betroffen ist, sondern auch die unmittelbare Umgebung des Sitzes. Dafür sind Kenntnisse des gesamten Kabinenbereichs vonnöten. Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es allerdings noch keine konkreten Vorstellungen über den Innenraum des Orbiters.

## **Notdurft während der Startphase**

Vom Start bis zum Zeitpunkt, an welchem der Orbiter sich vom Booster trennt und somit horizontal weiterfliegt (siehe Abbildung 2-4 und Abbildung 2-5), ist es praktisch nicht möglich, dass die Passagiere vom Sitz aufstehen und etwa zur Toilette gehen. Die Passagiere würden nämlich in der Kabine nach unten fallen. Nach Angaben des DLR soll dieser Vorgang maximal acht Minuten dauern – ein kurzer Zeitraum, in welchem es vielleicht einfach hingenommen werden muss, dass hier kein Passagier aufsteht. Allerdings geht es, um genau zu sein, bereits mit dem Boarding los. Wenn das Boarding schon mit senkrecht stehendem SpaceLiner stattfindet, dann sind die Passagiere ab diesem Zeitpunkt eingeschränkt. Wie vom konventionellen Fliegen bekannt, kann es über eine halbe Stunde dauern, bis alle Passagiere das Boarding absolviert haben und das Flugzeug anschließend in der Luft ist (wobei dann das Aufstehen und der Gang zur Toilette beispielsweise wieder erlaubt sind). Dies ist im Falle des SpaceLiners eine nicht hinnehmbare Zeit. Im Falle eines Notfalls oder auch einer Notdurft ist es den Passagieren nicht nur nicht gestattet, sondern auch praktisch unmöglich, aufzustehen und ihrem Bedürfnis nachzugehen. Dies ist zwar ein enormes Problem, das berücksichtigt werden muss, allerdings lässt es sich nicht allein mit einem passenden Entwurf eines Sitzes lösen. Vielmehr sollten sich hier mehrere Gruppen des SpaceLiners-Projekts zusammensetzen und das Problem gemeinsam angehen. Eine augenscheinliche Lösung wäre es, das Boarding mit horizontal ausgerichtetem Orbiter durchzuführen. So haben die Passagiere jederzeit die Möglichkeit aufzustehen und wären damit nicht eingeschränkt. Sobald das Boarding vollständig absolviert worden ist, bringt eine Rampe den SpaceLiner in die für den Start benötigte senkrechte Position. Auf diese Art und Weise lässt sich die Überbrückungszeit für die Passagiere auf ein Minimum reduzieren. Da, wie bereits erwähnt, dieses Problem nur gruppenübergreifend angegangen und nicht ausschließlich durch einen passenden Sitz gelöst werden kann, wird dieser Aspekt nicht weiter im Rahmen dieser

Abschlussarbeit betrachtet. Hier soll lediglich auf die große Problematik hingewiesen werden, damit nachfolgende Arbeiten darauf Rücksicht nehmen können.

### **Allgemeine Dimension des Sitzes**

Ein weiteres wichtiges Merkmal bildet die Dimension des Passagiersitzes. Grundsätzlich gilt in der Luft- und Raumfahrt: so wenig wie möglich, so viel wie nötig. Die Gründe dafür liegen auf der Hand. Allerdings handelt es sich beim SpaceLiner um einen Service im hochpreisigen Segment. Komfort und Technik sollten also möglichst im Gleichgewicht stehen. Die Abmaße der Sitze müssen in erster Linie ausreichend Platz für die Passagiere bieten und die Sicherheit der Passagiere begünstigen. Das stellt grundsätzlich die wichtigste Anforderung an die Abmaße der Sitze dar. Zur groben Erstorientierung können die Maße eines konventionellen Flugsitzes in der Business-Class genutzt werden. Die meisten Airlines benutzen für diese Klasse Maße in derselben Größenordnung. Der Vorteil dieser Abmaße ist, dass hier Sicherheit und Komfort genügend Platz eingeräumt wird und nicht zu kurz kommen. Allerdings gilt es speziell bei dem SpaceLiner zu beachten, dass sich der Sitz um die horizontale Achse drehen muss. Dieser Faktor könnte die Abmaße der Sitze im weiteren Verlauf noch beeinflussen. Ob und in welchem Ausmaß die Abmaße beeinflusst werden, soll im weiteren Verlauf dieser Arbeit untersucht werden. Für gewöhnlich beträgt die Breite der Sitze zwischen 80 und 90 Zentimeter. Der Sitzabstand zum Vordersitz beträgt zwischen 150 und 205 Zentimeter (siehe dazu <https://www.businessclassflug.com/airlines/business-class>). Da noch keine konkreten Vorstellungen seitens des DLR im Hinblick auf die Abmaße der Sitze vorliegen, sollen im Rahmen dieser und nachfolgender Arbeiten die oben genannten Maße herangezogen werden. Für einen Erstentwurf sind diese Maße berechtigt und bereits erprobt. Dies gilt nicht nur für die Hauptmaße (Länge x Höhe x Breite), sondern auch für die Nebenmaße (Höhe und Breite der Armlehnen, Neigungswinkel der Rückenlehne, Höhe und Breite der Kopfstützen etc.).

Neben den Abmaßen und den zuvor aufgezählten Randbedingungen spielt es eine sehr große Rolle, wie sich der Passagiersitz dreht, wenn sich das Flugzeug neigt. Da die Sitzfläche stets parallel zum Erdboden ausgerichtet sein soll, liegt es nahe, die Rotation des Sitzes der Wirkung der Gravitation selbst zu überlassen.

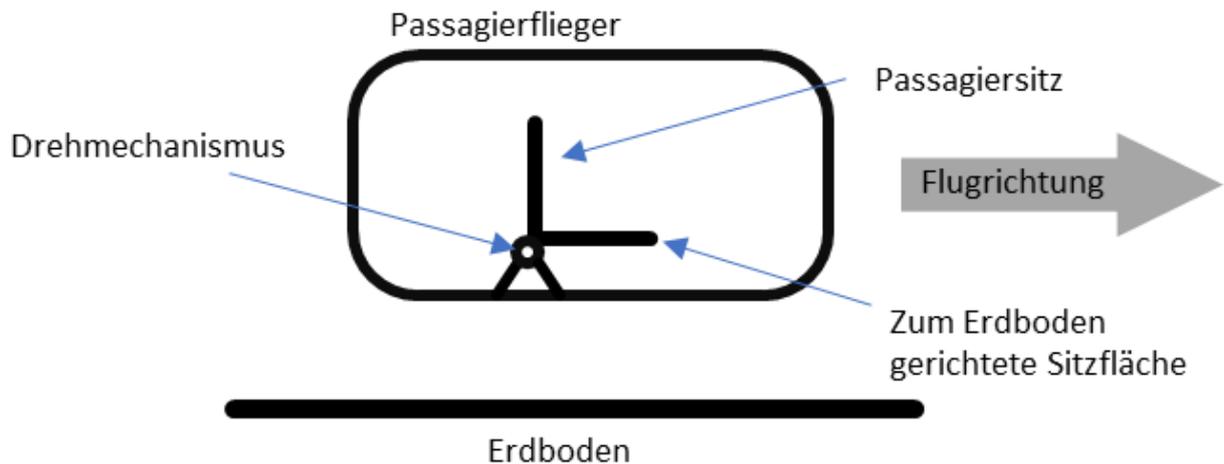


Abbildung 2-8: Prinzipskizze zur Veranschaulichung der Sitzneigung in Abhängigkeit von der Position des SpaceLiners (eigene Darstellung)

Abbildung 2-8 zeigt den Orbiter im stationären Gleitflug. In dieser Lage befindet sich die Sitzfläche, wie es aus dem konventionellen Passagierflugzeug bekannt ist, stets parallel zum Erdboden. Allerdings ist es erforderlich, dass die Sitzfläche im Steig- und Sinkflug sowie in der vertikalen Startposition weiterhin parallel zum Erdboden ausgerichtet ist. Dies wird insbesondere in Abbildung 2-9 deutlich: Der Drehmechanismus erlaubt beim Steig- und Sinkflug die Rotation des Sitzes, sodass der Passagier stets aufrecht sitzen kann und nicht kopfüber oder in einer anderen, unangenehmen Lage.



Abbildung 2-9: Prinzipskizze des Orbiters im Steig- und Sinkflug; die Sitzfläche ist jeweils parallel zum Erdboden ausgerichtet (eigene Darstellung)

Selbstverständlich wäre es technisch möglich, die Rotation des Passagiersitzes der Gravitation zu überlassen. Das wäre darüber hinaus die einfachere, kostengünstigere und somit leichtere Option. Prinzipiell funktioniert diese Option genauso, wie dies bei Wasser in einer Flasche der Fall ist: Egal, wie man die Flasche dreht und hält, die Wasseroberfläche ist stets parallel zum Erdboden. Allerdings spricht ein entscheidender Faktor gegen diese Lösung: Den Passagieren muss es jederzeit möglich sein, ihre Sitze sicher und komfortabel zu verlassen. Man denke hier beispielsweise an jemanden, der im oberen Stauraum auf sein Handgepäck zurückgreifen

möchte, oder an jemanden, der die Toilette aufsuchen muss. Außerdem ist noch etwa an einen Notfall zu denken, bei dem die Passagiersitze günstig gelegen sein müssen, damit die Passagiere einfach aussteigen können. Aus diesen Gründen muss der Sitz zusätzlich per Knopfdruck verstellt werden können. Das geht nur, wenn die Rotation des Sitzes motorisch umgesetzt wird. Daher ist es im Falle des SpaceLiners unbedingt notwendig, die Sitze mit einem entsprechenden Antrieb zu versehen. Dies hätte zudem den Vorteil, dass der motorische Antrieb eine langsame und geschmeidige Drehung ermöglichen kann. Bei der ersten Option, bei welcher sich der Sitz mit der Gravitation bewegt, besteht nämlich die Gefahr des Hin- und Herschaukelns.

### **Werkstoffe, Leichtbau und Festigkeit**

Darüber hinaus gelten weitere Anforderungen, die insbesondere im konventionellen Flugzeugbau für den zivilen Einsatz vorzufinden sind. Davon sind vor allem Richtlinien betroffen, die sich auf den Leichtbau beziehen. Das erstreckt sich von den Werkstoffen, die zum Einsatz kommen, bis hin zu Normteilen wie Schrauben, Muttern und Bolzen. Die infrage kommenden Bau- und Normteile sind dank der Kommerzialisierung des Passagierflugzeugbaus auf dem Markt verfügbar. Bestehende Lösungen, empfohlene Werkstoffe und geeignete Normteile können somit in die Struktur des SpaceLiners übernommen werden. Selbstverständlich muss, wie bei jedem anderen Projekt auch, die Tauglichkeit der verwendeten Teile geprüft werden. Schließlich ist der SpaceLiner kein gewöhnliches Passagierflugzeug. Doch das experimentelle Testen ist erst im fortgeschrittenen Stadium der Entwicklung relevant. Eines sollte stets im Hinterkopf behalten werden: Obwohl der SpaceLiner im Hinblick auf den Passagiersitz zahlreiche Gemeinsamkeiten mit einem konventionellen Passagierflugzeug aufweist, wirken auf Ersteren größere Beschleunigungskräfte, weil er in kürzerer Zeit höher fliegen muss als gewöhnliche Flugzeuge. Das wirkt sich nicht nur auf die Passagiere, sondern auch auf die Festigkeit der eingesetzten Teile und Sitzstrukturen des SpaceLiners aus.

### **Sitzkomfort**

Natürlich steht der Komfort ebenfalls im Vordergrund. Schließlich bilden genau diese Elemente, also Sitzkomfort, Sitzbezug und Ergonomie beim Fliegen, das Aushängeschild des SpaceLiners – zumindest im Innenraum. Aber auch hier sei angemerkt, dass im Rahmen dieser Arbeit und im Rahmen der Forschung des DLR nicht der Sitzbezug oder die Kissen der Sitze von hoher Priorität sind. Für einen ausreichenden Komfort gibt es bereits unzählige gute Lösungen, die – wenn es so weit sein sollte – einfach übernommen werden können. Für die Entwicklung des SpaceLiner-Sitzes stellt der Komfort allerdings kein Problem dar. Der Fokus liegt vielmehr auf dem Drehmechanismus der Passagiersitze.



Abbildung 2-10: *Business-Class-Sitz mit Abmaßen* ("Flugzeugsitz Doppelsitzbank Contour-S20214 Business Class -Lang," n.d.)

Zur besseren Übersicht sind die oben genannten Anforderungen und Richtlinien tabellarisch im Folgenden zusammengefasst.

<b>Anforderung</b>	<b>Erläuterung</b>	<b>Priorität</b>	<b>Auswirkungen auf die Gesundheit</b>
Drehung des Sitzes um die Horizontalachse	Senkrechter Start + horizontaler Stationärflug = zwei verschiedene Fliegerlagen	Hoch	Hoch
Langsame und geschmeidige Drehung des Sitzes beim Wechsel der Fliegerlagen	Schnelle und ruckartige Drehbewegungen („Schaukeln“) können zu Übelkeit u. a. führen	Hoch	Hoch
Zeitraum, in dem der Flieger senkrecht steht	Beim Boarding sollte der SpaceLiner möglichst (wie ein normales Flugzeug) liegen, damit die Passagiere nicht eingeschränkt werden.	Mittel	Mittel
Gewicht der Sitze	Leichtbau, Treibstoff und Umwelt	Mittel	Gering
Sicherheit des Drehmechanismus	Reduzierung der Gefahr des Klemmens und des Quetschens	Hoch	Hoch
Zugang zum Notfall-Equipment	Bei verdrehten Sitzen müssen die Passagiere an die Sauerstoffmasken und Lebenswesten mit der Hand herankommen.	Hoch	Hoch
Maße des Sitzes	110 cm x 80 cm x 135 cm (L x B x H); siehe auch Abbildung 2-10	Hoch	Mittel

Langlebigkeit des Sitzmechanismus	Hohe Langlebigkeiten zahlen sich langfristig aus, verursachen in der Anschaffung meist aber mehr Kosten und bringen oft ein höheres Gewicht mit sich.	Hoch	Gering
Antrieb der Rotation	Antrieb über Motor, individuell und per Knopfdruck regelbar, langsame und geschmeidige Drehbewegung, hohe Robustheit und hohe Sicherheit notwendig	Hoch	Hoch

Tabelle 2-1: Anforderungsliste

## 3 Konzeptentwurf

Aus den herausgearbeiteten Anforderungen und Rahmenbedingungen geht klar hervor, dass in der Entwicklung des SpaceLiner-Sitzes der Mechanismus zur einwandfreien und sicheren Rotation des Sitzes um die Horizontalachse – zumindest in der Anfangsphase der Entwicklung – das wichtigste Merkmal darstellt. Alle anderen übrigen Anforderungen wurden im Rahmen der zivilen Luft- und Raumfahrt bereits mehrfach angewandt. Aspekte wie Leichtbau, Komfort, Sicherheit und viele mehr sind dank jahrelanger Forschung und Entwicklung heutzutage auf einem sehr hohen und sicheren Niveau. Die Werkstoff-, Rohstoff- und Fertigungsindustrien sind im Bereich der Luft- und Raumfahrt hochgradig spezialisiert und können innerhalb kürzester Zeit passende, kostengünstige und zudem erprobte technische Lösungen realisieren. Es wäre daher unklug, solch bewährte und garantiert einwandfrei funktionierende sowie günstige Lösungskonzepte nicht in den SpaceLiner einfließen zu lassen, solange diese nicht zu anderen Rahmenbedingungen im Widerspruch stehen. Hinzu kommt die Tatsache, dass diese Arbeit nicht im Ansatz über die Ressourcen eines großen Unternehmens wie etwa Boeing o. Ä. verfügt. Es wäre daher nicht nur unklug, von bewährten Lösungen abzuweichen, sondern auch fahrlässig, weil das Knowhow eines solchen Unternehmens wie Boeing an dieser Stelle nicht zur Verfügung steht, um über partielle Lösungen zu debattieren, die jahrelang von solchen Unternehmen bis ins Detail entwickelt worden sind. Daher soll angenommen werden, dass Teillösungen zu den oben genannten Anforderungen (bis auf solche, die den Drehmechanismus direkt betreffen) bereits existieren und erprobt wurden. Aus diesen Gründen soll der Schwerpunkt dieser Arbeit auf den Drehmechanismus gelegt werden.

### 3.1 Variante 1: Hängender Sitz mit Deckenbefestigung

Der Drehmechanismus muss gewährleisten, dass der Sitz um 90° um die Horizontalachse gedreht werden kann – nicht zu schnell, aber auch nicht zu langsam. Die Geschwindigkeit, mit welcher der Sitz verdreht wird, ist genauso wichtig wie die Tatsache, dass der Sitz überhaupt drehbar gestaltet werden muss. Die erste Frage lautet also: Wie genau soll sich der Sitz verdrehen? Von Anwendungen aus dem Alltag sind Teillösungen bekannt, die Sitze verdrehen. Darunter fällt beispielsweise auch die allseits bekannte Schaukel

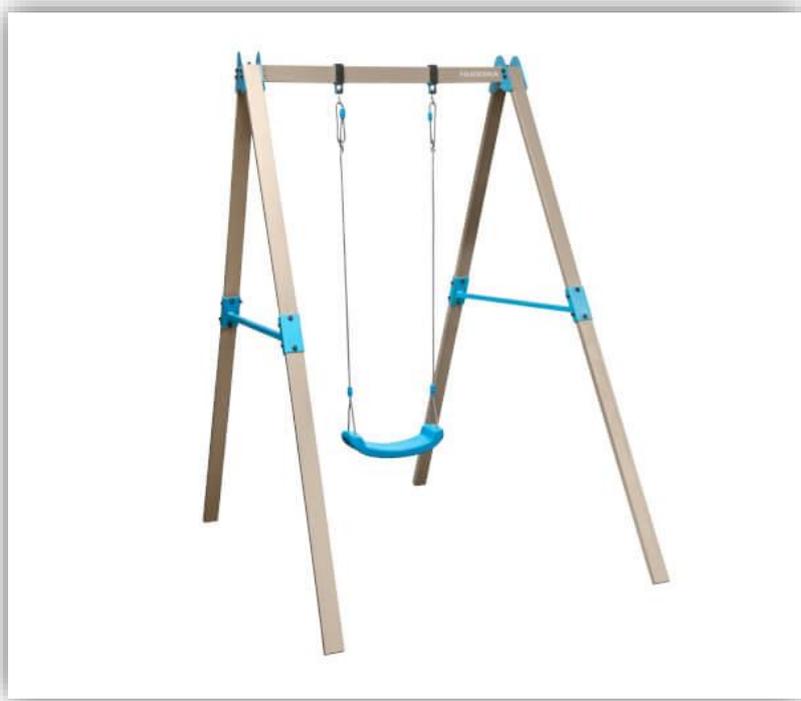


Abbildung 3-1: *Schaukel* ("HUDORA Schaukel Vario Basismodul V," n.d.)

Eine solche Konstruktion bietet die Möglichkeit, den Winkel großzügig zu verstellen. Eine Verstellung von  $90^\circ$  oder mehr ist hierbei kein Problem. Auch der Rahmen und die Komplexität erweisen sich als sehr leicht, robust und unkompliziert. Konflikte könnten allerdings mit der Aufhängung an der Decke entstehen. Normalerweise werden schwere Konstruktionen am Boden befestigt, der ohnehin schon fest gebaut werden muss, da auf diesem die Passagiere laufen. Die Decken einer Flugzeugkabine sind in der Regel nicht so fest gebaut, dass hier die Sitze samt Passagieren getragen werden können. Außerdem ist diese Konstruktion anfällig für seitliche Schwingungen. Das reduziert nicht nur den Komfort für die Passagiere des SpaceLiners, sondern wirkt sich auch negativ auf die Lebensdauer des Drehmechanismus aus. Nichtsdestotrotz soll schemenhaft gezeigt werden, wie eine solche Lösung grob aussehen könnte. Abbildung 3-2 zeigt einen einfachen Schalensitz, der im Folgenden den Passagiersitz des SpaceLiners vorläufig ersetzen soll. Bei dieser Variante wird der Sitz an der Decke der Kabine aufgehängt, wobei eine Rahmenkonstruktion die Decke mit dem Schalensitz verbindet. Die horizontale Drehachse befindet sich in der Hülse am oberen Ende des Rahmens. Auch wenn es in der Skizze so aussieht, als wäre diese Variante besonders schlank und besonders leicht, so muss berücksichtigt werden, dass hier sehr große Kräfte bei der Drehung wirken. Der Schwerpunkt des Sitzes und der Schwerpunkt der sitzenden Passagiere (ungefähr im Bereich der Hüfte) sind vergleichsweise weit von der Drehachse entfernt. Gemäß dem Gesetz zur Bestimmung des Massenträgheitsmoments bei Drehbewegungen, nämlich

$$J = m \cdot r^2$$

(wobei m für die Masse und r für den Abstand zwischen der Masse und der Drehachse steht), wächst das Massenträgheitsmoment quadratisch mit dem Abstand zwischen der Masse und der Drehachse an. Diese Lösung ist zwar mit Sicherheit technisch umsetzbar, aber ob sie auch im Hinblick auf Langlebigkeit und Leichtbau sinnvoll ist, soll später genauer untersucht werden.

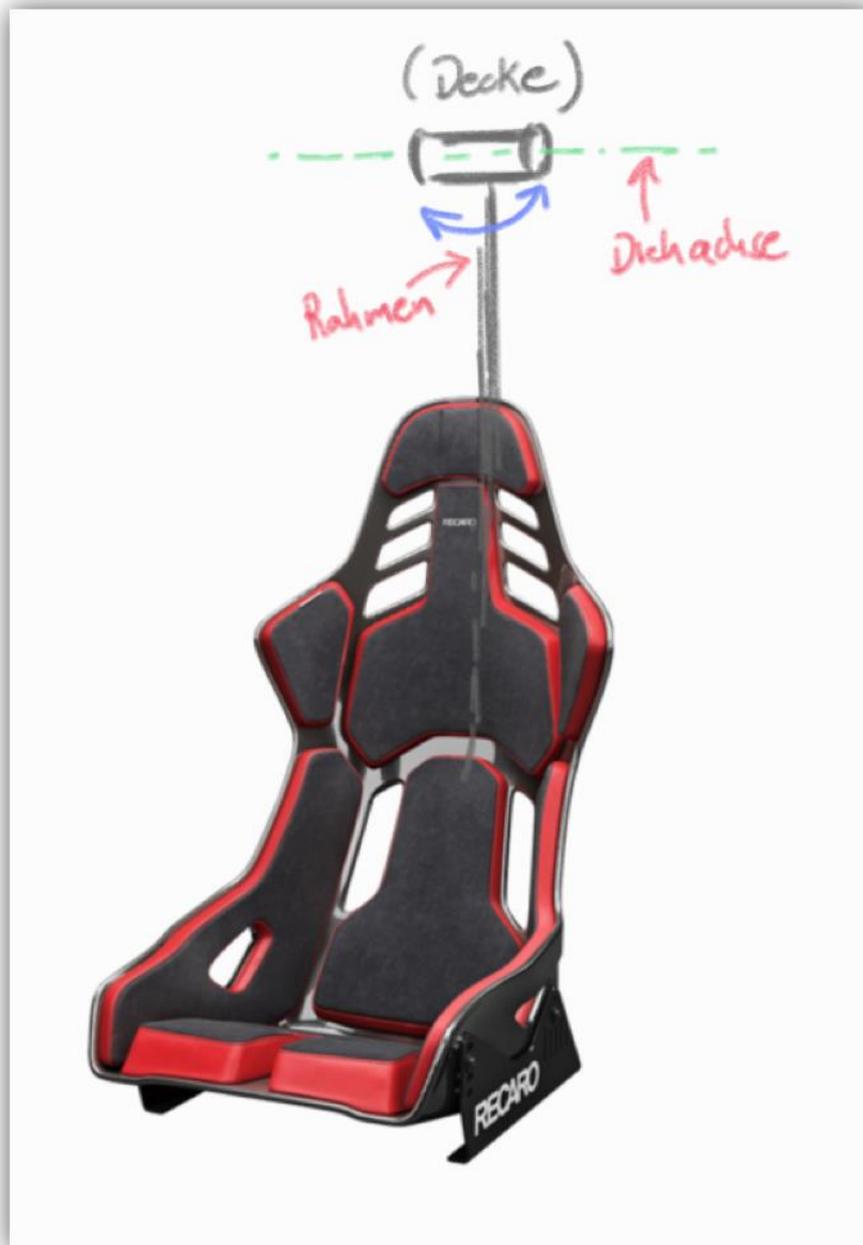


Abbildung 3-2: Schalensitz mit Aufhängung an der Decke (Variante 1) ("RECARO Podium CF – Höhepunkt der Sitzentwicklung,," n.d.)

Insgesamt macht die Variante gemäß Abbildung 3-2 einen guten ersten Eindruck, da sie unkompliziert ist und auf dem bekannten Schaukelprinzip basiert. Probleme könnten bei der Deckenaufhängung und beim Rahmen entstehen, wo im senkrechten Flug große Kräfte wirken können. Beim stationären, horizontalen Geradeausflug „hängt“ der Sitz lediglich nach unten. Hierbei spielt der Einfluss der Massenträgheit dann keine Rolle mehr.

### 3.2 Variante 2: Kippender Sitz mit Drehachse am Gesamtschwerpunkt

Eine Variante, bei der die Drehachse, im Gegensatz zu Variante 1, ganz nah am Massenschwerpunkt liegt, ist in Abbildung 3-3 zu sehen. Dabei „durchschneidet“ die Drehachse den Sitz. Auch dieses Konzept ist aus dem Büroalltag bekannt und vielfach bewährt.

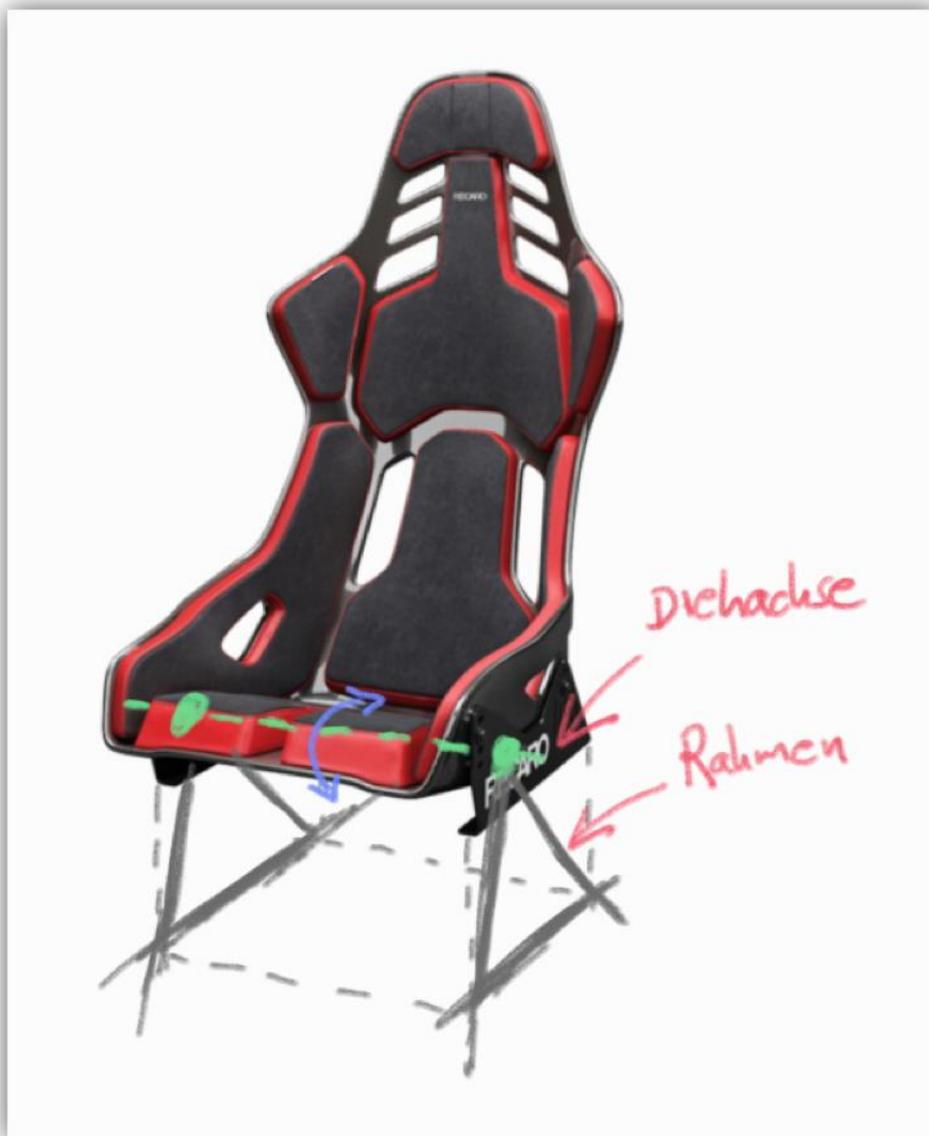


Abbildung 3-3: Schalensitz mit Drehachse nah am Schwerpunkt (Variante 2) ("RECARO Podium CF – Höhepunkt der Sitzentwicklung," n.d.)

Abbildung 3-4 zeigt einen handelsüblichen Bürostuhl, bei dem sich die Sitzneigung verstellen lässt. Hier liegt die entsprechende Horizontalachse nah am Schwerpunkt, so wie in Variante 2. Zwar ist dieses Konzept altbekannt und erprobt, allerdings lässt sich die Sitzneigung eines Bürostuhls lediglich um wenige Grad verstellen – eine Größenordnung, die weit von den mindestens geforderten 90° entfernt liegt. An dieser Stelle muss die Konstruktion somit angepasst werden, damit eine ausreichende Verstellmöglichkeit geboten wird. Durch die Wahl dieser Konstruktion wiederum lässt sich der Sitz kompakt gestalten, und zwar so kompakt, dass man als Nichtexperte kaum erkennen kann, ob er sich von einem gewöhnlichen Passagierfliegersitz unterscheidet oder nicht. Dadurch, dass die Drehachse den Sitz durchschneidet, lässt sich der Drehmechanismus samt Rahmen mit einer Blende gut verkleiden. In Abbildung 2-10, in welcher ein gewöhnlicher Passagiersitz einer Business-Class zu sehen ist, könnte ein solcher Drehmechanismus gut zum Einsatz kommen.



Abbildung 3-4: *Bürostuhl mit verstellbarer Sitzneigung* ("LOEFFLER\_Ergonomie\_Aktives\_Sitzen.jpg (JPEG-Grafik, 1000 x 891 Pixel) - Skaliert (69%)," n.d.)

Allerdings weist, ebenso wie Variante 1 (Abbildung 3-2), auch dieses Konzept eine Schwachstelle auf, die im weiteren Verlauf berücksichtigt werden muss. Gemäß dem Gesetz zur Bestimmung des Drehmoments,

$$M = F \cdot r$$

(wobei  $F$  die Kraft und  $r$  der Abstand zwischen dem Drehpunkt und dem Kraftangriffspunkt ist), wird der Rahmen in Variante 2 ebenfalls mit großen Kräften belastet. Wird beispielsweise ein Bremsmoment von 10 Newtonmetern zum Festhalten des Sitzes benötigt, so muss bei einer kurzen Hebellänge von 10 Zentimetern eine Bremskraft von 100 Newton auf den Rahmen wirken. Für dasselbe Drehmoment benötigt Variante 1 mit einem vergleichsweise langen Hebel von 100 Zentimetern lediglich eine Bremskraft von 10 Newton (siehe dazu Abbildung 3-5). Wie dieses Rechenbeispiel zeigt, könnte die Belastung bei dieser Konstruktion auf das Zehnfache anwachsen (verglichen mit der Konstruktion in Variante 1). Ob dieser Preis gerechtfertigt ist und gezahlt werden sollte, soll nach der Vorstellung der dritten Variante genauer untersucht werden. Eine höhere Belastung kann natürlich grundsätzlich durch eine festere und höherwertigere Konstruktion kompensiert werden, allerdings sollten hier Aspekte wie Leichtbau und Fertigungskosten nicht aus den Augen verloren werden.

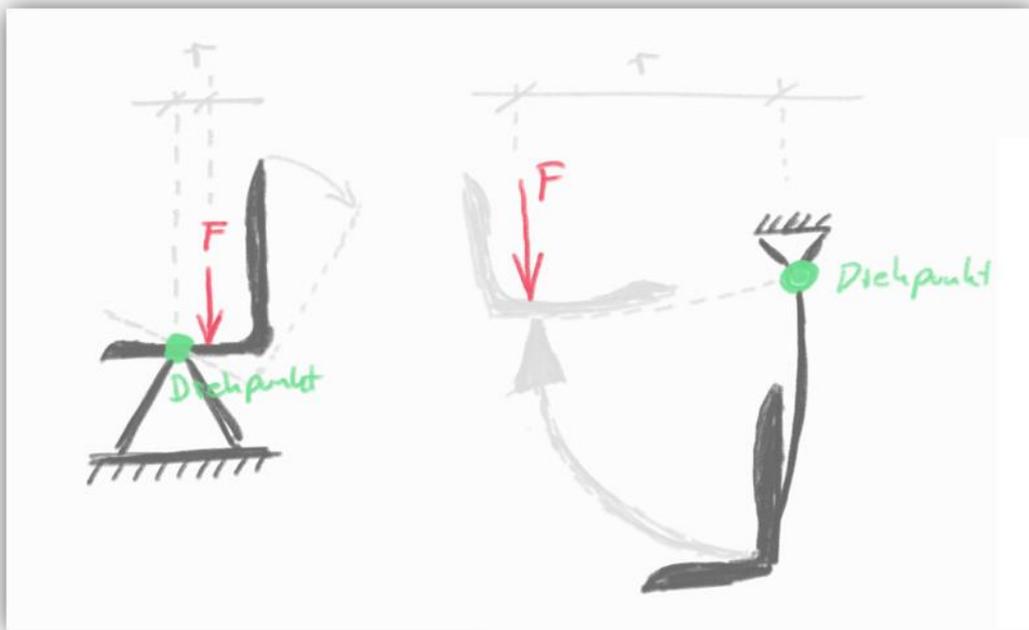


Abbildung 3-5: Variante 2 (links) und 1 (rechts) mit den zugehörigen Hebelarmen für das Drehmoment bzw. Massenträgheitsmoment (eigene Darstellung)

Zu Variante 2 sei angemerkt, dass hier das Massenträgheitsmoment geringer ausfällt als bei Variante 1. Das Massenträgheitsmoment macht sich bei der Drehung (konkret bei der Änderung der Winkelgeschwindigkeit) selbst bemerkbar und verursacht in dieser Phase unter Umständen große Belastungen. Das Drehmoment hingegen ist für die Bauteile ständig belastend, sowohl bei der Drehung selbst als auch in der Phase, in welcher der Sitz stillsteht. In diesem Sinne weist Variante 2 das kleinere Massenträgheitsmoment auf, dafür aber die größere Kraft beim Drehmoment. Wie sich sowohl Massenträgheitsmoment als auch Drehmoment auswirken und ob dies Auswirkungen auf die Entscheidung über eine Variante hat, soll nach der Vorstellung der dritten Version untersucht werden.

### 3.3 Variante 3: Kippender Sitz mit Drehachse am Boden

Die nachfolgende Abbildung 3-6 zeigt schließlich Version 3 des Drehmechanismus. Hier liegt eine vergleichsweise unkonventionelle und eine aus dem Alltag nicht allzu bekannte technische Lösung vor, bei der die Drehachse über die Hülse am Boden der Kabine angebracht ist. Eine schräge Stütze verbindet den Rahmen an der Rückenlehne mit dem Kabinenboden. Diese Stütze ist in ihrer Länge variabel und fungiert über ihre Funktion als Stütze hinaus als Stoßdämpfer. Auch im Hinblick auf das Massenträgheits- und Drehmoment bildet die Version 3 einen guten Kompromiss, da die entsprechenden Hebellängen hier weder allzu kurz noch allzu lang sind und sich zwischen denen in den Versionen 1 und 2 bewegen.



Abbildung 3-6: Schalensitz mit Drehachse und Stütze am Boden (Variante 3) (eigene Darstellung)

Es lässt sich abschließend sagen, dass die erste Version der Entwürfe aufgrund des langen Hebels und aufgrund der Befestigung an der Kabinendecke nicht bevorzugt werden darf und somit am wenigsten geeignet scheint. Die Version 2 bietet den Vorteil, dass sie aufgrund ihrer Bauweise besonders kompakt gestaltet werden kann. Ähnliche Lösungen sind, wie bereits erwähnt, aus dem Büroalltag zwar bekannt, allerdings muss hier auf eine ausreichend verstellbare Sitzneigung geachtet werden. Die zuletzt vorgestellte Version findet ein gutes Gleichgewicht mit Blick auf die entsprechenden Hebellängen. Die Befestigung am Kabinenboden scheint angemessen und angebracht, zudem kann die schräge Stütze zwischen dem Kabinenboden und der Rückenlehne Kräfte gut aufnehmen, sie bietet durch den Einbau eines Stoßdämpfers ein großes Potential bezüglich des Komforts und kann auch die Frage beantworten, wie der Sitz kontrolliert gedreht werden kann. Ein dort befestigter Stoßdämpfer könnte nämlich die Drehbewegung langsam genug durchführen.

Variante	Pro	Contra
1	Aus dem Alltag bekannte Lösung	Deckenbefestigung (Festigkeit der Kabinendecke nicht gegeben)
	Komplette Bodenfreiheit für den Passagier inkl. Vorder- und Hintermann.	Gefahr der seitlichen Schaukelbewegung möglich
	Leichte Konstruktion	Großes Massenträgheitsmoment
	Materialsparend	Kein Stauraum für das Handgepäck in der Kabine
2	Kompakt und schlank	Keine Bodenfreiheit gegenüber Version 1
	Bekannte Lösung aus dem Büroalltag	Große Haltekraft durch kleinen Hebel (siehe Abbildung 3-5)
	Feste Verbindung am Kabinenboden	Wenig Platz für den Drehmechanismus
3	Guter Kompromiss zwischen Variante 1 und 2 (Bauraum + Belastung)	Weniger Beinfreiheit durch die Stütze zwischen Rückenlehne und Kabinenboden

	Bedingt durch die Bauart: sehr gute und robuste Lösung mit einer großen Festigkeit	Aufwendigere Konstruktion im Vergleich zu Variante 1 (siehe Abbildung 3-2)
	Stoßdämpferintegration löst zusätzlich das Problem des freien Umherschwingens	Mehr Bau- und Normteile notwendig (damit auch schwerere Konstruktion)
	Keine Gefahr des seitlichen Ausschwingens (wie bei Variante 1; siehe Abbildung 3-2)	Voraussichtlich höherer Kostenaufwand (nach Ersteinschätzung); dies ist aber im weiteren Verlauf nochmal genauer zu untersuchen

Tabelle 3-1: Zusammenfassender Vergleich zwischen allen drei Varianten

Aufgrund der herausgearbeiteten Informationen und der vorangegangenen tabellarischen Zusammenfassung fällt die Wahl auf die dritte Version gemäß Abbildung 3-6. Die Tatsache, dass dies eine robuste und sichere konstruktive Lösung darstellt und dass das Problem des Umherschwingens durch die Integration eines Stoßdämpfers in der Stütze damit gelöst werden kann, machen Version 3 zum begründeten Favoriten im Rahmen dieser Arbeit. Eine genauere Ausarbeitung zur dritten Version folgt nun im nächsten Abschnitt der Arbeit.

## 4 Konkretisierung

In diesem Abschnitt soll eine geeignete technische Erstlösung realisiert werden, mit deren Hilfe erste experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden können. Selbstverständlich gilt es, hierbei zu berücksichtigen, dass es sich um einen Prototyp handeln wird. Bei einer Produktion mit einer Stückzahl von eins spielen die Fertigungskosten keine allzu große Rolle. Im Rahmen der späteren Serienproduktion kommt jedem kleinen Schritt eine wesentliche Rolle bei der Gestaltung der Produktionskosten zu, da jeder dieser kleinen Schritte unter Umständen tausendfach wiederholt werden muss. Eine Bewertung im Hinblick auf die Fertigung und auf die Produktion soll nach Vorstellung der konkreten technischen Lösung erfolgen.

### 4.1 Sitzmechanik und Drehmechanismus

Wie im vorherigen Kapitel herausgearbeitet wurde, soll im weiteren Verlauf die dritte Version der Entwürfe weiterverfolgt werden (Abbildung 3-6). Diese besteht im Wesentlichen aus zwei Stützen zwischen dem Kabinenboden und der Unterseite der Sitzfläche und aus einer Stütze zwischen der Rückenlehne und dem Kabinenboden.

Die nachfolgende Abbildung 4-1 zeigt die konstruktive Umsetzung aus der Prinzipskizze in Abbildung 3-6. Die Hauptbestandteile dieser Konstruktion sind:

- der eigentliche Sitz
- zwei Stützen unter dem Sitz, die am Kabinenboden gelenkig über eine Bolzenverbindung gelagert sind
- eine Stütze hinter dem Sitz, welche die Rückenlehne gelenkig (ebenfalls über eine Bolzenverbindung) mit dem Kabinenboden über eine Linearführung verbindet

Die beiden Bolzen (grün gestrichelt) unter der Sitzfläche (gemäß Abbildung 4-1) bilden die eigentliche horizontale Drehachse, die benötigt wird. Um diese Achse dreht sich der Stuhl bei Neigung des Orbiters. Zwei weitere Bolzen befinden sich auf der Rückseite der Rückenlehne und am Kabinenboden (an der Linearführung). Diese beiden Bolzen werden für die Stütze benötigt, die den Sitz davor schützt, frei zu fallen. Diese Stütze dämpft außerdem den Sitz hinsichtlich seiner Drehbewegung.

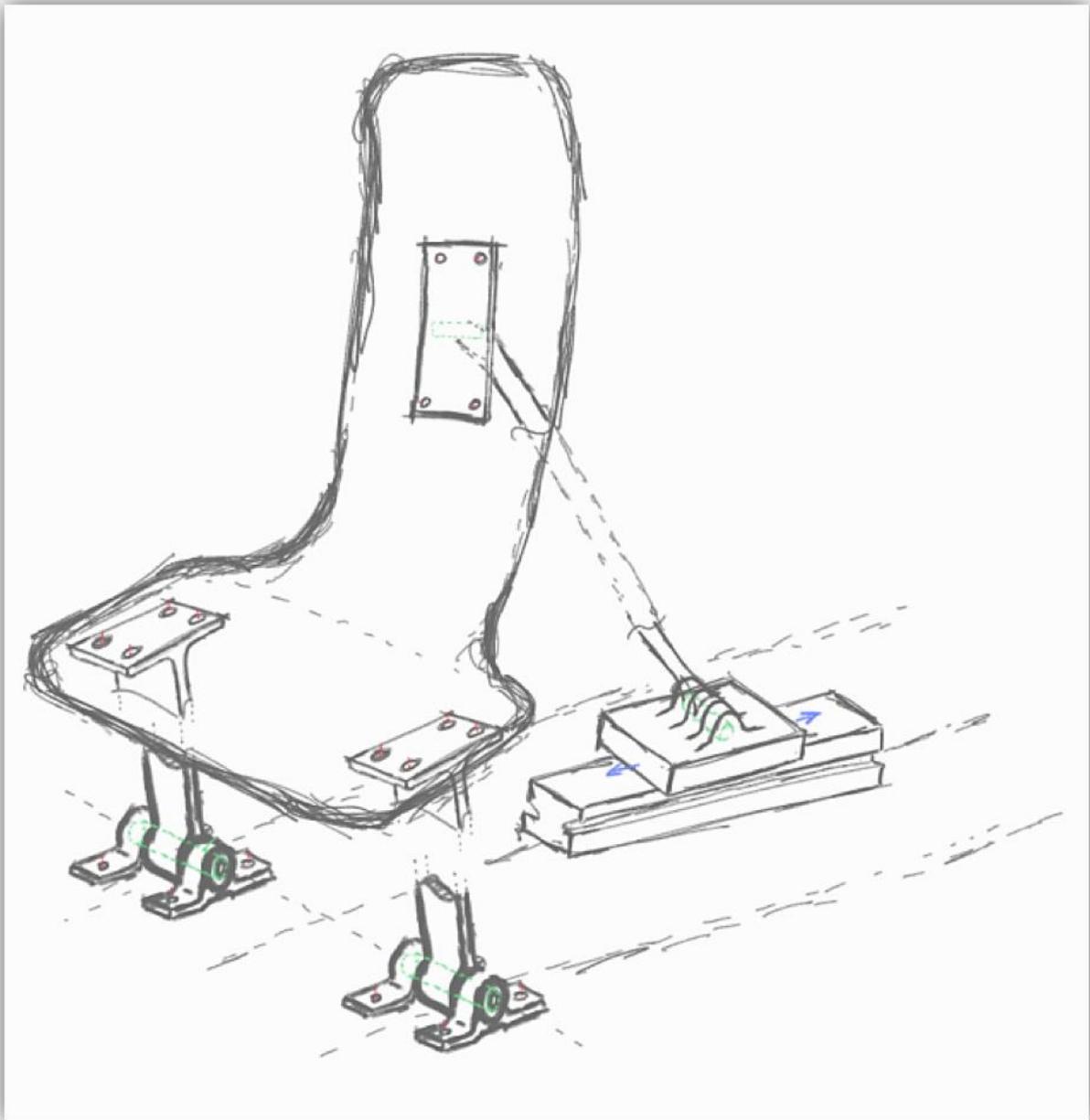


Abbildung 4-1: Konstruktiver Entwurf für Variante 3 (eigene Darstellung)

Die Linearführung wird aus dem Grund benötigt, dass die Stütze nach hinten ausweichen kann, wenn sich der Stuhl bei entsprechender Lage des Orbiters nach hinten legt. Da die Stütze nicht kürzer werden kann, muss sie entsprechend nach hinten ausweichen. Ebendiese Linearführung öffnet zugleich mehrere Türen für die weitere konstruktive Ausarbeitung.

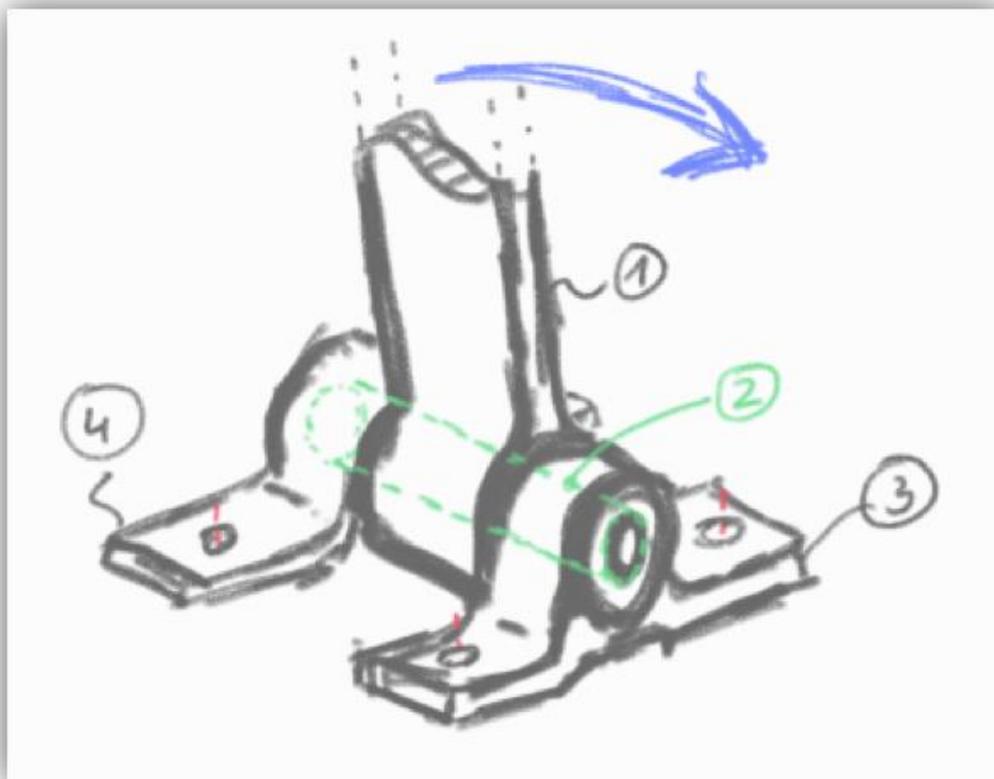


Abbildung 4-2: Bolzenverbindung zwischen Kabinenboden und Stütze (eigene Darstellung)

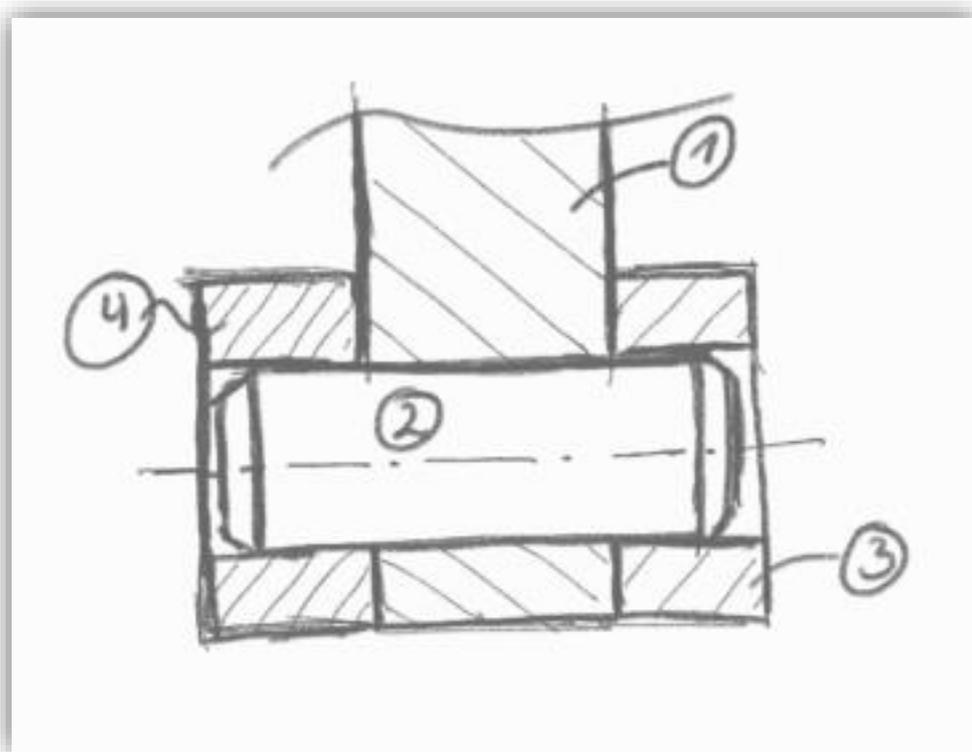


Abbildung 4-3: Schnitt durch die gelenkige Bolzenverbindung (eigene Darstellung)

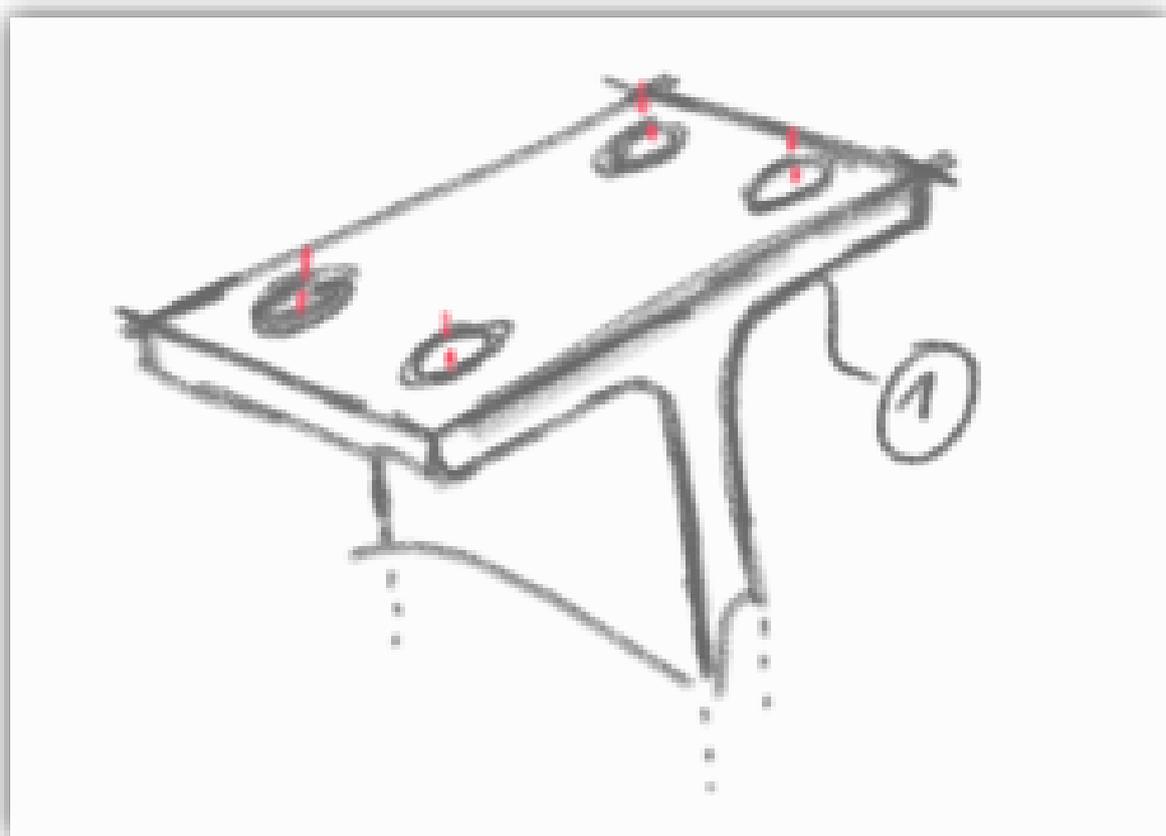


Abbildung 4-4: Adapterplatte zur Aufnahme der Sitzfläche (eigene Darstellung)

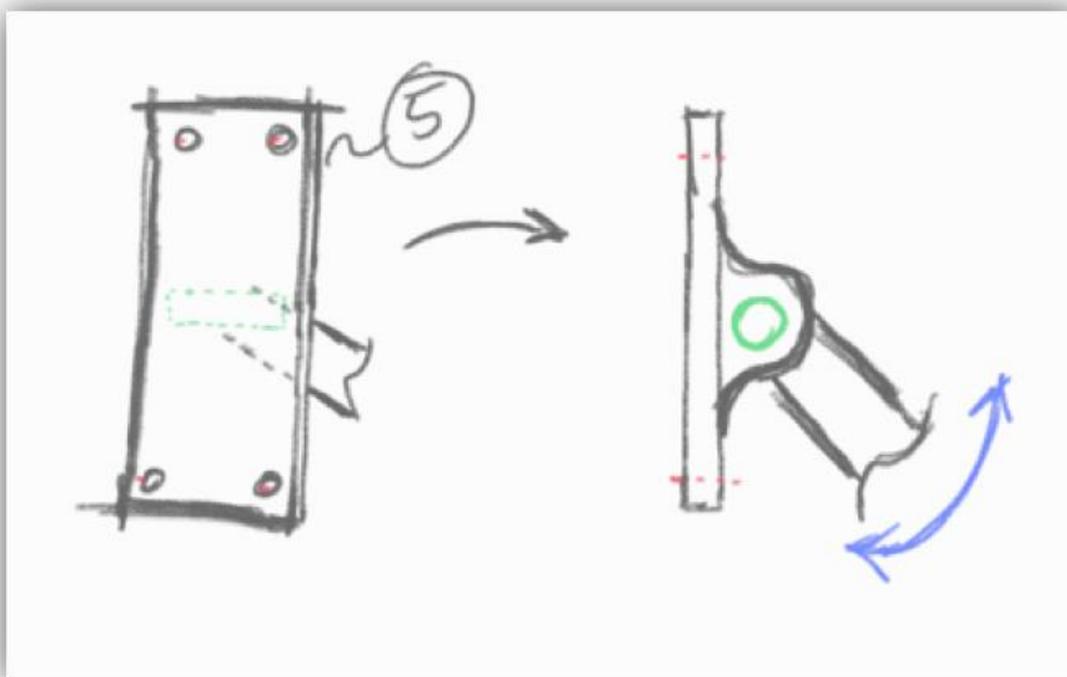


Abbildung 4-5: Adapterplatte zur Aufnahme der Rückenlehne; rechts: Seitenansicht mit Bolzenverbindung (eigene Darstellung)

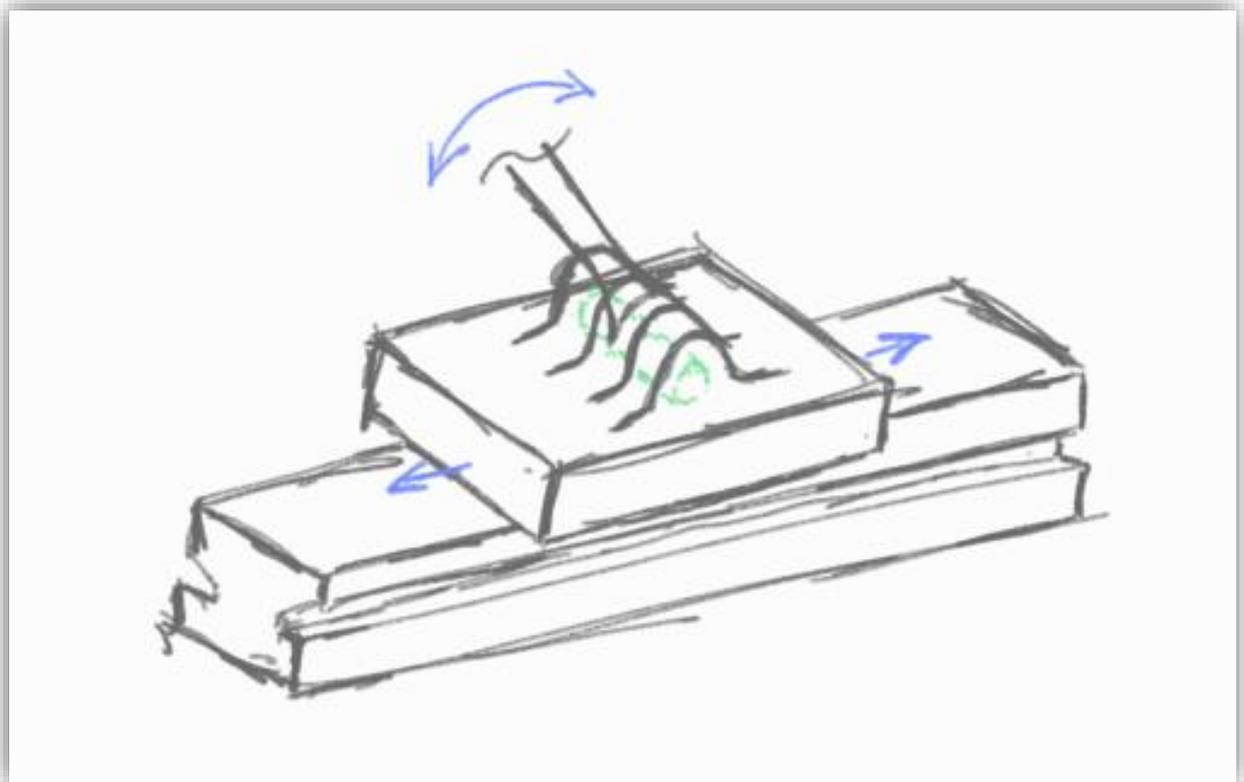


Abbildung 4-6: Linearführung inkl. Bolzenverbindung auf Führungskörper (eigene Darstellung)

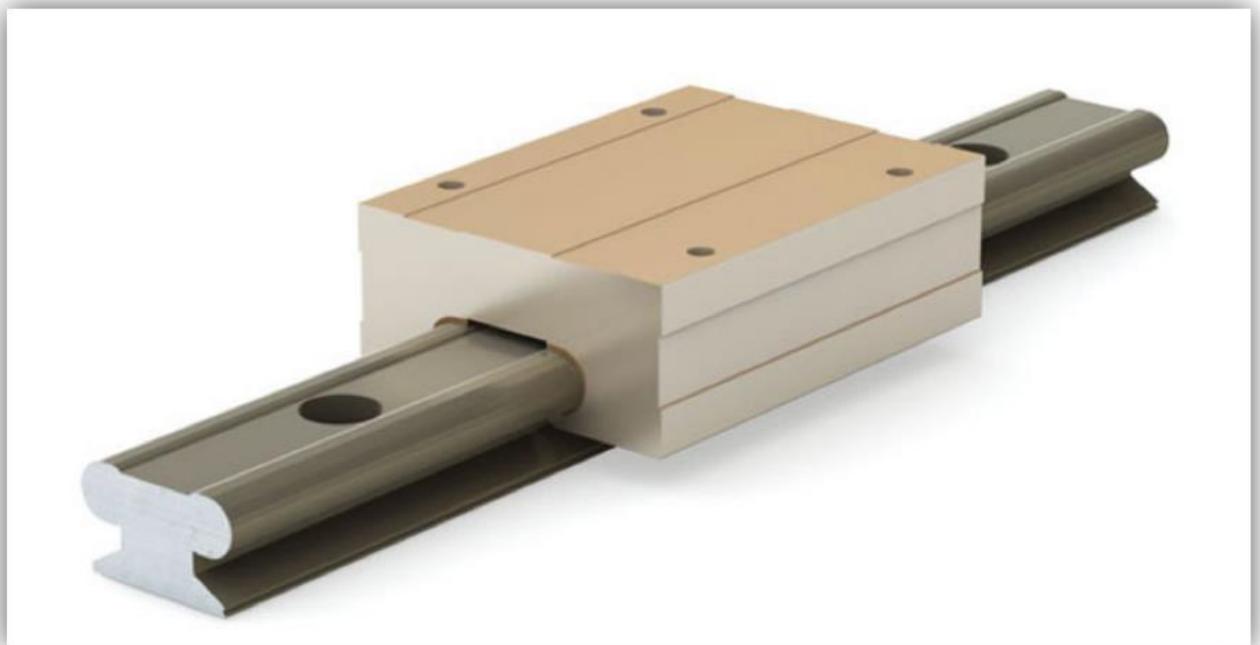


Abbildung 4-7: MiniRail-Linearführung der Firma HepcoMotion (hepcotion.com, n.d.)

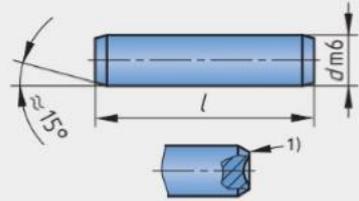
<b>Zylinderstifte, gehärtet</b>		vgl. DIN EN ISO 8734 (1998-03)													
 <p>1) Radius und Einsenkung am Stiftende zulässig</p>	<b>d</b> m6	<b>1</b>	<b>1,5</b>	<b>2</b>	<b>2,5</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>	
	<b>l</b> von bis	3 10	4 16	5 20	6 24	8 30	10 40	12 50	14 60	18 80	22 100	26 100	40 100	50 100	
	Nennlängen <i>l</i>	3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100 mm													
	Werkstoffe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stahl: Typ A Stift durchgehärtet, Typ B einsatzgehärtet</li> <li>• Nichtrostender Stahl Sorte C1</li> </ul>													
⇒	<b>Zylinderstift ISO 8734 – 6 x 30 – C1: d = 6 mm, l = 30 mm, aus nichtrostendem Stahl der Sorte C1</b>														

Abbildung 4-8: Bolzen für die Gelenkverbindung am Boden, am Schlitten und an der Rückenlehne (Gomeringer et al., 2022)

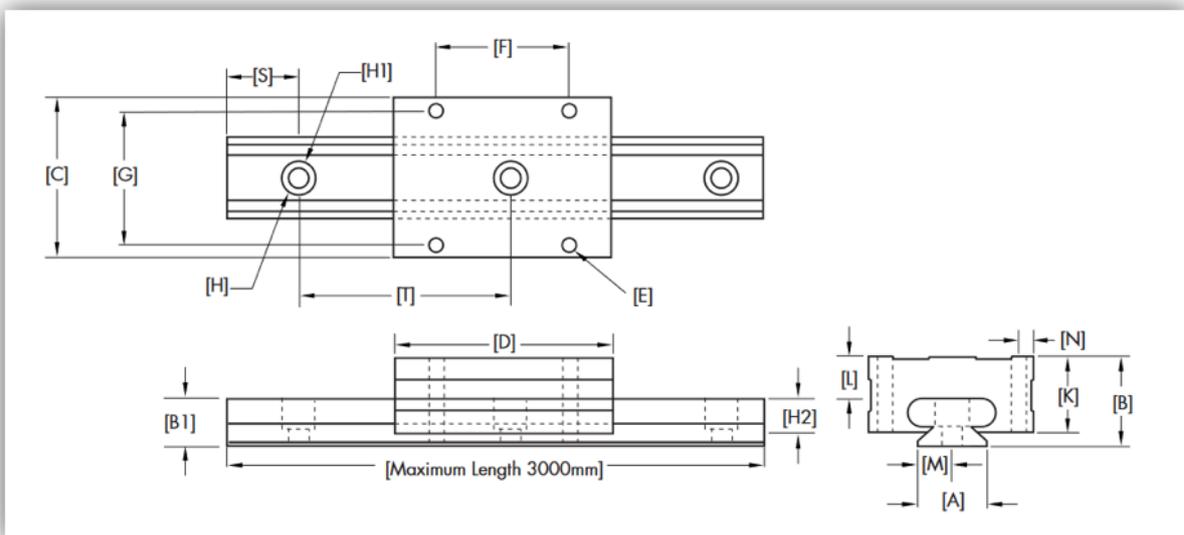


Abbildung 4-9: Technische Zeichnung des MiniRails der Firma HepcoMotion (hepcotion.com, n.d.)

Die Linearführung in Abbildung 4-7 ist gemäß den Herstellerangaben selbstschmierend, wartungsfrei, belastbar bis 6000 Newton und erlaubt Bewegungsgeschwindigkeiten bis zu 2 Meter pro Sekunde. Zudem ist die MiniRail der Firma HepcoMotion schlank gebaut, leicht und für Anwendungen geeignet, bei denen der Bauraum begrenzt ist. Ein großer Vorteil, den diese Konstruktion bietet, besteht in der Tatsache, dass sich der Schlitten auf der Schiene Abbildung 4-7 motorisch ansteuern lässt. Dadurch hat der SpaceLiner die Möglichkeit, die Passagiersitze zentral von der Pilotenkabine aus zu steuern. Dies könnte beispielsweise in einer Notfallsituation von zentraler Bedeutung sein. Allerdings lässt sich durch den Einsatz eines Elektromotors, der den Schlitten auf der Schiene bewegt, die Drehbewegung um die Horizontalachse bei entsprechender Neigung des Orbiters komplett steuern. Damit lässt sich auch eine langsame und geschmeidige Drehbewegung praktisch problemlos umsetzen. Darüber hinaus erhöht eine motorische Steuerung der Drehposition des Sitzes den Komfort für die Passagiere. Fühlt sich ein Gast beispielsweise unwohl in seiner rotatorischen Position, so kann er praktisch per Knopfdruck

und stufenlos seine gewünschte Lage einstellen. Der Einsatz eines Motors am Schlitten macht den Dämpfer, der an der Stütze angebracht werden kann, damit überflüssig.

## 4.2 Motorischer Antrieb

Wie in Abschnitt 2.2 *Anforderungen und Richtlinien* erläutert (siehe auch *Tabelle 1: Anforderungsliste*), sind ein motorischer Antrieb und eine motorische Steuerung bzw. Regelung für die Passagiersitze notwendig.

Zur Auswahl eines geeigneten elektrischen Motors stehen nicht nur eine Vielzahl an Motor-Typen, sondern auch unzählige Ausführungen der jeweiligen Motor-Typen. Abbildung 4-10 zeigt in Abhängigkeit des verwendeten Motorstroms die verschiedenen Motor-Typen, die sich daraus ergeben. Jeder einzelne Typ weist ein charakteristisches Betriebsverhalten auf und ist einem definierten Drehzahl- und Drehmomenten-Bereich untergeordnet. Dieses Kapitel schränkt auf Basis des Vorgehens nach Weidauer (Weidauer, 2013) die große Auswahl potenziell geeigneter Motoren systematisch ein und schlägt anhand einer praxisnahen Rechnung einen konkreten Motor vor, der für die weitere Konzeption zum Einsatz kommen kann.

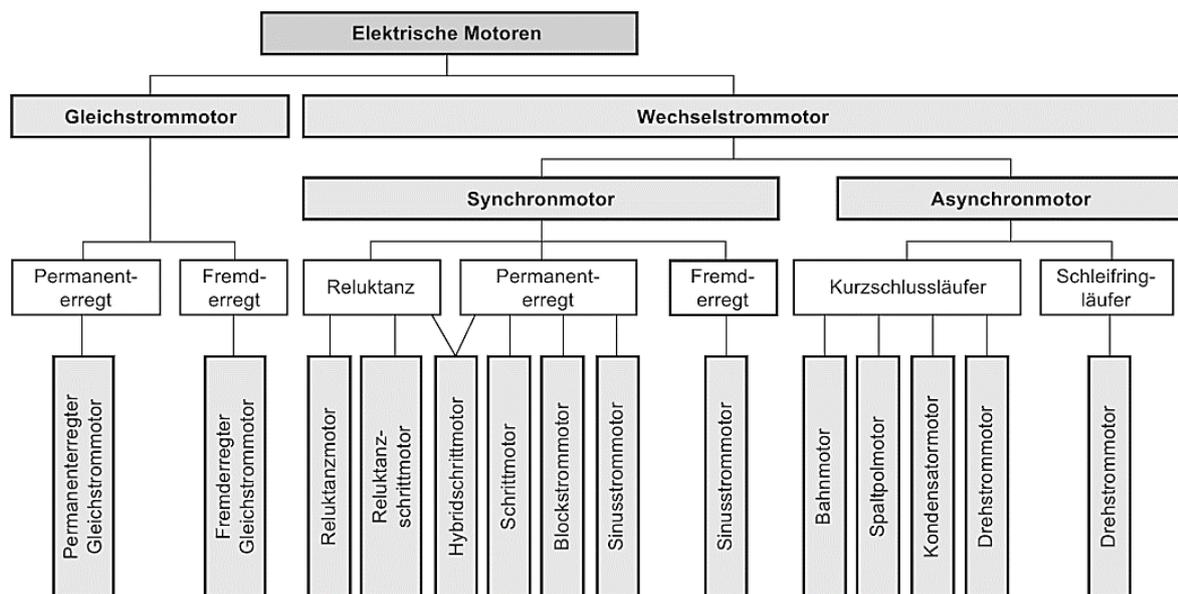


Abbildung 4-10: Übersicht der Motor-Typen (Weidauer, 2013)

<b>Mechanische Schnittstelle (Motor-Arbeitsmaschine)</b>			
Bewegungsart	Linear		Rotatorisch
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Linearmotor</li> <li>▪ Rotationsmotor mit Zahnstangengetriebe</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rotationsmotor</li> </ul>
Zeitlicher Verlauf der Bewegungsgrößen	Konstant	Veränderlich	Sehr dynamisch
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Asynchronmotor mit               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Direktanlauf</li> <li>– Stern-Dreieck-Anlauf</li> <li>– Sanftanlauf</li> <li>– Polumschaltung</li> </ul> </li> <li>▪ Gleichstrommotor mit               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Direktanlauf</li> <li>– Sanftanlauf</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Asynchronmotor mit Frequenzumrichter</li> <li>▪ Synchronmotor mit Frequenzumrichter</li> <li>▪ Reluktanzmotor mit Frequenzumrichter</li> <li>▪ Gleichstrommotor mit Stromrichter</li> <li>▪ Schrittmotor mit entspr. Stellgerät</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gleichstrommotor</li> <li>▪ Bürstenloser Gleichstrommotor</li> <li>▪ Synchronmotor</li> <li>▪ Asynchronmotor und entspr. Stellgerät</li> <li>▪ Direktantrieb</li> </ul>
Mittelwert des Drehmoments	Klein	Mittel	Hoch
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kleinmotoren-Gleichstrommotor</li> <li>▪ Bürstenloser Gleichstrommotor</li> <li>▪ Synchronmotor</li> <li>▪ Schrittmotor</li> <li>▪ Asynchronmotor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gleichstrommotor</li> <li>▪ Bürstenloser Gleichstrommotor</li> <li>▪ Synchronmotor</li> <li>▪ Asynchronmotor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Torquemotor</li> <li>▪ Getriebemotor</li> </ul>
Spitzenwert des Drehmoments	Geringe temporäre Überlast		Hohe häufige Überlast
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Standardmotor</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Servomotor</li> </ul>
Drehzahl	Klein	Mittel	Hoch
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Torquemotor</li> <li>▪ Getriebemotor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Standardmotor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sondermotor</li> <li>▪ Bürstenloser Gleichstrommotor</li> <li>▪ Synchronmotor</li> </ul>
Position/Lage	Relevant		Nicht relevant
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Motor mit Motorgeber</li> <li>▪ Schrittmotor</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Motor ohne Motorgeber (Geber ggf. nur für Kommutierung)</li> </ul>
Erforderliche Genauigkeit	Klein	Mittel	Hoch
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ungeregelter Antrieb</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gesteuerter Antrieb</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Geregelter Antrieb</li> <li>▪ Schrittantrieb</li> </ul>
Einbauraum	Gering		Nicht relevant
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Direktantrieb (Linear-, Torquemotor)</li> <li>▪ Synchronmotor</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Standardmotor</li> </ul>

Tabelle 4-1: Kriterien zur Auswahl geeigneter Motor-Typen (Weidauer, 2013)

Die Kriterien und Anforderungen können *Tabelle 3: Kriterien zur Auswahl geeigneter Motor-Typen* entnommen werden. Farblich hervorgehobene Felder entsprechen dabei den festgelegten Anforderungen gemäß den Randbedingungen in Abschnitt 2.2 *Anforderungen und Richtlinien*. Die Auswertung der einzelnen Lösungen gemäß Tabelle 3 zeigt, dass unterschiedliche Motor-Typen durchaus geeignet sind. Für die Regelbarkeit ist ein entsprechendes Stellgerät vorzusehen und um den langsamen Drehzahlbereich des Drehmechanismus der Sitze zu erreichen, ist gegebenenfalls ein mechanisches Getriebe einzusetzen. Gemäß dieser groben Vorauswahl eignen sich insbesondere folgende Motor-Typen:

1. Linearmotor (Abbildung 4-11)
2. Asynchronmotor (Abbildung 4-12)
3. Synchronmotor (Abbildung 4-13)
4. Gleichstrommotor (Abbildung 4-14)
5. Bürstenloser Gleichstrommotor (Abbildung 4-15)
6. Torquemotor (Abbildung 4-16)

Die Varianten 2 bis einschließlich 6 benötigen zusätzlich ein Getriebe bzw. ein Zahnstangengetriebe, das an den Linearschlitten (Abbildung 4-7) gekoppelt wird. Der Linearmotor in Variante 1 hingegen arbeitet im niedrigen Drehzahlbereich effizient und leistungsstark und kann den Passagiersitz daher direkt (ohne mechanische Wandlung) antreiben. Zur sinnvollen Eingrenzung dieser Suchergebnisse werden nun die geeigneten Motor-Typen näher untersucht.

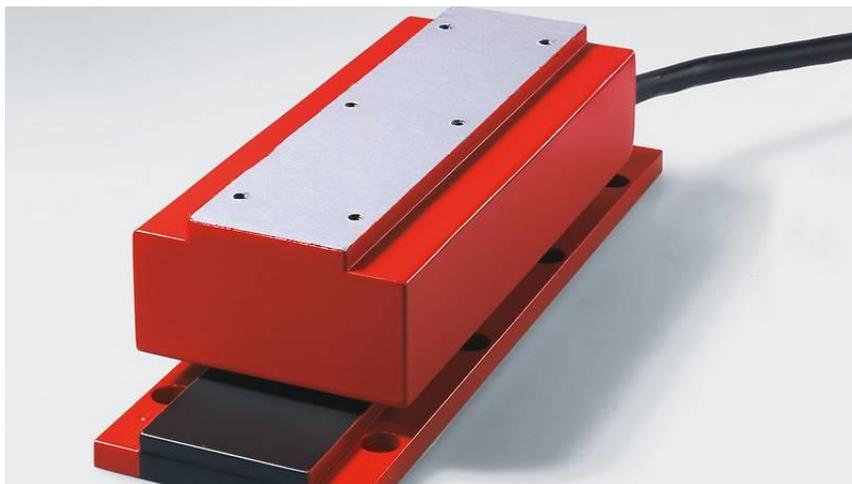


Abbildung 4-11: Linearmotor der Firma SEW Eurodrive ("Synchrone Servo-Linearmotoren SL2 | SEW-EURODRIVE," n.d.)

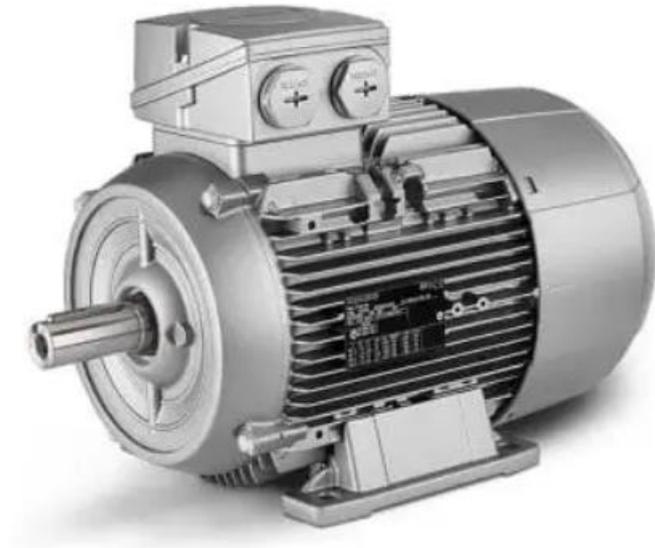


Abbildung 4-12: *Asynchronmotor der Firma Siemens* ("Niederspannungsmotor - SIMOTICS GP - Siemens Electric motors - AC / Asynchron / verstärkt," n.d.)



Abbildung 4-13: *Synchronmotor der Firma ACD* (ACD-Gruppe, n.d.)



Abbildung 4-14: Gleichstrommotor für den Spielbedarf ("Gleichstrommotor, 24 mm, 1,5...4,5 V- | Pollin.de," n.d.)

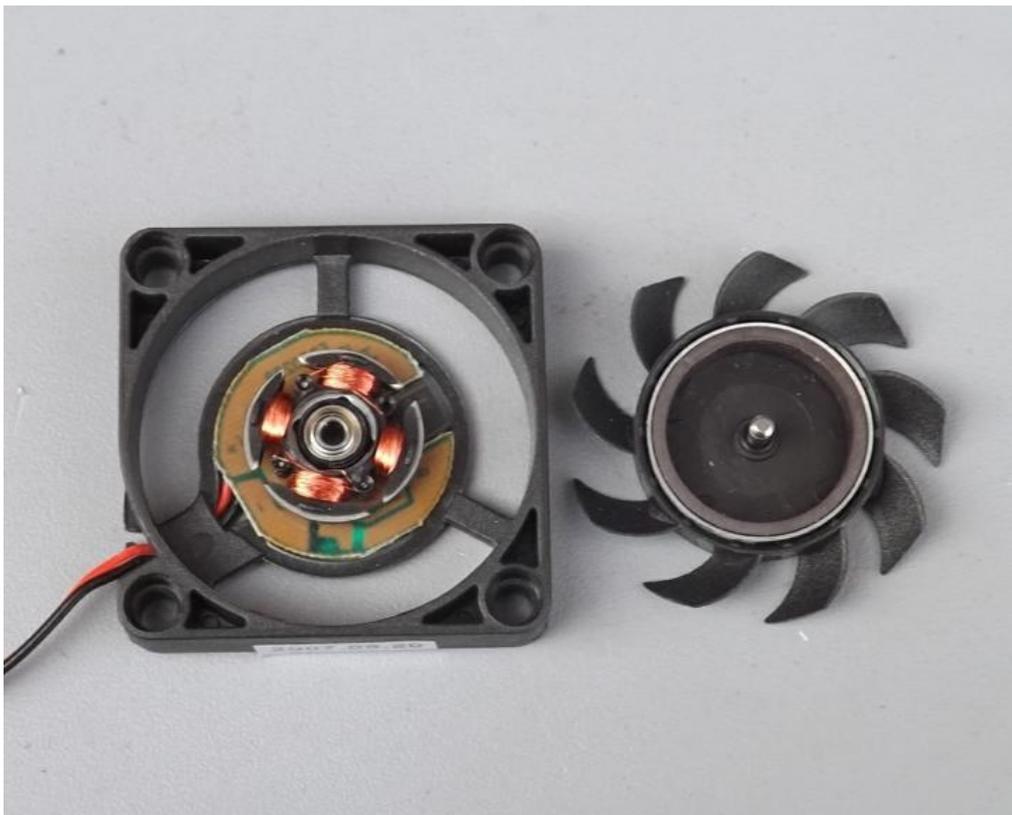


Abbildung 4-15: Bürstenloser Gleichstrommotor (im PC-Lüfter) ("DC 5V Silent 35mm cooling fan brushless motor chip cooling breeze Manifold|motor pieces|manifold mx5manifold ford - AliExpress," n.d.)



Abbildung 4-16: *Torquemotor des Herstellers Wittenstein* ("cyber® torque motor - WITTENSTEIN cyber motor GmbH," n.d.)

Der Linearmotor (Variante 1, Abbildung 4-11) ist leistungsstark, schlank gebaut und lässt sich nahtlos in den Linearschlitten integrieren. Der Asynchronmotor (Variante 2, Abbildung 4-12) ist in der Regel sperrig gebaut und für klassische Industrieanwendungen gedacht, bei denen die Arbeitsmaschinen konstant laufen. Hierzu zählen etwa Industrielüfter oder elektromechanisch betriebene Walzen in der Stahlverarbeitung. Diese Variante scheidet jedoch aufgrund der geringen Energiedichte und des großen Volumens aus. Der Synchronmotor (Variante 3, Abbildung 4-13) und der bürstenlose Gleichstrommotor (Variante 5, Abbildung 4-15) können jeweils sehr leistungsstark und schlank gebaut werden. Im Hinblick auf Leistung und Bauraum sind beide Motor-Typen grundsätzlich geeignet. Allerdings ist der Synchronmotor für hochgenaue Anwendungen im Bereich der Industrie eher zu finden – darunter fallen beispielsweise Werkzeugmaschinen. Ob ein Motor, der so präzise laufen kann, unbedingt erforderlich ist, ist eher anzuzweifeln. Der bürstenlose Gleichstrommotor ist universell einsetzbar und sowohl im Flugzeugbau als auch in PC-Lüftern oder E-Bikes zu finden. Er weist nicht die Präzision eines Synchronmotors auf, aber diese ist auch im Falle der Passagiersitze nicht unbedingt erforderlich. Beim bürstenlosen Gleichstrommotor muss berücksichtigt werden, dass für den Betrieb Gleichstrom erforderlich ist. Je nachdem, welcher Strom an Bord zur Verfügung steht, kann der Synchronmotor (Drehstrom) oder der bürstenlose Gleichstrommotor (Gleichstrom) bevorzugt werden. Allerdings ist hier nach wie vor der Linearmotor die favorisierte Lösung. Zu guter Letzt ist der Torquemotor zu betrachten: Torquemotoren erzeugen bei geringen Drehzahlen hohe Drehmomente. Sie kommen deshalb ohne mechanische Wandlung der Leistung aus. Ihr Aufbau gleicht dem eines hochpoligen Synchronmotors, mit dem Unterschied, dass ihr Durchmesser sehr viel größer ist. Obwohl Torquemotoren konstruktive Vorteile bezüglich des Bauraums und

Antriebsstrangs mit sich bringen, lässt sich kein Nutzen für die Passagiersitze daraus ableiten. Auch das Einsparen des Getriebes zahlt sich nicht aus, denn der Torquemotor ist in seiner Anschaffung höchst kostspielig und es wird nach wie vor eine Zahnstange benötigt, um aus der Rotation des Motors eine Translation für den Schlitten zu erzeugen. Dazu Weidauer:

*„Ihr Einsatz beschränkt sich deshalb auf Anwendungen, in denen ihre Vorteile auch wirklich benötigt werden.“* (Weidauer, 2013)

Der Torquemotor wird deshalb von der Liste der geeigneten Motoren gestrichen.

Häufig werden für gleiche Anwendungen unterschiedliche Motor-Typen eingesetzt. Auch im Falle von elektrisch verstellbaren Stühlen lassen sich diesbezüglich diverse Varianten beobachten. Es kann darüber hinaus nicht ausgeschlossen werden, dass andere Stuhl- oder Sesselhersteller Motor-Typen einsetzen, die im Laufe dieser Vorauswahl disqualifiziert wurden. Insofern kann für den SpaceLiner-Passagiersitz nicht abschließend beurteilt werden, welcher Motor-Typ am besten geeignet ist. Diese Recherche hat stattdessen ergeben, dass der Linearmotor eine gute und konstruktiv einwandfrei integrierbare Antriebslösung für die Passagiersitze darstellt. Daher fällt die Wahl hinsichtlich eines Motor-Typs für die Passagiersitze auf einen Linearmotor. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass gemäß der einschlägigen Literatur zur Auswahl eines geeigneten Antriebes gewiss viel mehr dazugehört als eine grobe Vorauswahl der Motor-Typen. Faktoren wie Betriebslast, Strom-Typ, Leistungselektronik, Bauraum und Kosten spielen eine wesentliche Rolle in einer solchen Entscheidungsfindung. Allerdings lässt der aktuelle Stand des SpaceLiner-Projekts keine genaueren Angaben zu diesen und vielen weiteren Faktoren zu. Auch ist es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, diese und andere Kriterien näher zu beleuchten und experimentell zu ergründen.

### 4.3 Auslegung und Berechnung

Als Grundlage für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sollen die nachfolgenden Berechnungen ausgewählter Maschinenelemente und die Untersuchungen kritischer Bauteilabschnitte dienen.

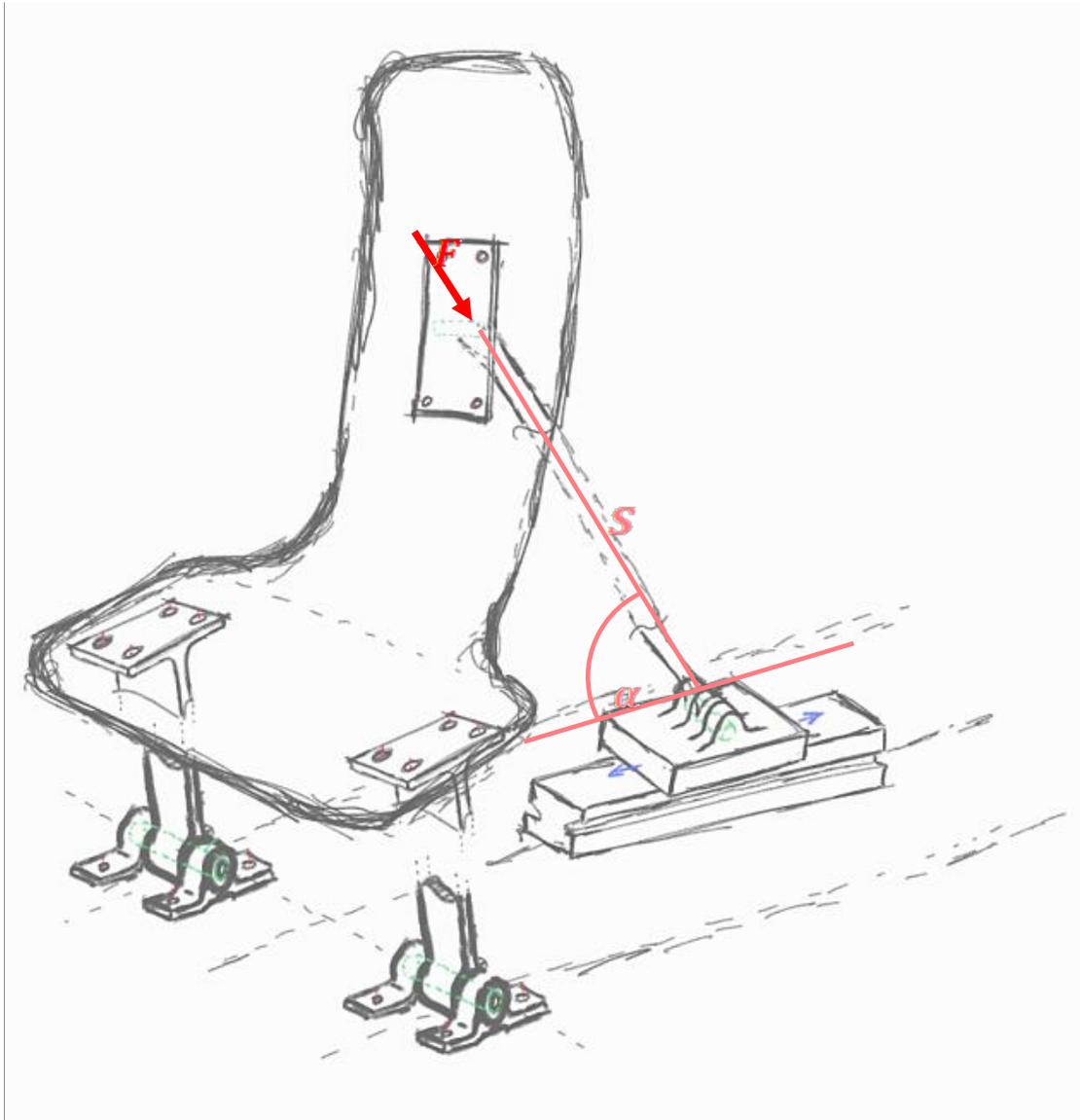


Abbildung 4-17: Sitz mit Belastung und Neigungswinkel (eigene Darstellung)

Wie in Abbildung 4-17 zu sehen, wirkt die Belastung des Passagiers auf die Stange S. Auf dem Schlitten befindet sich außerdem eine gelenkige Verbindung, die mithilfe eines Bolzens umgesetzt wurde (siehe Abbildung 4-3 und Abbildung 4-8). Dieser Bolzen wird ebenfalls beansprucht und soll im Rahmen dieses Kapitels zusammen mit der Stange ausgelegt werden.

Die Kraft F gemäß Abbildung 4-17 setzt sich zusammen aus folgenden Komponenten:

$$F = F_{\text{Passagier}} + F_{\text{Beschleunigung}} + F_{\text{Sitz}}$$

Dies bezieht sich auf die Masse des Passagiers, die Masse des Sitzes und die Kräfte, die auftreten, während der SpaceLiner beschleunigt (Beschleunigungs- bzw. Trägheitskräfte). Die Masse des Passagiers lässt sich empirisch problemlos ermitteln. Hier können Werte aus der zivilen Luftfahrt oder der Automobilindustrie herangezogen werden. Wesentlich schwieriger zu ermitteln ist hingegen die Beschleunigungskraft. Hierfür können zwar Werte von der NASA oder vergleichbaren Instituten herangezogen werden, allerdings wären dies Beschleunigungswerte für professionelle Astronauten, die sich einem Training unterzogen haben. Insofern ist hier bei der Abschätzung Vorsicht geboten. Dieser Wert sollte möglichst in Absprache mit dem DLR geschätzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Wert für die Belastung  $F$  als gegeben angenommen (und später nachkorrigiert). Auf die Stange wirkt also die Gesamtkraft  $F$ . Damit wäre sie bei Druck belastet und ist entsprechend zu dimensionieren. Es gilt:

$$\sigma = \frac{F}{A} \leq \sigma_{zul}$$

Dies kann genutzt werden, um die benötigte Querschnittsfläche zu ermitteln:

$$A \geq \frac{F}{\sigma_{zul}}$$

Die Kraft  $F$  soll im Rahmen der Vordimensionierung mit

$$F = (100kg + 100kg + 100kg) \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 2943N$$

abgeschätzt werden. Die Masse des Passagiers, diejenige des Sitzes und die Trägheitskraft sollen jeweils mit 100 Kilogramm Massenäquivalent abgeschätzt werden. Für den Werkstoff der Stange ist eine Standardlegierung für den Flugzeugbau empfehlenswert, die bei geringer Dichte und damit bei geringem Gewicht eine vergleichsweise hohe Festigkeit aufweist. Dies wäre nach DIN EN 1706 beispielsweise die Aluminium-Gusslegierung AC- $AlSi7Mg$ , welche für Teile im Flugzeugbau besonders gut geeignet ist. Die Zugfestigkeit der ausgewählten Alu-Legierung liegt nach DIN EN 1706 bei mindestens

$$R_m = 260 \frac{N}{mm^2} = \sigma_{zul}$$

Damit kann die erforderliche Querschnittsfläche der Stange auf

$$A \geq \frac{F}{\sigma_{zul}} = \frac{2943N}{260 \frac{N}{mm^2}} = 11,32 \text{ mm}^2$$

abgeschätzt werden. Wegen der Druckbeanspruchung ist eine knickresistente Querschnittsform zu empfehlen, die mindestens so groß ist wie die oben ermittelte Fläche. Da der ausgewählte Werkstoff gießbar ist, können beliebige Querschnittsformen konstruiert werden. Es ist damit nicht notwendig, sich auf die gängigen Aluminium-Profile, die auf dem Markt verfügbar sind, zu verlassen.

Für den Bolzen gemäß Abbildung 4-3 wird nach [RM25, S. 294] der Einbaufall 2 angewandt. Damit kann der Bolzendurchmesser gemäß [RM, Gl. 9.1] mit

$$d \approx k \cdot \sqrt{\frac{K_A \cdot F_{nenn}}{\sigma_{b,zul}}} = 8,61 \text{ mm}$$

ermittelt werden. Der Einspannfaktor

$$k = 1,1$$

ist gemäß [RM, S. 298] für Einbaufall 2 gewählt und der Anwendungs- bzw. Stoßfaktor

$$K_A = 1,25$$

ist nach [RM, Tab. 3-4] für mäßige Stöße am Sitz (z. B. Passagier bewegt sich oder steht auf und setzt sich wieder hin) und für einen gleichmäßigen Antrieb am Schlitten ausgewählt worden. Die zulässige Biegespannung beträgt

$$\sigma_{b,zul} = 0,15 \cdot R_m = 0,15 \cdot 400 \frac{N}{mm^2} = 60 \frac{N}{mm^2}$$

nach [RM, S. 298] für eine wechselnde Belastung und ist für Norm-Bolzen ausgewählt worden. Norm-Bolzen mit dem oben ermittelten Durchmesser existieren selbstverständlich nicht. Der Wert wird daher gemäß DIN EN ISO 8734 (siehe Abbildung 4-8) auf

$$d = 10 \text{ mm}$$

aufgerundet. Mit dem ermittelten Bolzendurchmesser können nach [RM, Abschnitt 9.2.1] die restlichen geometrischen Größen ermittelt werden (siehe Abbildung 4-18).

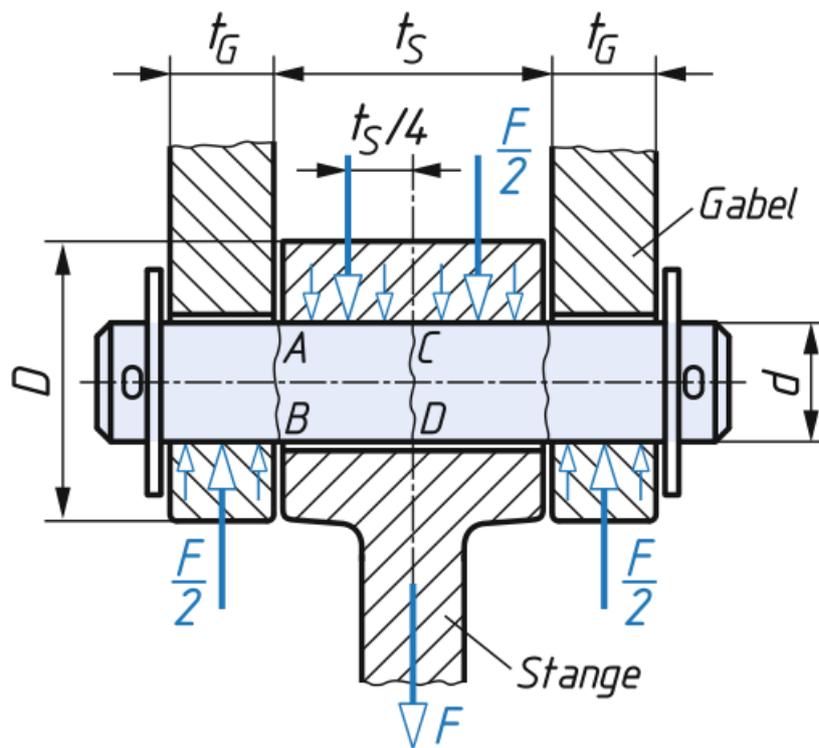


Abbildung 4-18: Stange und Gabel (Bolzenverbindung) (Wittel et al., 2021)

Demnach gilt:

$$D \approx 3 \cdot d = 30 \text{ mm}$$

$$t_S = 1 \cdot d = 10 \text{ mm}$$

$$t_G = 0,5 \cdot d = 5 \text{ mm}$$

Mithilfe dieser Größen kann die Bolzenverbindung nach Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 konstruktiv umgesetzt werden.

## 5 Ergonomie

Die Ergonomie von Flugzeugsitzen ist ein wichtiges Thema, da Flugreisen für viele Menschen ein wichtiger Teil ihres Lebens sind und lange Flüge oft mit Unannehmlichkeiten und Schmerzen verbunden sein können. Lange Flugreisen im Weltraum kommen darüber hinaus mit hohen Belastungen einher – insbesondere in der Start- und Landephase – und daher ist es wichtig, dass die Passagiere während der gesamten Reise bequem und entspannt sitzen können. Eine gute ergonomische Gestaltung der Sitzfläche und der Rückenlehne kann dazu beitragen, dass Passagiere während des Flugs bequemer sitzen und sich wohler fühlen.

Ein wichtiger Faktor bei der Gestaltung ergonomischer Flugzeugsitze ist die Unterstützung der natürlichen S-förmigen Kurve der Wirbelsäule. Eine Sitzfläche und Rückenlehne, die diese Kurve unterstützt, können dazu beitragen, dass der Rücken während des Flugs besser gestützt wird und weniger Belastung auf den Körper ausgeübt wird.

### **Sicherheitsaspekt**

Eines der wichtigsten Anforderungen an Sitzkonstruktionen beim Reisen im Weltraum ist zudem die Sicherheit. Die Sitze müssen in der Lage sein, die Passagiere während der Raketenstarts und -landungen und während der gesamten Reise im Weltraum zu sichern und zu schützen. Dazu gehört auch, dass sie bedingt durch die Sitzfläche und Rückenlehne dazu beitragen, die Strahlenbelastung auf den menschlichen Körper im Weltraum aktiv mitzureduzieren. Hier wären entsprechende Schutzschilde denkbar, die zwischen der Sitzkonstruktion und der Polsterung liegen. Die Sitzkonstruktion und die Ergonomie müssen gewährleisten, dass die Passagiere im Notfall schnell und einfach den Sitzplatz verlassen können. Zum Sicherheitsaspekt gehört auch die Integration von Sensoren und anderen Technologien, die bei Notfällen schnell und effektiv auf die Bedürfnisse der Passagiere reagieren können.

### **Bequemlichkeit und Funktionalität**

Weitere wichtige Anforderungen an Sitzkonstruktionen im Weltraum sind Bequemlichkeit und Funktionalität. Die Sitze müssen so gestaltet sein, dass sie den Passagieren während der gesamten Reise ein bequemes und angenehmes Sitzen ermöglichen. Dazu gehört auch, dass sie einstellbar sind, um die Passagiere in verschiedenen Sitzpositionen unterstützen zu können. Besonders wichtig bei der Gestaltung von Sitzen im SpaceLiner sind die Armlehnen, die einstellbar sein sollten, um die Schultern und Arme zu entlasten, und die Beinfreiheit, die ausreichend sein sollte, um die Durchblutung der Beine zu fördern und Schmerzen zu vermeiden. Die beweglichen Teile des Sitzes sollten verschiedene, nach Möglichkeit stufenlose und individuelle Verstellmöglichkeiten anbieten. Die Integration von Technologien wie

Massagefunktionen und Heiz- und Kühlelementen kann ebenfalls dazu beitragen, die Ergonomie und Bequemlichkeit zu verbessern.

### **Stauraum und Kommunikation**

Die Sitze im SpaceLiner müssen auch über ausreichende Stauräume verfügen, um Gepäck und andere Gegenstände unterbringen zu können. Sie müssen außerdem über Anschlüsse für elektronische Geräte verfügen, um den Passagieren während der Reise Unterhaltung und Kommunikation ermöglichen zu können.

### **Polsterung und Dämpfung**

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Ergonomie von Sitzen im SpaceLiner ist die Einbeziehung von gut entwickelten Sitzpolstern und anderen Dämpfungsmaterialien, die dazu beitragen können, dass die Passagiere während der Reise entspannter sitzen und sich wohler fühlen – insbesondere in Hinblick auf mögliche Schwingungen beim Start, bei der Landung oder beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre.



Abbildung 5-19: *Menschliche Wirbelsäule* ("Doppel-S-Form - die Krümmung der Wirbelsäule ★ BETTEN.de Lexikon," n.d.)

Zusammenfassend sind folgende ergonomische Faktoren, die bei der Gestaltung von Flugzeugsitzen berücksichtigt werden sollten:

- Einstellbare Rückenlehnen: Einstellbare Rückenlehnen ermöglichen es den Passagieren, ihre Sitzposition anzupassen, um ihre Wirbelsäule besser zu stützen.
- Sitzneigung: Eine leichte Neigung der Sitzfläche nach vorne kann dazu beitragen, dass der Rücken besser gestützt wird und dass die Beine leichter durchblutet werden.
- Armlehnen: Armlehnen, die sich einstellen lassen, können dazu beitragen, dass die Schultern und Arme während des Flugs entspannter bleiben.
- Beinfreiheit: Eine ausreichende Beinfreiheit ist wichtig, um die Durchblutung der Beine zu fördern und um Unbehagen und Schmerzen zu vermeiden.
- Sitzpolster und Dämpfungsmaterialien für Bequemlichkeit und Schwingungsdämpfung
- Stauraum und Anschlüsse für elektronische Geräte
- Sicherheit im Falle von Notfällen
- Bequemlichkeit und Funktionalität

## **Zusammenfassung**

Insgesamt ist es wichtig, dass Flugzeugsitze so gestaltet sind, dass sie die natürliche S-förmige Kurve der Wirbelsäule unterstützen und dass sie einstellbar sind, um den Passagieren eine bequeme Sitzposition anbieten zu können. Durch eine ergonomische Gestaltung der Flugzeugsitze kann dazu beigetragen werden, dass die Passagiere während des Flugs weniger Schmerzen haben und sich wohler fühlen.

Die Konstruktion von Sitzen im SpaceLiner ist eine anspruchsvolle Aufgabe, die hohe Anforderungen an Sicherheit, Bequemlichkeit und Funktionalität stellt. Durch eine sorgfältige Planung und Konstruktion können jedoch Sitze entwickelt werden, die den Passagieren während der Reise im Weltraum ein angenehmes und sicheres Reiseerlebnis bieten. Auch der Einsatz von umweltfreundlichen Materialien und Fertigungstechnologien wird in der zukünftigen Entwicklung von Sitzen im SpaceLiner eine wichtige Rolle spielen. Durch den Einsatz von nachhaltigen Materialien können die Auswirkungen der Raumfahrt auf die Umwelt minimiert werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Es hat sich im Rahmen dieser Arbeit herausgestellt, dass das Hauptaugenmerk auf den Drehmechanismus und auf die Mechanik des Passagiersitzes zu legen ist. Doch auch der motorische Antrieb spielt eine große Rolle und muss gesondert intensiv untersucht werden. Andere Komponenten und Eigenschaften des SpaceLiner-Sitzes, wie beispielsweise der Sitzbezug oder der Werkstoff des Rahmens, finden sich in der Anwendung der zivilen Luftfahrt oder auch bei gewöhnlichen Passagierflugzeugen wieder. Hier sollten bewährte Konzepte und technische Lösungen, die bereits im Bereich der zivilen Luftfahrt seit Jahrzehnten angewandt werden, möglichst nicht ignoriert, sondern vielmehr übernommen werden – das beginnt bei den Abmaßen des Sitzes und endet bei der Wahl des Materials für den Sitzbezug. Da es jedoch für den Drehmechanismus noch keine technische Lösung in Zusammenhang mit einem zivilen Flugzeug gibt, muss hier umso mehr auf die Konstruktion und den Antrieb geachtet werden. Die gewählte Konstruktion für den Drehmechanismus hat viele Vorteile, birgt aber auch Nachteile. Sind die anderen Varianten, die nicht konkretisiert wurden, also doch besser? Bieten sie einen höheren Komfort für die Passagiere? Gibt es einen Motor-Typ, der besser geeignet ist? Diese Fragen lassen sich abschließend nur experimentell und empirisch beantworten. Wäre das Budget nicht begrenzt, könnte man die im Rahmen dieser Arbeit entworfenen drei Versionen fertigen, komplett ausstatten und experimentelle Tests durchführen, um die Festigkeit, den Komfort und alle hier ermittelten Randbedingungen zu prüfen. Auch wäre eine experimentelle Untersuchung der Motoren für den Antrieb sehr wünschenswert und ganz im Sinne des SpaceLiner-Vorhabens.

### Konstruktive Aspekte

Insgesamt zeigt die gewählte Konstruktion zusammen mit dem selektierten Antrieb dennoch ein gutes Potential zur konstruktiven Umsetzung der Sitze. Die Stütze an der Rückenlehne kann problemlos hohe Kräfte aufnehmen. Bei genauerer Berechnung lässt sich die Stütze vermutlich schmaler und kompakter bauen, sodass die Stütze die Beinfreiheit des Hintermanns weniger einschränkt. Darüber hinaus bietet der Schlitten mehrere Möglichkeiten, den Komfort der Gäste zu erhöhen. Per Knopfdruck lassen sich in Kombination mit dem dynamischen Linearmotor verschiedene Drehlagen des Sitzes einstellen. Zudem kann die Drehung bei Neigung des SpaceLiner-Orbiters automatisiert erfolgen, ganz ohne Zutun der Passagiere und ohne auf die Wirkung der Gravitation angewiesen zu sein. Die Drehungen der Sitze lassen sich durch den Linearmotor außerdem synchronisieren, sodass alle Sitze synchron und gleichzeitig ihre Drehlage anpassen. Weitere Vorteile, wie die Dämpfung der Drehung und das Verharren in einer bestimmten Lage, wurden bereits im Rahmen der Konkretisierung erläutert. Deshalb sollte diese Konzeptvariante weiterverfolgt und experimentell erprobt werden.



Abbildung 6-1: CNC-gefertigter Motorradhelm aus einem Metallblock. (5Axis Machine Cutting HELMET / DAISHIN SEIKI CORPORATION, 2009)

## Ergonomische Aspekte

Die Ergonomie der Sitzgestaltung im Spaceliner in der Zukunft kann durch verschiedene Maßnahmen sichergestellt werden. Wie bereits erwähnt, sollten anpassbare Sitze, flexible Materialien und elektrisch verstellbare Elemente verwendet werden. Letztgenanntes ist ein wichtiger Faktor, da zusätzliche Motoren für die Verstellung des Sitzes nur in enger Absprache mit der Konstruktionsabteilung vorgesehen werden können. Die Konstruktion und die Ergonomie gehen damit Hand in Hand durch den Gesamtprozess des Spaceliner-Sitzes. Denkbar ist auch der Einsatz von Sitzeinlagen und -auflagen, die den Druck auf bestimmte Körperbereiche verringern und somit für mehr Komfort sorgen. Ebenso wichtig ist die Unterstützung von Gesundheits- und Wellness-Maßnahmen während des Flugs. Dies könnte durch die Integration von Massagefunktionen in die Sitzgestaltung oder durch die Bereitstellung von speziellen Gesundheits- und Wellness-Programmen erreicht werden. Insgesamt gibt es also viele Möglichkeiten, wie die Ergonomie der Sitzgestaltung im Spaceliner der Zukunft sichergestellt werden kann. Derzeit sind dies allerdings lediglich Gedanken, die konstruktiv überprüft und integriert werden müssen. Der Prozess für eine solche Integration ist aufwendig und bedarf einer gesonderten Untersuchung. Diese Thematik in einem würdigen Maßstab innerhalb dieser Abschlussarbeit zu berücksichtigen, würde mit Sicherheit den Rahmen sprengen. Es ist daher empfehlenswert, die Untersuchung in Hinblick auf die Ergonomie auf eine separate Abschlussarbeit auszulagern.

## **Nächstes Arbeitspaket**

Der nächste Schritt im Anschluss an diese Arbeit bestünde in der nächsten Stufe der Konkretisierung – das heißt, dass ein 3D-Modell mithilfe der computerunterstützten Konstruktion (CAD) erstellt werden muss. Abbildung 5-1 zeigt eine CNC-Fertigung: Hier wurde von der Firma Daishin ein Motorradhelm gefertigt – und zwar aus einem Quader. Insofern sind im Hinblick auf die Prototyp-Fertigung des Rahmens für den Sitz keine Komplikationen zu erwarten. Grundlage für eine CAD-Modellierung sollte eine vorausgegangene Berechnung sein, durch welche die Kräfte und die Belastungen ermittelt werden. Nach einem passenden Computereinsatz kann in einem Zwischenschritt der Sitz samt Drehmechanismus mithilfe von 3D-Druckern in einem kleinen Maßstab gedruckt werden, um die grundsätzliche Funktion zu testen. Ist dieser Test bestanden, können die entsprechenden Teile im Rahmen einer Prototyp-Entwicklung per CNC gefertigt werden. Die CNC-Fertigung ist ideal für die Prototyp-Produktion geeignet und erlaubt die Fertigung komplexer Geometrien. Die eigentliche Sitzfläche steht zu diesem Zeitpunkt immer noch nicht im Fokus, da zunächst der Mechanismus verifiziert werden muss. Dass eine bequeme Sitzfläche am Ende vorliegen wird, wird nicht angezweifelt und stellt auch nicht das wesentliche Problem des SpaceLiners dar. Dass aber ein funktionierender und ökonomischer Drehmechanismus vorliegt, ist nicht garantiert. Daher sollte der eigentliche Drehmechanismus so lange weiterentwickelt werden, bis er zufriedenstellend und einwandfrei funktioniert. Erst dann sollten die darauffolgenden Randbedingungen in Angriff genommen werden, denn andernfalls besteht die Gefahr, dass der Drehmechanismus nicht einwandfrei funktioniert und eine nachträgliche Anpassung der Drehmechanik nicht mehr mit dem Rest des Sitzes kompatibel ist. Ein weiterer Vorteil dieser Variante besteht darin, dass die Mechanik und der Rahmen sehr robust und gleichzeitig kostengünstig sind. Hierfür wurden ausschließlich Normteile verwendet, die der Maschinenbauhandel dank einer hohen Stückzahlproduktion kostengünstig anbietet. Sollte ein experimenteller Test (eines Tages) mit dieser Variante erfolgreich sein, so könnte dieser Entwurf einen nicht unbedeutenden Beitrag zur Kostensenkung bei dem Projekt SpaceLiner leisten.

## **Motorauswahl**

Zum Drehmechanismus gehört auch der motorische Antrieb. Zwar wurde hier ein geeigneter Motor-Typ unter Zuhilfenahme der einschlägigen Literatur ermittelt, allerdings kann zum jetzigen Zeitpunkt noch kein konkreter Motor gewählt werden, weil beispielsweise die benötigte Leistung noch nicht bekannt ist. Die benötigte Leistung für den Motor ist erst dann bekannt, wenn ermittelt wurde, wie groß die Belastung ausfällt. Und diese wiederum ist erst dann ermittelbar, wenn der konkrete Sitz entworfen wurde. Erst dann ist die Masse und somit auch die Belastung bekannt. Allerdings beschränkt sich die Wahl des Antriebs nicht nur auf den Motor-Typ oder auf einen konkreten Linearmotor. Heutzutage bilden Elektromotoren lediglich die Muskeln eines Systems. Das Herzstück bzw. das Gehirn stellt die Leistungselektronik dar. Diese entnimmt dem

---

Energiespeicher (Batterie) den Strom und teilt diesen sinnvoll für den Elektromotor ein, je nachdem, wie der Bedarf ist. Spätestens an dieser Stelle sollte disziplin- und fächerübergreifend eine Fachkraft aus der entsprechenden Disziplin (Mechatronik/Elektro-Maschinenbau) herangezogen werden, um den elektrischen Antrieb gemeinsam weiterzuentwickeln. Die Ergebnisse dieser Arbeit haben aufgezeigt, dass es nicht ausreichend ist, „einfach nur“ eine Skizze eines Sitzes zu entwerfen, damit die Arbeit an dem SpaceLiner fortgesetzt werden kann. Hier ist letzten Endes viel ingenieurtechnisches Wissen im Bereich der Mechanik gefragt und vor allem werden fundierte Kenntnisse der Antriebstechnik für die Wahl des Motors benötigt.

## VII. Literaturverzeichnis

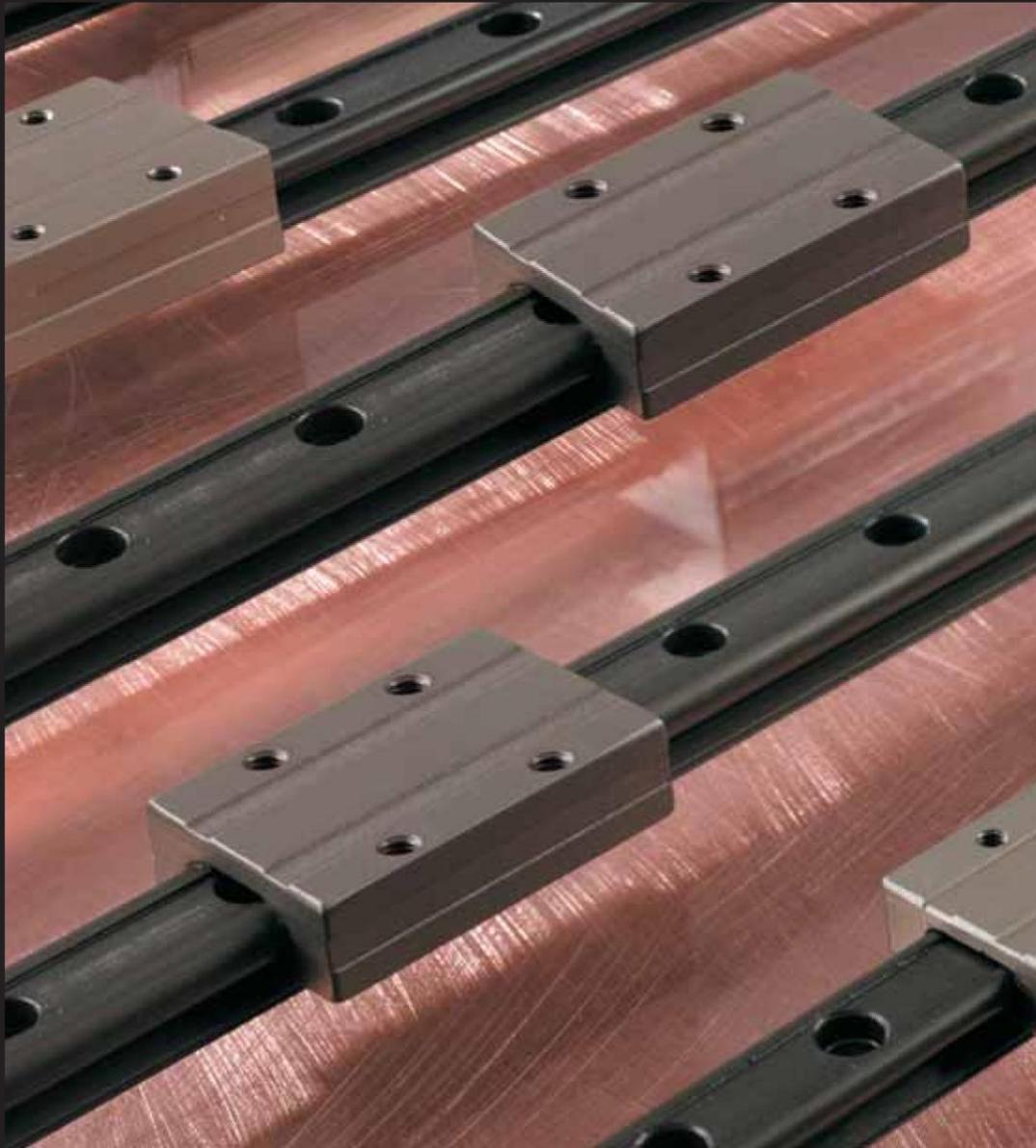
- 5Axis Machine Cutting HELMET / DAISHIN SEIKI CORPORATION, 2009.
- ACD-Gruppe, n.d. Synchronmotor DUM4-05.1-00R.96-0AG. URL <https://www.acd-gruppe.de/antriebstechnik/dum4-051-00r96-0ag/>, <https://www.acd-gruppe.de/antriebstechnik/dum4-051-00r96-0ag/> (accessed 12.23.22).
- cyber® torque motor - WITTENSTEIN cyber motor GmbH [WWW Document], n.d. URL <https://cyber-motor.wittenstein.de/de-de/produkte/servomotoren/rotative-synchronmotoren/cyber-torque-motor/> (accessed 12.19.22).
- DC 5V Silent 35mm cooling fan brushless motor chip cooling breeze Manifold|motor pieces|manifold mx5manifold ford - AliExpress [WWW Document], n.d. URL <https://de.aliexpress.com/item/1798964530.html> (accessed 12.19.22).
- DMG 5-Axis Machine's Finesse Gives Daishin's Performance Racing Helmet the Edge - World Industrial Reporter [WWW Document], n.d. URL <https://worldindustrialreporter.com/dmg-5axis-machines-finesse-gives-daishins-performance-racing-helmet-edge/> (accessed 12.19.22).
- Doppel-S-Form - die Krümmung der Wirbelsäule ★ BETTEN.de Lexikon [WWW Document], n.d. URL <https://www.betten.de/lexikon/doppel-s-form.html> (accessed 12.23.22).
- Explore With Us: DLR Spaceliner - YouTube [WWW Document], n.d. URL <https://www.youtube.com/watch?v=50rfXksgOD0> (accessed 12.19.22).
- Flugzeugsitz Doppelsitzbank Contour-S20214 Business Class -Lang, n.d. . wingdesign.com. URL <https://wingdesign.com/shop/flugzeugmoebel/flugzeugsitze/flugzeugsitz-doppelsitzbank-contour-s20214-business-class-lang/> (accessed 12.23.22).
- Gleichstrommotor, 24 mm, 1,5...4,5 V- | Pollin.de [WWW Document], n.d. . Pollin Electronic GmbH. URL <https://www.pollin.de/p/gleichstrommotor-24-mm-1-5-4-5-v-310719> (accessed 12.19.22).
- Gomeringer, R., Kilgus, R., Menges, V., Oesterle, S., Rapp, T., Scholer, C., Stenzel, A., Stephan, A., Wieneke, F., 2022. Tabellenbuch Metall: mit Formelsammlung, 49., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. ed, Europa-Fachbuchreihe für Metallberufe. Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, Haan-Gruiten.

- hepcotion.com, H., n.d. Mini Rail - Selbstschmierende Gleitführungen [WWW Document]. HepcoMotion Deutsch. URL <https://www.hepcotion.com/de/produkt/linearfuehrungen-uehrungsschienen-und-linearlager/mini-rail-selbstschmierende-gleitfuehrungen/> (accessed 12.19.22).
- Hildebrandt, E., 2018. Entwicklung und Bau eines Cabin Mock-ups zur Durchführung von ergonomisch experimentellen Kabinen- und Sitzbereichsuntersuchungen beim vertikalen Start (mit Probanden) im Rahmen des DLR Projekts SpaceLiner. HUDORA Schaukel Vario Basismodul V [WWW Document], n.d. . HUDORA. URL <https://www.hudora.de/gartenschaukel-vario-basismodul-hudora> (accessed 12.19.22).
- LOEFFLER\_Ergonomie\_Aktives\_Sitzen.jpg (JPEG-Grafik, 1000 × 891 Pixel) - Skaliert (69%) [WWW Document], n.d. URL [https://office-roxx.de/wp-content/uploads/2017/10/LOEFFLER\\_Ergonomie\\_Aktives\\_Sitzen.jpg](https://office-roxx.de/wp-content/uploads/2017/10/LOEFFLER_Ergonomie_Aktives_Sitzen.jpg) (accessed 12.23.22).
- Niederspannungsmotor - SIMOTICS GP - Siemens Electric motors - AC / Asynchron / verstärkt [WWW Document], n.d. URL <https://www.directindustry.de/prod/siemens-electric-motors/product-18183-2228613.html> (accessed 12.19.22).
- RECARO Podium CF – Höhepunkt der Sitzentwicklung. [WWW Document], n.d. URL <https://www.recaro-automotive.com/de/dynamik/recaro-podium-cf> (accessed 12.19.22).
- Sippel, M., 2009. Promising roadmap alternatives for the SpaceLiner. Acta Astronautica 66, 1652–1658.
- Synchrone Servo-Linearmotoren SL2 | SEW-EURODRIVE [WWW Document], n.d. URL [https://www.sew-eurodrive.de/produkte/motoren/linearbewegung/synchrone\\_servo-linearmotoren\\_sl2/synchrone\\_servo-linearmotoren\\_sl2.html#panel-0dae2219-222a-4ec2-aa61-bdb2e1c26f17-2](https://www.sew-eurodrive.de/produkte/motoren/linearbewegung/synchrone_servo-linearmotoren_sl2/synchrone_servo-linearmotoren_sl2.html#panel-0dae2219-222a-4ec2-aa61-bdb2e1c26f17-2) (accessed 12.19.22).
- Weidauer, J., 2013. Elektrische Antriebstechnik: Grundlagen, Auslegung, Anwendungen, Lösungen, 3., überarb. Aufl. ed. Publicis Publ, Erlangen.
- Wittel, H., Spura, C., Jannasch, D., 2021. Maschinenelemente. Band 2: Tabellenbuch / Herbert Wittel, Christian Spura, Dieter Jannasch, 25. Auflage. ed. Springer Vieweg, Wiesbaden [Heidelberg].

## VIII. Anhang

## MINIATURE LINEAR GUIDES

SMOOTH & QUIET LINEAR MOTION



- QUIETEST MOTION
- SELF-LUBRICATING
- INTERCHANGEABLE WITH MINIATURE PROFILE RAILS (7-20MM)
- WILL NOT FAIL CATASTROPHICALLY

## mini-rail Product Overview



Based on Pacific Bearing Company's proven Simplicity technology, **mini-rail** miniature linear guides provide smooth and quiet linear motion. The self-lubricating design requires no sealing, emits no particulates, tolerates both high and low temperature extremes and has no rolling elements that can cause catastrophic failure.

**mini-rail** miniature linear guides are available in five sizes: 7, 9, 12, 15 and 20mm - in lengths up to 3000mm, meaning no cumbersome butt joints. These guides are precision manufactured from lightweight aluminum alloys to ensure long life and corrosion resistance.

An economical alternative to conventional miniature linear guides, **mini-rail** requires no maintenance, is fully interchangeable with industry standard sizes and is maintained in stock for quick delivery.



### Compensated Precision Series (MRC):

Same as Precision Series except provided with additional clearance on the carriage to tolerate misalignment.

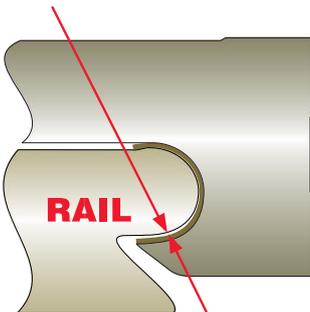
## 7 Technical Data

**mini-rail** is offered in three design configurations:

**Precision Series (MR):** Hardcoat anodised rails and carriages are corrosion resistant. FrelonGold® self-lubricating liner delivers the best overall performance, the highest loads, the best wear life, and speeds. Most precise running clearance for high precision applications.

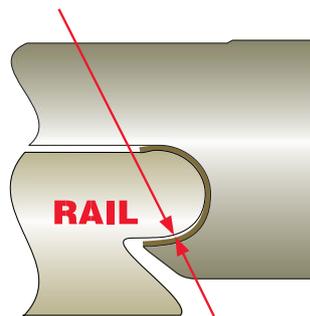
### 8 Precision Series (MR)

.025 - .051mm  
Running Clearance  
(HARDCOAT ANODISED)



### 9 Compensated Precision Series (MRC)

.064 - .089mm  
Running Clearance  
(HARDCOAT ANODISED)

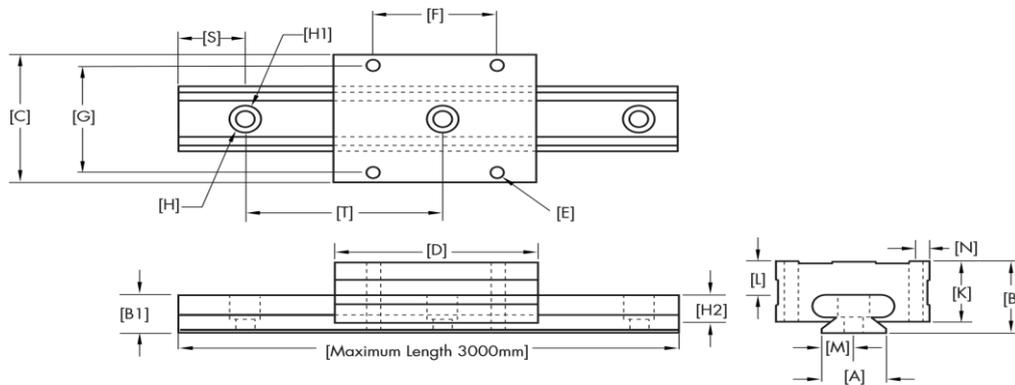


The data and specifications in this publication have been carefully compiled and are believed to be accurate and correct. However, it is the responsibility of the user to determine and ensure the suitability of Hepco-Pacific products for a specific application. Hepco-Pacific only obligation will be to repair or replace without charge, any defective components if returned promptly. No liability is assumed beyond such replacement.

# mini-rail Specifications (Maximum Length 3000mm)

Part Number	Running Clearance	A (mm)	B	B1	C	D	E	F	G	H	H1	H2	K	L	M	N	S	T
MR7x-xxx	.025 - .051	7	8	6.2	17	24	M2	8	12	4.2	2.4	2.3	6.2	1.7	3.5	2.3	5	15
MRC7x-xxx	.064 - .089	7	8	6.2	17	24	M2	8	12	4.2	2.4	2.3	6.2	1.7	3.5	2.3	5	15
MR9x-xxx	.025 - .051	9	10	7.3	20	30	M3	13	15	4.5	2.6	3	8	2.4	4.5	2.5	7.5	20
MRC9x-xxx	.064 - .089	9	10	7.3	20	30	M3	13	15	4.5	2.6	3	8	2.4	4.5	2.5	7.5	20
MR12x-xxx	.025 - .051	12	13	8	27	34	M3	15	20	6	3.5	3.5	10.7	4.6	6	3.5	10	25
MRC12x-xxx	.064 - .089	12	13	8	27	34	M3	15	20	6	3.5	3.5	10.7	4.6	6	3.5	10	25
MR15x-xxx	.025 - .051	15	16	9.3	32	42	M3	20	25	6	3.5	4.5	14.1	6.3	7.5	3.5	15	40
MRC15x-xxx	.064 - .089	15	16	9.3	32	42	M3	20	25	6	3.5	4.5	14.1	6.3	7.5	3.5	15	40
MR20x-xxx	.025 - .051	20	25	13.5	46	62	M4	38	38	9.5	6	8.5	21.2	11.2	10	4	20	60
MRC20x-xxx	.064 - .089	20	25	13.5	46	62	M4	38	38	9.5	6	8.5	21.2	11.2	10	4	20	60

**NOTE:** Add the overall length of the rail to the part number,  
 EXAMPLE "MR121-220" for a single carriage Precision Series assembly with a 220mm long rail.  
 Cut-to-length rails are available up to 3000mm.  
 The "S" dimension will remain constant at one end unless requested otherwise.  
 Standard and cut-to-length rail ends are NOT coated. Fully coated rails are available upon request.



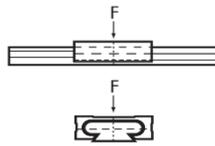
**NOTE:** CAD files can be downloaded from our website at [www.hepcmotion.com](http://www.hepcmotion.com)

The numbers below are for rails in a static condition. Refer to the calculations below to establish dynamic parameters.

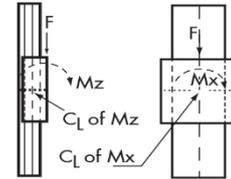
### Static Load Data

Size	F (N)	MSL (N)*
7	445	734
9	667	1557
12	1334	1957
15	2224	3114
20	3559	6005

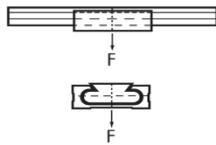
\*Max static load in Newtons.



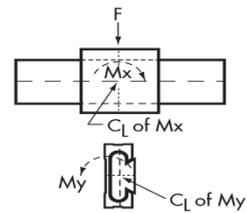
Size	Mx (N-m)	My (N-m)	Mz (N-m)
7	2.3	1.8	1.8
9	5.0	3.2	3.2
12	9.0	5.6	5.6
15	15.1	9.0	9.0
20	24.9	14.7	14.7



Size	F (N)
7	89
9	125
12	222
15	356
20	578



Size	F (N)	Mx (N-m)	My (N-m)	Mz (N-m)
7	133	2.3	1.8	1.8
9	222	5.0	3.2	3.2
12	400	9.0	5.6	5.6
15	667	15.1	9.0	9.0
20	1112	24.9	14.7	14.7



### Performance Ratings for Linear Motion

Plane bearings are rated by their limiting PV, which is a combination of load over a given surface area and the velocity.

**PV** = The performance measurement of plane bearings

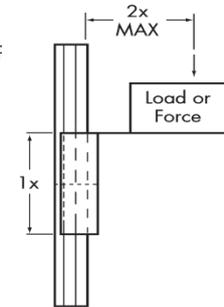
**PV** = P x V where P = pressure (load) in kgf/cm<sup>2</sup>

**V** = velocity (speed) in m/min

**Note:** All three parameters must be met by an application for the

### Cantilevered Loads

Binding of the carriage will occur if



with plane bearings. Contact Hepco for additional information.

### ORDERING CODE

#### Standard length assemblies

**No entry:** Precision Series running clearance (.025 - .051mm)  
FrelonGOLD® bearing material on RC70 hardcoat anodised rail

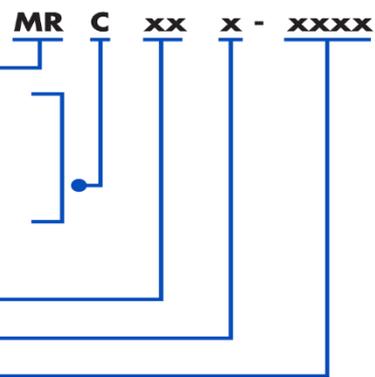
Compensated Precision Series running clearance (.064 - .089mm) FrelonGOLD® bearing material on RC70 hardcoat anodised rail

(All interchangeable with miniature rolling element profile rails)

Nominal sizes 7, 9, 12, 15, 20mm

Number of carriages per rail 1 or 2

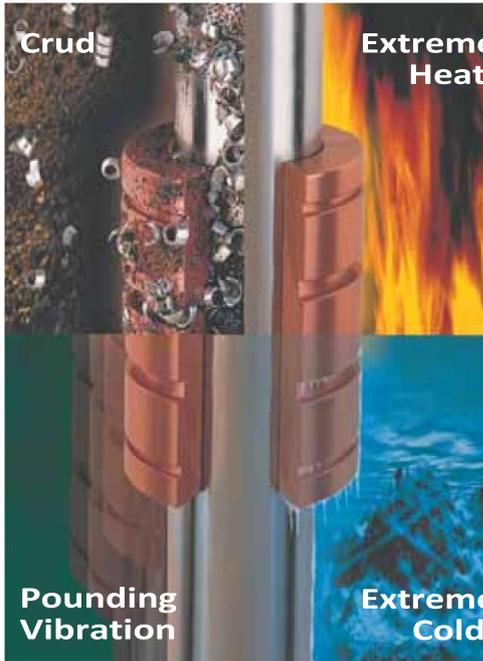
Length of rail in mm (max. length 3000mm)



Size	Standard Lengths Available (max. length 3000mm)						
7	40	70	85	100	130	-	-
9	55	75	95	115	155	195	275
12	120	170	220	270	320	370	470
15	150	230	310	430	470	670	-
20	220	280	340	460	640	880	-



## 10 technology now applied to profile rails



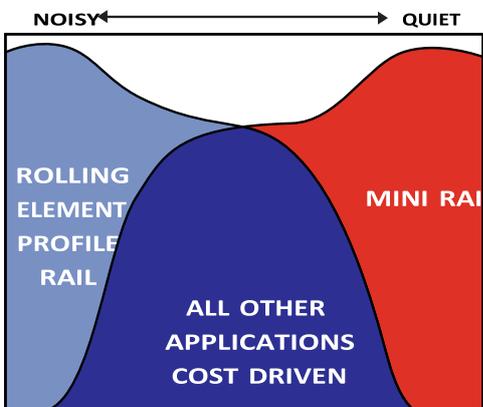
### Performance Advantages:

- Quietest running
- Self-lubricating
- Dampens vibration
- No metal to metal contact
- Tolerates shock loads
- Will not fail catastrophically
- Corrosion resistant

### Industries Include:



- 10.1**
- Semi-conductor processing
  - Clean room
  - Scanning and input devices
  - Printing and output devices
  - Packaging machinery
  - Pick and place machinery
  - Textile machinery
  - Material handling applications
  - Automotive assembly plants
  - Fitness equipment
  - Medical devices
  - Foundries and steel mills



- Machine Tool Accuracies
- Quiet Motion
- Preloaded - zero play
- Washdowns
- Very high speeds
- Shock loads & vibration
- Extreme temperatures

\*Registered in the U.S. Patent and Trademark Office. Registration #2690260

### Design Criteria:

Rolling element profile rails are good for high speed applications, but are NOT recommended for noise reduction, contaminated environments, high vibration, shock loads, or wide temperature extremes.

**mini rail** \* self-lubricating technology

PERFORMANCE DRIVEN PERFORMANCE DRIVEN **performs better in these applications.**

## 11 Alternative Products



### 11.1 Simplicity Bearings

or closed formats.

The high speed and load benefits of the Hepco-Pacific Frelon™ Gold liner are readily apparent but for the most extreme environments of wash-downs and corrosion the 'J'-Liner is readily available. Designed to interchange with failing ball based systems Hepco-Pacific Simplicity bearings are available in standard or pillow block, open



### 11.2 Flanged Housings

improved final alignment of the shaft is combined with a bearing that cannot catastrophically fail.

Hepco-Pacific Flanged bearings are available either with single or double flanges. These bearings can be either face or end mounted eliminating the need for a precision pilot. With this simplified installation process an



### 11.3 Sleeve Bearings

Sleeve bearings are an ideal solution for low to moderate speed linear/rotary applications. These bearings combine all of the Simplicity benefits such as self-lubrication, contamination and shock load tolerance ideal for idle rollers, conveyors and packaging machinery.



### 11.4 Square Bearings

Square bearings are utilised in tough applications where alignment is difficult and space is critical. The Simplicity benefits of contamination tolerance, self lubrication and high load capacity are combined with the radial integrity on a single shaft eliminating costly and bulky.

## 12 Complementary Linear Products



### 12.1 Shaft



To make the most of your Hepco-Pacific Simplicity bearings we offer high load/ rigidity support rails, light and strong tubular or aluminium options, stainless steel in 400 or 300 Series. All of these options are available in random lengths or machined to your exacting specifications.

### 12.2 Hardened Crown Track Rollers



The Hardened Crown Track Roller is an inexpensive linear motion solution providing low friction, smooth operation and a high load capacity. This simple bearing and rail system combines precision with wide operating tolerances suitable for use in applications such as door/guarding systems and conveyors.

## 13 Contact details

**Hepco Slide Systems Ltd**

Lower Moor Business Park, Tiverton Way  
Tiverton, Devon, England EX16 6TG

**Tel: 01884 257000 Fax: 01884 243500**

**E-mail:** [sales@hepcotion.com](mailto:sales@hepcotion.com)    **Website:** [www.HepcoMotion.com](http://www.HepcoMotion.com)



CATALOGUE No. MINI-RAIL 03 UK © 2010 Hepco Slide Systems Ltd.



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Hamburg University of Applied Sciences

## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

*Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI*

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Rahmati

Vorname: Sabina

dass ich die vorliegende Bachelorthesis bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:  
Entwicklung eines Flugsitzes im Rahmen des DLR-Projekts SpaceLiner

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

*- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -*

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile - bitte ausfüllen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

29.12.2022

Datum

Unterschrift im Original