

Schlussbericht

der

RWTH Aachen University

zum Vorhaben

upBUS

**Elektrisch angetriebener, transmodularer Bus für
den Personennahverkehr als kostengünstige und
umweltfreundliche Lösung**

FKZ 50RP1980

Projekt- und Dokumentinformation

Projektinformationen	
Projekt	upBUS- Elektrisch angetriebener, transmodularer Bus für den Personennahverkehr als kostengünstige und umweltfreundliche Lösung
Zuwendungsgeber	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Projektträger	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)
Förderkennzeichen	50RP1980
Projektlaufzeit	01.06.2019 – 31.08.2021
Zuwendungsempfänger	RWTH Aachen University Institut für Strukturmechanik und Leichtbau Lehrstuhl für Höchstfrequenzelektronik
Projektleitung	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder kai-uwe.schroeder@sla.rwth-aachen.de +49 241 80 98631
Autoren	David Bierbüsse Eduard Heidebrecht Tobias Meinert Renato Negra Kai-Uwe Schröder

Inhaltsverzeichnis

1. KURZE DARSTELLUNG DES VORHABENS	3
1.1. Aufgabenstellung	3
1.2. Stand der Technik.....	3
1.3. Eigene Vorarbeiten	5
1.4. Planung und Ablauf	6
1.5. Zusammenarbeit mit Partnern.....	6
2. EINGEHENDE DARSTELLUNG	7
2.1. Wissenschaftlich-/technische Erkenntnisse.....	7
2.1.1. Auslegung der Fahrgastzelle (AP-2000).....	7
2.1.2. Anpassung und Skalierung der Schnittstelle (AP-3000).....	12
2.1.3. Auslegung des Fahrmoduls (AP-4000).....	30
2.1.4. Antriebs- und Sensortechnik (AP-5000)	44
2.1.5. Demonstration des Testmodells (AP-6000)	60
2.1.6. Zusammenfassung.....	66
2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	68
2.3. Notwendigkeit der geleisteten Arbeit.....	68
2.4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	68
2.5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	70
2.6. Veröffentlichung der Ergebnisse	70
3. Literatur	71

1. KURZE DARSTELLUNG DES VORHABENS

1.1. Aufgabenstellung

Das Hauptziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines Technologiedemonstrators für transmodularen Verkehr. Der Technologiedemonstrator wird den Wechsel zwischen Seilbahn- und Busmodus vollautomatisch und im laufenden Betrieb der Seilbahn durchführen. Für den Technologiedemonstrator müssen verschiedene Funktionen und Subsysteme entwickelt und hergestellt werden. Dazu zählen als Trägerplattform der Technologie ein angepasstes Seilbahngehänge, eine Dummykabine und ein Fahrmodul. Als eigentliche Kernkomponente der Übergabe wird die iBOSS-Raumfahrtschnittstelle für die Anwendung weiterentwickelt und eine Sensorlösung geschaffen, die eine Kopplungsgenauigkeit von unter 10 mm bietet. Nach Auslegung und Konstruktion der nötigen Komponenten werden diese gefertigt und zum Technologiedemonstrator zusammen montiert. Die Demonstration der Technologie findet an einer Seilbahn statt, die für diesen Zweck umgebaut wird. Die Station wird um eine Fahrspur für den Bus erweitert und die Beschleunigungsstrecke der Seilbahnkabine wird angepasst, sodass der Moduswechsel in einem Bereich mit gleichbleibender Geschwindigkeit durchgeführt werden kann. Die erfolgreiche Demonstration des automatisierten Wechsels schließt das Vorhaben ab.

1.2. Stand der Technik

Die Realisierung der Verbindung einer kuppelbaren Seilbahnkabine mit einem elektrisch angetriebenen automatisierbaren Fahrmodul ist ein absolutes Novum. Das Hybridkonzept unterscheidet sich grundsätzlich von aktuellen und vergangenen Entwicklungen im Bereich der urbanen Mobilität und eröffnet dadurch ungeahnte Möglichkeiten. Dies ist darin begründet, dass sich Bus- und Seilbahnhersteller aufgrund der Unternehmenshistorien ausschließlich auf eine Verkehrsebene fokussiert haben. Dementsprechend baut zum Beispiel Daimler keine Seilbahnen und Doppelmayr keine Busse für den Straßenverkehr. Die Seilbahnhersteller haben sich zudem im Fall von People-Mover-Systemen bisher nicht von schienengebundenen Fahrzeugkonzepten distanziert. Diese Lücke macht sich upBUS zunutze und definiert eine neue Mobilitätsvariante im Zeitalter der vernetzten Systeme, in der ein und dasselbe Verkehrsmittel kontinuierlich in zwei Ebenen verkehrt. Dadurch eröffnen sich für die Stadtverkehrsbetriebe neue Gestaltungs-, Automatisierungs- und Optimierungsmöglichkeiten. Verschiedene Verkehrsmittel auf der bodengebundenen und der oberirdischen Ebene müssen folglich nicht mehr aufeinander abgestimmt werden. Sehr innovativ ist dabei die Komponente, die den upBUS zum Hybridvehikel macht. Hierzu zählen die mechanischen Schnittstellen, die auf der iBOSS-Schnittstelle basieren. Die iBOSS-Schnittstelle ist als „4 in 1-System“ ausgeführt. Mit „4 in 1“ wird die Fähigkeit bezeichnet, Lasten, elektrische Energie, Daten und Wärme mit einer einzigen Schnittstelle zu übertragen. Diese Kombination ist weltweit einmalig [1].

Als verwandte konkurrierende Technologie zum upBUS ist ausschließlich ein Hybridkonzept namens Cable City Car von Doppelmayr bekannt [2]. Bei diesem wird das Laufwerk von kuppelbaren Seilbahnkabinen in einer Übergangsstation auf Schlitten gesetzt. Die Schlitten fahren anschließend schienengebunden auf einer aufgeständerten Trasse weiter, sodass die Mobilität lediglich weiterhin auf der +1-Ebene erfolgt. Der Vorteil dabei ist, dass durch die aufgeständerte Trasse kleinere Kurvenradien als im Seilbahnbetrieb möglich sind. Die Kosten für den Bau einer Trasse sind jedoch höher als die für den

Bau einer Seilbahnstrecke, da meistens eine Betonfahrbahn oder ein Traggerüst – wie bei anderen Hochbahnen auch – vonnöten ist. Andere konkurrierende Technologien sind People-Mover-Systeme, die allerdings keine Hybrideigenschaften besitzen und mit einem beträchtlich höheren konstruktiven Aufwand verbunden sind. Doppelmayr produziert beispielsweise den sogenannten Cable Liner, der bereits in mehreren Städten wie Oakland, Las Vegas, Venedig und Mexiko-Stadt umgesetzt wurde.

Im Bereich der elektrisch angetriebenen automatisierten Minibusse sind die Hersteller Local Motors aus den USA sowie Easymile und Navya aus Frankreich am bekanntesten. Der Minibus Arma von Navya wird seit 2016 von der Schweizer Postauto AG in Sitten eingesetzt [3]. Ein weiterer Einsatz findet seit September 2016 in Lyon statt [4]. Aus Deutschland stammt der e.GO Mover, der sich derzeit in der Entwicklung befindet. Der e.GO Mover verfügt im Vergleich zu seinen Konkurrenten über ein Lenkungs-system für einen Fahrer. Neben den Minibussen sind auch klassische Verkehrsmittel wie Busse und Straßenbahnen mögliche konkurrierende Systeme von upBUS [5]. Diese müssen aber als parallel existierende Systeme betrachtet werden. upBUS fasst sich selbst als Weiterentwicklung einer urbanen Seilbahn auf. Jedes System hat dabei Vor- und Nachteile und besetzt dadurch einen bestimmten Bereich im ÖPNV. U-Bahnen werden eingesetzt, um große Menschenmengen (>10000 P/h) über größere Distanzen zu transportieren. Sie werden erst bei Streckenlängen von mehr als 10 km und einer benötigten Kapazität von mehr als 6000 P/h wirtschaftlich sinnvoll. Straßenbahnen haben eine ähnliche Förderleistung wie Seilbahnen (bis 6000 P/h), sind aber erst für längere Distanzen (>5 km) wirtschaftlich gesehen im Vorteil. Bussysteme haben ihren Vorteil in stark verzweigten Systemen, die nur eine geringe Förderleistung benötigen. Urbane Seilbahnen besetzen dabei eine Lücke zwischen Bussen und Straßenbahnen. Sie sind wirtschaftlich am sinnvollsten für Strecken bis zu 5 km (oder bei entsprechendem Gelände auch länger) mit einer benötigten Förderleistung von bis zu 6000 P/h [5] oder bei städtischen Topografien, die den Transport durch Straßen- und U-Bahnen unmöglich machen. Der Vorteil von upBUS ist, dass durch die Hybridtechnik eine direkte Verbindung zwischen den Vorteilen der Bussysteme zur Seilbahn entsteht. Die upBUS-Seilbahn verbindet nicht mehr ein verzweigtes Bus-system über einen Umsteigebahnhof mit dem weiter entfernten restlichen Nahverkehrssystem, sondern ersetzt das Bussystem und lässt das Umsteigen überflüssig werden. Durch diese Weiterentwicklung erweitern urbane Seilbahnen ihre Möglichkeiten im ÖV-System.

Da der upBUS die Eigenschaften eines Minibusses mit denen einer kuppelbaren Seilbahn in einem vereint, werden beim bestehenden Stand der Technik stets zwei unterschiedliche Mobilitätsprodukte benötigt, um die gleiche Funktionalität anzubieten. Diese würde durch upBUS entfallen.

Die iBOSS-Schnittstelle ist durch nationale und internationale Patente geschützt (DE 102014104695 A1, CA 2944390 A1, CN 106163926 A, EP 3126245 A1, US 20170015443 A1). Die Patentanmeldungen sind bereits veröffentlicht worden und befinden sich derzeit im Erteilungsverfahren. Das Patent hat in diesem Fall die RWTH Aachen beantragt. Im Jahr 2018 wurden Gespräche zwischen dem Technologietransfer der RWTH Aachen und der iBOSS GmbH abgeschlossen, wodurch die iBOSS GmbH die alleinigen Lizenzierungsrechte der iBOSS-Schnittstelle besitzt. Während des upBUS-Vorhabens dürfen die Antragssteller im Rahmen der Entwicklungsarbeit an den Hochschulinstituten auf die iBOSS-Schnittstelle zugreifen und diese für die neue Anwendung weiterentwickeln. Sollte nach dem Ende des Vorhabens bei zukünftigen Weiterentwicklungen von upBUS weiterhin auf die geschützten Eigenschaften der iBOSS-Schnittstelle zurückgegriffen werden müssen, verpflichtet sich die iBOSS GmbH, mit upBUS zu kooperieren und die Nutzungsrechte der iBOSS-Schnittstelle für die Aktivitäten von upBUS bereitzustellen. Der „freedom-to-operate“ ist daher gesichert.

Für die Kopplung zwischen den jeweiligen Modulen ist eine Sensorik zur Abstandsmessung und Geschwindigkeitsregulierung erforderlich. Im heutigen Straßenverkehr werden Kamera und Radarsysteme überwiegend für die Abstandsregulierung oder in Spurhalteassistenten eingesetzt. LiDAR-Systeme eignen sich hervorragend für den autonomen Straßenverkehr und werden bereits vereinzelt verwendet [6]. Komplettlösungen zur Sensordaten-Auswertung autonom fahrender Fahrzeuge bietet beispielsweise NVIDIA [7]. LiDAR-Systeme zeichnen sich durch eine hohe Genauigkeit in der Entfernungsmessung aus, sind aber vergleichsweise teuer. Kommerziell verfügbare Radarsysteme wiederum sind kostengünstiger, haben aber im normalen Betrieb nur eine Entfernungsauflösung von einigen Zentimetern. Allerdings sind für einen beschränkten Messbereich Entfernungen und Abstandsänderungen von wenigen Millimetern möglich [8]. Bezüglich upBUS sind beide Systeme, LiDAR und Radar, potenziell geeignete Kandidaten für den Koppelvorgang der jeweiligen Module.

1.3. Eigene Vorarbeiten

Das gesamte iBOSS-System und damit auch die Schnittstelle befinden sich seit 2010 in der Entwicklung. Die Entwicklung und Ertüchtigung der Schnittstelle wurde dabei maßgeblich von den Antragsstellern am Institut für Strukturmechanik und Leichtbau (SLA) durchgeführt. Unabdingbar für eine erfolgreiche Kopplung ist darüber hinaus die Implementierung einer geeigneten Sensorik zur Abstandsmessung und Geschwindigkeitsregulierung. Der Lehrstuhl für Höchsthfrequenzelektronik (HFE) verfügt über langjährige Erfahrung insbesondere auf dem Gebiet der Hochfrequenzelektronik im Millimeterwellen-Bereich, welche die Auslegung der Sensorik mit entsprechender Messgenauigkeit ermöglicht. Dabei reichen die Forschungskompetenzen von der Simulation und Modellierung über die Implementierung bis hin zur Charakterisierung und Vermessung von Systemen bis über 100 GHz.

Zusätzlich besitzt das SLA umfassende Expertise auf den Feldern der Auslegung, der Dimensionierung und der Qualifizierung von Raum- und Luftfahrtstrukturen. Dies wurde/wird u.a. in den Projekten Silent Air Taxi, EnerVib sowie BIMOD bewiesen.

Die Expertise des HFE im Bereich der funkbasierten Sensortechnik wurde durch diverse Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Radartechnik erlangt. Aktivitäten in diesem Bereich sind unter anderem eine internationale Kooperation zwischen der National Chiao Tung University in Taiwan und dem Institut für Höchsthfrequenzelektronik zum Design und der Implementierung eines 35 GHz CMOS MIMO Radarsystems, die Auslegung eines rauscharmen Empfängermoduls für bildgebende Radaranwendungen im Ka-Band [9] in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik sowie die Auslegung und Implementierung eines Muti-Ton CW Radarsystems [10].

Die ersten Ideen zu upBUS sind im Jahr 2016 entstanden. Zunächst war der Grundgedanke, Fertigungstechnologien und Strukturkonzepte aus dem Luft- und Raumfahrtbereich auf die Seilbahntechnik zu übertragen, um so die Transportkapazität von Seilbahnen zu erhöhen. Dazu wurden zunächst verschiedene Kabinenkonzepte am SLA erarbeitet. Durch diese Vorarbeit konnte das notwendige Wissen rund um das Thema der Seilbahntechnik gewonnen werden. Im Reifeprozess der Idee wurde der Fokus der Arbeit folgend auf die Integrierbarkeit von Seilbahnen in den städtischen Verkehr durch das disruptive Konzept der kontinuierlichen Mobilität in zwei Ebenen gesetzt. In diesem Zusammenhang spielt die bereits genannte iBOSS-Schnittstelle eine wesentliche Rolle. Zur Auslegung der upBUS-Fahrgastzelle

wurden bereits mehrere analytische und numerische Berechnungen am SLA durchgeführt. Die Fahrgastzelle ist leichtbauoptimiert ausgelegt, sodass der Kraftfluss auf eine möglichst günstige Art und Weise vom Gehänge auf die tragende Struktur übertragen wird. Um eine Vorstellung der Größe und des Raumgefühls dieser ersten Auslegung gewinnen zu können, wurde am SLA ein erstes Mockup in Originalgröße gefertigt. Die Erkenntnisse beim Bau dieses Mockups fließen in die spätere Fertigung des Demonstrators ein. Weiterhin kann das Mockup für die Verbreitung der Idee verwendet werden, indem es auf Messen ausgestellt wird.

Die Kenntnisse und Vertrautheit mit der Schnittstelle, die über die lange persönliche Entwicklungszeit der Antragsteller gewonnen werden konnten, sowie die Kompetenzen am SLA im Bereich der Strukturauslegung und die Erfahrungen des HFE im Gebiet der Kurzstrecken-Sensortechnik ermöglichen eine rasche Modifizierung der Schnittstellen und eine Entwicklung des Fahrzeugs zu einem Einsatz als Demonstrator auf einem Teststand.

1.4. Planung und Ablauf

Das upBUS-Projekt war für einen Zeitraum von 1,5 Jahren angelegt. Start des Projekts war der 1. Juni 2019, und der Abschluss sollte am 30. November 2020 erfolgen. Aufgrund der weltweiten Corona-Pandemie konnten die Arbeiten am Prototyp nicht wie geplant durchgeführt werden. Zusätzlich existierten Dienstreisesperren, die die Durchführung der Testfahrt an der Seilbahnanlage in Österreich im November 2020 unmöglich machten. Aus diesem Grund wurde das Projekt verlängert und konnte am 31.8.2021 abgeschlossen werden. Die Demonstrationsfahrt des upBUS-Testmodells erfolgte dabei im Juni 2021. Die innerhalb dieses Vorhabens geplanten Arbeiten wurden durch das SLA und des HFE durchgeführt.

Folgende Hauptarbeitspakete wurden definiert und bearbeitet:

- AP-1000: Projektmanagement
 - Organisation, Planung und Kontrolle der anfallenden Arbeiten
- AP-2000: Auslegung der Fahrgastzelle
 - Strukturauslegung, Systemauslegung, Fertigung, Montage
- AP-3000: Anpassung und Skalierung der Schnittstelle
 - Anpassung Mechanik, Anpassung Elektronik, Fertigung, Montage
- AP-4000: Auslegung des Fahrmoduls
 - Strukturauslegung, Systemauslegung, Fertigung, Montage
- AP-5000: Antriebs- und Sensortechnik
 - Sensorentwicklung, Leistungsbedarfsbestimmung, Antriebsentwicklung, Einbau Antrieb, Einbau Sensorik
- AP-6000: Demonstration des Testmodells
 - Endmontage, Testfahrt

Im Verlauf des Projekts waren keine Änderungen an den Arbeitspaketen notwendig.

1.5. Zusammenarbeit mit Partnern

Das upBUS-Projekt wurde in Kooperation zwischen dem SLA und dem HFE bearbeitet. Neben dieser Zusammenarbeit erfolgten Unteraufträge an die iBOSS GmbH für die Fertigung der Schnittstellen und an die Augetech GbR für die Anpassung der Schnittstellenelektronik. Eine weitere Kooperation bestand zum weltweit führenden Seilbahnhersteller Doppelmayr, der das Projekt mit der Anpassung und Bereitstellung eines Seilbahngehänges und der Zurverfügungstellung einer Seilbahnanlage für die Test- und

Demonstrationsfahrt unterstützt hat. Die Seilbahnanlage wurde speziell für die Testfahrt umgebaut bzw. erweitert. Dies umfasst eine Fahrspur für den Bus und die Anpassung der Beschleunigungsübersetzung in der Seilbahnstation, sodass eine längere Fahrtstrecke mit gleichbleibender Geschwindigkeit zur Verfügung stand.

2. EINGEHENDE DARSTELLUNG

2.1. Wissenschaftlich-/technische Erkenntnisse

upBUS fokussiert sich im gesamten Projekt genau auf ein Ziel: Die erfolgreiche Demonstration des Übergangs vom Bus- in den Seilbahnmodus und umgekehrt an einem Seilbahnteststand. Alle Arbeiten werden auf dieses Ziel ausgerichtet. Das Projektteam wird dabei wie ein Startup agieren, da die Vorgehensweise von innovativem Forschungsprojekt und Startup sehr ähnlich sind. Die erfolgsversprechenden Theorien aus der Startup-Szene können daher auch auf dieses Forschungsprojekt angewendet werden, um dessen Erfolgswahrscheinlichkeit zu erhöhen. Aus diesem Grund wird der Demonstrator nur über minimale Funktionen verfügen. Gerade ausreichend, um die Innovation von upBUS demonstrieren zu können. Dieser upBUS-Demonstrator wird am Ende der Projektlaufzeit die oben erwähnte Testfahrt durchführen. Dafür werden vier Entwicklungen verfolgt, die ausschließlich diese Testfahrt im Fokus haben. Die aus dem iBOSS-Projekt existierende Schnittstelle wird für upBUS angepasst und weiterentwickelt. Beispielsweise werden zur Kostenreduzierung nicht benötigte Funktionen entfernt oder Vereinfachungen an Bauteilen vorgenommen, die wegen der ursprünglichen Raumfahrtanwendung sehr komplex sind. Unabdingbar für eine erfolgreiche Kopplung ist darüber hinaus die Implementierung einer geeigneten Sensorik zur Abstands- und Entfernungsmessung. Für die genaue Ausrichtung der Module ist dabei eine Messauflösung im Millimeter-Bereich erforderlich. Das Ziel des Projekts ist dabei, kommerziell erhältliche Sensortechnik für den Demonstrator anzupassen und einzustellen. Schließlich müssen noch ein Fahrmodul und eine Fahrgastzelle entwickelt werden. Aus Vereinfachungsgründen werden diese beiden Teile auf die Grundfunktion der Demonstrationsfahrt beschränkt. Die Fahrgastzelle wird beispielsweise keine Passagiere transportieren können, das Fahrmodul nur eine minimale elektrische Reichweite aufweisen oder über eine Höchstgeschwindigkeit im Bereich der Schrittgeschwindigkeit verfügen. Auf diesem Weg werden die Risiken von Fehlschlägen reduziert und die Chancen eines Erfolgs deutlich erhöht. Zusätzlich bleiben die Kosten gering.

2.1.1. Auslegung der Fahrgastzelle (AP-2000)

- **Strukturauslegung:**

Die Kabine wurde so einfach wie möglich gestaltet, da sie ausschließlich als Dummy fungiert. Die Philosophie von upBUS beinhaltet, die komplette Intelligenz des Kopplungsprozesses in das Fahrmodul zu integrieren. Dies ist vor allem aus der Seilbahntechnik abgeleitet, da auch dort die Seilbahnkabinen über praktisch keine Komponenten verfügen. Dies liegt unter anderem an einem gewünschten minimalen Gewicht der Kabinen. Je geringer das Eigengewicht der Kabine ist, desto mehr Fahrgäste können transportiert werden. Diese Anforderung muss upBUS ebenfalls erfüllen. Daher ist der Aufbau der Dummykabine sehr simpel gestaltet und besteht aus einfachen Stahl-Vierkant-Hohlprofilen, welche zusammengeschweißt werden. Für das möglichst optimale Profil wurden zunächst die vier verschiedenen, in Abbildung 1 dargestellten, geometrische Konfigurationen miteinander verglichen.

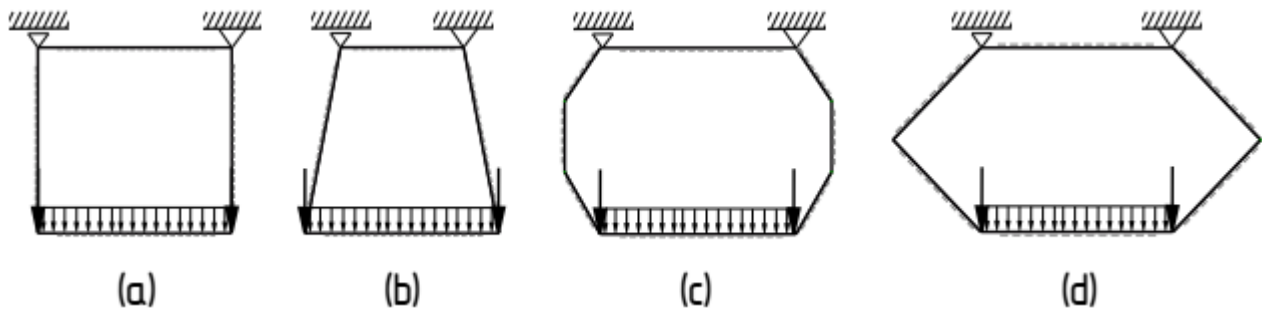


Abbildung 1: Geometrische Konfigurationen der lasttragenden Struktur der Dummykabine. Die Last ist aufgetragen.

Die aufgetragenen Lasten bestehen aus einer Flächenlast und zwei Einzelkräften, die jeweils in den Seiten der Bodenplatte aufgetragen sind und für alle Kabinen identisch sind. Die Flächenlast entspricht den zu erwartenden Kräften einer Bodenplatte und weiterer Systeme, die für die Testfahrt mitgeführt werden müssen. Die Einzellasten entsprechen dem Gewicht der oberen Kabinenteile, der Karosserie und weiterer Anbauten. Die resultierenden inneren Kräfte und Momente für die verschiedenen Geometrien sind in Abbildung 2 bis Abbildung 4 dargestellt.

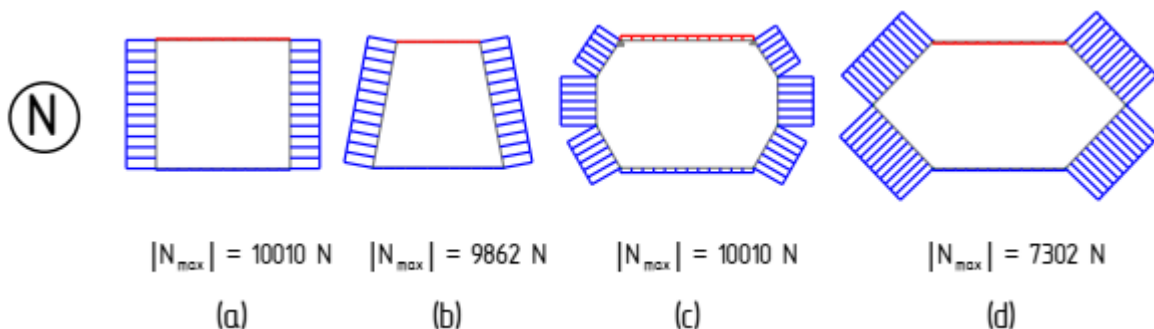


Abbildung 2: Normalkraftverlauf in den einzelnen Geometrien.

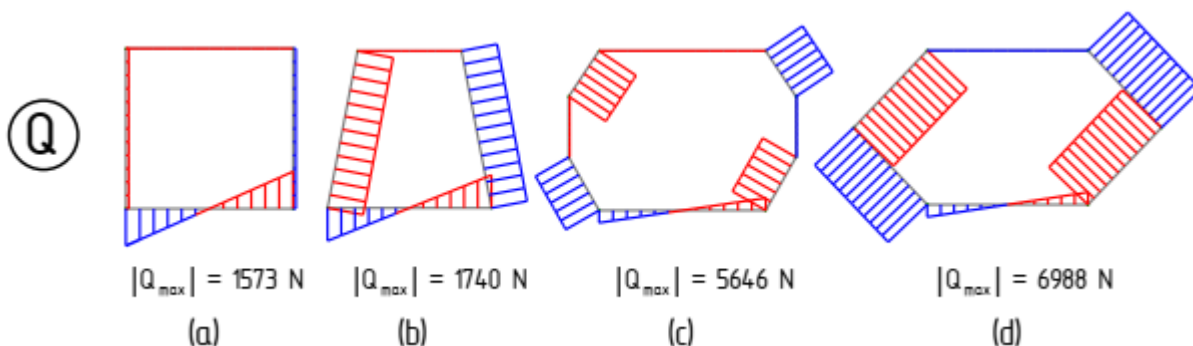


Abbildung 3: Querkraftverlauf in den einzelnen Geometrien.

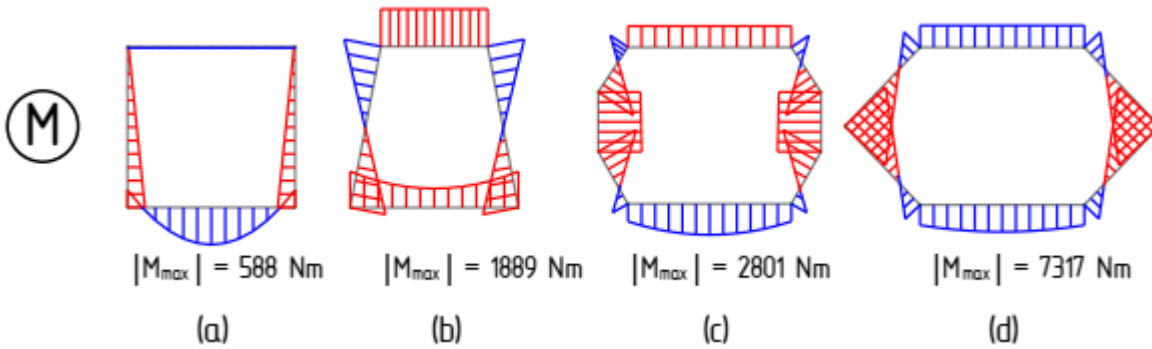


Abbildung 4: Momentverlauf in den einzelnen Geometrien.

Die Spannung in einem Balken ist proportional zu der Summe aus Normalkraft, Querkraft und Moment. Die Normalkraft ist in Geometrie a und c am höchsten, die Querkräfte und Momente in den Geometrien c und d. Aus diesem Grund sind nur noch Geometrie a und b für eine weitere Betrachtung interessant. Ein Massevergleich nach Hinzufügen einer Erweiterungsstruktur (siehe Abbildung 5), um der Kabine das Aussehen eines Straßenfahrzeugs zu geben, ergibt, dass Variante b mit 123 kg um 10 kg leichter ist, als Variante a.

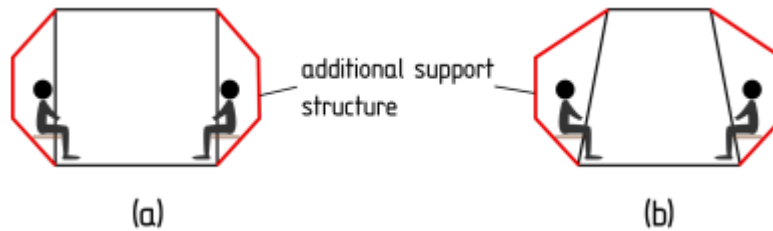


Abbildung 5: Erweiterungsstruktur für die beiden übrig gebliebenen Geometrien a und b.

Die Grundstruktur der ausgewählten Kabine ist in Abbildung 6 dargestellt.

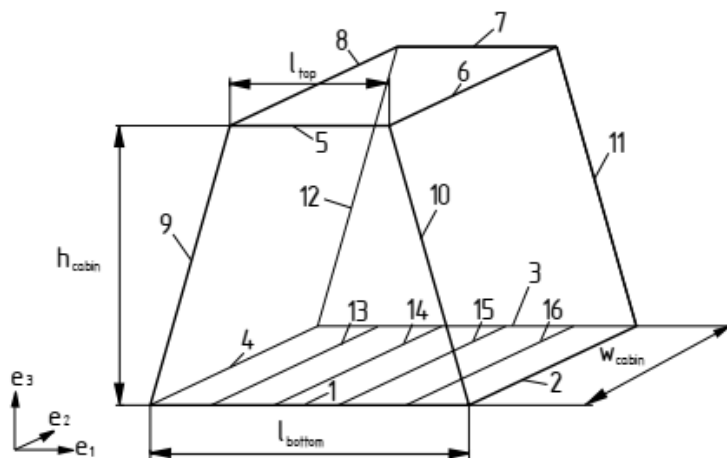


Abbildung 6: Ausgewählte Grundstruktur der Dummykabine.

Ein Boden wird ergänzt, um nötige Systeme transportieren zu können. Zusätzlich erhält die Kabine eine Karosserie. Diese übernimmt lediglich optische Aufgaben, damit die wirtschaftliche und wissenschaftliche Vermarktung unterstützt wird. Durch Erfahrungen aus früheren Projekten ist es unumgänglich, dass die Testmodelle ein Mindestmaß an optischen Eigenschaften aufweisen. Alles andere hat negative Einflüsse, die leicht zu vermeiden sind. Das finale Design der Dummykabine ist in Abbildung 7 gezeigt. Gut zu erkennen ist in der Mitte das oben ermittelte Grundgerüst für einen optimalen Kraftfluss.

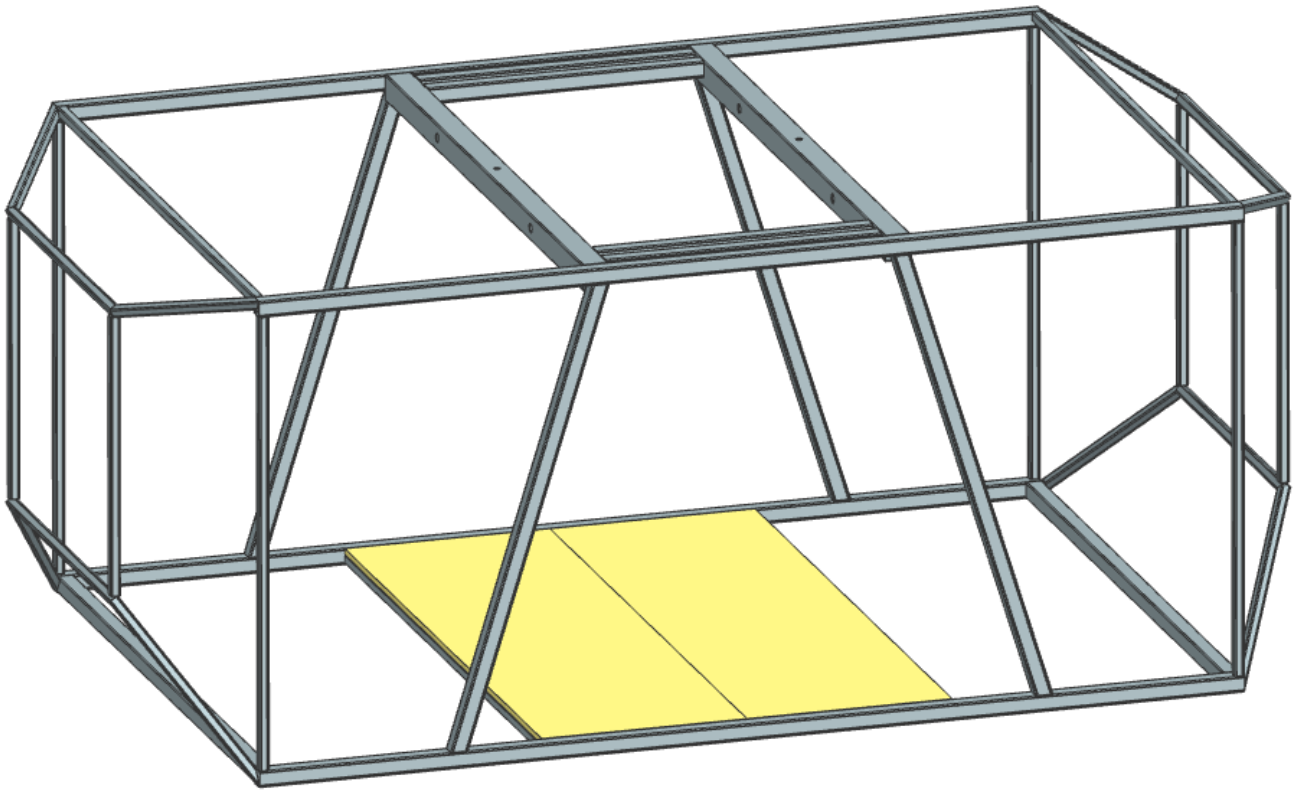


Abbildung 7: Das finale Design der Dummykabine.

- **Systemauslegung:**

Die wichtigste Eigenschaft der Kabine ist, die Zentrierung beim Koppeln zu übernehmen. Die Zentrierung ist notwendig, damit sich die beiden Seiten der Schnittstelle treffen, sodass eine sichere Kopplung durchgeführt werden kann. Aus diesem Grund sind drei Zentrierungsstufen vorgesehen. Zunächst findet eine Zentrierung über schiefe Ebenen in den Ecken der Kabine statt. Diese zentrieren die Kabine auf 2,5 cm genau. Anschließend führen zwei Trichter die Zentrierung auf unter 1 cm weiter. Danach zentrieren Passformen an den Schnittstellen diese. Dafür sind die Schnittstellen schwimmend gelagert, um so Toleranzen auszugleichen. Die schwimmende Lagerung kann auch einen Winkelversatz ausgleichen. Erst danach koppeln die Schnittstellen. Die Zentrierungsstufen in der Kabine sind in Abbildung 8 dargestellt.

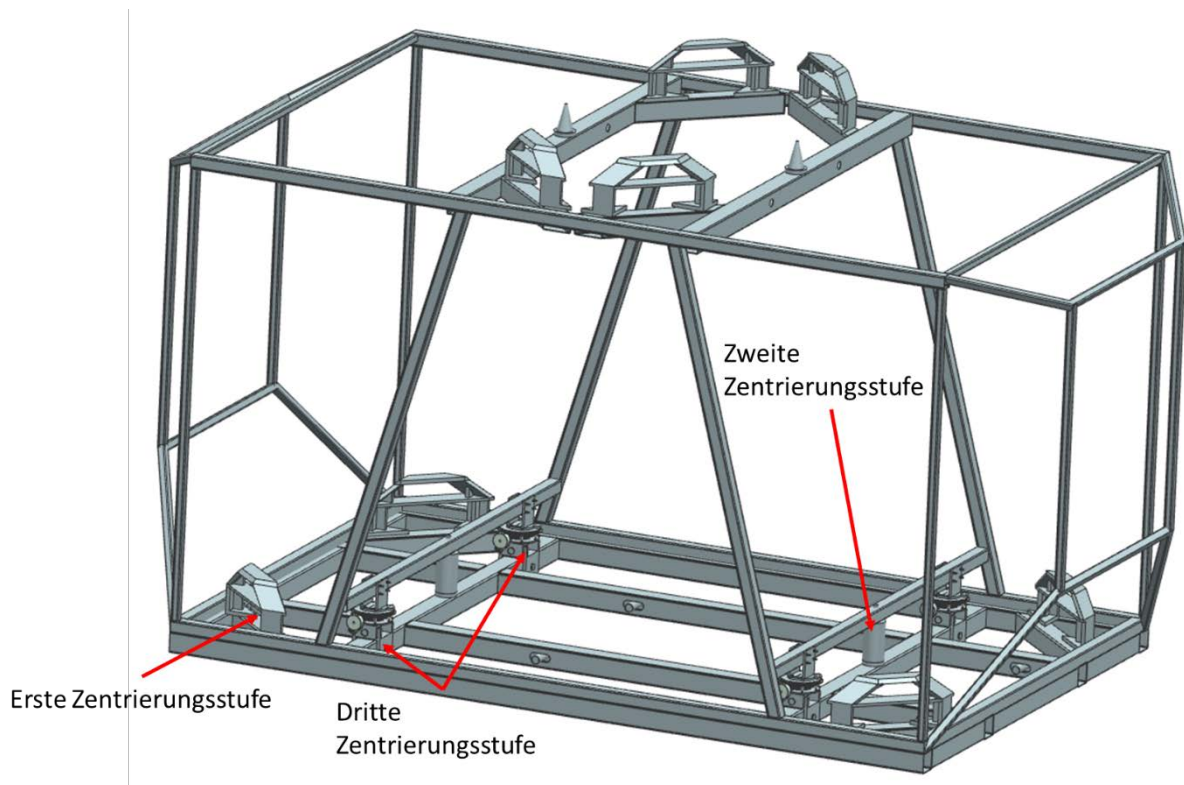


Abbildung 8: Zentrierstufen in der Dummykabine.

- **Fertigung:**

Für die Fertigung wurden Vierkant-Hohlprofile miteinander verschweißt. Da für die Kopplung eine hohe Toleranz nötig ist, wurden die Schweißarbeiten des Gerüsts an eine Schlosserei vergeben, die auf Ofenbau spezialisiert ist. Auf diesem Weg konnte sichergestellt werden, dass die Fertigungsabweichungen für die Kopplung nicht zu groß wurden. Das Grundgerüst der Kabine (mit einigen ersten montierten Komponenten) ist in Abbildung 9 dargestellt.



Abbildung 9: Gefertigtes Grundgerüst der Kabine.

- **Montage:**

Die Montage für das Gesamtfahrzeug ist Kapitel 2.1.5 beschrieben.

2.1.2. Anpassung und Skalierung der Schnittstelle (AP-3000)

- **Struktur- und Systemauslegung**

Die bisherige iBOSS-Schnittstelle weist besondere Eigenschaften auf, die sie für den Einsatz im up-BUS-System prädestiniert. Zunächst ist sie ein „4-in-1“-Interface. Dies bedeutet, dass sie neben mechanischen Kräften auch Daten, Strom und Wärme übertragen kann. Sie ist androgyn (es gibt keine männliche und weibliche Seite), sodass jede Schnittstelle mit jeder anderen beliebig koppeln kann. Die Kopplung kann in 90 °-Schritten durchgeführt werden. Das heißt, die Schnittstellen können immer um 90 ° zueinander rotiert werden und anschließend wieder koppeln. Dazu ist sie redundant ausgelegt. Hierbei kann sich eine passive Schnittstelle auch von der aktiven Schnittstelle entkoppeln. In dieser gesamten Kombination ist die iBOSS-Schnittstelle weltweit einmalig. Aus diesem Grund wurde sie für das upBUS-Projekt ausgewählt.

In Abbildung 10 wird das grundlegende Funktionsprinzip der iBOSS-Schnittstelle deutlich. Das Führungselement enthält Führungskurven für die Führungsbolzen, welche in dieser Abbildung bereits im Kopplungselement eingesteckt sind, und ist starr mit der Grundplatte verschraubt. Zudem laufen die bereits erwähnten Bolzen ebenfalls in der Führungskurve in der Innenseite der Außenhülse. Bei Beginn des Kopplungsvorgangs wird die Außenhülse durch den dargestellten Antrieb über die Schnecke und die in der Außenhülse befindliche Verzahnung in Rotation versetzt. Dabei wird der Führungsbolzen in

seiner Ausgangslage im Führungselement gehalten. Folglich dreht sich zu Beginn der Kopplung lediglich die Außenhülle um das Führungs- bzw. Kopplungselement, sodass die Flügel der Außenhülle und die Flügel des Kopplungselements zueinander verdreht werden. Sobald das waagerechte Kurvenstück an der Innenseite der Außenhülle durch den Führungsbolzen zurückgelegt wurde, läuft dieser gegen das anfänglich vertikale Kurvenstück der Außenhülle (innen). Da dieser dort vorerst an einer weiteren horizontalen Bewegung gehindert wird, gleitet der Führungsbolzen nun die Kurve des Führungselementes hinauf. Die Führungskurven sind dabei so konstruiert, dass das Kopplungselement durch die Bewegung der Führungsbolzen unter die Flügel der Außenhülle des Kopplungspartners greift und dort, durch die wieder nach unten abfallende Kurve im Führungselement, eine definierte Vorspannkraft aufbringt, welche beide Schnittstellen über einen Kraftschluss miteinander verbindet. Nach Aufbringen der Vorspannkraft muss am Motor nicht länger eine Spannung anliegen, da die Verzahnung, bestehend aus der Schnecke des Antriebs und dem Zahnkranz der Außenhülle, selbsthemmend wirkt. Folglich bleibt auch nach Abschalten des Motors die Vorspannkraft zwischen den gekoppelten Schnittstellen erhalten. Die Drehbewegung der Außenhülle wird zudem noch für die Umsetzung einer weiteren Funktion genutzt. Auf der Außenseite der Außenhülle befindet sich ein weiteres Kurvenstück, welches das Ausfahren des Pinrings ermöglicht. Dies ist hierbei durch eingesteckte Bolzen im Pinring realisiert. Durch den Hub des Pinrings fahren die bronzefarbenen Kontakte am Pin in Stromabnehmer in der Schnittstelle und ihrem Kopplungspartner ein und schließen somit den Stromkreis. Das Führungselement besitzt eine Bohrung durch seine Mitte, um eine optische Datenübertragung zwischen den beiden gekoppelten Schnittstellen zu ermöglichen

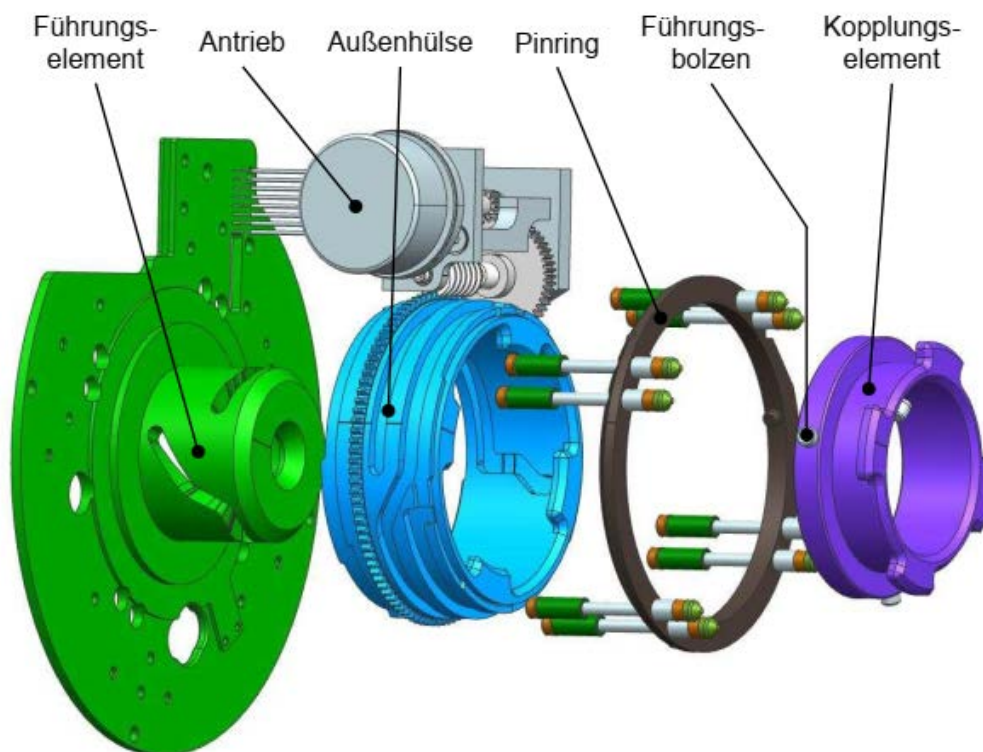


Abbildung 10: Mechanisches Funktionsprinzip der iBOSS-Schnittstelle.

Um dem Anforderungsprofil von upBUS gerecht zu werden, kann jedoch auf einige Funktionen verzichtet werden. Folgende Änderungen wurden für upBUS vorgenommen: Für upBUS ist eine androgyne Schnittstelle nicht nötig. Aus diesem Grund wurde die Androgynität abgeschafft. Dies ermöglicht zusätzlich, dass der Kopplungspartner keine zweite Schnittstelle sein muss, sondern ein einfaches passives Gegenstück. Aus diesem Grund wurde auch die Redundanz entfernt, da diese beim passiven Gegenstück nicht notwendig ist. Beim Ausfall des Systems kann die Schnittstelle per Hand entkoppelt werden. Weiterhin wird eine 90°-Symmetrie nicht mehr benötigt. Diese wurde auf 180° reduziert. Die 180°-Symmetrie ermöglicht immer noch ein Koppeln in beide Fahrrichtungen des Fahrzeugs. Eine gleiche Ausrichtung von Kabine und Fahrmodul ist daher nicht nötig. Die Wärmeübertragung wird auf der Erde nicht benötigt und wird ebenfalls weggelassen. Eine redundante Datenübertragung, wie sie bei der iBOSS-Schnittstelle vorgesehen ist, wird ebenfalls nicht benötigt. Bei der upBUS-Schnittstelle wird lediglich eine CAN-Verbindung verwendet und somit das Optical-Can-Interface der iBOSS-Schnittstelle übernommen. Die grundsätzliche Mechanik der Schnittstelle ist gleichgeblieben. Einige Toleranzen wurden aber erhöht, damit die Kopplungstoleranz größer ist. Eine Explosionsdarstellung der angepassten Schnittstelle ist in Abbildung 11 dargestellt. Trotz der Vereinfachung ist es aber immer noch wesentlich einfacher und zeitlich gesehen schneller, die gut funktionierende iBOSS-Schnittstelle zu vereinfachen, als von Grund auf eine neue Schnittstelle zu entwickeln, weswegen dieser Weg gewählt wurde.

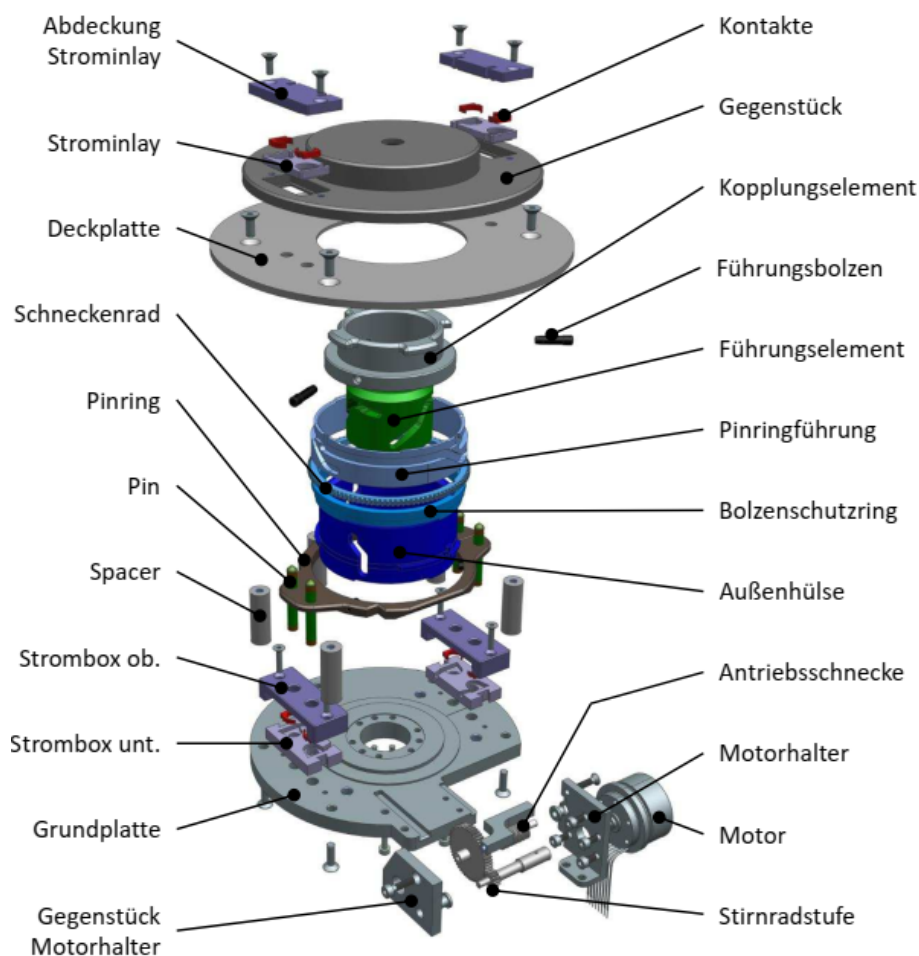


Abbildung 11: Explosionsdarstellung der ersten Anpassungskonstruktion.

Im Folgenden werden die wichtigsten Änderungen im Einzelnen dargestellt und mit der ursprünglichen Ausführung der iBOSS-Schnittstelle verglichen. Durch den Wegfall der Androgynität kann das Gegenstück der Schnittstelle unbeweglich und als einzelnes Bauteil ausgeführt werden. Dadurch muss die eigentliche Schnittstelle nicht mehr die Aufnahme eines anderen Kopplungselements ermöglichen, wodurch die Flügel in der Außenhülse (siehe Abbildung 12) nicht benötigt werden. Außerdem entfällt die Spiegelsymmetrie.

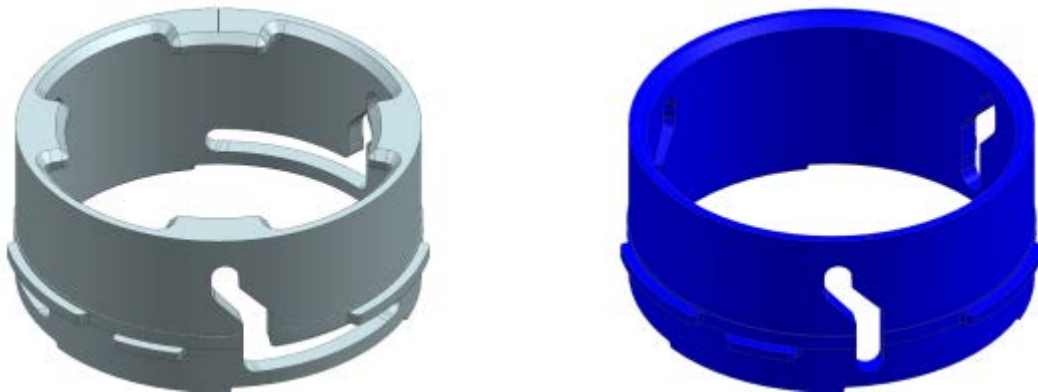


Abbildung 12: Außenhülse der iBOSS-Schnittstelle (links) und von upBUS.

Weiterhin kann die Kurve des Führungsbolzens in der Außenhülse modifiziert werden. Dieses waagerechte Kurvenstück dient in der Außenhülse des iBOSS-Projekts zur angularen Verschiebung zwischen den Flügeln der Außenhülse und den Flügeln des Kopplungselements, bevor der eigentliche Koppelvorgang beginnt sowie für die Möglichkeit des redundanten Entkoppelns. Beides findet bei der upBUS-Schnittstelle keine Anwendung. Dieses zusätzliche Kurvenstück lässt sich ebenfalls in der Führung des Pinrings wiederfinden und wird, wie in Abbildung 13 zu erkennen ist, auch gekürzt.



Abbildung 13: Hülse Pinring der iBOSS-Schnittstelle (links) und von upBUS.

Weil die Schnittstelle des iBOSS-Projekts jeweils um 90° verdreht um die z-Achse koppelbar ist, sind vier Steckplätze für elektrische Kontakte vorgesehen (siehe Abbildung 14). Da die Schnittstellen im upBUS-Projekt eine fest definierte Position und Ausrichtung besitzen und lediglich eine Rotation um 180° möglich ist, reichen zur Stromübertragung zwei Kontaktstellen. Daraus ergeben sich Anpassungen am Pinring, an der Grundplatte, der Stromversorgung, dem Auflagerring und den Pins. Bei der modifizierten Schnittstelle herrscht im Gegensatz zu der iBOSS-Schnittstelle geringerer Platzmangel. Daher können die Bohrungen für die Pins auf einem größeren Radius positioniert werden, was eine Anpassungskonstruktion des Pins erlaubt. Damit auch im eingefahrenen Zustand die Schnecke und das Antriebsrad nicht behindert werden, sind entsprechende Aussparungen am Pinring vorgesehen.

Wie in Abbildung 14 zu erkennen, werden die Flügel des Pinrings in reduzierter Dicke ausgeführt. Der Grund dafür ist der ansonsten unzureichende Platz zwischen Flügel und Strombox im eingefahrenen Zustand der Schnittstelle.



Abbildung 14: Pinring der iBOSS-Schnittstelle (links) und von upBUS.

Die Stromversorgung wird auf die Oberseite der Grundplatte verlegt, um eine ebene Unterseite und somit eine einfachere Montage der Schnittstelle zu ermöglichen. Als Folge dessen muss die Gesamtlänge der zur Stromübertragung genutzten Pins gekürzt werden, da der Abstand zwischen unteren und oberen Kontakten schrumpft (Abbildung 15). Durch den größeren Bauraum kann der untere Teil der Außenhülse bis zum Pinring verlängert werden. Da der Kontakt von unten verschraubt und somit der Pin mit dem Pinring verklemmt wird, ist die bisher zur Befestigung genutzte Klebung nicht länger notwendig. Weiterhin erhält die Hülse oben eine starke Fase, welche der Zentrierung des Pins am Pinring dient. Da in der Vergangenheit aufgrund der Fasen (siehe Abbildung 15) am Übergang zwischen Hülse und unterem Schraubkontakt Probleme beim Ausfahren der Pins aufgetreten sind, werden diese entfernt. Weiterhin wird die Kappe des Pins gekürzt, da diese im eingefahrenen Zustand leicht aus der Deckplatte ragt, was beim Koppeln der Schnittstelle möglicherweise zu Problemen führen könnte.



Abbildung 15: Pin der iBOSS-Schnittstelle (oben) und von upBUS.

Für die Befestigung der oberen Auflagefläche und die Übertragung der dort auftretenden Druckkräfte auf die Grundplatte und folglich auf das Fahrgestell müssen Abstandshalter zwischen der Deckplatte und der Grundplatte vorgesehen werden. Im Gegensatz zu den bei iBOSS zum Einsatz kommenden Profilen (Abbildung 16), welche dort gleichzeitig als Halterung für Dioden dienen, werden aus Kostengründen fünf einfache zylindrische Stahlstücke verwendet. Diese haben einen Durchmesser von 10 mm und werden radial verteilt mittels M4-Senkkopfschrauben in Grund- und Deckplatte befestigt. Ebenfalls wird die Motorhalterung bis zur Deckplatte verlängert und kann folglich an der Druckkraftübertragung teilnehmen (siehe Abbildung 16).



Abbildung 16: Spacer der iBOSS-Schnittstelle (links) und von upBUS.

Dadurch, dass beim iBOSS-Projekt eine der Hauptanforderungen darin besteht, dass jeweils zwei identische Schnittstellen in 90°-Winkelabständen gekoppelt werden können, ist neben vielen anderen Eigenschaften die Stromversorgung schwierig umzusetzen (vgl. Abbildung 17). Dies hat zusätzlich zu dem sehr beschränkt zur Verfügung stehenden Bauraum zur Folge, dass die dazu benötigten Bauelemente komplex ausfallen. Ein entscheidender Faktor für die Schnittstelle im upBUS-Projekt ist, dass diese Bedingung nicht erfüllt werden muss. Die Kopplung der Schnittstelle findet hier stets mit einem festen, dafür angepassten Gegenstück statt. Dadurch muss diese nur die Pins und deren Stromversorgung beinhalten und nicht zusätzlich einen entsprechenden Gegenkontakt, welcher im Gegenstück zu finden ist. Hierdurch und aufgrund anderer Änderungen steht deutlich mehr Bauraum zur Verfügung, so dass die Stromversorgung deutlich einfacher gestaltet werden kann (siehe Abbildung 17). Es werden wie oben bereits erläutert lediglich zwei Kontaktstellen verwendet, wodurch sich eine gegenüberliegende Anordnung anbietet. Außerdem wird die Stromversorgung auf die Oberseite der Grundplatte verlegt, um keine Bauteile an deren Unterseite anbringen zu müssen. Dies hat zur Folge, dass diese eben ist, wodurch die Montage der Schnittstelle erleichtert wird. Allerdings müssen als Folge der Montage auf der Oberseite die Flügel des Pinrings in der Dicke reduziert werden. Gefertigt werden die sogenannten Stromboxen aus jeweils zwei Kunststoffteilen, welche die Kontakte beinhalten und gleichzeitig als Führung der Pins beim Aus- beziehungsweise Einfahren dienen. Diese Kunststoffteile sind zudem mit unterschiedlich großen Schwalbenschwanzverbindungen aneinander ausgerichtet, wodurch Ausrichtungsfehler bei der Montage vermieden werden. Die Ausgänge der Kabel befinden sich lediglich auf einer Seite der Strombox, da diese aufgrund ihrer geraden und nicht gebogenen Form auch in der anderen Ausrichtung montiert werden kann. Die Strombox wird zur besseren Zentrierung mit M3-Senkkopfschrauben an der Grundplatte befestigt.



Abbildung 17: Strombox der iBOSS-Schnittstelle (links) und von upBUS.

Als Kopplungspartner zum Schließen des Stromkreises kommt auf der Gegenseite ebenfalls eine Konstruktion aus zwei Kunststoffteilen zum Einsatz. Im Gegensatz zu den Stromboxen auf der Grundplatte werden diese hier allerdings zum Teil als Inlay in das Gegenstück integriert (vgl. Abbildung 18). Der untere Teil, in dem sich auch die Kontakte befinden, wird in eine Tasche im äußeren Ring des Gegenstücks eingelassen, während der obere Teil als Deckel verschraubt wird und durch eine Ausformung an der Unterseite den unteren Teil fixiert.

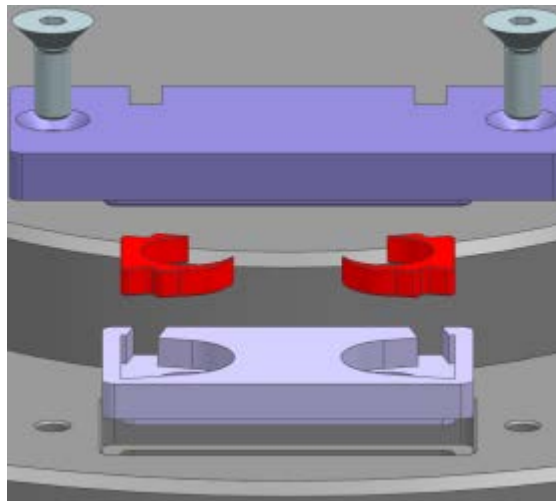


Abbildung 18: Strominlay im passiven Kopplungselement der upBUS-Schnittstelle.

Sehr großes Vereinfachungspotential ergibt sich aufgrund der wegfallenden Androgynität der Schnittstellen auch bei der Deckplatte. Diese wird im Gegensatz zu der hochkomplexen Konstruktion der iBOSS-Schnittstelle als einfaches Drehteil gestaltet (siehe Abbildung 19).



Abbildung 19: Auflagerring der iBOSS-Schnittstelle (links) und von upBUS.

Aus demselben Grund lässt sich ebenfalls die Grundplatte vereinfachen. Es entfällt hier das komplizierte Bohrmuster, welches durch weniger und einfacher platzierte Bohrungen ersetzt wird (vergleiche

Abbildung 20). Ebenfalls können verschiedene Ausfräsungen weggelassen werden. Die Dicke der Grundplatte wird erhöht, um die Schnittstelle mit dem Sattel der Befestigung unter Berücksichtigung der minimalen Einschraubtiefe verschrauben zu können. Aus diesem Grund kann die Montage des Antriebs erheblich erleichtert werden. Dazu wurde aus der Ausfräsung im iBOSS-Projekt eine durchgehende Tasche, die es ermöglicht, den Antrieb im montierten Zustand seitlich in die Schnittstelle einzuschieben. Weil die Grundplatte auf dem Sattel der Befestigung aufliegt, muss die Verschraubung des Führungselements mit der Grundplatte durch Senkkopfschrauben ersetzt werden. Dies hat zur Folge, dass der Durchmesser der inneren Bohrung reduziert wird, um den erforderlichen Platz für die größeren Schraubenköpfe der Senkkopfschrauben zu schaffen.



Abbildung 20: Grundplatte der iBOSS-Schnittstelle (links) und von upBUS.

Da die Kopplung beim Prototyp stets in einer Richtung erfolgt, kann jeweils eine Schnittstelle mit einer passiven Seite verbunden werden (vergleiche Abbildung 21). Bei der Kopplung zwischen Fahrkabine und Fahrmodul beziehungsweise zwischen Seilbahnaufhängung und Kabine müssen höhere Lagegenauigkeiten der Module zueinander toleriert werden, als dies bei der Anwendung im Weltraum der Fall ist. Aus diesem Grund werden die Radien der Flügel im Gegenstück größer ausgeführt als bei der Konstruktion der Außenhülle, welche im iBOSS-Projekt als passiver Kopplungspart eingesetzt wird.

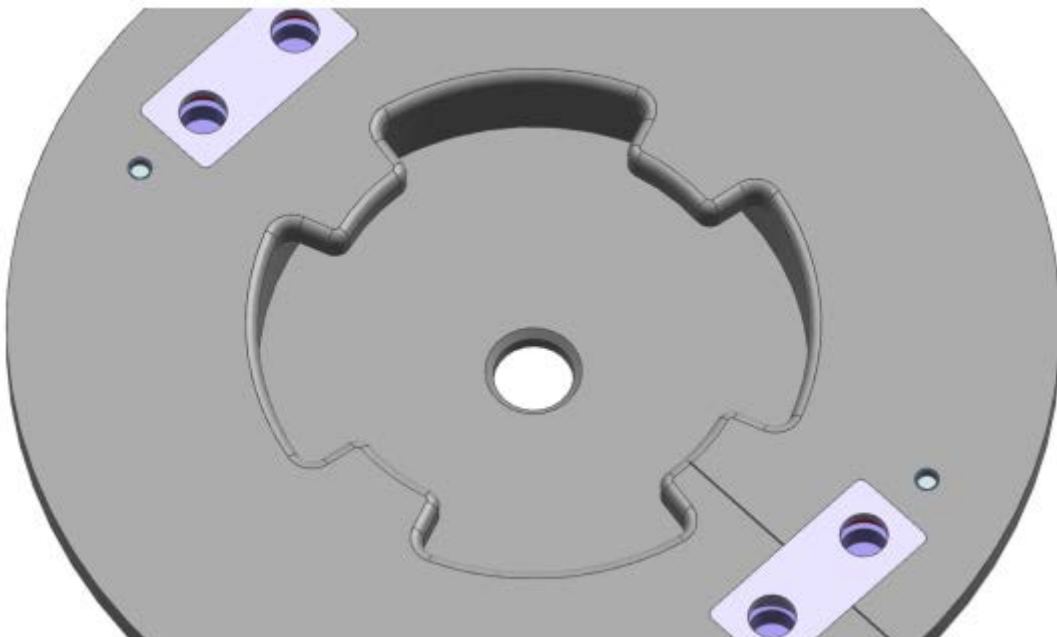


Abbildung 21: Passive Seite der upBUS-Schnittstelle.

Auslegung der unteren Schnittstellen

Die iBOSS-Schnittstelle wurde für Anwendungen im Erdorbit ausgelegt. In der dort vorherrschenden Mikrogravitation treten praktisch keine Lasten auf. Für die Anwendung bei upBUS müssen die unteren Schnittstellen die Gewichtskraft der Kabine als Druckkraft tragen sowie eine genügend große Vorspannkraft aufbringen. Die oberen Schnittstellen müssen das Gewicht der Kabine im Seilbahnmodus tragen, was als eine Zugkraft auf die Schnittstelle wirkt. Dazu treten auch hier die Vorspannkraften auf. In Abbildung 22 ist der Kraftverlauf im Querschnitt der Schnittstelle dargestellt. Da die bereits wirkende Gewichtskraft einen Teil der benötigten Klemmkraft bereitstellt, wird die Außenkonstruktion der Schnittstelle mit einer erhöhten Druckkraft belastet, wohingegen das Innenleben der Schnittstelle eine Belastung durch eine Zugkraft erfährt. Die erforderliche Klemmkraft zur Aufnahme von Beschleunigungs- und Bremskräften der Schnittstelle errechnet sich folglich bei angenommener gleichmäßiger Kraftaufteilung auf die vier Schnittstellen zu:

$$F_{kerf} = \frac{1}{z_{Schnittstellen}} \cdot a_{Brems} \cdot m_{Kabine} \cdot \frac{1}{\mu_{Deckplatten}} = 6131,25 \text{ N}$$

- $m_{Kabine} = 1000 \text{ kg}$ (Annahme) (2.1)
- $a_{Brems} = 0,5 \cdot g$:Bremsbeschleunigung (Annahme)
- $\mu_{Deckplatten} = 0,2$ (Reibungskoeffizient Stahl/Stahl)
- $z_{Schnittstellen}$: Anzahl der Schnittstellen in einer Ebene (hier 4)

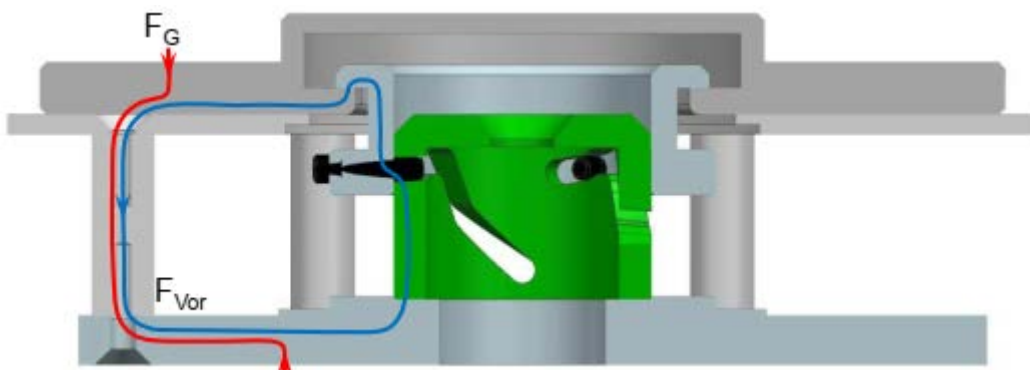


Abbildung 22:Kraftleitung in der unteren Schnittstelle (Schnittansicht).

Folgender Anteil wird dabei von der Gewichtskraft abgedeckt:

$$F_{vor} = F_{Kerf} - F_G = 3678,75 \text{ N} \quad (2.2)$$

Um die Festigkeit der unteren Schnittstellen zu analysieren, müssen zwei Komponentenverbunde betrachtet werden:

- Es muss überprüft werden, ob die Innenkonstruktion (Führungselement, Bolzen, Kopplungselement, Gegenstück) der Vorspannkraft ausgesetzt werden kann.
- Es gilt zu überprüfen, ob die Außenkonstruktion (Spacer, Deckplatte, Grundplatte) der Gewichtskraft der Kabine und der aufzubringenden Vorspannkraft (ergeben zusammen die erforderliche Klemmkraft) standhält.

- **Überprüfen der Innenkonstruktion der unteren Schnittstellen:**

Aus der Anschauung der Schnittstelle und vorhergegangenen Analysen bei der Auslegung im iBOSS-Projekt, befindet sich die kritische Stelle an der Verbindung des Kopplungselements mit dem Führungselement durch die Führungsbolzen. Diese Verbindung lässt sich vereinfacht und konservativ abgeschätzt als eine einschnittige Nietverbindung annähern. Die sich aus der Vorspannkraft ergebenden Spannungen lassen sich dadurch sehr einfach, wie folgt, abschätzen. Hierbei muss die Führung im Führungselement auf zu hohe Lochleibung und der Bolzen auf mögliches Abscheren geprüft werden.

$$\tau_{\text{Bolzen}} = \frac{4 \cdot F_{\text{vor}}}{z \cdot n \cdot \pi \cdot d^2} = 97,58 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (2.3)$$

$$p_{\text{Lochleibung}} = \frac{F_{\text{vor}}}{z \cdot d \cdot s} = 30,67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (2.4)$$

Für eine Visualisierung und Bestätigung dieser überschlägigen Berechnung wird eine Festigkeitsanalyse mittels FEM durchgeführt. Die auftretenden Kontaktstellen werden hierbei durch die Funktion „Flächen auf Fläche kleben“ miteinander vernetzt, da nicht davon ausgegangen wird, dass sich die Bauteile relativ zueinander verschieben. Die betrachteten Bauteile werden durch ein Tetraedernetz mit einer Elementkantenlänge von 2 mm abgebildet. Die auftretende Kraft wurde als gleichmäßig am äußeren Ring des Gegenstücks wirkend angenommen und das Führungselement mit einer festen Zwangsbedingung versehen. Die ausgegebenen Spannungen sind unwesentlich geringer als die zuvor analytisch ermittelten. Für eine bessere Darstellung wurde in Abbildung 23 die Legende angepasst. Die höchste Vergleichsspannung tritt, wie oben bereits erwähnt, am Bolzen auf. Da die maximal auftretende Spannung lediglich 81,8 MPa beträgt, eignet sich ein herkömmlicher unlegierter Baustahl für die Innenkonstruktion der unteren Schnittstellen. Hierbei ist anzumerken, dass die untenstehende Abbildung 23 die gemittelten Elementspannungen anzeigt. Die maximalen Spannungen an den Knoten sind merklich höher, was aus realitätsferner Krafteinleitung und möglicherweise ungünstiger Position der automatisch generierten Elemente folgt. Betrachtet werden daher die gemittelten Elementspannungen. Allerdings bleiben die maximalen Knotenspannungen ebenfalls weit unter der Streckgrenze unlegierter Baustähle. Die durch die Simulation ermittelte, maximale Spannung liegt in etwa 16 % unterhalb der analytisch errechneten, wodurch sich beide Ergebnisse gegenseitig bestätigen

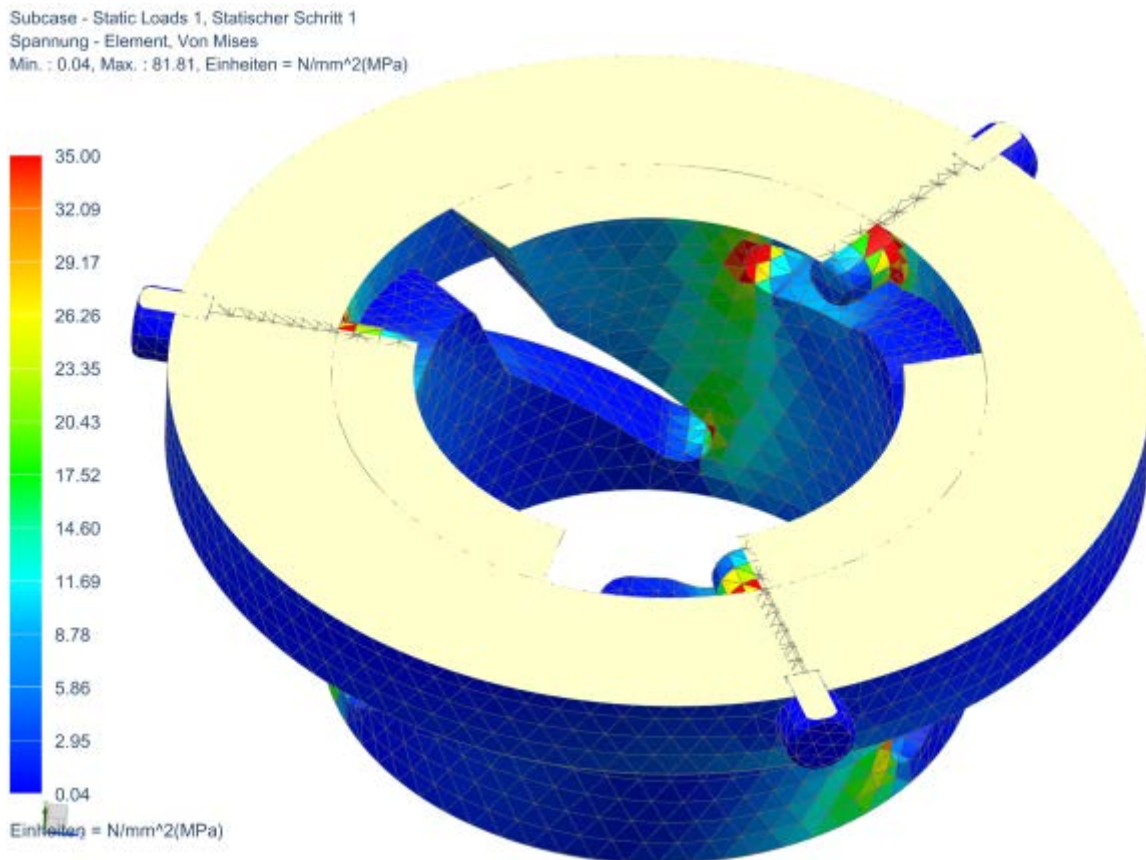


Abbildung 23: Ergebnis einer FEM-Simulation der Innenkonstruktion der unteren Schnittstelle.

- **Überprüfen der Außenkonstruktion der unteren Schnittstelle:**

Die Außenkonstruktion der unteren Schnittstellen muss einerseits die Gewichtskraft der Kabine und andererseits die bereits erläuterte Vorspannkraft zum Verspannen der Deckplatte mit dem Gegenstück ertragen. Die einzelnen Bauteile werden durch ein Tetraedernetz mit einer Elementkantenlänge von 3 mm abgebildet. Die eingesetzten Schraubverbindungen werden durch eine gängige FEM-Modellierung ersetzt. Dabei wird eine Verbindung aus RBE-3-Elementen und Beam-Elementen mit dem Spannungsquerschnitt der verwendeten M4-Schrauben erzeugt. Die Modellierung kann zu lokalen Spannungsspitzen führen, ermittelt allerdings zuverlässige Ergebnisse. Die Beam-Elemente ermöglichen eine Auswertung von Kräften auf den Schraubkörper. Die maximale Vergleichsspannung liegt dabei bei 50,86 MPa (vergleiche Abbildung 24) in den Schraubverbindungen und ist als unkritisch zu betrachten. In der Simulation wird der Einfluss des Motorhalters nicht betrachtet. Der Motorhalter ist nicht durch eine Schraubverbindung mit der Deckplatte verbunden. Aufgrund fertigungs- und montagebedingter Ungenauigkeiten kann bei einer konservativen Auslegung nicht davon ausgegangen werden, dass dieser zu jedem Zeitpunkt an der Deckplatte anliegt und somit an der Druckkraftübertragung auf die Grundplatte teilnimmt. Dementsprechend wird dieser in der Simulation nicht näher betrachtet. Die Anwesenheit des Motorhalters stellt allerdings in keinem Fall eine Reduzierung der Festigkeit der Außenkonstruktion dar, sondern besitzt eine stützende Wirkung.

Subcase - Static Loads 1, Statischer Schritt 1
Spannung - Element, Von Mises
Min. : 0.01, Max. : 50.86, Einheiten = N/mm²(MPa)

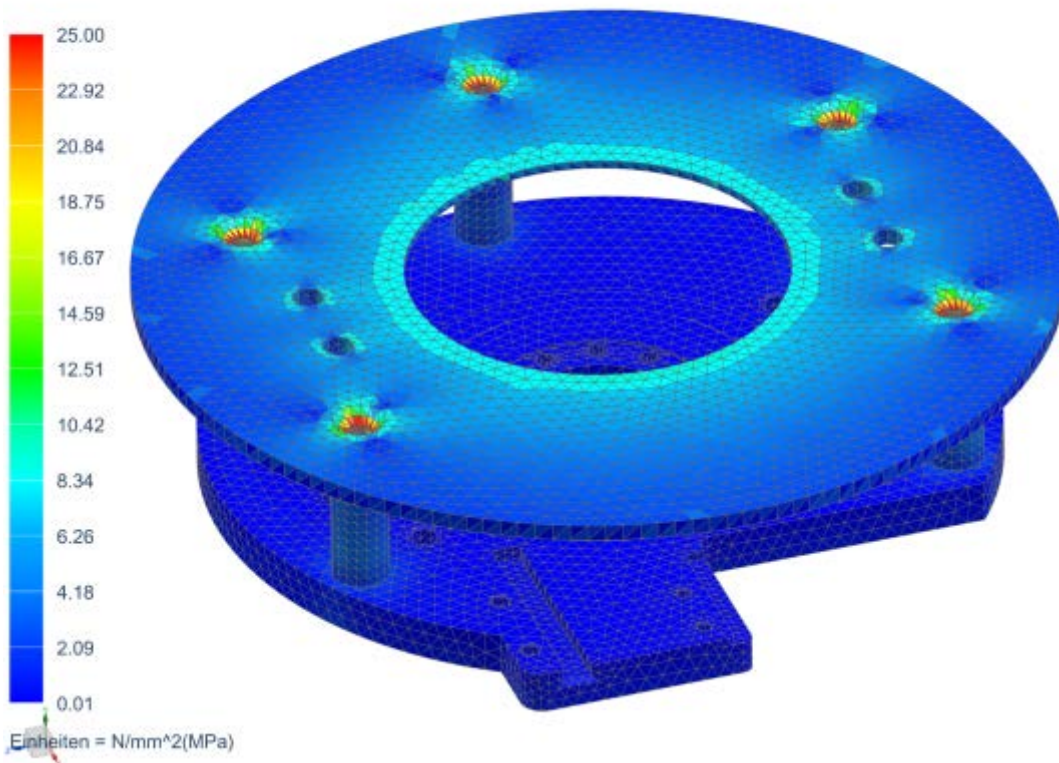


Abbildung 24: Ergebnis einer FEM-Simulation der Außenkonstruktion der unteren Schnittstelle.

Auslegung der oberen Schnittstellen:

Der kritischere Belastungszustand liegt in den oberen Schnittstellen vor, die für die Kopplung zwischen Kabine und Seilbahnaufhängung zuständig sind. Wie in Abbildung 25 zu sehen ist, verlaufen die Kraftflüsse der Gewichtskraft und der Vorspannkraft in gleicher Richtung (Zugkraft) durch die Innenkonstruktion der Schnittstelle. Die Außenkonstruktion der Schnittstelle wird lediglich durch die Vorspannkraft belastet. Da zuvor bei der Simulation der Außenkonstruktion der unteren Schnittstellen die Festigkeit erwiesen wurde, wird hier auf eine Betrachtung der Außenkonstruktion verzichtet, da dort die Last auf die oberen Schnittstellen geringer ist.

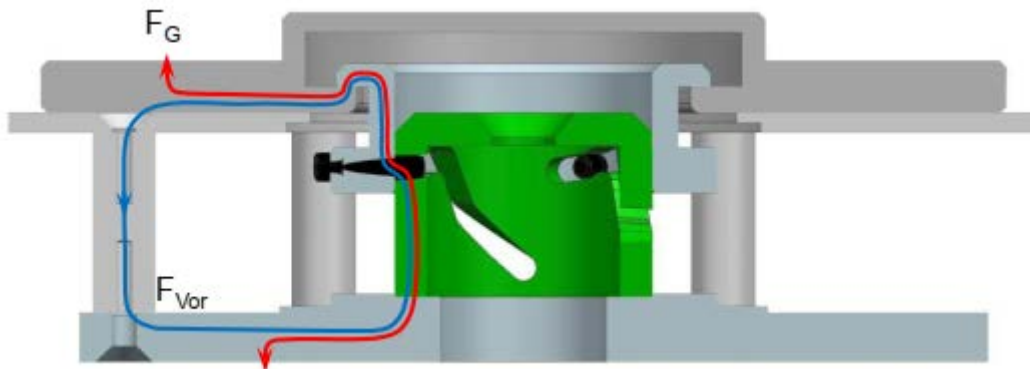


Abbildung 25: Kraftleitung in der oberen Schnittstelle (Schnittansicht).

Aus vorherigen Übersichtsrechnungen im iBOSS-Projekt hat sich ergeben, dass die Schnittstelle bis zu einer Zugkraft von 6 kN sicher ausgelegt ist. Um diese Annahme zu überprüfen, werden sowohl eine analytische Rechnung als auch eine Simulation der Festigkeit durchgeführt. Dafür wird das bereits zuvor beschriebene Simulationsmodell mit einer Zugkraft von 6 kN beaufschlagt. Für die Berechnung werden die gleichen Formeln wie bei der Berechnung der unteren Schnittstellen genutzt. In den Bolzen und der Kurve des Führungselements ergeben sich folgende, analytisch bestimmte Spannungen:

$$\tau_{\text{Bolzen}} = \frac{4 \cdot F_{\text{vor}}}{z \cdot n \cdot \pi \cdot d^2} = 159,16 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (2.5)$$

$$p_{\text{Lochleibung}} = \frac{F_{\text{vor}}}{z \cdot d \cdot s} = 100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (2.6)$$

Abbildung 26 zeigt die Ergebnisse der Festigkeitssimulation. Deutlich zu erkennen sind hier die Belastungsspitzen in den Kerben der Führungskurve und an den Bolzen, welche sich als kritischstes Bauteil erweisen. Weiterhin zeigt die maximal berechnete Spannung von 159,23 MPa, dass die Übersichtsrechnung und die Simulation erstaunlich ähnliche Werte liefern und sich somit in ihren Aussagen bestätigen.

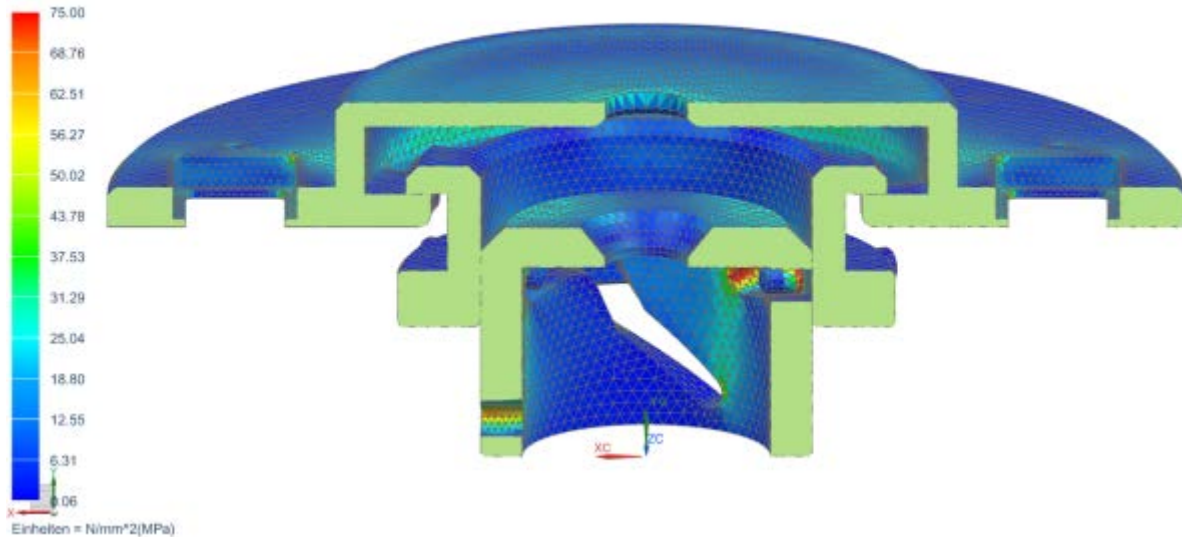
Subcase - Static Loads 1, Statischer Schritt 1
 Spannung - Element, Von Mises
 Min. : 0.06, Max. : 159.23, Einheiten = N/mm²(MPa)


Abbildung 26: Ergebnis der FEM-Simulation der Innenkonstruktion der oberen Schnittstelle.

Unter der Annahme, dass für die insgesamt auf die Innenkonstruktion wirkende Kraft folgende Formel gilt:

$$F_{ges} = m_{Kabine} \cdot g + \frac{1}{\mu_{Deckplatten}} \cdot Q_{res} \quad (2.7)$$

Folgt für die maximal übertragbare Querkraft:

$$Q_{res} = \mu_{Deckplatten} \cdot (F_{ges} - m_{Kabine} \cdot g) \quad (2.8)$$

Diese Querkraft beschreibt hauptsächlich die Lasten, die im Seilbahnbetrieb aufgrund von Wind an der Kabine angreifen. Um verschiedene Anströmrichtungen des Windes zu berücksichtigen, wird angenommen, dass dieser aus zwei Hauptrichtungen angreift, wobei die Kraft an der kleineren Kabinenfläche der Hälfte der Kraft an der Hauptfläche entspricht. Mit dem Satz von Pythagoras ergibt sich somit eine maximale Querkraft von:

$$Q = \sqrt{Q_{Wind}^2 + \left(\frac{Q_{Wind}}{2}\right)^2} \quad (2.9)$$

$$Q_{Wind} = \sqrt{\frac{4}{5}} \cdot Q = 2538,4 \text{ N} \quad (2.10)$$

Mit der Seitenfläche der Kabine von ungefähr 9 m^2 errechnet sich eine maximal übertragbare Windlast von 282 N/m^2 , woraus folgt, dass ein sicherer Betrieb bis zu einer Windstärke von 8 Beaufort möglich ist. Bei diesen Windstärken ist ein Testbetrieb von vornherein ausgeschlossen, sodass die Auslegung des Prototyps für eine höhere Windlast somit nicht erforderlich ist.

Auf Basis dieser Auslegung wurden noch einige Verfeinerungsarbeiten an der upBUS-Schnittstelle vorgenommen. Der bisher verwendete raumfahrtgeeignete Motor wurde durch einen deutlich günstigeren konventionellen Motor ersetzt, wobei das Drehmoment gleichzeitig erhöht wurde. Nun wurde ein EC 60fl. der maxon motor GmbH mit 100 W Leistung verbaut. Aufgrund des größeren Durchmessers des Motors musste auch die Antriebseinheit angepasst werden. Die größte Erweiterung wurde an der Stromübertragung vorgenommen. Anstatt der in Kunststoffboxen verbauten Anschlüsse wurden an der Unterseite des Auflagerrings und an der Oberseite des passiven Gegenstücks Platinen installiert, in denen die Feder für die Übertragung eingelegt wird. Dadurch können auch die Pins einfacher aufgebaut werden. Die Flügel des Kopplungselements wurden zur Kostenreduktion von vier auf drei reduziert. Schließlich wurde das optische CAN-Interface ebenfalls auf einer Platine verbaut, die auf der Unterseite des Auflagerrings und der Oberseite des passiven Gegenstücks montiert wird. Eine Übersicht der finalen Schnittstelle sind in den Abbildungen 27 bis 30 dargestellt.

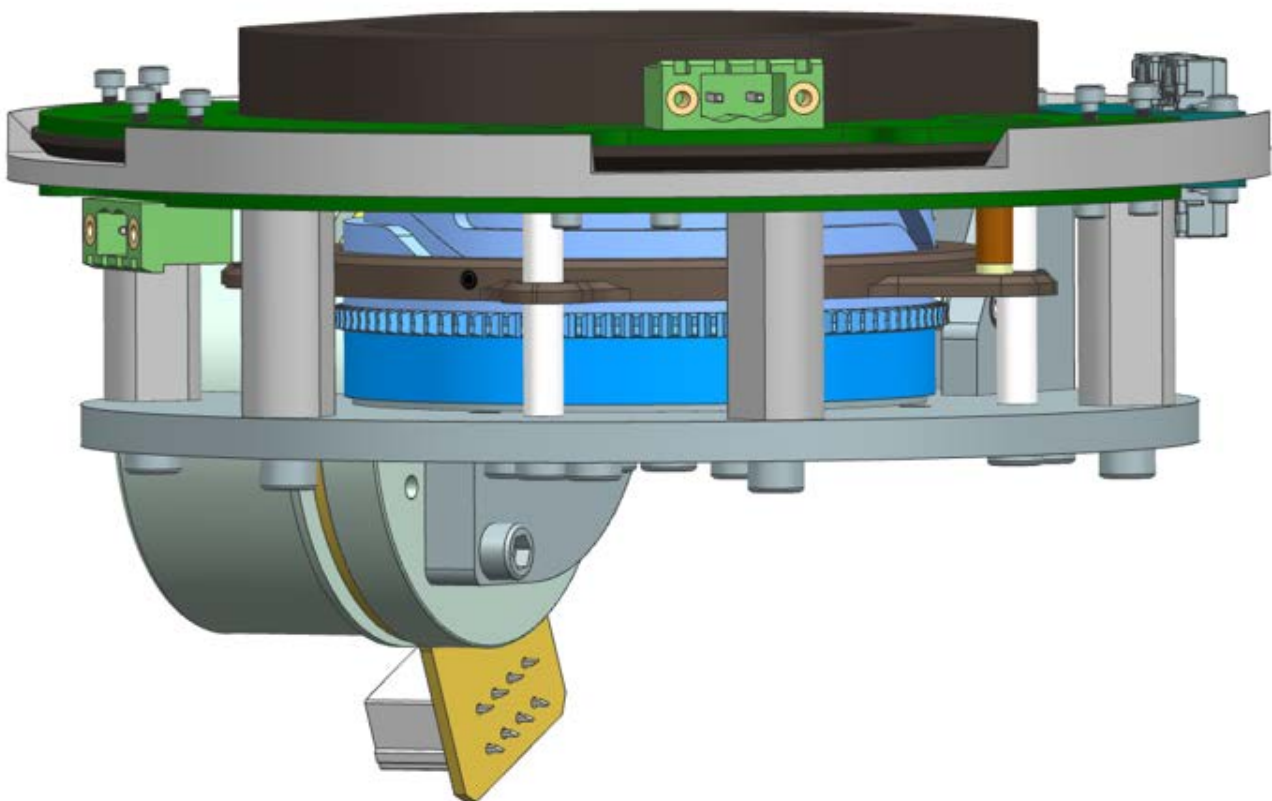


Abbildung 27: Seitenansicht der finalen Schnittstelle. Zu erkennen sind die Platinen (in dunkelgrün) sowie das CAN-Interface (ganz rechts sind graue Steckerbuchsen zu sehen).

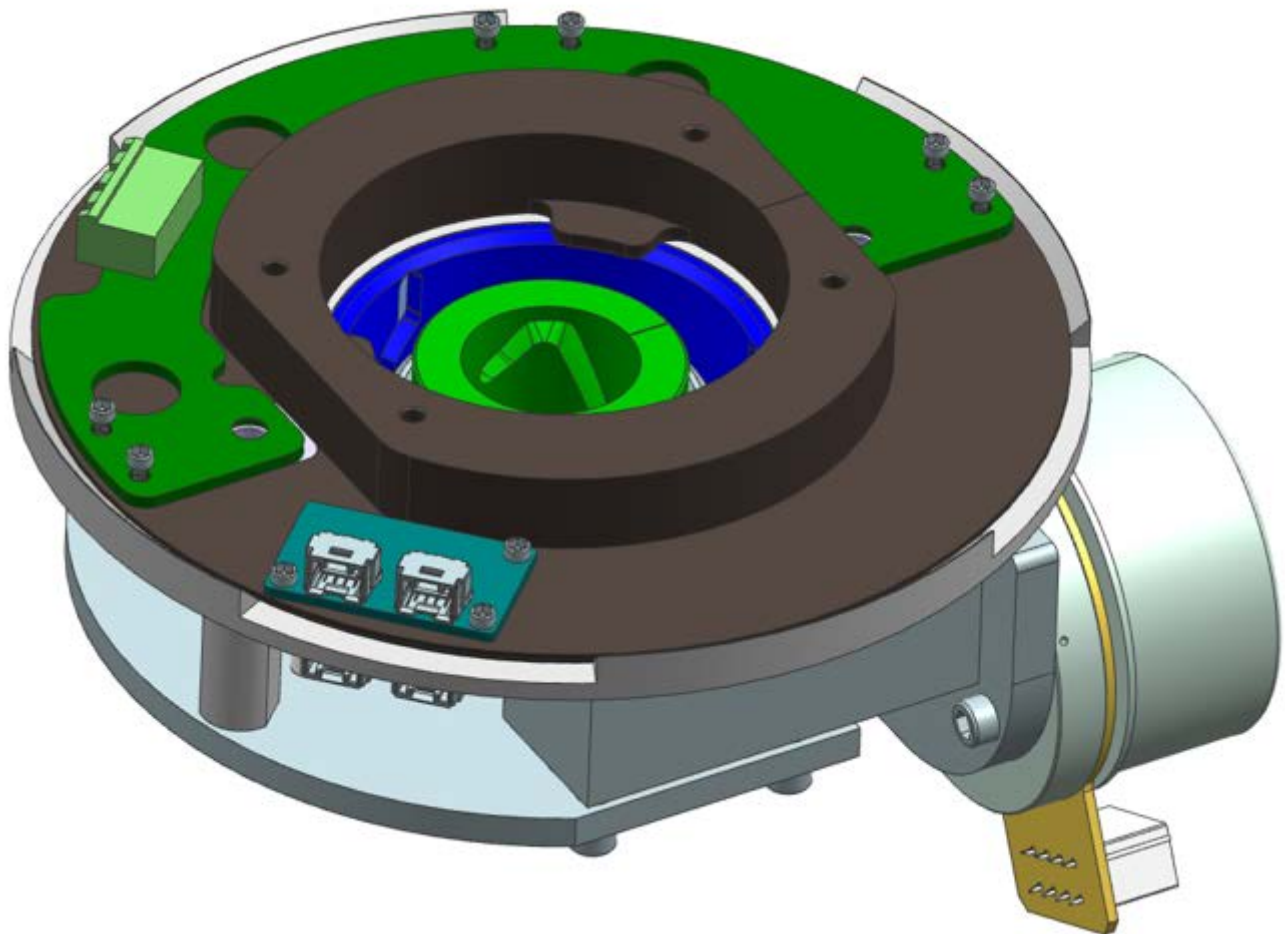


Abbildung 28: Draufsicht auf die gekoppelte finale Schnittstelle. Das passive Gegenstück (in braun) wurde für die Aufnahme der Platine leicht angepasst. Nicht abgebildet wurde eine Kunststoffabdeckung der Elektronik.

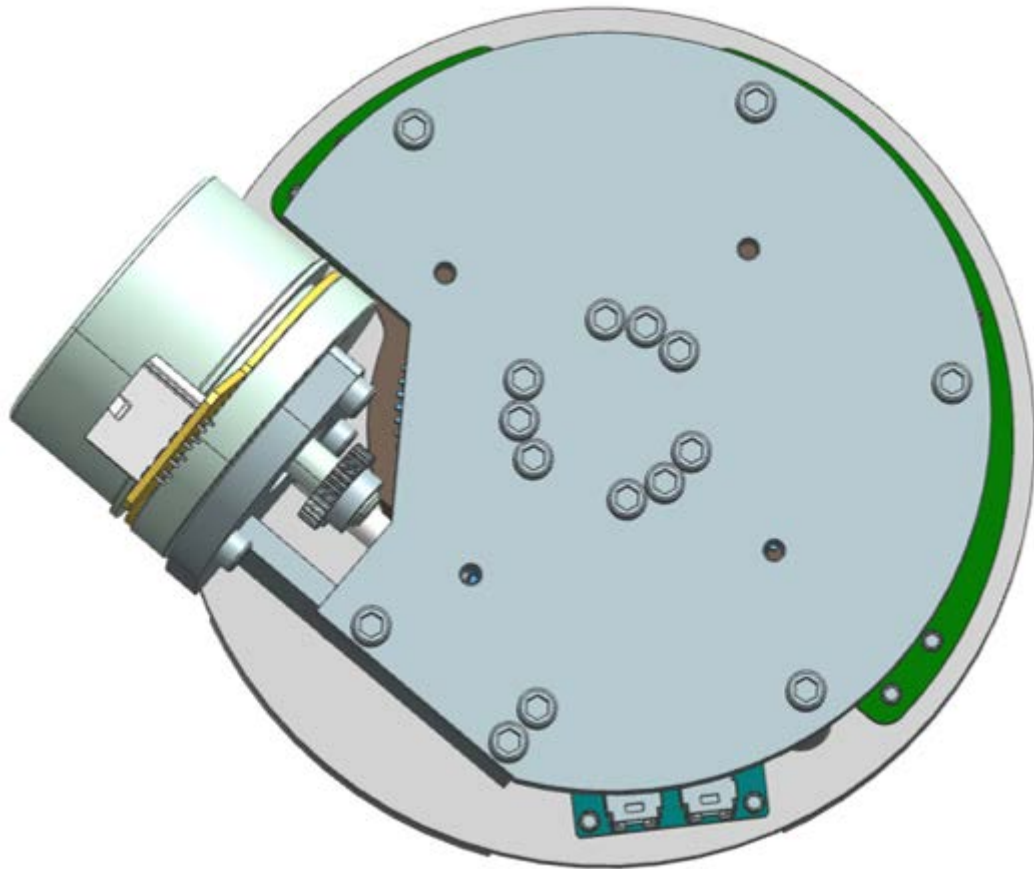


Abbildung 29: Sicht von unten auf die finale Schnittstelle. Gut zu erkennen ist die neue Motoreinheit, die deutlich größer ausfällt.

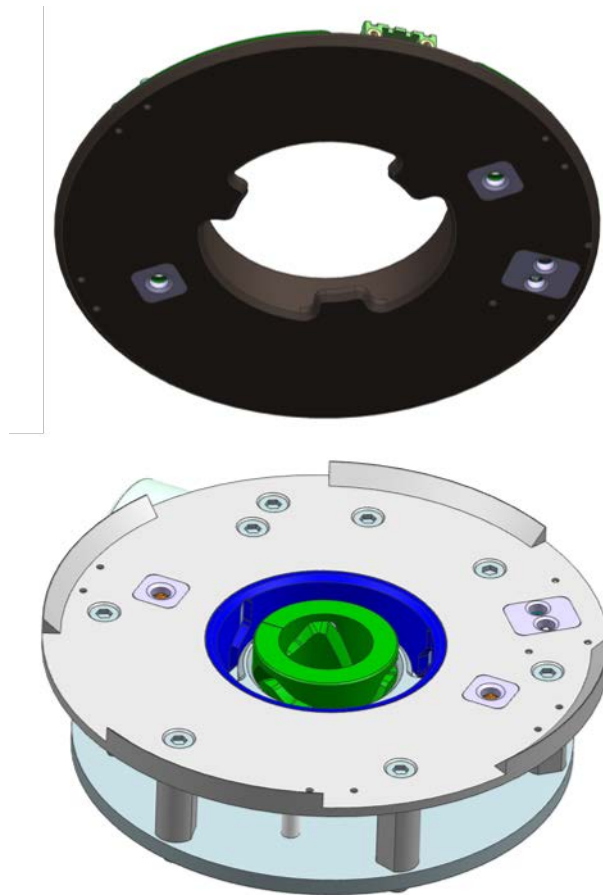


Abbildung 30: Die finale Version in der entkoppelten Version. Am Rand des Auflagerrings sind gut die Führungselemente zu sehen, um die Zentrierung zu vereinfachen.

- **Fertigung und Montage:**

Die Fertigung der Schnittstellen wurden von der iBOSS GmbH durchgeführt. Für die Montage wurde zudem eine schwimmende Lagerung aufgebaut. Diese ist recht simpel umgesetzt. Für die x- und y-Achse des Fahrzeugs existieren jeweils Bolzen. So kann ein Schwimmen in der Ebene des Fahrzeugs ermöglicht werden. Dazu sind die U-Profile so konstruiert, dass sie sich jeweils um 1° um die Bolzenachse kippen können. Auf diesem Weg wird ein Winkelversatz an den Schnittstellen ausgeglichen. Über ein verbautes Hartgummi sind die Schnittstellen in z-Richtung gedämpft. Eine eingebaute Schnittstelle ist in Abbildung 31 dargestellt.



Abbildung 31: Montierte und eingebaute Schnittstelle.

2.1.3. Auslegung des Fahrmoduls (AP-4000)

Das Fahrmodul besteht aus den beiden Hauptkomponenten Antriebseinheit und Hubsystem. Die Antriebseinheit wird für die Fortbewegung des Fahrmoduls, aber auch für die gezielte Steuerung bei der Positionierung des Fahrmoduls unter der Kabine respektive unter dem Seilbahngehänge benötigt. Die Auslegung und Auswahl dieses Teils wurde in Arbeitspaket 5000 durchgeführt und wird daher an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Dieses Arbeitspaket befasst sich daher mit der Auslegung des Hubsystems und der Struktur des Fahrmoduls. Das Hubsystem wird benötigt, um einen Höhenunterschied bei den Zentrierebenen auszugleichen. Die erste Zentrierungsstufe weist eine Höhe von ungefähr 20 cm auf, was vom Hubsystem überbrückt werden muss. Dazu können die Schnittstellen nicht unter Last koppeln oder entkoppeln. Das Hubsystem liefert hierfür die Entlastung. Vereinfacht kann daher davon gesprochen werden, dass das Hubsystem dafür zuständig ist, die Kabine aus dem Seilbahngehänge heraus- bzw. hereinzuhängen. Neben dieser zentralen Aufgabe übernimmt das Fahrmodul nur noch

die Fahreigenschaften. Auf eine Lenkung oder weiteren Aktuatoren wurde aus Gründen der Vereinfachung verzichtet. Die Struktur des Fahrmoduls ist daher lediglich für das Tragen aller Komponenten zuständig und erfüllt sonst keine weitere Funktion. Führende Konstruktionsrichtlinien waren daher Einfachheit bei Fertigung und Montage und geringe Kosten.

- **Strukturauslegung**

Die Hauptstruktur des Fahrmoduls soll relativ einfach aufgebaut sein. Zur Erfüllung der Aufgabe als Technologieträger muss das Fahrmodul nur wenige Komponenten transportieren. Diese sind der Antrieb inklusive Getriebe, Batterie und Steuerungseinheiten. Die logische Aufteilung ist in Abbildung 32 dargestellt. Durch den simplen Aufbau eignet sich eine einfache Struktur für das Fahrmodul. Die Struktur muss zum einen eine sichere Verbindung zwischen Rädern bzw. Achsen und dem Fahrzeug als auch eine Aufnahme bzw. Befestigung für die Komponenten bieten. Daher soll die Fahrzeugstruktur als Leiterraum ausgeführt werden. Die Leiterraumtechnik stammt aus der Ursprungszeit des Automobilbaus und wird heute noch in Lastfahrzeugen eingesetzt. Sie zeichnet sich durch einen einfachen Aufbau und eine einfache Auslegung aus.

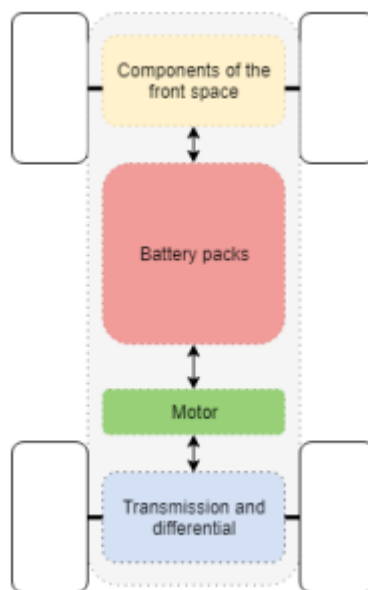


Abbildung 32: Systemaufteilung des Fahrmoduls.

Für die Struktur werden Vierkant-Hohlprofile aus Stahl verwendet. Diese Stahlprofile sind relativ günstig und können sehr leicht miteinander verschweißt werden. Dazu ist die Auslegung einer solchen Struktur vergleichsweise einfach, erfüllt aber vollständig die Anforderung. Der für die Auslegung verwendete Grundaufbau des Fahrmoduls ist in Abbildung 33 dargestellt. Er weist zwei Hauptprofile auf, die in Fahrtrichtung zeigen, und vier Querträger, die die Achsen umschließen sollen. Die Verbindung erfolgt in der Ebene, indem die Querträger an die Längsträger geschweißt werden.



Abbildung 33: Die Grundstruktur des Fahrmoduls.

Das nötige Hubsystem wird für die Auslegung als zusätzlicher Leiterraum angenommen, welcher auf der Fahrzeugstruktur aufliegt. Die genaue Ausgestaltung des Hubsystems erfolgt in einem nachfolgenden Schritt, da für den Mechanismus verschiedene Umsetzungsmöglichkeiten in Frage kommen. Die Ersatzstruktur ist in Abbildung 34 gezeigt.



Abbildung 34: Fahrmodul mit Ersatzstruktur fürs Hubsystem.

Für die Anbindung der Achsen wird zwischen den Querträgern eine Aufnahme vorgesehen, durch welche die Achsen gesteckt werden können. Die Aufnahme wird als zusätzliches Bauteil angenommen, um das Profil des Längsträgers nicht zu schwächen. Die Grundstruktur des Fahrmoduls, welches für die Auslegung und Dimensionierung verwendet wird, ist in Abbildung 35 dargestellt.



Abbildung 35: Grundstruktur des Fahrmoduls für die Auslegung.

Exemplarisch wird an dieser Stelle die Auslegung der Achse gezeigt. Für die Auslegung wird ein vereinfachtes Modell angenommen. Auf die Achse können drei Arten von Lasten wirken: Biegung, Querkraft und Torsion. Für die Auslegung werden die verursachten Spannungen mit dem von Mises-Kriterium zusammengeführt. Für eine Auslegung zur sicheren Seite wird ein Fahrzeuggewicht von 2520 kg angenommen. Als Ausgangsgröße der Achse werden 80 mm angenommen, da dies die Maximalgröße ist, welche durch ein Beispielgetriebe geführt werden kann. Unter der Annahme eines zylindrischen Körpers mit Vollmaterial können Querschnitt, axiales Widerstandsmoment und polares Widerstandsmoment berechnet werden.

$$A_C = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{80 \text{ mm}}{2}\right)^2 = 5026,55 \text{ mm}^2 \quad (2.11)$$

$$W_{ax} = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{\pi \cdot (80 \text{ mm})^3}{32} = 50265,48 \text{ mm}^3 \quad (2.12)$$

$$W_p = \frac{\pi \cdot d^3}{16} = \frac{\pi \cdot (80 \text{ mm})^3}{16} = 100530,96 \text{ mm}^3 \quad (2.13)$$

Als nächster Schritt wird das Strukturproblem vereinfacht. Dafür werden die Reifen als Fest- und Loslager angenommen und die Anbindung an die Struktur als Punktlast. Die Last ergibt sich direkt aus dem angenommenen Gewicht von Kabine und Fahrmodul. Beschleunigungskräfte werden an dieser Stelle vernachlässigt, da für das Fahrzeug nur für sehr geringe Geschwindigkeiten und Beschleunigungen geplant sind. Mit der oben angenommenen Masse ergeben sich Punktlasten:

$$F_{1,2} = \frac{m \cdot g}{4} = \frac{2520 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{4} = 6180,3 \text{ N} \quad (2.14)$$

Das reduzierte Strukturmodell ist in der untenstehenden Abbildung 36 dargestellt.

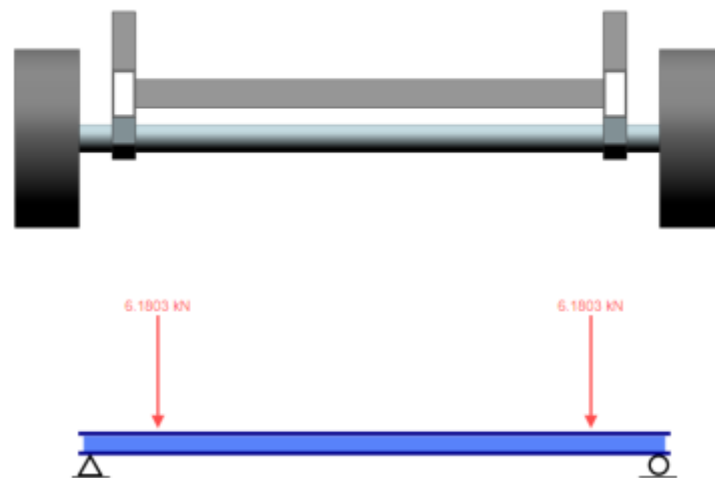


Abbildung 36: Achse und Vereinfachung für die Berechnung.

Neben der Querkraft wirken auch noch ein Biegemoment und Torsion durch den Antrieb auf die Achse. Das Moment ist zwischen den Einzelkräften konstant. Für die quantitative Bestimmung wird daher der Einleitungspunkt der Einzellast angenommen. Für das Torsionsmoment wird ein typischer Antriebswert gesetzt. Beide Größen ergeben sich dadurch zu:

$$M_{1,2} = F_{1,2} \cdot x = 6180,3 \text{ N} \cdot 221,25 \text{ mm} = 1367391,38 \text{ Nmm} \quad (2.15)$$

$$T_{Torsion} = 2000 \text{ Nm} \quad (2.16)$$

Dadurch ergeben sich mit den oben berechneten geometrischen Größen die jeweiligen (Schub-)Spannungen mit

$$\sigma_b = \frac{M_{1,2}}{W_{ax}} = \frac{1367391,38 \text{ Nmm}}{50265,48 \text{ mm}^3} = 27,2034 \text{ MPa} \quad (2.17)$$

$$\tau_q = \frac{F_{1,2}}{A_q} = \frac{6180,3 \text{ N}}{5026,55 \text{ mm}^2} = 1,2295 \text{ MPa} \quad (2.18)$$

$$\tau_t = \frac{T_{Torsion}}{W_p} = \frac{2000 \text{ Nm}}{100530,96 \text{ mm}^3} = 19,8944 \text{ MPa} \quad (2.19)$$

Das von Mises-Kriterium wird verwendet, um die Spannungen zusammenzuführen. Damit ergibt sich eine Spannung von:

$$\sigma_a = \sqrt{(\sigma_b)^2 + 3(\tau_q + \tau_t)^2} = 45,25856 \text{ MPa} \quad (2.20)$$

Als Material für die Achse wird gewöhnlicher, unlegierter Baustahl (S235) mit einer Streckgrenze von 250 MPa gewählt. Durch das Hinzufügen mehrerer Sicherheitsfaktoren für die Größe der Achse, die

Oberflächenbeschaffenheit und die allgemeine Sicherheit wird die Streckgrenze auf 62 MPa reduziert. Der Vergleich mit der ermittelten Spannung ergibt eine finale Sicherheit von 1,36, was unter den berücksichtigten Annahmen (insbesondere dem Ausgangsgewicht) vollkommen ausreicht. Analog können auch die anderen Grundelemente ausgelegt werden.

Mit Auswahl der weiteren Komponenten und insbesondere des Hubsystems müssen Veränderungen an der Struktur vorgenommen werden, wobei die Grundstruktur bestehen bleibt. Die finale Version der Fahrmodulgrundstruktur ist in Abbildung 37 dargestellt.

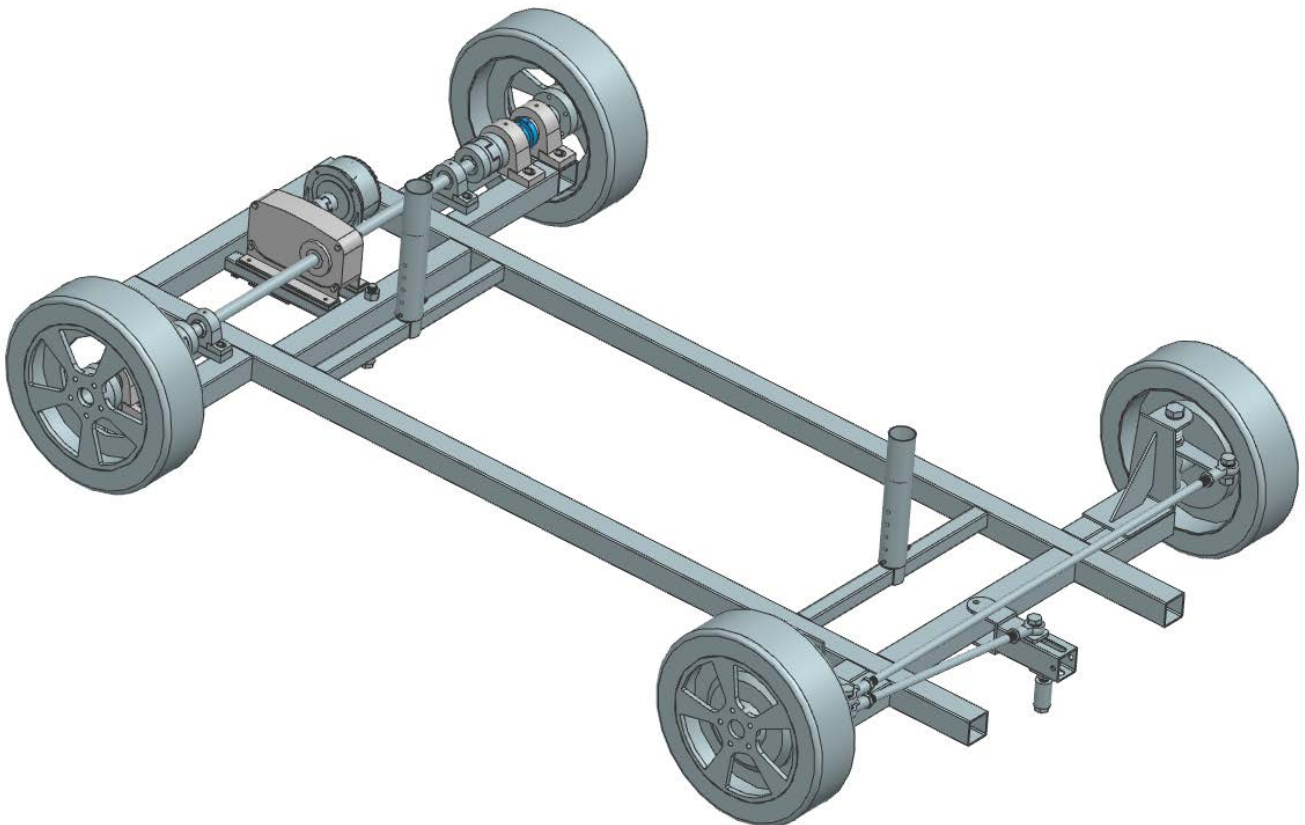


Abbildung 37: Finale Version der Fahrmodulgrundstruktur (Fahrtrichtung vorne rechts).

Eine Hauptänderung ist die Verwendung unterschiedlicher Radaufhängungen. Für die Sicherstellung des Wechselprozesses wird für die vordere Achse eine Lenkung eingebaut. Das Fahrzeug wird in der Seilbahnstation in einer Schiene geführt, sodass die Positionierung quer zur Fahrtrichtung fest ist. Damit das Fahrzeug sich selbständig in der Schiene ausrichten kann, ist die Lenkung direkt mit der Schienenführung verbunden. Aufgrund der Lenkung wird für die vorderen Räder auf eine durchgehende Achse verzichtet und die beiden Vorderräder werden über eine Einzerradaufhängung mit der Fahrzeugstruktur verbunden. Im hinteren Teil sind Motor und Getriebe deutlich kleiner ausgeführt als noch in der Systemauslegung angenommen. Insbesondere das Getriebe wird nicht mit Differential verwendet, sondern ist ein einfaches Stirnradgetriebe. Auf ein Differential wurde aufgrund der Kosten verzichtet und weil die hier umgesetzte Version auch die Anforderungen an den Test erfüllt. Die senkrecht

- Betriebskosten 4,30 € pro Zyklus
- Länge der Druckluftflasche ca. 1,5 m/Außendurchmesser ca. 230 mm/Gewicht ca. 85 kg

- **Hydraulik**

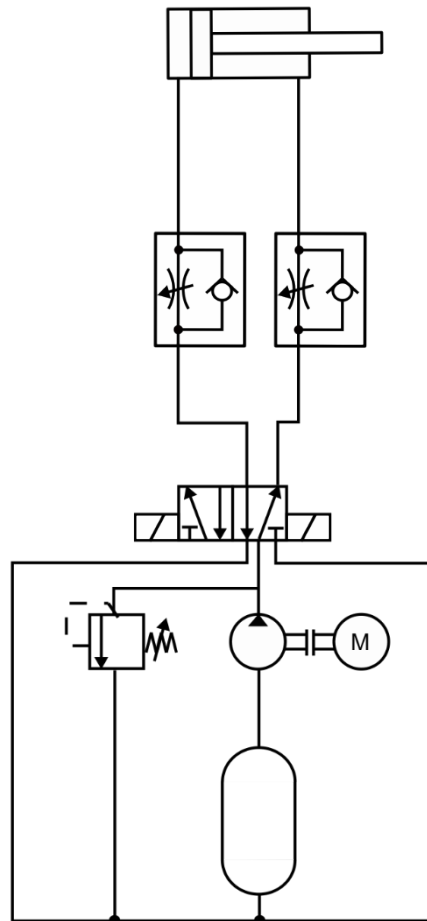


Abbildung 39: Grundlegender Aufbau eines Hubsystems, welches über einen Hydraulikzylinder angetrieben wird.

- Komponenten:
 - Hydraulikaggregat 24 V/2 kW/250 bar
 - 5/2-Wegeventil (oder 4/2;4/3)
 - Drosselrückschlagventile
 - Hydraulikschläuche
 - Hubzylinder Lukas Leichtmetallzylinder 500 bar
- Gesamtpreis ca. 2100 €
- Bei diesem Konzept müssen zusätzliche Führungen für die Kabine vorgesehen werden
- Das Aggregat entleert 2 in Reihe geschaltete Batterien in ca. 2 Stunden

○ **Mechanisches Scherenhubsystem**

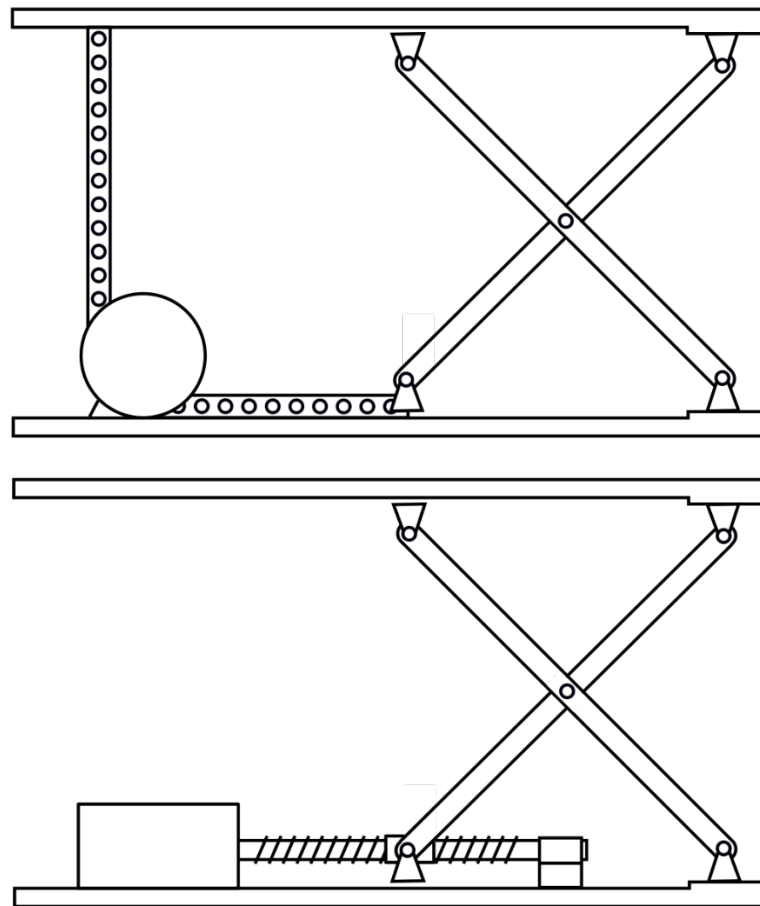


Abbildung 40: Zwei mögliche Umsetzungen eines Scherenhubsystems unter Verwendung einer Schubkette (oben) oder eines Spindeltriebs.

- Integration der Komponenten einer Scherenhebebühne ins Fahrzeug
- Antrieb über Schubkette oder Spindeltrieb
- Gesamtpreis ca. 2000 €
- Sehr hoher Energiebedarf bei Spindeltrieb wegen hoher Drehzahl
- Sehr hoher Energiebedarf bei Schubkette wegen hohem Moment (eventuell zusätzliches Getriebe nötig)

Für die Auswahl werden die drei Konzepte mithilfe eines paarweisen Vergleichs bewertet. Das am höchsten bewertete System wird für den Einsatz im Technologiedemonstrator ausgewählt. Für die Konzepte werden zunächst die Bewertungskriterien zueinander gewichtet.

Gew.	Anz.		Kriterium						
5/28	5	a	Fertigungskosten						
				a					
1/7	4	b	Betriebskosten		a				
				b		d			
3/28	3	c	Benötigter Bauraum		d		a		
				d		b		f	
1/4	7	d	Funktionssicherheit		c		f		a
				d		f		b	
1/28	1	e	Gewicht		d		c		
				f		d			
3/14	6	f	Energiebedarf		g				
				f					
1/14	2	g	Komplexität						

Die Funktionssicherheit ist von überragender Bedeutung, da das Hubsystem während des dynamischen Tests fundamental wichtig ist. Dazu ist auch der Energiebedarf entscheidend, da dies direkt in der nötigen Batterie resultiert, was sowohl einen Einfluss auf die Kosten aber auch auf das Gewicht des Gesamtfahrzeugs hat. Die Kosten für Fertigung und Betrieb sind aufgrund des Projektbudgets ebenfalls wichtig. Der benötigte Bauraum und die Komplexität sind nur von nachrangiger Wichtigkeit, da das Fahrmodul relativ viel verfügbaren Platz aufweist und durch die Möglichkeit der Vorbereitung der Testfahrt die Komplexität nicht entscheidend ist. Die geringste Wichtigkeit hat das Gewicht, da alle drei vorgestellten Konzepte generell eine geringe Masse aufweisen.

Im Folgenden werden für die vier Konzepte (die Schere in den zwei Ausführungen) in den jeweiligen Kategorien Punkte von 1 (schlecht) bis 5 (sehr gut) verteilt. Zu einer besseren Übersicht ist eine Begründung direkt stichwortartig angefügt.

Kriterium	Pneumatik		Kommentar
	Punkte	Gew. Punkte	
Fertigungskosten	5	25/28	Ca. 2200€
Betriebskosten	1	1/7	Ca. 4,30€ pro Zyklus
Benötigter Bauraum	2	3/14	Druckflasche und Zylinder benötigen viel Bauraum
Funktionssicherheit	3	3/4	Möglichkeit einer Leckage
Gewicht	2	1/14	Druckflasche wiegt ca. 85 kg
Energiebedarf	5	15/14	Nur Wegeventil benötigt Strom
Komplexität	1	1/14	Hohe Anzahl an Komponenten
Summe gew. Punkte	45/14		
Rang	3		

Hydraulik			
Kriterium	Punkte	Gew. Punkte	Kommentar
Fertigungskosten	5	25/28	Ca. 2100€
Betriebskosten	3	3/7	Verbrauch von Hydrauliköl
Benötigter Bauraum	5	15/28	Zylinder und Aggregat benötigen wenig Bauraum
Funktionssicherheit	3	3/4	Möglichkeit einer Leckage
Gewicht	4	1/7	Gewicht von Führungen und Aggregat
Energiebedarf	3	9/14	2kW Aggregat
Komplexität	3	3/14	Mittelhohe Anzahl an Komponenten
Summe gew. Punkte	101/28		
Rang	2		

Schere + Schubkette			
Kriterium	Punkte	Gew. Punkte	Kommentar
Fertigungskosten	5	25/28	Ca. 2000€
Betriebskosten	5	5/7	Nur Stromverbrauch
Benötigter Bauraum	2	3/14	Schere und Schubkette benötigen viel Bauraum
Funktionssicherheit	5	5/4	Ausfall nur durch mech. Versagen möglich
Gewicht	1	1/28	Hohes Gewicht der Schere
Energiebedarf	1	3/14	Ca. 3kW
Komplexität	5	5/14	Wenige Komponenten
Summe gew. Punkte	103/28		
Rang	1		

Schere + Spindeltrieb			
Kriterium	Punkte	Gew. Punkte	Kommentar
Fertigungskosten	5	25/28	Ca. 2000€
Betriebskosten	5	5/7	Nur Stromverbrauch
Benötigter Bauraum	2	3/14	Schere und Spindel benötigen viel Bauraum
Funktionssicherheit	5	5/4	Ausfall nur durch mech. Versagen möglich
Gewicht	1	1/28	Hohes Gewicht der Schere
Energiebedarf	1	3/14	Ca. 3kW
Komplexität	5	5/14	Wenige Komponenten
Summe gew. Punkte	103/28		
Rang	1		

Die Ausführung der Kette mit Spindeltrieb ist der Schubkette aufgrund der Verfügbarkeit der Komponenten und der Anbringungsmöglichkeiten des Antriebs vorzuziehen.

○ **Berechnung des Scherenhubsystems**

Für die Berechnung der nötigen Kraft des Scherenhubsystems werden die in Abbildung 41 gezeigten geometrischen Größen benötigt. Die Länge der Schere ergibt sich mit:

$$l = \sqrt{x^2 + y^2} \quad l = \sqrt{(x - \Delta x)^2 + (y + \Delta y)^2} \quad (2.21)$$

$$\sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{(x - \Delta x)^2 + (y + \Delta y)^2} \quad (2.22)$$

Mit $\Delta x = x - 0,2$ (Mindestabstand) folgt:

$$x = \sqrt{0,04m^2 + 2\Delta y y + \Delta y^2} \quad (2.23)$$

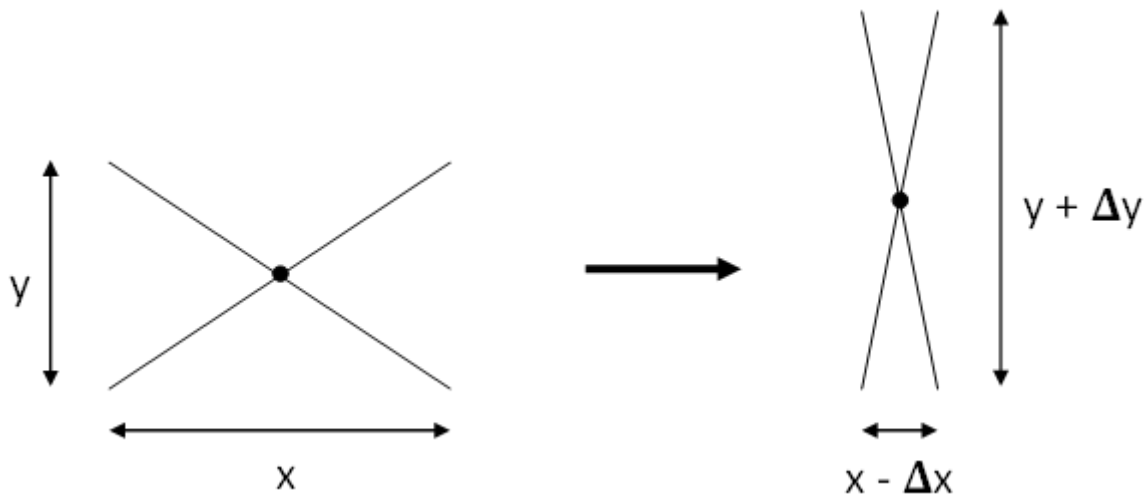


Abbildung 41: Geometrische Größen für die Berechnung des Scherenhubsystems.

Mit der verfügbaren Bauhöhe $y = 300 \text{ mm}$ und dem geforderten Hub $\Delta y = 200 \text{ mm}$ ergibt sich $x \approx 450 \text{ mm}$.

Bei einem zu hebenden Gewicht von 1000 kg ergibt sich eine Gewichtskraft G von 9810 N. Die nötige Kraft des Scherenhubs ist exemplarisch in Abbildung 42 dargestellt.

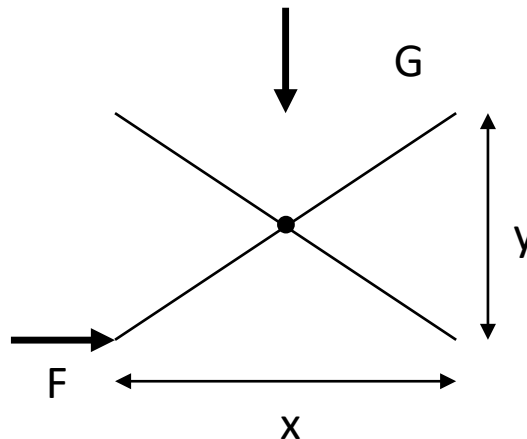


Abbildung 42: Kräftegleichgewicht an der Schere.

Mit dem Prinzip der virtuellen Verschiebung ergibt sich:

$$\delta A = F\delta x + G\delta y = 0 \quad (2.24)$$

$$\frac{F}{G} = -\frac{\delta y}{\delta x} \quad (2.25)$$

Aus Formel 2.22 folgt mithilfe der p-q-Formel:

$$\delta y = -y + \sqrt{y^2 - \delta x^2 + 2\delta x x} \quad (2.26)$$

Die negative Lösung der p-q-Formel ist in diesem Zusammenhang nicht sinnvoll einsetzbar, weswegen nur mit der positiven Lösung gerechnet wird. δy wird negativ in das Kräfteverhältnis eingesetzt, da die Verschiebung der Richtung der Kraft G entgegengesetzt ist:

$$\frac{F}{G} = \frac{-y + \sqrt{y^2 - \delta x^2 + 2\delta x x}}{\delta x} \quad (2.27)$$

Erweitern mit $y + \sqrt{y^2 - \delta x^2 + 2\delta x x}$:

$$\frac{F}{G} = \frac{-\delta x + 2x}{y + \sqrt{y^2 - \delta x^2 + 2\delta x x}} \quad (2.28)$$

$$\lim_{\delta x \rightarrow 0} \frac{-\delta x + 2x}{y + \sqrt{y^2 - \delta x^2 + 2\delta x x}} = \frac{x}{y} \quad (2.29)$$

Somit folgt:

$$\frac{F}{G} = \frac{x}{y} = \frac{450}{300} = \frac{3}{2} \quad (2.30)$$

Die maximal aufzubringende Kraft F würde bei einer Schere also $F = 14715 \text{ N}$ betragen. Bei vier gleichmäßig vom Schwerpunkt entfernten Scheren beträgt die Kraft pro Schere $3678,75 \text{ N}$.

Die finale Version des Scherenhubsystems integriert ins Fahrmodul ist in Abbildung 43 dargestellt.

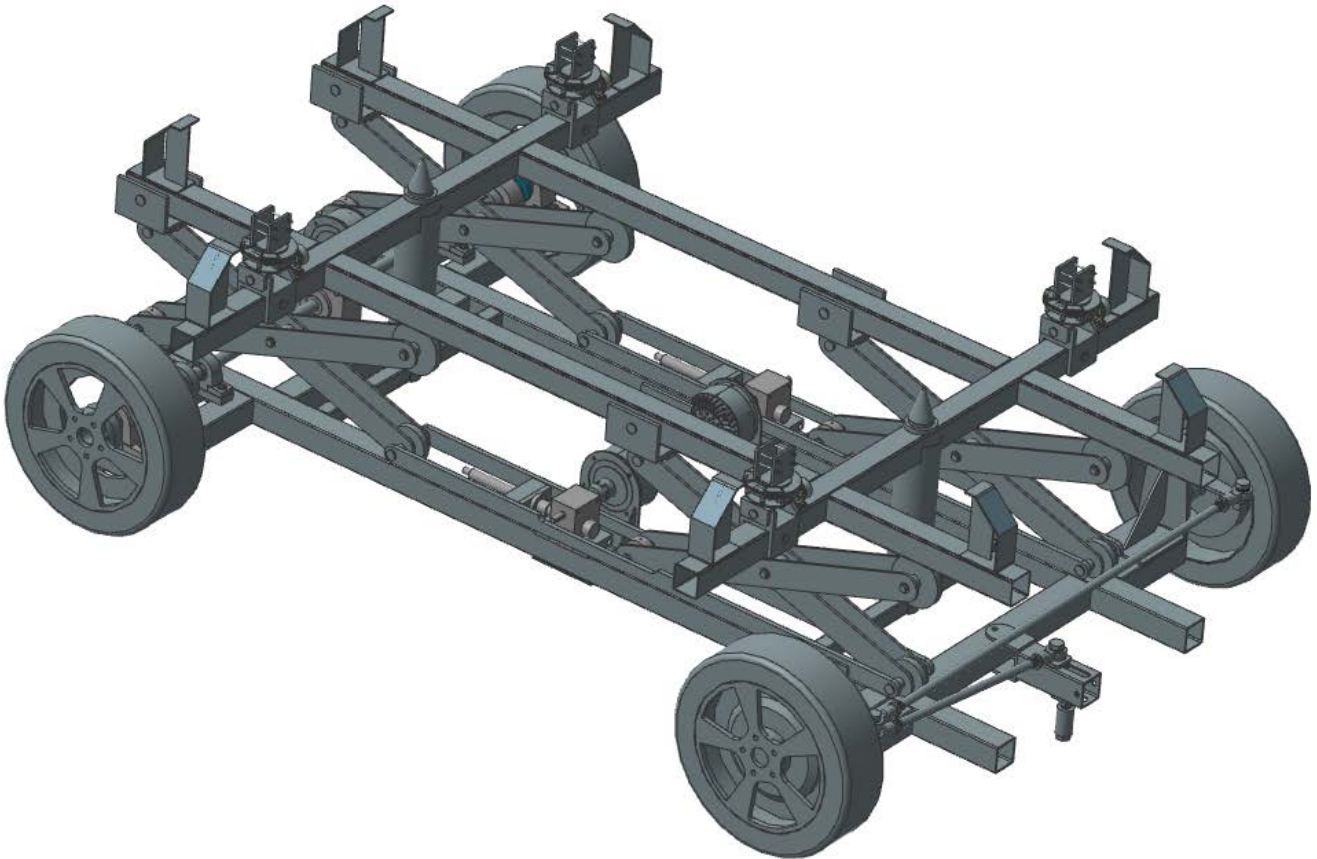


Abbildung 43: Fahrmodul mit Hubsystem und Schnittstellen für die Kopplung der Kabine.

- **Fertigung**

Die Schweißarbeiten für das Grundgerüst wurden wie bei der Kabine an die Schlosserei vergeben, die auf Ofenbau spezialisiert ist. Auf diesem Weg konnte sichergestellt werden, dass die Fertigungsabweichungen für die Kopplung nicht zu groß wurden. Das Grundgerüst des Fahrmoduls (mit montierter Antriebseinheit) und dem unteren Teil des Hubsystems ist in Abbildung 44 dargestellt.



Abbildung 44: Grundgerüst des Fahrmoduls mit montierten Reifen, Antriebseinheit und der Unterseite des Hubsystems. Die obere Ebene des Hubsystems liegt auf dem Boden unterhalb des Fahrmoduls.

- **Montage**

Die Montage für das Gesamtfahrzeug ist Kapitel 2.1.5 beschrieben.

2.1.4. Antriebs- und Sensortechnik (AP-5000)

- **Sensorentwicklung**

Für eine erfolgreiche Übergabe der Kabine zwischen Seilbahnhängearm und Fahrmodul sind zuverlässige Sensorsysteme erforderlich, die präzise Positionsdaten der Koppelschnittstellen für ihre entsprechenden Koppelpartner liefern können. Herkömmliche Sensorsysteme zur Entfernungsmessung im Automotive-Bereich basieren entweder auf Radar- oder Sonarsystemen. Automotive-Radarsysteme sind für einen vergleichsweise großen Messbereich bekannt und können bis zu mehreren hundert Metern Messdistanz abdecken. Die Messauflösung liegt jedoch typischerweise im Bereich von einigen Zentimetern und sogar mehr. Sonar-gestützte Systeme haben einen geringeren Messbereich und werden meist für die Kurzstreckenerfassung von Hindernissen in unmittelbarer Nähe des Sensors eingesetzt. Aufgrund ihrer hohen Auflösung und niedrigen Produktionskosten werden sie überwiegend im Bereich der Park-Assistenzsysteme verwendet. Herkömmliche Radar- und Sonar-basierte Sensorsysteme haben allerdings den Nachteil, dass sie ohne weitere Signalverarbeitung nicht zwischen bestimmten Hindernissen unterscheiden können. Das bedeutet, dass Objekte in der Umgebung des Sensors zwar erkannt, aber nicht identifiziert werden können. Die Identifizierung von Objekten kann durch Systeme wie LIDAR, Kamera-basierte oder Radar-basierte Bildgebungsverfahren erreicht werden. Dies wiederum ist mit einem erhöhten Aufwand an Signalverarbeitung und Produktionskosten verbunden. Die untenstehende Tabelle zeigt eine Übersicht der unterschiedlichen Systeme im Vergleich.

Spezifikation	SONAR	RADAR	LiDAR	Kamera
Messdistanz	Gering	Mittel / Hoch	Mittel / Hoch	Gering/ Mittel
Auflösung	Hoch	Mittel	Hoch	Mittel
Kosten	Gering	Mittel	Hoch	Mittel
Komplexität	Gering	Mittel	Hoch	Hoch

Für die Realisierung der Kabinenübergabe sollte im Rahmen des Projekts ein Sensorsystem entwickelt werden, welches den Anforderungen bzgl. einer erforderlichen Messgenauigkeit von weniger als 2 cm sowie einer Objektidentifizierung der entsprechenden Koppelpartner entspricht. Die Objektidentifizierung ist bei der Kabinenübergabe insbesondere erforderlich, um die genaue Position der entsprechenden Koppelpartner der jeweiligen Schnittstellen bestimmen zu können. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen des Projekts ein neuartiges Messsystem, basierend auf einem Active-Target Ansatz, entwickelt. Hierbei sendet das Zielobjekt Messsignale aus, welche über das ortende Objekt gesteuert und verarbeitet werden. Vergleichbare Systeme werden bspw. in der Flugsicherung in der Form von Sekundär-Radarsystemen verwendet. Daher sind die Sendeknoten und die Empfangsknoten voneinander getrennt. Der Sendeknoten kann als Referenzpunkt auf dem Zielobjekt (z.B. upBUS-Passagierkabine) und der Empfangsknoten auf dem Ortungsobjekt (z.B. upBUS-Fahrmodul) platziert werden. Dabei werden beide Objekte in einem lokalen Bezugssystem zueinander in Beziehung gesetzt. Abbildung 45 verdeutlicht den Unterschied zwischen Active-Target und konventionellen Messsystemen zur Entfernungsbestimmung.



Abbildung 45: Vergleich zwischen konventionellem Messsystem und Active-Target.

Beim konventionellen Ansatz erfolgt die Entfernungsbestimmung durch Messung der Signalreflektion eines gesendeten Messsignals an einem entsprechenden Zielobjekt und anderen Objekten (Clutter) innerhalb der Messstrecke. Hierbei ist eine Identifizierung des Zielobjekts nicht ohne aufwändige bildgebende Verfahren möglich. Bei dem Active-Target Ansatz kann durch eine Synchronisation von Sender (Tx) und Empfänger (Rx) das Signal von einem Zielobjekt (Line-of-Sight) eindeutig von den Signalreflektionen anderer Objekte in unmittelbarer Umgebung unterschieden werden. Durch eine Anordnung von mehreren Empfangsknoten auf dem ortenden Objekt kann somit über eine Time-of-Flight Messung (ToF) die Position im Referenzsystem des ortenden Objekts bestimmt werden.

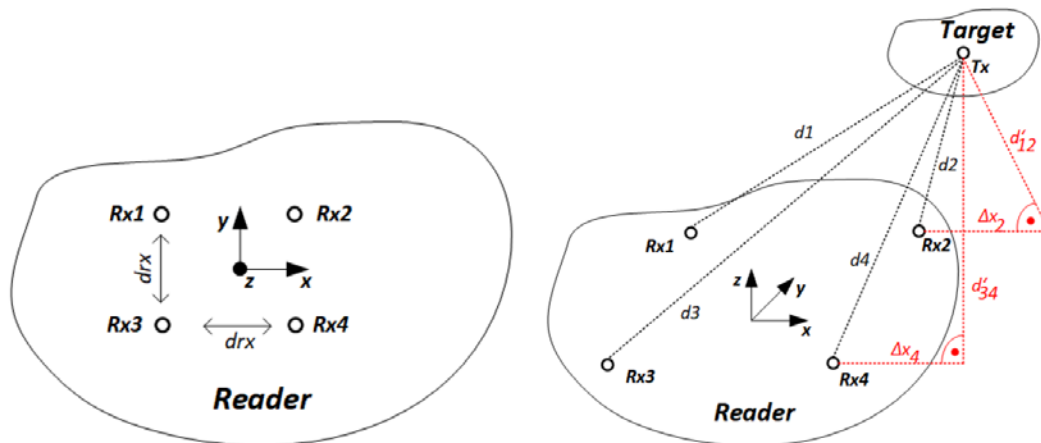


Abbildung 46: Triangulationsprinzip und Empfängeranordnung.

Die Positionsbestimmung basiert dabei auf dem Triangulationsprinzip gemäß Abbildung 46. Die Bestimmung der Position im kartesischen Koordinatensystem erfolgt entsprechend der unten aufgeführten Zusammenhänge. Somit lässt sich die Distanz zwischen einem Empfängerknoten, Rx_i , und dem Sender, Tx , direkt aus der Signallaufzeit, bestimmen durch

$$d_i = \frac{t_i - t_0}{c_0}. \quad (2.31)$$

Hierbei entspricht t_0 dem Zeitpunkt des Aussendens des Messsignals, t_i dem Zeitpunkt des Empfangens des Messsignals am Knoten Rx_i und c_0 der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Messsignals. Die Berechnung der x- und y-Koordinaten erfolgt entsprechend der Gleichungen

$$x = \frac{d_3^2 - d_4^2}{2d_{rx}} = \frac{d_1^2 - d_2^2}{2d_{rx}} \quad (2.32)$$

und

$$y = \frac{d_3^2 - d_1^2}{2d_{rx}} = \frac{d_4^2 - d_2^2}{2d_{rx}}. \quad (2.33)$$

Hierbei entspricht d_{rx} dem Abstand zwischen den jeweiligen Empfängerknoten. Die Bestimmung der z-Koordinate erfolgt gemäß der Gleichung

$$z = \sqrt{d_i^2 - \Delta x_i^2 - \Delta y_i^2} \quad (2.34)$$

mit

$$\Delta x_{1,3} = x - d_{rx} , \tag{2.35}$$

$$\Delta x_{2,4} = x - \frac{d_{rx}}{2} ,$$

$$\Delta y_{2,1} = y - \frac{d_{rx}}{2} ,$$

$$\Delta y_{3,4} = y - d_{rx} .$$

Der gewählte Ansatz ist in der Theorie medienunabhängig. So ließe sich das Konzept sowohl für Radar, Sonar als auch LiDAR basierte Messsysteme implementieren. Allerdings steigt der Synchronisationsaufwand für die ToF-Messung mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Messsignals. Bei einem Radar- oder LiDAR basierten Messsystem breitet sich das Messsignal mit Lichtgeschwindigkeit (~300,000 km/s) aus, was einer minimalen Zeitsynchronisationsgenauigkeit der Sende- und Empfangsknoten in der Größenordnung von 1E-10 s voraussetzen würde. Ein solches System wäre somit praktisch nicht realisierbar. Hingegen breitet sich das Messsignal bei dem Sonar-basierten Messsystem nur mit Schallgeschwindigkeit (~340 m/s) aus. Eine Synchronisationsgenauigkeit von Sender und Empfänger in einer Größenordnung von 1E-6 s ist hierbei hinreichend genau für einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf das Messergebnis. Weiterhin kann die Synchronisation hierbei über einen Funkkanal erfolgen, über welchen der Messzyklus gestartet wird. Dies ist möglich, da die Laufzeit des Auslösesignals (Lichtgeschwindigkeit) vernachlässigbar klein gegenüber der Signallaufzeit des Messsignals (Schallgeschwindigkeit) ist. Abbildung 47 zeigt eine Systemübersicht des Active-Target Systems, welches im Rahmen des Projekts entwickelt wurde.

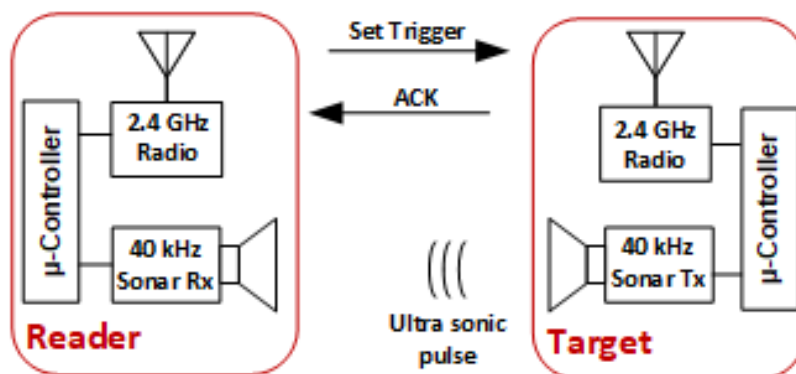


Abbildung 47: Ultraschall-basiertes Active-Target System.

Es basiert auf einem gepulsten Sonarsystem, bei dem der Empfänger und der Sender räumlich getrennt sind. Dabei dient der Tx als aktives Ziel (Active-Target) für den Rx. Der Tx erzeugt kurze Ultraschallimpulse (US) mit einer Mittenfrequenz von 40 kHz. Die Signalimpulse werden vom ortenden Objekt (Reader) über eine zusätzliche Funkverbindung ausgelöst, die im 2,4-GHz-ISM-Band arbeitet. Das Blockdiagramm in Abbildung 48 veranschaulicht die Verarbeitungsabläufe des Systems.

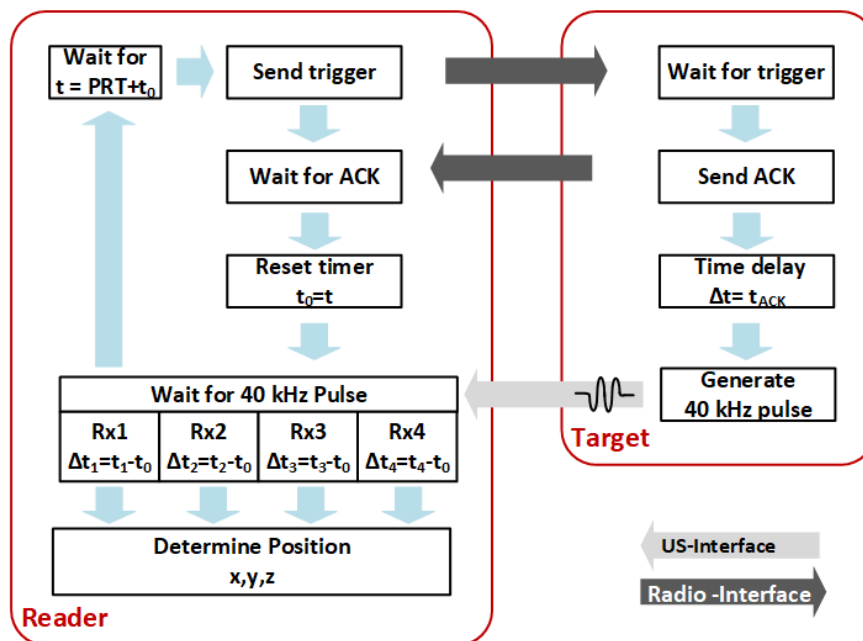


Abbildung 48: Verarbeitungsabläufe des Active-Target Systems.

Das ortende Objekt sendet eine Trigger-Anforderung über die Funkverbindung an das Ziel-Objekt. Nach Erhalt der Anforderung wird eine Bestätigung (ACK) an das ortende Objekt zurückgesendet. Die ACK-Übertragungszeit, t_{ACK} , ist für jede Trigger-Anforderung konstant im Rahmen der erforderlichen Messgenauigkeit, wodurch die Synchronisierung von ortendem Objekt und Ziel-Objekt ermöglicht wird. Entsprechend der ACK-Übertragungszeit wird die Erzeugung des Ultraschallpulses um $\Delta t = t_{ACK}$ verzögert. Mit Aussenden des Ultraschallpulses aktualisiert das ortende Objekt den Startzeitpunkt für den neuen Messzyklus auf $t = t_0$. Anschließend werden die Rx-Frontend-Module Rx_1, Rx_2, Rx_3, Rx_4 aktiviert, um den eingehenden Ultraschallimpuls zu erfassen. t_i gibt die Empfangszeit des gesendeten Ultraschallpulses an dem jeweiligen Rx-Frontend-Modul, Rx_i , an. Basierend auf den Messergebnissen wird die Position entsprechend den oben genannten Gleichungen bestimmt.

Die Implementierung der Rx-Frontend Module wird in Abbildung 49 gezeigt. Hierbei wandelt der Ultraschallwandler einen eintreffenden Schallimpuls in ein elektrisches Signal um, welches von dem nachfolgenden Verstärker um 42 dB verstärkt wird. Eine Komparator-Schaltung vergleicht das verstärkte Signal mit einer Schwellspannung V_{th} und löst beim Überschreiten dieser aus. Der nachfolgende

Gleichrichter reduziert das Signal auf seine Einhüllende und erzeugt somit das Auslösesignal für das Empfangen des Messsignals.

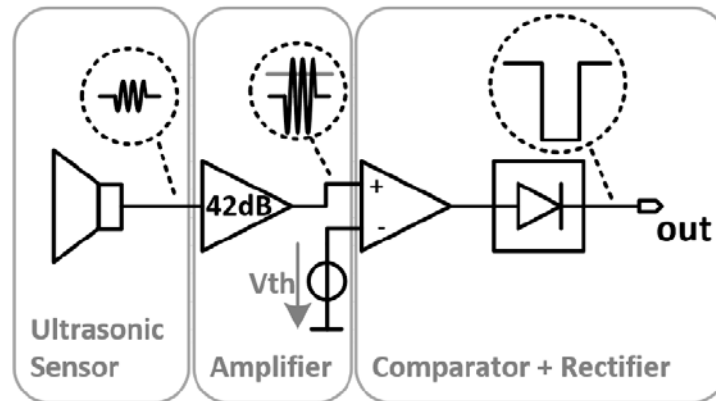


Abbildung 49: Schematischer Aufbau der Rx-Frontend Module.

Anhand des nachfolgenden Messaufbaus wird die Tauglichkeit des ultraschall-basierten Active-Target Messsystems für die Positionsbestimmung während der Kabinenübergabe des upBUS-Wechselprozesses untersucht. Abbildung 50 stellt die Anfangsbedingungen für eine maximale Verschiebung zwischen ortendem Objekt und Ziel-Objekt dar. Dabei beziehen sich x'_{max} und z'_{max} auf das Koordinatensystem des ortenden Objekts, welches einer sich dem Seilbahngehänge in x' -Richtung nähernden Passagierkabine entspricht. Für die Anwendung der Kabinenübergabe muss die Passagierkabine um max. 0,4 m in Richtung des Seilbahngehänges angehoben werden. Außerdem muss das Seilbahngehänge innerhalb eines bestimmten Bereichs von dem Fahrmodul erkannt werden. Für die Übergabe wird ein max. Erkennungsbereich von 3 m vorausgesetzt.

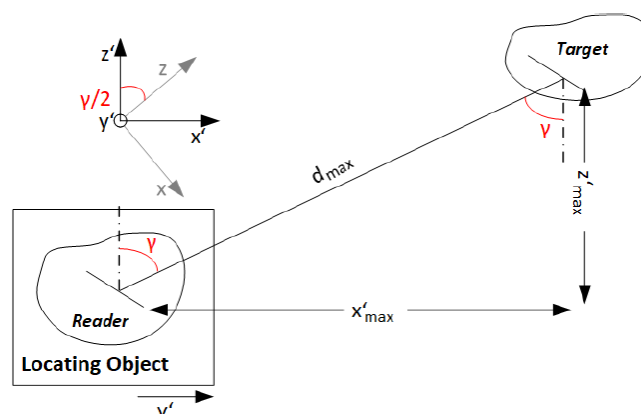


Abbildung 50: Verschiebung zwischen Ziel und ortendem Objekt.

Demnach muss das Ziel bei einem x'_{max} von 3 m und einem z'_{max} von 0,4 m noch detektierbar sein, was zu einem maximalen radialen Abstand, d_{max} , zwischen Ziel und ortendem Objekt von 3,03 m führt. In dieser Konfiguration beträgt der Winkel zwischen dem Radialvektor von d_{max} und der z' -Achse, $\gamma = 82^\circ$. Dieser Winkel nimmt mit abnehmender Verschiebung in x' -Richtung ab und ist gleich Null, wenn ortendes Objekt und Ziel-Objekt perfekt ausgerichtet sind. Dementsprechend muss ein Erfassungswinkel von 82° vom ortendem Objekt unterstützt werden. Da die Strahlbreite der verwendeten Ultraschallsensoren begrenzt ist, werden sowohl die Anordnung der Empfangsknoten als auch der Sendeknoten des Ziels um $\frac{\gamma}{2}$ gekippt, sodass der maximal erforderliche Erfassungswinkel auf ein Minimum reduziert wird. Daher wird eine Koordinatentransformation nach unten stehender Gleichung angewendet, die die gemessenen Sensordaten auf das $(x' y' z')$ -Koordinatensystem des ortenden Objekts bezieht.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(41^\circ) & 0 & \sin(41^\circ) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(41^\circ) & 0 & \cos(41^\circ) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (2.36)$$

Die Entfernungsmessung wurde gemäß den oben genannten Anforderungen durchgeführt. Entsprechend wurde das Ziel entlang der x' -Achse von der Position $(x' y' z') = (0,2 \ 0 \ 0,45)$ m bis $(x' y' z') = (3 \ 0 \ 0,45)$ m mit einer Schrittweite von etwa 0,5 m verschoben. Für jede Position wurden 1000 Messzyklen durchgeführt. Abbildung 51 stellt die Performance des Messsystems in $(x' y' z')$ Koordinaten dar. Dazu werden die Koordinaten basierend auf den entsprechenden Messwerten nach der obigen Berechnungsvorschrift bestimmt. Es ist zu erkennen, dass der gemessene mittlere Fehler mit zunehmender Verschiebung in x' -Richtung stark zunimmt. Allerdings reduziert sich dieser auf einen akzeptablen Wert von nicht mehr als 0,02 m für $x' < 1,5$ m und fällt auf einen Wert von weniger als 0,01 m für $x'=0,2$ m in x' , y' und z' -Richtung. Für die Anwendung der Kabinenübergabe ist die geringe Messgenauigkeit mit zunehmender Entfernung weniger kritisch, da eine präzise Positionierung nur bei sehr geringem Abstand zwischen ortendem Objekt und Ziel-Objekt erforderlich ist.

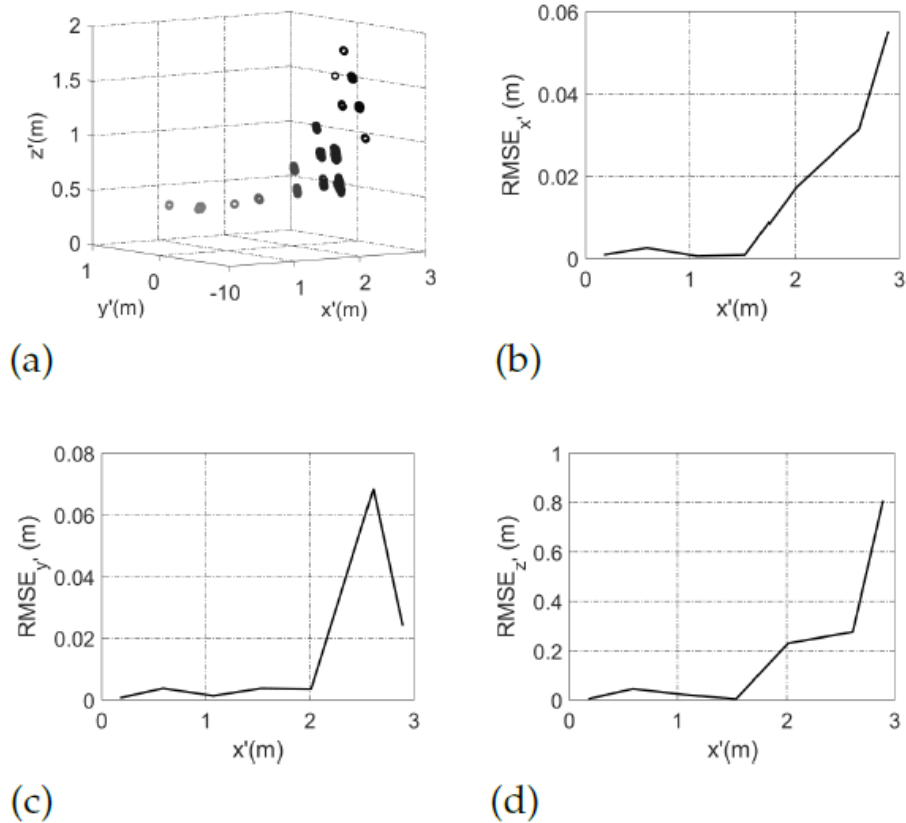


Abbildung 51: Gemessene Positionen in $(x' y' z')$ - Koordinaten (a) und mittlerer Fehler in x' (b), y' (c) und z' (d) Richtung.

Die Integration des Active-Target Sensorsystems im upBUS-Technologiedemonstrator ist in Abbildung 52 veranschaulicht. Um eine möglichst große Abdeckung während der Kabinenübergabe zu gewährleisten, sind die Empfängerknoten jeweils an der Vorder- und Rückseite des Fahrmoduls sowie vorne und hinten an der Oberseite der Kabine angebracht. Die jeweiligen „Targets“ befinden sich entsprechend an der Unterseite der Kabine sowie an der Unterseite des Seilbahngehänges. Je nach Betriebsmodus wird das Messsystem auf Referenzebene 1 oder Referenzebene 2 aktiv.

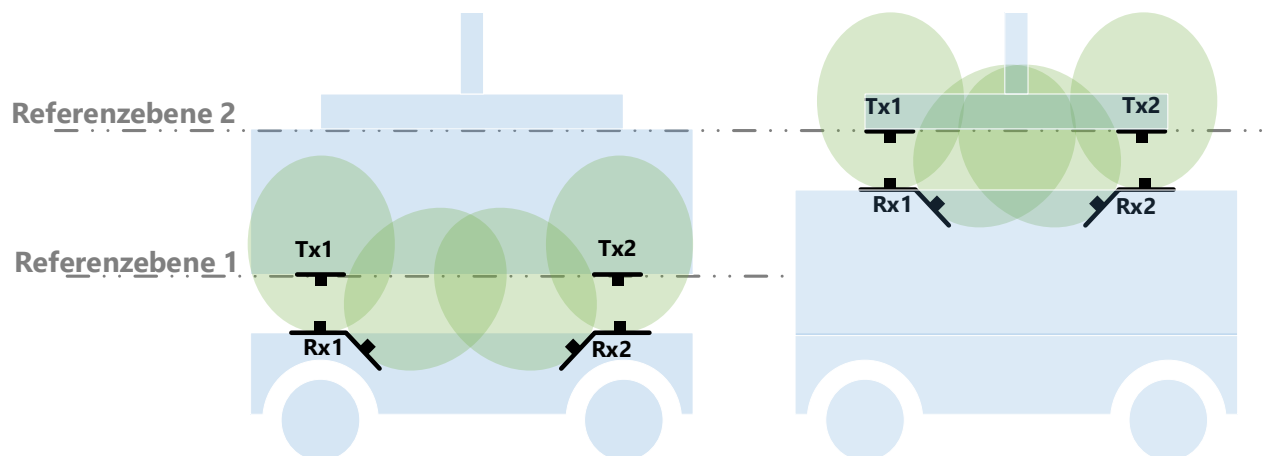


Abbildung 52: Integration des Active-Target Sensorsystems im upBUS-Technologiedemonstrator.

Abbildung 53 zeigt die Integration der Rx-Frontend-Module im Fahrmodul. Für den Technologiedemonstrator ist die Anzahl der möglichen Freiheitsgrade auf die x- und z-Richtung limitiert, weshalb bei der Implementierung auf eine dreidimensionale Positionsbestimmung verzichtet wurde und sich die Array-Größe der Empfängeranordnung auf 2 Elemente reduziert.

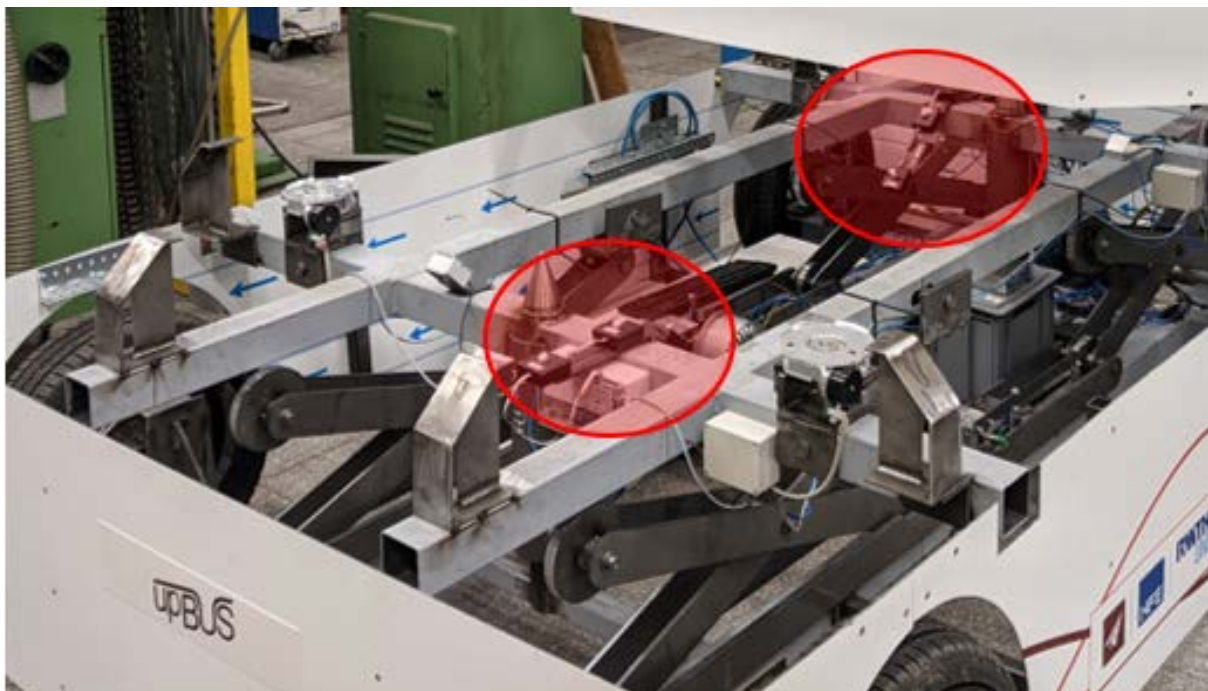


Abbildung 53: Integration der Rx-Frontend-Module im Fahrmodul.

Während des Koppelvorgangs wird zwecks einer höheren Messgenauigkeit zusätzlich zu der Positionsbestimmung durch das Active-Target System auf eine Entfernungsmessung durch ein LiDAR System zurück gegriffen. Sobald sich das Fahrmodul unter der Kabine positioniert hat, wird den LiDAR Sensoren eine bekannte Referenz präsentiert, wodurch Doppeldeutigkeiten vermieden werden können.

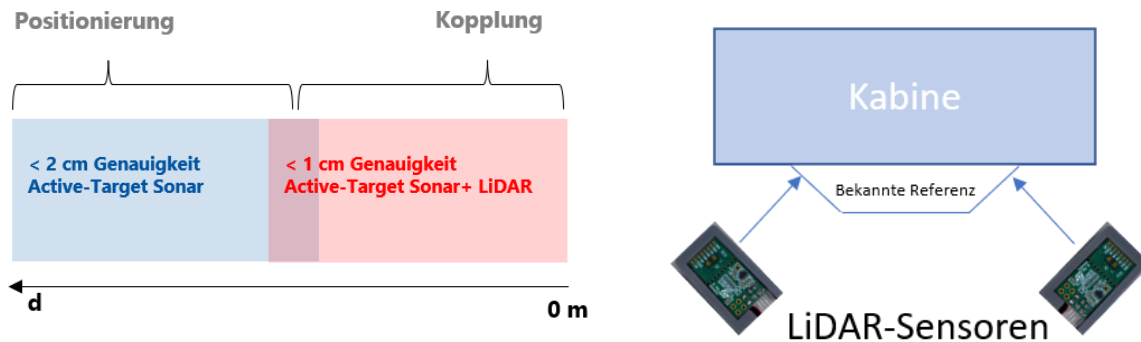


Abbildung 54: Anwendung des LiDAR-basierten Messsystems zur Erhöhung der Messgenauigkeit während der Kopplung.

• Leistungsbedarfsbestimmung und Antriebsentwicklung

Die Auswahl von Motor und Getriebe haben für die Systemauslegung des Fahrmoduls die höchste Priorität. Weitere Komponenten wie Motorcontroller, Batterien, Sicherungen etc. werden sekundär betrachtet und sind teilweise auch von dem gewählten Motor abhängig. Die technischen Anforderungen an den Motor ergeben sich aus dem erwarteten Fahrzeuggewicht, der nötigen Beschleunigung, Fahrgeschwindigkeit und dem Reifendurchmesser. Mit geplanten 17 Zoll-Reifen, einem Gewicht von 1000 kg, einer Nenngeschwindigkeit von 4 km/h und einer Beschleunigung von $0,7 \text{ m/s}^2$ wird ein Motor mit 2,1 kW Nennleistung, einem Nenndrehmoment von 110 Nm (maximales Drehmoment 375 Nm) und einer Drehzahl von 181 rpm benötigt. Die Grundannahme ist, dass das Fahrzeug über eine angetriebene Achse verfügt, welche von einem Motor angetrieben ist. Zunächst muss die Entscheidung über die Auswahl der Motortechnik getroffen werden. Elektromotoren existieren in den Ausführungen Gleichstrommotor, Asynchronmotor, Synchronmotor und Reluktanzmotor. Im Folgenden werden die Motoren kurz vorgestellt:

- Gleichstrommotor:
 - keine Verwendung im PKW-Bereich
 - Verwendung im Bereich fahrbarer Arbeitsmaschinen kleiner Leistung
 - günstiger als Drehstrommotoren
 - schlechter Wärmeabtrag, da innenliegender Rotor, der die gesamte Wärmeleistung aufnimmt
 - Maximale Drehzahl: 8.000 U/min
- Asynchronmotor:
 - aufwendigere Regelung als beim Gleichstrommotor
 - dreiphasiger Drehstrom muss aus Gleichstrom erzeugt werden
 - teurer als Gleichstrommotoren

- guter Wärmeabtrag, weil außenliegender Rotor den Großteil der Wärmeleistung aufnimmt
- Das maximale Drehmoment ist größer als 20.000 U/min, wodurch eine hohe Leistung bei kleinem Gewicht folgt
- Für den Anwendungsfall des Technologiedemonstrators ist eine hohe Übersetzung nötig
- große Standardisierung für verschiedene Anwendungen
- Synchronmotor:
 - aufwendigere Regelung als beim Gleichstrommotor
 - dreiphasiger Drehstrom muss aus Gleichstrom erzeugt werden
 - teurer als Asynchronmotor
 - höherer Wirkungsgrad als Asynchronmotor
 - guter Wärmeabtrag, weil außenliegender Rotor den Großteil der Wärmeleistung aufnimmt
 - Das maximale Drehmoment ist größer als 20.000 U/min, wodurch eine hohe Leistung bei kleinem Gewicht folgt
 - Für den Anwendungsfall des Technologiedemonstrators ist eine hohe Übersetzung nötig
- Reluktanzmotor:
 - meist Individualanfertigungen oder geringe Produktionstiefen, was in hohen Kosten resultiert und ihn vermutlich teurer als Synchronmotoren macht
 - aufwendigere Regelung als beim Gleichstrommotor
 - mehrphasiger Drehstrom muss aus Gleichstrom erzeugt werden
 - höherer Wirkungsgrad als Asynchronmotor
 - guter Wärmeabtrag, weil außenliegender Rotor den Großteil der Wärmeleistung aufnimmt
 - Das maximale Drehmoment ist größer als 20.000 U/min, wodurch eine hohe Leistung bei kleinem Gewicht folgt
 - Für den Anwendungsfall des Technologiedemonstrators ist eine hohe Übersetzung nötig

Analog zum Hubsystem wird die Motorenauswahl mithilfe eines paarweisen Vergleichs und der Bewertung der einzelnen Motoren anhand der gewichteten Kategorien getroffen.

Gew.	Anz.		Kriterium							
5/44	5	a	Spezifische Leistung							
				b						
6/44	6	b	Spezifisches Moment		a					
				b	d					
3/44	3	c	Zuverlässigkeit		d	a				
				d	b	a				
8/44	8	d	Regelgüte		c	b	g			
				d	c	g	a			
2/44	2	e	Geräuschpegel		d	g	b	i		
				e	d	h	i			
1/44	1	f	Thermomanagement		g	d	i			
				g	h	o				
7/44	7	g	Komplexität des Gesamtsystems		h	i				
				g	i					
4/44	4	h	Kosten		i					
				i						
8/44	8	i	Marktverfügbarkeit							

Die Marktverfügbarkeit und die Regelgüte sind von überragender Bedeutung für die Auswahl der Motoren. Der Technoliedemonstrator muss in einem kurzen Zeitraum entwickelt und gebaut werden, weswegen die Bezugsfähigkeit der Motoren sehr wichtig ist. Da das Fahrzeug sehr langsam während der Kopplung fährt und die Ausrichtung im Millimeterbereich durchgeführt werden muss, ist die Regelgüte von ebenso großer Wichtigkeit. Die Komplexität ist dann nachfolgend wichtig, um den Aufbau und die Regelungseinstellung einfach zu halten. Leistung, Moment und Kosten bilden den folgenden Block, die in der Regel auch eng voneinander abhängig sind. Weniger wichtig sind die Zuverlässigkeit (da Elektromotoren in der Regel eine hohe Zuverlässigkeit haben), der Geräuschpegel und das Thermomanagement. Die Motoren werden nun in den jeweiligen Kategorien verglichen. Bei der angewendeten Methode werden den Motoren Punkte von 0 – 3 in den jeweiligen Kategorien vergeben, die über einen direkten Vergleich ermittelt werden. Wenn ein Motor bspw. in einer Kategorie allen anderen Motoren überlegen ist, erhält er 3 Punkte. Ein anderer Motor, der den übrigen beiden überlegen ist, erhält 2 Punkte. Wenn Motoren gleichwertig sind, werden keine Punkte vergeben.

Kriterium	Gleichstrommotor		Kommentar
	Punkte	Gew. Punkte	
Spezifische Leistung	0	0	Im Vergleich niedrig
Spezifisches Moment	0	0	Im Vergleich niedrig
Zuverlässigkeit	0	0	Im Vergleich durchschnitt
Regelgüte	3	0,55	Leicht zu steuern
Geräuschpegel	0	0	Im Vergleich hoch
Thermomanagement	0	0	Schnelle Überhitzung möglich
Komplexität	3	0,48	Kein Drehstrom benötigt
Kosten	3	0,27	Niedrige Kosten
Marktverfügbarkeit	1	0,18	Überall verfügbar
Summe gew. Punkte	1,48		
Rang	1		

Kriterium	Asynchronmotor		Kommentar
	Punkte	Gew. Punkte	
Spezifische Leistung	2	0,23	Hohe Leistung
Spezifisches Moment	0	0	Niedriges Moment
Zuverlässigkeit	2	0,14	Relativ zuverlässig
Regelgüte	0	0	Aufwendige Regelung
Geräuschpegel	1	0,05	Vergleichsweise leise
Thermomanagement	1	0,02	Guter Überhitzungsschutz
Komplexität	1	0,16	Drehstrom benötigt
Kosten	2	0,18	Vergleichsweise günstig
Marktverfügbarkeit	2	0,36	Leicht zu beziehen
Summe gew. Punkte	1,14		
Rang	2		

Kriterium	Synchronmotor		Kommentar
	Punkte	Gew. Punkte	
Spezifische Leistung	0	0	Niedrige Leistung
Spezifisches Moment	3	0,41	Hohes Drehmoment
Zuverlässigkeit	0	0	Im Vergleich durchschnitt
Regelgüte	0	0	Aufwendige Regelung
Geräuschpegel	1	0,05	Vergleichsweise leise
Thermomanagement	1	0,02	Guter Überhitzungsschutz
Komplexität	1	0,16	Drehstrom benötigt
Kosten	1	0,09	Relativ teuer
Marktverfügbarkeit	2	0,36	Leicht zu beziehen
Summe gew. Punkte	1,09		
Rang	3		

Kriterium	Reluktanzmotor		Kommentar
	Punkte	Gew. Punkte	
Spezifische Leistung	3	0,34	Hohe Leistung
Spezifisches Moment	2	0,27	Hohes Drehmoment
Zuverlässigkeit	2	0,14	Relativ zuverlässig
Regelgüte	0	0	Aufwendige Regelung
Geräuschpegel	1	0,05	Vergleichsweise leise
Thermomanagement	1	0,02	Guter Überhitzungsschutz
Komplexität	0	0	Drehstrom benötigt
Kosten	0	0	Individualanfertigung – teuer
Marktverfügbarkeit	0	0	Wenige Hersteller
Summe gew. Punkte	0,82		
Rang	4		

Für das Fahrmodul wird somit ein Gleichstrommotor gewählt. Die Gründe liegen in der guten Verfügbarkeit, den niedrigen Preisen, einer einfachen Regelung und niedriger Komplexität für die Subkomponenten. Der Gleichstrommotor soll aus Komplexitätsgründungen mit 48 V betrieben werden und die

oben genannten Kennwerte aufweisen. Auf dem Markt existieren verschiedene Umsetzungen und Anbieter von Gleichstrommotoren. Im Folgenden findet sich ein Überblick über verschiedene erhältliche Motoren.

Golf Cart Motor

Nennleistung [kW]	Maximalleistung [kW]	Nenn Drehmoment [Nm]	Maximaldrehmoment [Nm]	Nenn-drehzahl [1/min]	Gewicht [kg]	Volumen [l]	Preis [EUR]
Ca. 3-5	Ca. 11-15	Ca. 40	k. A.	Ca. 2800	Ca. 28	10	500 - 2000



Vorteile:

- Viele Motoren verfügbar
- Golf-Cart-Getriebe verwendbar
- Hohes Drehmoment

Nachteile:

- Leistungsdaten der Motoren unvollständig
- Schlecht verfügbare Leistungselektronik
- Bindung an Golf-Cart-Getriebe und Achsen
 - Beschränkung der Baugröße
 - Schwer zu beschaffen
- Hoher Preis, hohes Gewicht, großer Platzbedarf

Motor von Fleck Elektroauto

Nennleistung [kW]	Maximalleistung [kW]	Nenn Drehmoment [Nm]	Maximaldrehmoment [Nm]	Nenn-drehzahl [1/min]	Gewicht [kg]	Volumen [l]	Preis [EUR]
12	k. A.	Ca. 90	k. A.	8000	35	k. A.	999



Vorteile:

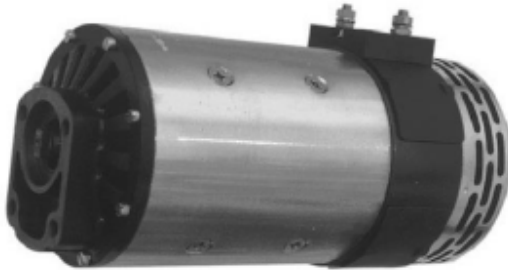
- Hohes Drehmoment
- Getriebe verfügbar
- Antriebswelle verfügbar

Nachteile:

- Leistungsdaten des Motors unvollständig
- Bindung an Zahnwelle
- Hoher Preis, hohes Gewicht, großer Platzbedarf

Hydraulikmotor

Nennleistung [kW]	Maximalleistung [kW]	Nenn Drehmoment [Nm]	Maximaldrehmoment [Nm]	Nenn-drehzahl [1/min]	Gewicht [kg]	Volumen [l]	Preis [EUR]
3	-	-	Ca. 72	2500	12,5	k. A.	480



Vorteile:

- Hohes Drehmoment

Nachteile:

- Kein kontinuierlicher Betrieb möglich

HPM3000B

Nennleistung [kW]	Maximalleistung [kW]	Nenn Drehmoment [Nm]	Maximaldrehmoment [Nm]	Nenn-drehzahl [1/min]	Gewicht [kg]	Volumen [l]	Preis [EUR]
3-5	-	10	25	4400	8	2,03	258



Vorteile:

- Geringes Gewicht, Volumen und Preis
- Motor und alle notwendigen Teile der Leistungselektronik direkt beim Hersteller verfügbar
- Viele Anwendungsbeispiele & Herstellerinformationen
- Eigene Übersetzung durch Riemenscheibe einstellbar
- Simple Achsen möglich

Nachteile:

- Geringes Drehmoment -> hohe Untersetzung nötig

BLT 11-15

Nennleistung [kW]	Maximalleistung [kW]	Nenn Drehmoment [Nm]	Maximaldrehmoment [Nm]	Nenn-drehzahl [1/min]	Gewicht [kg]	Volumen [l]	Preis [EUR]
2,5	5	9,6	55	2500	20	9,74	1200

Vorteile:

- Hohes maximales Drehmoment
- Differentialgetriebe verfügbar



Nachteile:

- Hoher Preis
- Großes Volumen und Gewicht
- Verfügbare Achsbreite nicht ausreichend
- Anschluss an Achse aufwendig

Aus den vorgestellten Motoren wird der HPM3000B aufgrund der leichten Verfügbarkeit der Leistungselektronik, der vielen Anwendungsbeispiele und des niedrigen Preises ausgewählt.

Um das Drehmoment auf die nötigen 375 Nm zu erhöhen, ist eine Untersetzung notwendig, die zwischen Motor und Achse geschaltet wird. Das gewählte Getriebe ist ein Stirnrad-Flachgetriebe mit einer Übersetzung von 28,25:1, wodurch ein ausreichendes Drehmoment an den Rädern sichergestellt werden kann.

- **Einbau Antrieb**

Für die Antriebseinheit wird der Motor direkt an die Eingangswelle des Getriebes angeschlossen. Beide Komponenten werden dann mittig hinter die Hinterachse platziert (siehe Abbildung 55). Die Hinterachse wird durch die Ausgangsseite des Getriebes geschoben und über eine Passfeder formschlüssig mit dem Getriebe verbunden. Über eine Kupplung wird die Antriebswelle jeweils mit Adapterwellen an den Hinterrädern angeschlossen.

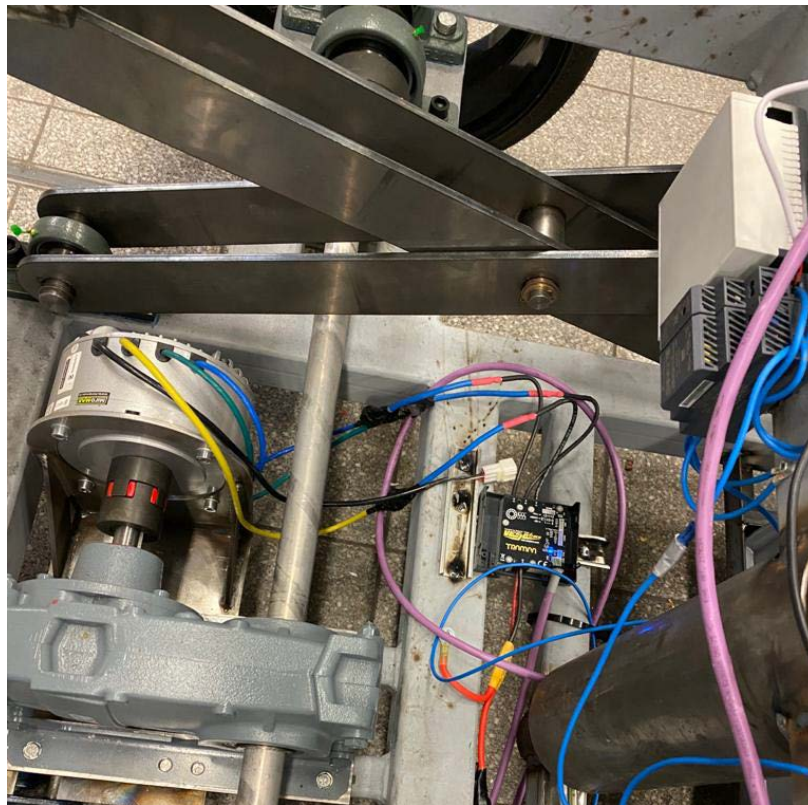


Abbildung 55: Einbauposition des Motors.

2.1.5. Demonstration des Testmodells (AP-6000)

- **Endmontage**

Die Endmontage erfolgt direkt für das gesamte Fahrzeug. So können alle Komponenten passend zueinander ausgerichtet werden. Dies erleichtert die spätere Übergabe, da so vom Wechselprozess weniger Fertigungs- und Montagetoleranzen ausgeglichen werden müssen. Für eine bessere Übersicht wird zunächst die Aufbaureihenfolge geschildert, gefolgt von einer Fotodokumentation des Aufbaus.

Wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, wird zunächst die Fahrinheit aufgebaut. Dafür wird die Antriebseinheit in die Struktur des Fahrmoduls gesetzt und mit den Reifen verbunden (siehe Abbildung 56). Anschließend wird das Hubsystem aufgebaut und dabei in das Fahrmodul montiert. Danach wird die Kabine aufgesetzt (siehe Abbildung 57). Nun ist die Grundstruktur des Fahrzeugs aufgebaut. Anschließend werden die elektronischen Komponenten angeschlossen und in Betrieb genommen (siehe Abbildung 58). An dieser Stelle werden auch die Schnittstellen und die Sensorik eingebaut. Zu diesem Moment verfügt das Fahrzeug über seine Grundfunktionen. Anschließend wird die Adapterplatte des Gehänges aufgesetzt und die entsprechenden Komponenten verbaut.

Nun können die Systeme eingestellt und getestet werden. Nachdem dies abgeschlossen ist, werden die Karosserie, Beleuchtung und die Lenkungseinheit verbaut (siehe Abbildung 59). Der Technologiedemonstrator ist nun vollständig aufgebaut und bereit für die Testfahrt (siehe Abbildung 60).



Abbildung 56: Das Fahrmodul nach Einbau der Antriebseinheit.

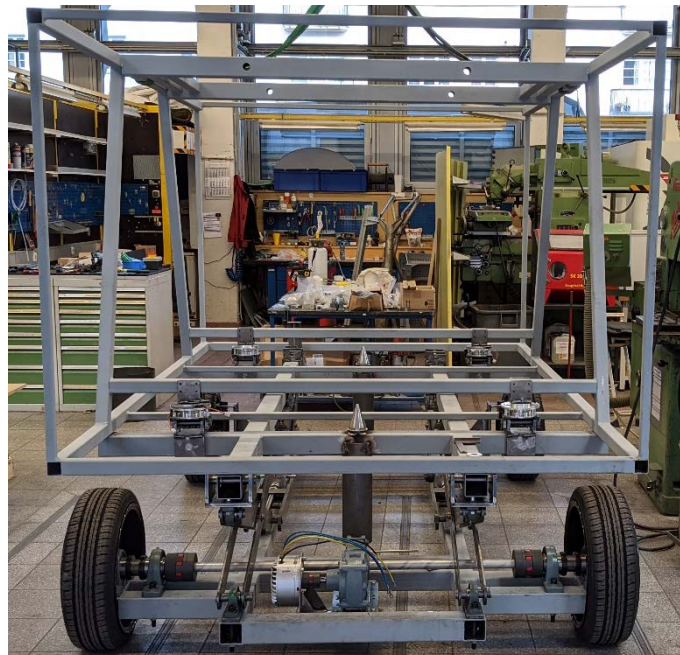


Abbildung 57: Die Kabine ist auf dem Fahrmodul platziert. Das Hubsystem ist eingebaut.

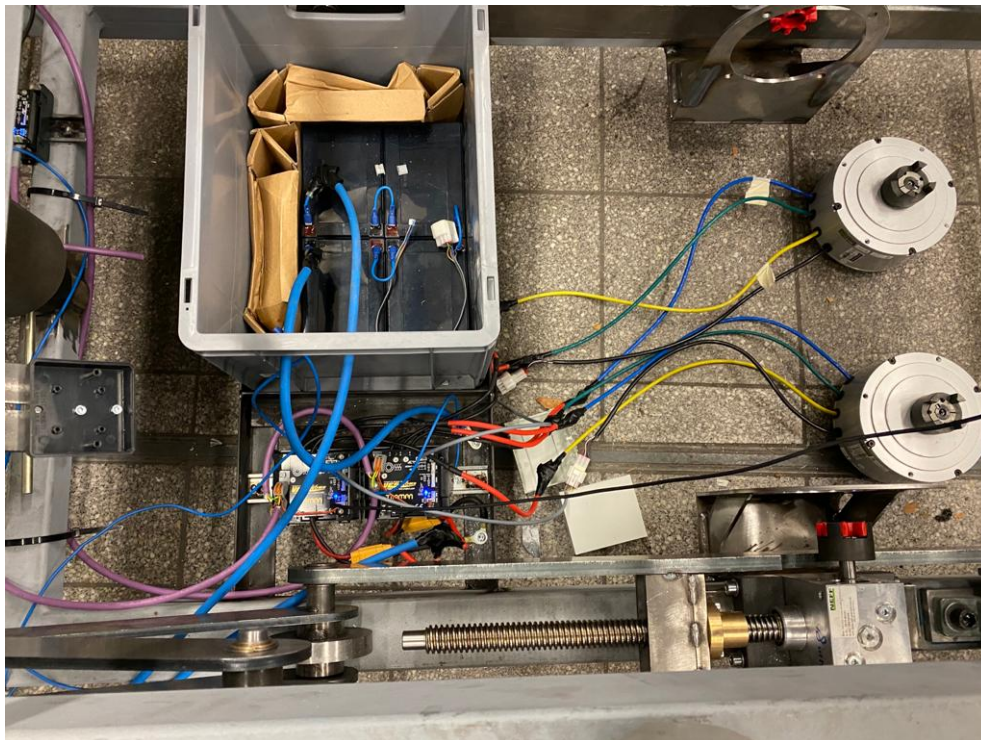


Abbildung 58: Integration der Elektronikkomponenten in das Fahrmodul.



Abbildung 59: Montage der Karosserie.



Abbildung 60: Zum Einstellen der Systeme am fertigen Fahrzeug wird ein Hallendeckenkran als Ersatz für die Seilbahnstation verwendet.

- **Proof-of-Principle im Werkstattumfeld**

Die ersten Funktionstests des Proof-of-Principle wurden im Umfeld der institutseigenen Werkstatt durchgeführt. Die Durchführung im Werkstattumfeld war essentiell, um potentielle Problemquellen bei der Kabinenübergabe bereits früh erkennen und während der Testfahrt am Doppelmayr-Gelände auszuschließen zu können. Zu diesem Zweck wurde ein Hallendeckenkran verwendet, welcher als Ersatz für die Seilbahnstation diente. An den Laufkran wurde das Seilbahngehänge befestigt, welches für das Projekt von der Firma Doppelmayr zur Verfügung gestellt wurde. Zur realistischen Simulation der Kabinenübergabe an der Seilbahnteststation musste der Kran mit einer konstanten Geschwindigkeit von 0,2 m/s verfahren werden, welche der Kabinengeschwindigkeit innerhalb der Seilbahnstation entspricht. Das Testfahrzeug wurde weiterhin so ausgerichtet, dass die Fahrtrichtung parallel zur Bewegungsrichtung des Deckenkranes verläuft. Aufgrund des limitierten Platzes innerhalb der Werkstatt musste die Kabinenübergabe auf einer verkürzten Strecke stattfinden. Für den Wechsel von Bus- auf Seilbahnmodus startete das Fahrzeug somit unmittelbar unter dem Seilbahngehänge. Entsprechend startete das Fahrmodul unmittelbar unter der am Kran hängenden Kabine für den Wechsel von Seilbahn- auf Busmodus, welcher in Abbildung 61 zu sehen ist.



Abbildung 61: Der Proof-of-Principle im Werkstattumfeld. Die Bilderserie zeigt den Wechsel vom Seilbahn- in den Busmodus (von rechts nach links).

Während der Testfahrt im Werkstattumfeld wurden die nachfolgenden Erkenntnisse erarbeitet und Änderungen sowie Erweiterungen am Testfahrzeug umgesetzt:

- Die mehrfachen Zentrierungsstufen am Fahrmodul sowie am Seilbahngehänge führten zur Überbestimmtheit während der Kabinenübergabe, entsprechend wurden die Kegel der zweiten Zentrierungsstufe (siehe Abbildung 8) angepasst, um diese Überbestimmtheit zu reduzieren
- Bereits eine geringe Schiefelage der Kabine reichte aus, dass die Schnittstellen nicht zuverlässig schließen konnten. Diese Schiefelage konnte von dem Sensorsystem nicht unmittelbar erkannt werden. Als Folge wurden zusätzliche Endschalter in die Schnittstellen eingebaut, um den Schließstatus auslesen zu können.
- Die erforderliche kurze Koppelzeit von $< 2s$ führte zum Verkanten der Schließmechanik. Ein Grund dafür ist die limitierte Regelgeschwindigkeit des Schnittstellenmotors. Als Folge wurde eine Kalibriersequenz eingeführt, welche die Schließmechanik sämtlicher Schnittstellen von derselben Nullposition aus starten lässt. Darüber hinaus wurde die Schließmechanik sämtlicher Schnittstellen mit einem Schmiermittel versehen.

- **Testfahrt am Seilbahnteststand**

Die Testfahrt und Technologiedemonstration am Seilbahnteststand fand vom 01.06.2021 bis zum 04.06.2021 auf dem Gelände der Firma Doppelmayr in Wolfurt, Österreich statt. Zu diesem Zweck musste die Teststation entsprechend vorbereitet werden. Innerhalb der Teststation wurde somit eine Schienenführung implementiert, um das Fahrmodul während der Kabinenübergabe auszurichten. Hierdurch reduzierte sich die Anzahl möglicher Freiheitsgrade auf ein Minimum. Abbildung 62 zeigt die Ausrichtung der Führungsschienen am Seilbahnteststand, sowie den upBUS-Technologiedemonstrator mit Seilbahngehänge, Kabine und Fahrmodul.



Abbildung 62: Ausrichtung der Führungsschienen (links). upBUS-Technologiedemonstrator am Seilbahnteststand mit Seilbahngehänge, Kabine und Fahrmodul (rechts).

Nachdem das Testfahrzeug auf die Gegebenheiten der Seilbahnstation abgestimmt wurde, erfolgte die Technologiedemonstration des Wechselprozesses am Seilbahnteststand. Abbildung 63 zeigt den Wechsel von Bus- auf Seilbahnmodus (oben) und den Wechsel von Seilbahn- auf Busmodus (unten) jeweils von rechts nach links. Hierzu positionierte sich das Fahrmodul mit angekoppelter Kabine unter den Seilbahngehängearm, welcher sich mit einer konstanten Geschwindigkeit parallel zur Fahrbahn bewegte. Nach der Ausrichtung und Positionierung des Fahrmoduls wurde die Kabine über die Hubmechanik im Fahrmodul an den Seilbahngehängearm gedrückt und an diesen angekoppelt bzw. vom Fahrmodul entkoppelt. Entsprechend in umgekehrter Reihenfolge verlief der Wechsel vom Seilbahnmodus in den Busmodus.



Abbildung 63: Proof-of-Principle am Seilbahnteststand. Die obere Bilderserie zeigt den Wechsel vom Bus- in den Seilbahnmodus (von rechts nach links). Die untere Bilderserie zeigt den Wechsel vom Seilbahn- in den Busmodus (von rechts nach links).

Allgemein konnte die Technologiedemonstration am Seilbahnteststand als Erfolg gewertet werden. So konnte die vollautomatische Kabinenübergabe unter realen Bedingungen mehrfach demonstriert werden. Nichtsdestotrotz kam es während der Testfahrt zu Störungen während der Kabinenübergabe, welche untenstehend zusammengefasst sind.

- Die Schließmechanik der Schnittstellen funktionierte auch nach den vorherigen Anpassungen nicht zuverlässig. So kam es auch hier vereinzelt zum Problem des Verkantens. Erneutes Schmieren der Mechanik sowie das Abfeilen von hervorstehenden Ecken, konnte nur bedingt Abhilfe schaffen. Hierbei bereiteten insbesondere die Schnittstellen am oberen Teil der Kabine Probleme, welche für die Verbindung zum Seilbahngehängearm verantwortlich sind. Als ein wesentlicher Grund hierfür konnten die hohen Lasten identifiziert werden, die im Seilbahnmodus (d.h. Kabine hängt am Seilbahngehängearm) auf die Schließmechanik wirkten.
- Das Sensorsystem funktionierte nicht zuverlässig während der Testfahrt. Als Hauptgrund wurden hierfür Störgeräusche aus der Umgebung identifiziert. Insbesondere durch Störgeräusche einer nahegelegenen Baustelle kam es vermehrt zu Störungen in der ultraschall-basierten Messsensorik. Dieses Problem blieb bei der Testfahrt im Werkstattumfeld vorerst unentdeckt bedingt durch eine vernachlässigbare Geräuschkulisse.

2.1.6. Zusammenfassung

Im Vorhaben upBUS wurde ein Technologiedemonstrator für eine Anwendung der nahtlosen Mobilität aufgebaut und getestet. Bei der nahtlosen Mobilität werden zwei unterschiedliche Verkehrsträger so miteinander verbunden, dass sie für die Fahrgäste wie ein einheitliches System erscheinen. Beim upBUS-Vorhaben wird dies über den Wechsel der Fahrgastkabine zwischen zwei Verkehrssystemen vollzogen. Der Technologiedemonstrator ist in der Lage, im laufenden Betrieb zwischen einer Fahrplattform

für eine Straßenanwendung und einem Seilbahngehänge – und umgekehrt – zu wechseln. Auf der Fahrplattform agiert das Fahrzeug als Minibus und kann in Bereichen eingesetzt werden, die für urbane Seilbahnen schwer zugänglich sind. An der Seilbahn unterscheidet sich die Fahrgastkabine nicht von gewöhnlichen Seilbahnkabinen, wodurch die großen Vorteile der Seilbahn – hoher Takt, niedrige Betriebskosten, umweltfreundlicher Betrieb – voll zur Geltung kommen. Ein solches System, bei dem zwei Verkehrsmittel nahtlos miteinander verbunden werden, ist bisher nicht existent. Der Technologiedemonstrator von upBUS zielt daher darauf ab, die technische Machbarkeit dieser Technologie erstmals zu zeigen. Die Komplexität der Demonstration wurde reduziert, um die technische Machbarkeit im Rahmen dieses Vorhabens darstellen zu können. Die Kopplung im laufenden Betrieb wird nur in Fahrtrichtung gesteuert. Quer zur Fahrtrichtung wird das Fahrzeug über eine Schiene geführt. Aus diesem Grund verfügt das Fahrzeug auch nur über eine passive Lenkung. Es kann ohne Schiene nur geradeaus fahren. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt lediglich wenige Kilometer pro Stunde und die Batteriereichweite ist auf wenige Minuten Betriebszeit begrenzt. Die Kabine selbst ist nur ein Technologieträger für Sensorik und Schnittstelle und kann nicht von Personen betreten werden. Diese Vereinfachungen reduzieren die Komplexität beim Aufbau des Fahrzeugs, haben aber nur geringe Auswirkungen auf die Erkenntnisse aus der ersten Demonstration der technischen Machbarkeit. Zusätzlich können mögliche Fehler aus der Komplexität des Fahrzeugs vermieden werden.

Für den Technologiedemonstrator wurden auf Basis der oben genannten Anforderungen ein Fahrmodul und einen Kabinendummy entwickelt. Die Größe richtet sich nach einem Seilbahnteststand, welcher von Seilbahnhersteller „Doppelmayr“ für den Test zur Verfügung gestellt wurde. Das Fahrzeug wurde daher in 1:1-Größe gebaut. Für das Fahrmodul wurden Gleichstrom-Elektromotoren ausgewählt, die sowohl für den Antrieb als auch für das Hubsystem eingesetzt werden. Ein Hubsystem wird benötigt, um die Kabinen in die Seilbahn zu heben bzw. sie aus dieser herauszuheben. Aus Kosten- und Komplexitätsgründen wurde das Hubsystem mechanisch als Schere aufgebaut. Für den Antrieb der Scherenarme wurden die gleichen Elektromotoren verwendet. So konnte auf die gleichen Ansteuerungsprotokolle zurückgegriffen werden. Die Sensorik basiert auf einem Active-Target-System. Dies bedeutet, dass ein Sender beim passiven Kopplungspartner (Unterseite der Kabine oder am Gehänge) ein Signal aussendet, welches von mehreren Empfängern auf der aktiven Kopplungsseite (Fahrmodul oder Oberseite der Kabine) empfangen wird. Parallel wird ein Zeitstempel des Sendesignals über ein Funk-Can-Netzwerk übertragen. Die Logikeinheit kann nun über die Auswertung der verschiedenen Lauflängen an den einzelnen Empfängern mithilfe des Triangulationsprinzips die Position des Senders exakt bestimmen. So ist eine Genauigkeit im Millimeterbereich erzielt worden. Für die Kopplung wurden Schnittstellen aus dem Raumfahrtprojekt „iBOSS“ verwendet, die für die upBUS-Anwendung angepasst wurden. Primärziel war dabei die Kostenreduktion und eine Erhöhung der Kopplungstoleranz. In jeder Kopplungsebene wurden vier Schnittstellen verwendet. Neben der mechanischen Kopplung haben die Schnittstellen auch eine Strom- und Datenverbindung bereitgestellt, sodass die Kabine über das Fahrmodul versorgt werden konnte.

Die grundlegende Funktionsfähigkeit des Technologiedemonstrators wurde in einem ersten Schritt in den Werkstätten der RWTH Aachen gezeigt. Dafür hat ein Deckenkran das Verhalten der Seilbahnstation simuliert. In diesem begrenzten Rahmen konnte der Proof-of-Principle gezeigt werden. Abschließend wurde die Testfahrt an der Seilbahnstation vom Projektpartner Doppelmayr wiederholt. Auch in

dieser, einer realen Anwendung angenäherten, Umgebung konnte der Wechselprozess erfolgreich demonstriert werden.

Die Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten haben die Umsetzbarkeit der nahtlosen Mobilität gezeigt. Sie haben bestätigt, dass das Konzept von upBUS ein großes Potential für die Weiterentwicklung der urbanen Mobilität bietet und ein relevanter Baustein für eine erfolgreiche Verkehrswende sein kann.

2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die detaillierte Aufschlüsselung des zahlenmäßigen Nachweises ist dem Verwendungsnachweis zu entnehmen. Tabelle 1 zeigt die Hauptpositionen aus dem Gesamtfinanzierungsplan und die getätigten Ausgaben für das upBUS-Vorhaben.

Tabelle 1: Hauptpositionen des zahlenmäßigen Nachweises für das upBUS-Vorhaben

	Bewilligung [€]	Ausgaben [€]
Personalausgaben	289.989,30	290.705,71
Mieten und Rechnerkosten	3.598,66	4.903,00
Vergabe von Aufträgen	65.055,20	67.932,00
Verbrauchsmaterialien	30.353,27	25.101,00
Reisekosten	9.614,47	11.983,00
Summe	399.327,31	399.908,30

2.3. Notwendigkeit der geleisteten Arbeit

Zur Bearbeitung aller konzipierten Arbeitspakete wurden zwei wissenschaftliche Mitarbeiter in Vollzeit und mehrere studentische Hilfskräfte mit insgesamt 43 h/Woche (umgerechnet auf die Projektlaufzeit) eingesetzt. Dazu wurden für die Konstruktion und den Aufbau der Hardware ein Technischer Zeichner (3 PM) und ein Mechaniker (6 PM) benötigt. Für die Aufgaben des Projektmanagements und der Beratung wurde die Projektleitung mit 5-8 % des monatlichen Zeitaufwands aus der Grundausstattung der RWTH Aachen finanziert.

Der Umfang der getätigten Arbeiten war mit Bezug auf die definierten Arbeitspakete angemessen. Die durchzuführenden Aufgaben waren zusammenhängend und nach dem Bottom-Up-Prinzip geplant. Sie wurden im Rahmen des vorab definierten Zeitplans ohne signifikante Leerzeiten oder Verzögerungen durchgeführt und führten im wissenschaftlichen Sinne zu aussagekräftigen und verwertbaren Ergebnissen. Die eingesetzte Menge an Personal zur Bearbeitung der Aufgabe war notwendig.

Alle Partner stellten dem Vorhaben Sachmittel und Infrastruktur zur Verfügung. Hierbei handelt es sich beispielsweise um Laborräume inklusive Mess- und Testeinrichtungen, Werkstätten und Bearbeitungsmaschinen sowie eingerichtete Arbeitsplätze.

2.4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Wirtschaftlicher Nutzen

Die Projektarbeiten an der RWTH Aachen innerhalb des geplanten Vorhabens sind im Bereich der anwendungsorientierten Grundlagenforschung anzusiedeln. Daher sind unmittelbare wirtschaftliche Auswirkungen nicht erkennbar. Neue und/oder ergänzende marktorientierte Technologie-Entwicklungen können jedoch durch abgeleitete Grundideen und Erkenntnisse des Projekts angestoßen und gefördert werden. Transmodularer Verkehr existiert bisher nicht. Mit upBUS wird auf diesem Gebiet somit der erste Schritt getan. upBUS kann zusätzlich auch als Modellprojekt für transmodularen Verkehr gesehen werden. Unternehmen wie Airbus, Audi oder Siemens haben Konzepte für diesen neuartigen Verkehr vorgestellt, verfügen aber nach Kenntnis der Antragssteller über keine geeignete Schnittstelle. Eine erfolgreiche Demonstration von upBUS würde somit als First Mover ein ganz neues Feld mit bahnbrechenden Potentialen eröffnen. Neben der Kopplung zwischen Seilbahn und Bus ist genauso eine Kopplung zwischen Bus und Zug oder Automobil und Flugzeug möglich. Eine Fahrgastzelle wird mit beliebigen anderen Systemen koppeln können. Dabei muss diese Fahrgastzelle nicht unbedingt als Bus ausgelegt sein. Eine Ausführung als mobiles Büro ist ebenso denkbar. Für das Modellprojekt als Kopplung zwischen Seilbahn und Bus haben sich die Antragssteller entschieden, weil in Seilbahnsystemen ein enormes Potential für den öffentlichen Nahverkehr liegt und insbesondere Seilbahnen durch die Transformation zum transmodularen Verkehr profitieren. Ferner kann das Hybridkonzept für den Transport von Waren eingesetzt werden. Dies kann ein wesentlicher Vorteil sein, wenn diese beim Transport topographische Hindernisse überwinden müssen. Im urbanen Bereich ist ein On-Demand-System basierend auf upBUS denkbar. Im On-Demand-System verkehren die Hybridvehikel als autonome Taxis, die bei einem Aufruf über eine Smartphone-App die Fahrgäste abholen und zum Ziel bringen. Je nach Verkehrs- und Stadtlage können die Taxen auf der 0- oder +1-Ebene verkehren. Ein Computersystem berechnet dabei die optimale Verkehrsrouten. Die Stadt stellt die notwendige Seilbahninfrastruktur zur Verfügung und erhebt eine Gebühr für die Benutzung der Seilbahnstrecken.

Während der Projektlaufzeit wurde die upBUS UG (haftungsbeschränkt) als Ausgründung aus der RWTH Aachen gegründet. Der Hintergrund dieser Ausgründung lag in einer Patentanmeldung. Die Antragssteller haben der RWTH Aachen den Wechselprozess als Erfindung gemeldet. Die Patentabteilung der RWTH Aachen hat sich aufgrund der langen Entwicklungszeit gegen eine Anmeldung entschieden und die Erfindung den Antragsstellern frei gegeben. Falls die upBUS-Idee in Zukunft bis zur Marktreife weiterentwickelt und als Produkt im ÖPNV angeboten werden sollte, ist zu irgendeinem Zeitpunkt der Wechsel der Forschung und Entwicklung in den privaten Bereich nötig. Für diese Idee wurde die upBUS UG zu diesem frühen Zeitpunkt gegründet. Das Patent muss dann nicht später aufwendig in ein Unternehmen eingelegt werden. Die upBUS UG dient seit ihrer Gründung daher lediglich als Tresor für das Patent und verfolgt bis jetzt keine wirtschaftlichen Ziele.

Wissenschaftlicher / Technischer Nutzen

Der Fokus der Arbeiten an der RWTH Aachen lag in der Weiterentwicklung der iBOSS-Schnittstelle für die terrestrische Anwendung und dem Aufbau der Kopplungssensorik. Durch die Implementierung dieser beiden Kernkomponenten in den Technolgie Demonstrator konnte erstmals der nahtlose Wechsel zwischen Bus und Seilbahn demonstriert werden.

Ein weiterer Schwerpunkt der Verwertung bestand in der Heranbildung von wissenschaftlichem Nachwuchs. So wurden studentische Hilfskräfte und wissenschaftliche Mitarbeiter in beachtlichem Umfang in die Durchführung des upBUS-Projektes einbezogen und erhielten die Möglichkeit zur Anfertigung von Projekt-/Bachelor-/Master- und Doktorarbeiten.

Ein zusätzlicher Schwerpunkt lag auf der Vermarktung und Bekanntmachung der Idee. Den Auftakt bildete die Vorstellung von upBUS auf der Internationalen Automobilausstellung (IAA) 2019 in Frankfurt. Im Rahmen der Messe wurde die Idee von upBUS erstmals der Öffentlichkeit präsentiert. Kontakte zu Automobilzulieferern und Entwicklern von automatisierten Minibussen konnten aufgebaut werden, die im weiteren Verlauf des Projekts von positivem Nutzen waren. Erstmals wurde über die upBUS-Idee von der Deutschen Welle international berichtet. Die Öffentlichkeitsarbeit im weiteren Verlauf des Projekts hat einen hohen Stellenwert eingenommen, da nur die Besprechung solch einer Idee in der Öffentlichkeit die Chancen auf eine zukünftige Umsetzung ermöglicht. Aus diesem Grund wurde von den Antragsstellern gezielt das Gespräch mit regionalen und überregionalen Zeitungen, Radioanbietern und Fernsehsendern gesucht. Im Laufe der Projektlaufzeit sind eine Vielfalt von Artikeln, Radio- und Fernsehbeiträgen erschienen. Durch das Bekanntwerden von upBUS konnten die Antragssteller mit vielen deutschen, aber auch internationalen Kommunen ins Gespräch kommen, die sich für die Umsetzung einer upBUS-Strecke interessieren.

Auf den Ergebnissen des upBUS-Projekts wurde die Förderung eines Nachfolgeprojekts bewilligt. Im upBUS-KI-Projekt sollen sowohl die Schnittstelle als auch der Wechselprozess weiterentwickelt werden. In die Schnittstelle soll die entwickelte Sensorik implementiert werden. Dazu soll sie weiter an die terrestrischen und automobilen Anforderungen angepasst werden. Der Wechselprozess soll mithilfe eines KI-basierten Ansatzes robuster gestaltet werden. Dazu wird eine virtuelle Seilbahnstation aufgebaut, an der eine KI den Wechselprozess trainiert. Anschließend werden die Erkenntnisse in einen neuen, weiterhin vereinfachten Demonstrator überführt.

2.5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind keine Ergebnisse von Dritten bezüglich der durchgeführten Arbeiten bekannt.

2.6. Veröffentlichung der Ergebnisse

Veröffentlichungen, Präsentationen und Messen

- [1] 68. Internationale Automobil Ausstellung, Frankfurt am Main, September 2019
- [2] Meinert, T.; Berndt, D.; Bierbüsse, D.; Heidebrecht, E.; Chaves-Vargas, M.; Negra, R.; Schröder, K.-U. (2020): upBUS - Mögliche Anwendungen eines transmodularen Busses im Ruhrgebiet. In: Tagungsband zum Symposium Intelligente Mobilität, Hannover, S. 26-27
- [3] Meinert, T.; Chaves-Vargas, M.; Bierbüsse, D.; Heidebrecht, E.; Negra, R.; Schröder, K.-U. (2020): upBUS: Electrical, autonomous driving, transmodular bus for public transport systems. In: FISITA Web Congress 2020. F2020-DGT-012

- [4] Bierbüsse, D.; Heidebrecht, E.; Meinert, T.; Chaves-Vargas, M.; Negra, R.; Schröder, K.-U. (2020): Positioning Sensor System for Transmodular Mobility. In: FISITA Web Congress 2020. F2020-ACM-042
- [5] Meinert, T.; Berndt, D.; Bierbüsse, D.; Heidebrecht, E.; Chaves-Vargas, M.; Negra, R.; Schröder, K.-U. (2021): upBUS – Nahtlose Mobilität zwischen Bus und Seilbahn am Beispiel des Düsseldorfer Medienhafens. In: Proof, H. (Hrsg.) Making Connected Mobility Work. Springer Gabler, Wiesbaden. S. 295-312. https://doi.org/10.1007/978-3-658-32266-3_17

Studentische Arbeiten

- [1] Schrenker, C.: Konzeptentwicklung, energetische Analyse, sowie Konstruktion einer 35 Personenkabine des upBUS-Vehikels als elektrisch angetriebenes Hybridvehikel für eine kontinuierliche Mobilität in der bodengebundenen und oberirdischen Verkehrsebene, RWTH Aachen, Aachen, Juli 2019
- [2] Alboldt, D.: Entwicklung und Auslegung einer Hochgeschwindigkeitsseilbahn, RWTH Aachen, Aachen, Januar 2020
- [3] Rathmes, T.: Erstellung eines Businessplans für ein neues Mobilitätskonzept - upBUS kombiniert die Seilbahn und das autonome Shuttle, RWTH Aachen, Aachen, Januar 2020
- [4] Jerg, J. F.; Knieps, T.; Piep, J.; Renzelmann, T.; Schwender, L.: Entwicklung eines Leichtbau-Designs einer Fahrgastzelle und Seilbahnaufhängung für zukunftsfähige, multi-hybride Mobilitätssysteme, Hochschule Bremen, Bremen, Februar 2021
- [5] Groß, A.: Konzeptentwicklung und Konstruktion eines automatisierten, elektrisch angetriebenen Fahrmoduls im upBUS-Projekt, RWTH Aachen, Aachen, März 2021

3. Literatur

- [1] Wenzel, W. u.a. (2017): Mechanical, thermal, data and power transfer types for robotic space interface for orbital and planetary missions – a technical review. In: Proceedings of the 14th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation (ASTRA 2017), Leiden, Niederlande.
- [2] Doppelmayr Seilbahnen GmbH. Die Wälderbahn der Zukunft – Doppelmayr City Cable Car. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=XipANwcVnRI> (Zugriff am 04.03.2019).

-
- [3] INGENIEUR.de. In der Schweiz fahren erstmals Elektrobusse ohne Fahrer. Juni, 2016. URL: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/verkehr/in-schweiz-fahren-erstmal-elektrobusse-fahrer> (Zugriff am 04.03.2019).
- [4] S. Escalé. Les navettes autonomes de Navya débarquent à Lyon. Itespresso. September, 2016. URL: http://www.itespresso.fr/navya-navettes-autonomes-electriques-lyon-137312.html?inf_by=5a394c48671db880138b4820 (Zugriff am 04.03.2019).
- [5] H. Monheim u.a. Urbane Seilbahnen – Moderne Seilbahnsysteme eröffnen neue Wege für die Mobilität in unseren Städten. KSV Verlag. 2010.
- [6] e.Go Mover: Produktinformationen, URL: https://www.e-go-moove.com/site/assets/files/1003/ego_mover_katalog_de.pdf (Zugriff am 04.03.2019)
- [7] NVIDIA Drive-Plattform, URL: <https://www.nvidia.com/de-de/self-driving-cars/drive-platform/> (Zugriff am 04.03.2019)
- [8] CW radar, URL: <http://www.radartutorial.eu/02.basics/Continuous%20Wave%20Radar.en.html> (Zugriff am 26.11.2021)
- [9] Sreejith Nair, Realization of a coherent low noise receiver module for the integration in an imaging Ka Band MIMO Radar, Master thesis, HFE, RWTH Aachen University (2017)
- [10] M. Brachvogel, Analysis and design of a multiple frequency continuous wave radar, Master thesis, HFE, RWTH Aachen University (2016)

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN --	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Veröffentlichung (Publikation)
3. Titel upBUS - Mögliche Anwendungen eines transmodularen Busses im Ruhrgebiet	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Meinert, Tobias Berndt, Dominik Bierbüsse, David Heidebrecht, Eduard Chaves Vargas, Mauricio Negra, Renato Schröder, Kai-Uwe	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.08.2021
	6. Veröffentlichungsdatum 20.02.2020
	7. Form der Publikation Fachtagung
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) RWTH Aachen, Institut für Strukturmechanik und Leichtbau (SLA), Wüllnerstraße 7, 52062 Aachen, Deutschland RWTH Aachen, Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik (HFE), Kopernikusstraße 16, 52074 Aachen, Deutschland TU Dortmund, August-Schmidt-Straße 1, 44227 Dortmund, Deutschland	9. Ber.-Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 50RP1980
	11. Seitenzahl 2
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) BMWi über das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Königswinterer Straße 522-524 53227 Bonn Deutschland	13. Literaturangaben 4
	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 0
16. DOI (Digital Object Identifier) --	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Symposium intelligente Mobilität 2020, Hannover, 20.02.2020	
18. Kurzfassung Weltweit stehen Regionen aufgrund der Verstädterung und der zunehmenden Zahl von Autos am Rande eines Kollapses. Um die überfüllten Straßen zu entlasten, muss der Luftraum über dem Boden für die urbane Mobilität geöffnet werden. Flugtaxis werden wegen ihres hohen Energieverbrauchs keine Lösung für die genannten Stauprobleme sein und würden den Individualverkehr eher vom Boden in den Luftraum verlagern. Daher wird nur eine Weiterentwicklung des öffentlichen Verkehrs die aktuellen und zukünftigen Probleme lösen können. upBUS bietet die Lösung, indem es zwei unterschiedliche Verkehrssysteme, urbane Seilbahnen und autonome Elektrobusse, miteinander kombiniert. Seilbahnen sind eine ideale Lösung, um den Luftraum über dem Straßenniveau zu nutzen. Sie sind bekannt für ihre niedrigen Investitions- und Betriebskosten, ihre kurzen Bauzeiten, ihren minimalen Energiebedarf sowie ihre enorme Flexibilität bei der Streckenführung. Seilbahnen sind jedoch durch das Problem der Netzintegration gekennzeichnet, da die Stationen nicht an jedem beliebigen Ort positioniert werden können. Der Ansatz von upBUS besteht darin, urbane Seilbahnen und autonome Minibusse zu einem modularen System zu verschmelzen. Am Boden agieren die Fahrzeuge als autonome Elektrobusse. In einer Seilbahnstation verwandeln sie sich im Betrieb vollautomatisch in eine Seilbahnkabine. Mit dem modularen Ansatz von upBUS erfahren städtische Verkehrssysteme einen enormen Flexibilitätsgewinn. Vor allem die Stadt Essen bietet vielversprechende Potenziale. Wie alle deutschen Großstädte hat auch Essen mit alltäglichen Kapazitätsengpässen und verkehrsbedingten Umweltbelastungen zu kämpfen. upBUS könnte zu einer Veränderung der bestehenden Verkehrsmuster beitragen, wofür es Beispiele gibt.	
19. Schlagwörter transmodularer Verkehr, Seilbahn, Minibus, automatisiertes Fahren	
20. Verlag Data4UrbanMobility Forschungsgruppe	21. Preis --

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 1623831-5

Document control sheet

1. ISBN or ISSN --	2. type of document (e.g. report, publication) Veröffentlichung (Publikation)	
3. title upBUS - Possible application of a transmodular bus in the Ruhr area		
4. author(s) (family name, first name(s)) Meinert, Tobias Berndt, Dominik Bierbüsse, David Heidebrecht, Eduard Chaves Vargas, Mauricio Negra, Renato Schröder, Kai-Uwe	5. end of project 31.08.2021	
	6. publication date 20.02.2020	
	7. form of publication Fachtagung	
8. performing organization(s) name, address RWTH Aachen University, Institute of Structural Mechanics and Lightweight Design, Wüllnerstraße 7, 52062 Aachen, Germany RWTH Aachen University, Chair of High Frequency Electronics, Kopernikusstraße 16, 52074 Aachen, Germany TU Dortmund, August-Schmidt-Straße 1, 44227 Dortmund, Germany	9. originators report no.	
	10. reference no. 50RP1980	
	11. no. of pages 2	
	13. no. of references 4	
12. sponsoring agency (name, address) BMW i via German Aerospace Center Königswinterer Straße 522-524 53227 Bonn Germany	14. no. of tables 0	
	15. no. of figures 0	
	16. DOI (Digital Object Identifier) --	
17. presented at (title, place, date) Symposium intelligente Mobilität 2020, Hannover, 20.02.2020		
18. abstract Worldwide, regions are on the verge of collapse due to urbanization and an increasing number of cars. In order to relieve overcrowded streets, the airspace above the ground must be opened for urban mobility. Aircraft taxis won't be the solution to the aforementioned traffic congestion problems because of their high energy consumption and they would rather shift individual traffic from the ground to the airspace. Therefore, only a further development of public transport will be able to solve current and future problems. upBUS offers the solution by combining two different transport systems, urban ropeways and autonomous electric busses. Ropeways are an ideal solution to use the airspace above the street level. They are known for their low investment and operating costs, their short construction times, minimal energy requirements, as well as enormous routing flexibility. But ropeways are characterized by the problem of network integration, as the stations cannot be positioned in any necessary place. The upBUS approach is to merge urban ropeways and autonomous mini buses into a modular system. On the ground level the vehicles act as autonomous electric buses. In a ropeway station they transform fully automatically during operation into a ropeway cabin. With upBUS' modular approach urban transport systems gain a huge benefit in flexibility. In particular, the city of Essen offers promising potential areas. Like all major German cities, Essen must deal with everyday capacity bottlenecks and traffic-induced environmental pollution. upBUS could potentially contribute to a change in existing transportation patterns for which examples are given.		
19. keywords transmodular transport, ropeway, minibus, automated driving		
20. publisher Data4UrbanMobility Forschungsgruppe	21. price --	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 1623662-7

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN --	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Veröffentlichung (Publikation)
3. Titel UPBUS - ELEKTRISCHER, AUTOMATISCH FAHRENDER, TRANSMODULARER BUS FÜR ÖFFENTLICHE VERKEHRSSYSTEME	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Meinert, Tobias Chaves Vargas, Mauricio Bierbüsse, David Heidebrecht, Eduard Negra, Renato Schröder, Kai-Uwe	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.08.2021 6. Veröffentlichungsdatum 04.12.2020 7. Form der Publikation Fachtagung
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) RWTH Aachen, Institut für Strukturmechanik und Leichtbau (SLA), Wüllnerstraße 7, 52062 Aachen, Deutschland RWTH Aachen, Lehrstuhl für Hochfrequenzelektronik, Kopernikusstraße 16, 52074 Aachen, Deutschland	9. Ber.-Nr. Durchführende Institution 10. Förderkennzeichen 50RP1980 11. Seitenzahl 9
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) BMWi über das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Königswinterer Straße 522-524 53227 Bonn Deutschland	13. Literaturangaben 29 14. Tabellen 0 15. Abbildungen 15
16. DOI (Digital Object Identifier) --	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) FISITA Web Congress 2020, 24.11.2020	
18. Kurzfassung Weltweit stehen viele Regionen aufgrund der fortschreitenden Verstädterung und der zunehmenden Zahl von Autos am Rande des Kollapses. Um die überfüllten Straßen zu entlasten, muss der Luftraum über dem Boden für die urbane Mobilität geöffnet werden. upBUS bietet die Lösung, indem es die Entwicklung von zwei verschiedenen Verkehrssystemen, städtischen Seilbahnen und autonomen Elektrobussen, kombiniert. Seilbahnsysteme sind eine ideale Lösung, um den Luftraum oberhalb der Straße zu nutzen. Auf der anderen Seite sind Seilbahnen durch das Problem der Netzintegration gekennzeichnet, da die Stationen nicht an jedem beliebigen Ort platziert werden können. Der upBUS-Ansatz besteht darin, urbane Seilbahnen und autonome Minibusse in einem modularen System zu vereinen. Am Boden fungieren die Fahrzeuge als autonome Elektrobusse. In einer Seilbahnstation verwandeln sie sich in eine Seilbahnkabine. Dieser Umwandlungsprozess läuft im Betrieb vollautomatisch ab, ohne dass die Fahrgäste zwischen den verschiedenen Transportsystemen wechseln müssen. Das upBUS-Fahrzeug besteht aus drei Teilen. Die elektrische Antriebstechnik und alle Sensoren für das autonome Fahren sind in ein Skateboard integriert. Die Seilbahn bietet eine Aufhängung mit einer Verbindungsplatte. Der dritte Teil, die Fahrgastkabine, kann entweder an die Antriebseinheit oder an die Anschlussplatte der Seilbahnaufhängung angeschlossen werden. Auf diese Weise profitiert upBUS von der Flexibilität von Bussen in Kombination mit dem hohen Fahrgastaufkommen von städtischen Seilbahnen. Mit dem upBUS-Konzept sind urbane Seilbahnen keine Insellösung mehr und können einfach in das öffentliche Verkehrssystem integriert werden. In diesem Beitrag werden die Vorteile dieses neuen Mobilitätssystems im Detail erläutert und die technischen Teile des Transformationsprozesses anhand eines Prototyps beschrieben, der die Schlüsseltechnologie im November 2020 demonstriert.	
19. Schlagwörter Seilbahn, intelligente Mobilität, modulare Mobilität, transmodular, öffentlicher Verkehr, Kleinbus, autonomes Fahren	
20. Verlag Fédération Internationale des Sociétés d'Ingénieurs des Techniques de l'Automobile (FISITA)	21. Preis --

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 1624077-4

Document control sheet

1. ISBN or ISSN --	2. type of document (e.g. report, publication) Veröffentlichung (Publikation)	
3. title UPBUS - ELECTRICAL, AUTONOMOUS DRIVING, TRANSMODULAR BUS FOR PUBLIC TRANSPORT SYSTEMS		
4. author(s) (family name, first name(s)) Meinert, Tobias Chaves Vargas, Mauricio Bierbüsse, David Heidebrecht, Eduard Negra, Renato Schröder, Kai-Uwe	5. end of project 31.08.2021	
	6. publication date 04.12.2020	
	7. form of publication Fachtagung	
8. performing organization(s) name, address RWTH Aachen University, Institute of Structural Mechanics and Lightweight Design (SLA), Wüllnerstraße 7, 52062 Aachen, Germany RWTH Aachen University, Chair of High Frequency Electronics, Kopernikusstraße 16, 52074 Aachen, Germany	9. originators report no.	
	10. reference no. 50RP1980	
	11. no. of pages 9	
12. sponsoring agency (name, address) BMWi via German Aerospace Center Königswinterer Straße 522-624 53227 Bonn Germany	13. no. of references 29	
	14. no. of tables 0	
	15. no. of figures 15	
16. DOI (Digital Object Identifier) --		
17. presented at (title, place, date) FISITA Web Congress 2020, 24.11.2020		
18. abstract Worldwide, many regions are on the brink of collapse due to ongoing urbanisation and the increasing number of cars. To relieve the congested roads, the airspace above the ground needs to be opened up for urban mobility. upBUS provides the solution by combining the development of two different transport systems, urban cable cars and autonomous electric buses. Cable car systems are an ideal solution to use the airspace above the road. On the other hand, cable cars are characterised by the problem of network integration, as the stations cannot be placed anywhere. The upBUS approach is to combine urban cable cars and autonomous minibuses in a modular system. On the ground, the vehicles function as autonomous electric buses. At a cable car station, they transform into a cable car cabin. This transformation process is fully automatic during operation, without passengers having to switch between the different transport systems. The upBUS vehicle consists of three parts. The electric drive technology and all sensors for autonomous driving are integrated into a skateboard. The cable car provides a suspension with a connecting plate. The third part, the passenger cabin, can be connected either to the drive unit or to the connection plate of the cableway suspension. In this way, upBUS benefits from the flexibility of buses in combination with the high passenger volume of urban cable cars. With the upBUS concept, urban cable cars are no longer an isolated solution and can be easily integrated into the public transport system. This paper explains the benefits of this new mobility system in detail and describes the technical parts of the transformation process using a prototype demonstrating the key technology in November 2020.		
19. keywords ropeway, smart mobility, modular mobility, transmодular, public transport, minibus, autonomous driving		
20. publisher Fédération Internationale des Sociétés d'Ingénieurs des Techniques de l'Automobile (FISITA)	21. price --	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 1624099-2

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN --	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Veröffentlichung (Publikation)	
3. Titel POSITIONIERUNGSSENSORSYSTEM FÜR TRANSMODULARE MOBILITÄT		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Bierbüsse, David Heidebrecht, Eduard Meinert, Tobias Chaves Vargas, Mauricio Negra, Renato Schröder, Kai-Uwe	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.08.2021	
	6. Veröffentlichungsdatum 04.12.2020	
	7. Form der Publikation Fachtagung	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) RWTH Aachen, Lehrstuhl für Höchstfrequenzelektronik (HFE), Kopernikusstraße 16, 52074 Aachen, Deutschland RWTH Aachen, Institut für Strukturmechanik und Leichtbau (SLA), Wüllnerstraße 7, 52062 Aachen, Deutschland	9. Ber.-Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen 50RP1980	
	11. Seitenzahl 7	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) BMW über das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Königswinterer Straße 522-524 53227 Bonn Deutschland	13. Literaturangaben 29	
	14. Tabellen 0	
	15. Abbildungen 10	
16. DOI (Digital Object Identifier) --		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) FISITA Web Congress 2020, 24.11.2020		
18. Kurzfassung In diesem Beitrag wird ein neues Konzept eines Positionierungssensorsystems für transmodulare Mobilität vorgestellt, das ohne komplexe Bild- und Signalverarbeitungsfunktionen auskommt. Es basiert auf einem Sonarsystemansatz, bei dem Sende- und Empfangsknoten getrennt sind. Dabei kann der Sendeknoten als Referenzpunkt auf dem Zielobjekt (z.B. Passagierkabine) dienen und der Empfangsknoten auf dem Ortungsobjekt (z.B. Transportmittel) platziert werden. Dabei werden beide Objekte in einem lokalen Bezugssystem zueinander in Beziehung gesetzt. Das Sensorsystem wird um eine zusätzliche Funkstrecke zur Synchronisation erweitert. Es kann eine Reichweite von mehr als 5 Metern mit einer maximalen Positionsauflösung im Millimeterbereich abdecken.		
19. Schlagwörter Ortungssystem, Ultraschall, transmodulare Mobilität		
20. Verlag Fédération Internationale des Sociétés d'Ingénieurs des Techniques de l'Automobile (FISITA)	21. Preis --	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 1624148-2

Document control sheet

1. ISBN or ISSN --	2. type of document (e.g. report, publication) Veröffentlichung (Publikation)	
3. title POSITIONING SENSOR SYSTEM FOR TRANSMODULAR MOBILITY		
4. author(s) (family name, first name(s)) Bierbüsse, David Heidebrecht, Eduard Meinert, Tobias Chaves Vargas, Mauricio Negra, Renato Schröder, Kai-Uwe	5. end of project 31.08.2021	
	6. publication date 04.12.2020	
	7. form of publication Fachtagung	
8. performing organization(s) name, address RWTH Aachen University, Chair of High Frequency Electronics (HFE), Kopernikusstraße 16, 52074 Aachen, Germany RWTH Aachen University, Institute of Structural Mechanics and Lightweight Design (SLA), Wüllnerstraße 7, 52062 Aachen, Germany	9. originators report no.	
	10. reference no. 50RP1980	
	11. no. of pages 7	
12. sponsoring agency (name, address) BMW i via German Aerospace Center Königswinterer Straße 522-524 53227 Bonn Germany	13. no. of references 29	
	14. no. of tables 0	
	15. no. of figures 10	
16. DOI (Digital Object Identifier) --		
17. presented at (title, place, date) FISITA Web Congress 2020, 24.11.2020		
18. abstract This paper presents a new concept of a positioning sensor system for transmodular mobility without the need for complex image and signal processing capability. It is based on a sonar system approach, in which the transmitting nodes and receiving nodes are separated. Thereby, the transmitting node can serve as a reference point on the target object (e.g. passenger cabin) and the receiving node can be placed on the locating object (e.g. transportation carrier), respectively. In this regard, both objects are related to each other in a local reference system. The sensor system is extended by an auxiliary radio link for synchronization purposes. It can cover a range of more than 5 meters with a maximum positioning resolution in the millimeter range.		
19. keywords positioning system, ultrasonic, transmodular mobility		
20. publisher Fédération Internationale des Sociétés d'Ingénieurs des Techniques de l'Automobile (FISITA)	21. price --	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 1624122-2

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN --	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Veröffentlichung (Publikation)
3. Titel upBUS – Nahtlose Mobilität zwischen Bus und Seilbahn am Beispiel des Düsseldorfer Medienhafens	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Meinert, Tobias Berndt, Dominik Bierbüsse, David Heidebrecht, Eduard Chaves Vargas, Mauricio Negra, Renato Schröder, Kai-Uwe	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.08.2021 6. Veröffentlichungsdatum 17.04.2021 7. Form der Publikation Sonstiges
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) RWTH Aachen, Institut für Strukturmechanik und Leichtbau (SLA), Wüllnerstraße 7, 52062 Aachen, Deutschland RWTH Aachen, Lehrstuhl für Hochfrequenzelektronik (HFE), Kopernikusstraße 16, 52074 Aachen, Deutschland TU Dortmund, August-Schmidt-Straße 1, 44227 Dortmund, Deutschland	9. Ber.-Nr. Durchführende Institution 10. Förderkennzeichen 50RP1980 11. Seitenzahl 18 13. Literaturangaben 29 14. Tabellen 0 15. Abbildungen 6
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) BMWi über das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Königswinterer Straße 522-524 53227 Bonn Deutschland	16. DOI (Digital Object Identifier) --
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Making Connected Mobility Work, Wiesbaden, 17.04.2021	
18. Kurzfassung Eine Folge der stetigen Urbanisierung sind zunehmende verkehrsinduzierte Probleme in Städten und Metropolregionen weltweit. Um den überbeanspruchten Straßenraum zu entlasten, müssen die Potentiale oberhalb des Straßenniveaus genutzt werden. Lufttaxis werden als innovatives Verkehrsmittel der Zukunft diskutiert, stellen aufgrund ihres hohen Energieverbrauchs aber keine Lösung des Problems dar. Maßgebliche positive Effekte verspricht nur die Erweiterung des ÖPNV auf die +1-Ebene. Aufgrund kurzer Bauzeiten, geringer Kosten und geringen Energiebedarfs sind Seilbahnen ein prädestiniertes Verkehrsmittel. Durch ihre Systemeigenschaften ergeben sich Schwierigkeiten bei der Integrierbarkeit in bestehende ÖPNV-Netze, sodass Seilbahnen bisweilen oftmals nur Insellösungen sind. upBUS ermöglicht eine bodengebundene Erweiterung der Seilbahnstrecke und stellt somit den ersten Schritt zur nahtlosen Mobilität dar. upBUS ist ein modulares System mit einer Fahrkabine als Zentraleinheit. Auf der Straße wird die Fahrkabine als Bus von einem Fahrmodul bewegt. In der Seilbahnstation wechselt die Fahrkabine vom Fahrmodul an ein Seilbahngehänge. Dabei ermöglicht der vollautomatisierte Wechselprozess den nahtlosen Übergang zwischen den Verkehrsträgern. Somit entfallen für den Fahrgast die mit dem Umstieg verbundenen Wartezeiten. Der Stadtteil Düsseldorf-Hafen ist durch einen stark wachsenden Anteil von Unternehmen aus dem Dienstleistungssektor gekennzeichnet. Durch seine Lage direkt am Rhein und vielen Pendlern aus linksrheinischen Städten existieren Verkehrsprobleme. Die begrenzte Fläche des Hafengeländes schränkt die Parkmöglichkeiten ein. Die Verkehrsanbindung über wenige Rheinbrücken ist für die Pendlerströme problematisch. Eine linksrheinische Park & Ride-Möglichkeit, mit einer Seilbahn über den Rhein sowie ein Bus für die Anbindung der letzten Meile innerhalb des Medienhafens kann Abhilfe leisten. Mit upBUS ist beides in einem System im bestehenden ÖPNV-Netz möglich.	
19. Schlagwörter Nahtlose Mobilität, Transmodularer Verkehr, Urbane Seilbahnen	
20. Verlag Springer Gabler	21. Preis --

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 1624172-5

Document control sheet

1. ISBN or ISSN --	2. type of document (e.g. report, publication) Veröffentlichung (Publikation)	
3. title upBUS - Seamless mobility between bus and cable car using the example of Düsseldorf's media port		
4. author(s) (family name, first name(s)) Meinert, Tobias Berndt, Dominik Bierbüsse, David Heidebrecht, Eduard Chaves Vargas, Mauricio Negra, Renato Schröder, Kai-Uwe	5. end of project 31.08.2021	
	6. publication date 17.04.2021	
	7. form of publication Sonstiges	
8. performing organization(s) name, address RWTH Aachen University, Institute of Structural Mechanics and Lightweight Design (SLA), Wüllnerstraße 7, 52062 Aachen, Germany RWTH Aachen University, Chair of High Frequency Electronics (HFE), Kopernikusstraße 16, 52074 Aachen, Germany TU Dortmund, August-Schmidt-Straße 1, 44227 Dortmund, Germany	9. originators report no.	
	10. reference no. 50RP1980	
	11. no. of pages 18	
12. sponsoring agency (name, address) BMWi via German Aerospace Center Königswinterer Straße 522-524 53227 Bonn Germany	13. no. of references 29	
	14. no. of tables 0	
	15. no. of figures 6	
16. DOI (Digital Object Identifier) --		
17. presented at (title, place, date) Making Connected Mobility Work, Wiesbaden, 17.04.2021		
18. abstract One consequence of continuous urbanisation is increasing traffic-induced problems in cities and metropolitan regions worldwide. In order to relieve the overused road space, the potential above street level must be used. Air taxis are discussed as an innovative means of transport of the future, but due to their high energy consumption they do not represent a solution to the problem. Only the extension of public transport to +1 level promises significant positive effects. Due to short construction times, low costs and low energy consumption, cable cars are a predestined means of transport. Due to their system characteristics, difficulties arise in integrating them into existing public transport networks, so that cable cars are often only isolated solutions. upBUS enables a ground-based extension of the cable car route and thus represents the first step towards seamless mobility. upBUS is a modular system with a driver's cabin as the central unit. On the road, the driver's cabin is moved as a bus by a drive module. In the cable car station, the driver's cabin is changed from the driver's module to a cable car hanger. The fully automated changeover process enables a seamless transition between the modes of transport. This eliminates the waiting time for passengers associated with the changeover. The Düsseldorf-Hafen district is characterised by a rapidly growing proportion of companies from the service sector. Traffic problems exist due to its location directly on the Rhine and many commuters from cities on the left bank of the Rhine. The limited area of the port site restricts parking possibilities. The traffic connection via a few Rhine bridges is problematic for the commuter flows. A Park & Ride facility on the left bank of the Rhine, with a cable car over the Rhine, as well as a bus to connect the last mile within the Media Harbour can provide a remedy. With upBUS, both are possible in one system in the existing public transport network.		
19. keywords Seamless mobility, Transmodular transport, Urban ropeways		
20. publisher Springer Gabler	21. price --	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 1624179-5