

Zero-Emission Cargo Bike for Smart Cities (ZEC-Bike)

Verbundforschungsprojekt gefördert durch das Ministerium für
Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg im Rahmen
des Strategiedialogs Automobilwirtschaft Baden-Württemberg mit
Mitteln der Landesinitiative Elektromobilität III

Abschlussbericht

Version vom 28. Juni 2022

Projektlaufzeit: 01.04.2018 – 31.05.2022

Verbundkoordination/Konsortialführung

Universität Ulm
Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik
Dr.-Ing. Michael Buchholz
Albert-Einstein-Allee 41, 89081 Ulm
Tel.: +49 (731) 50-27003
Fax: +49 (731) 50-12-27003
michael.buchholz@uni-ulm.de

Verbundpartner



universität
uulm



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Universität Ulm
Institut für Mess-, Regel- u. Mikrotechnik
Herr Prof. Dr.-Ing. Klaus Dietmayer
Albert-Einstein-Allee 41, 89081 Ulm
Tel.: +49 (731) 50-27000
Fax: +49 (731) 50-27009
klaus.dietmayer@uni-ulm.de

Dt. Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Fahrzeugkonzepte
Herr Bastian Mayer
Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart
Tel.: +49 (711) 6862-8061
Fax: +49 (711) 6862-258
bastian.mayer@dlr.de



Autoren:

UULM-MRM

- Suvrath Pai
- Dr.-Ing. Michael Buchholz

DLR-FK

- Bastian Mayer
- Özcan Deniz
- Amelie Ewert

EMB

- Tim Riebe
- Markus Schmitz

Seitenzahl: 55

Freigabe: öffentlich



1 Zusammenfassung

Im Projekt „Zero-Emission Cargo Bike for Smart Cities“ (ZEC-Bike) wurde das weltweit erste rein elektrisch angetriebene Lastenkraftrad mit schnelllade- und rekuperationsfähiger Batterie entwickelt. Dafür wurde im Projekt ein hochwertiges Batteriesystem mit aktivem Heiz /Kühlsystem entwickelt, welches mit öffentlichen AC-Ladesäulen effizient und schnell geladen wird (Ladung bis auf 80 % der Nennkapazität innerhalb von 30 Minuten). Trotz kleinem Bauraum sowie niedriger Batteriespannung (<60 V) und somit hohen Stromstärken konnte eine effiziente Schnellladung realisiert werden.

Um die negativen Effekte der Nutzlast auf das Fahrverhalten zu minimieren, wurde im Projekt ein neues Fahrzeugkonzept mit schwerpunktgünstiger und nutzerfreundlicher Anbringung der Nutzlast entwickelt, welches Fahrten mit den im städtischen Raum üblichen Geschwindigkeiten auch bei voller Beladung erlaubt. Aufbauend auf den Ergebnissen des Projekts „Sicherheitsfahrwerk mit Elektro-Allradantrieb für E-Bikes und E-Motorräder“ wurden auch das entwickelte Lastenrad mit einem Allradantrieb ausgestattet. Dieser dient zur Steigerung der Energieeffizienz (Rekuperation auch am Vorderrad, wo bei Zweirädern ein Hauptanteil der Bremsenergie umgesetzt wird) und zur Erhöhung der Sicherheit durch entsprechende, im Projekt entwickelte Unterstützungssysteme für den Fahrer unabhängig von der Beladung. Dazu wurde auch ein haptisches Feedback am Lenker implementiert, um in kritischen Fahrmanövern dem Fahrer Hinweise zur Erhöhung der Fahrsicherheit geben zu können. Auch die technische Möglichkeit einer Cloud-Anbindung des Fahrzeugs für digitale Services wurde gezeigt.

Entsprechend den technischen Alleinstellungsmerkmalen wurden zudem geeignete Geschäftsmodelle untersucht, um eine erfolgreiche Markteinführung des elektrischen Lastenkraftrades zu unterstützen. Mögliche Anwendungsfälle können von kommunaler Grünflächenpflege bis zum Nutzlasttransport für den städtischen Kleinliefer- und Kurierverkehr reichen.

Die Erreichung der Projektziele wurde durch entsprechende Tests mit prototypischen Systemen und einem Fahrzeugdemonstrator nachgewiesen.

2 Einleitung

In diesem Kapitel werden zunächst der Hintergrund und die Motivation, die zur Beantragung und Durchführung des Projekts führten, beschrieben, bevor die im Projektplan gesetzten Ziele erläutert werden. Das Kapitel schließt mit einem Überblick über den Projektplan und einer kurzen Beschreibung der beiden Verbundpartner und des Unterauftragnehmers EMB-Elektromaschinenbau GmbH.

2.1 Hintergrund und Motivation

Die aktuell am Markt befindlichen Lastenzweiräder lassen sich in zwei Kategorien unterteilen: die elektrisch unterstützten Fahrräder, sog. (S)-Pedelecs, und die allein von einem Elektromotor angetriebenen Elektroroller und E-Bikes.

Lastenpedelecs werden üblicherweise in der bereits bei Lastenfahrrädern bekannten Long-John-Variante gebaut. Die Ladefläche befindet sich dabei zwischen dem Lenker und dem Vorderrad auf Höhe der Radnabe. Dies erlaubt einen tiefen Schwerpunkt des Fahrzeugs bei der Beförderung von schweren Nutzlasten. Das Fahrgefühl unterscheidet sich durch die Lenkstange zwischen Lenker und Vorderrad sowie durch den langen Radstand von dem eines gewöhnlichen Fahrrads. Der kleine Vorderreifen wird durch die Nutzlast verdeckt. Dies kann insbesondere bei Straßenbahnschienen und Bordsteinkanten zu Problemen führen. Im Gegensatz gibt es die selten gefertigte Long-Tail-Variante, bei der die Last zwischen Fahrer und Hinterrad angebracht wird. Das Fahrzeug bleibt bei beiden Varianten, wegen seines tiefen Schwerpunkts auch bei hohen Geschwindigkeiten stabil, besitzt allerdings einen großen, durch den Radstand bedingten Wendekreis. Der Einsatz der Lastenpedelecs mit reiner Muskelkraft ist mit Zuladung nicht möglich. Die zum Start des Projekts verfügbaren Topmodelle wurden mit E-Motoren bis 350 W und 45 km/h sowie Batteriegrößen bis 1 kWh ausgestattet. Diese gelten somit offiziell nicht mehr als Pedelec, sondern als S-Pedelecs mit Helm- und Versicherungspflicht. Radwege dürfen offiziell von S-Pedelecs nicht befahren werden, selbst wenn diese für Mofas freigegeben sind.

Elektrische Lastenroller entstehen durch das Anbauen von zusätzlichen Koffern oder Trägern an Elektroroller aus dem Consumerbereich. Für die Einordnung in die Klasse



L1e sind die Fahrzeuge auf eine Höchstgeschwindigkeit von 45 km/h limitiert. Meist wird die Nutzlast am Heck und/oder am Bug des Fahrzeugs befestigt. Die Nutzlast verschiebt den Fahrzeugschwerpunkt nach oben und erhöht die Seitenwindanfälligkeit. Beides verringert die Fahrstabilität der Lastenroller.

2.2 Zielsetzung

Im Projekt „Zero-Emission Cargo Bike for Smart Cities“ (ZEC-Bike) zielte auf die Entwicklung des weltweit ersten rein elektrisch angetriebene Lastenkraftrads mit schnelllade- und rekuperationsfähiger Batterie. Dafür war im Projekt ein hochwertiges Batteriesystem mit aktivem Heiz /Kühlsystem zu entwickeln, welches mit öffentlichen AC-Ladesäulen effizient und schnell geladen werden kann. Ziel war hierfür eine Ladung bis auf 80 % der Nennkapazität innerhalb von 30 Minuten zu gewährleisten. Die Herausforderung war dabei neben dem Thermomanagement auf kleinem Bauraum auch die effiziente Schnellladung bei gleichzeitig kleinen Batteriespannungen (<60 V) und somit hohen Stromstärken zu realisieren.

Aufbauend auf den Ergebnissen des Projekts „Sicherheitsfahrwerk mit Elektro-Allradantrieb für E-Bikes und E-Motorräder“ wurden auch sollte auch das neu zu entwickelnde Lastenrad mit einem Allradantriebsstrang ausgestattet werden, d.h. neben dem angetriebenen Hinterrad wurde auch das Vorderrad mit einem elektrischen Antrieb versehen. Zum einen sollten so die positiven Effekte des Allradantriebs für die Energieeffizienz genutzt werden, da bei Krafträdern ein Großteil der Bremsenergie am Vorderrad umgesetzt wird. Neben der Effizienzsteigerung sollte der Allradantrieb aber auch zur Erhöhung der Sicherheit dienen. Auch hierzu wurde auf die Erfahrungen aus dem vorangegangenen Projekt zurückgegriffen und diese auf das neue Fahrzeugkonzept übertragen und erweitert. Speziell muss hierbei mit sehr unterschiedlichen Lastszenarien (Vollladung, Leerfahrt) umgegangen werden. Neben den entsprechenden Erweiterungen des Sensorkonzepts und der Algorithmen war darüber hinaus ein haptisches Feedback am Lenker zu implementieren, um in kritischen Fahrmanövern dem Fahrer Hinweise zur Erhöhung der Fahrsicherheit geben zu können. Auch die technische Möglichkeit einer Cloud-Anbindung des Fahrzeugs für digitale Services sollten gezeigt werden.



Um die negativen Effekte der Nutzlast auf das Fahrverhalten zu minimieren, sollte im Projekt zudem ein neues Fahrzeugkonzept mit schwerpunktgünstiger und nutzerfreundlicher Anbringung der Nutzlast entwickelt werden, welches Fahrten mit den im städtischen Raum üblichen Geschwindigkeiten auch bei voller Beladung erlaubt. Entsprechend den technischen Alleinstellungsmerkmalen sollten geeignete Geschäftsmodelle untersucht, um eine erfolgreiche Markteinführung des elektrischen Lastenkraftrades zu unterstützen.

Die Erreichung der Projektziele war durch entsprechende Tests mit prototypischen Systemen und Fahrzeugdemonstratoren nachzuweisen. Zudem sollte ein schneller Transfer der erzielten Ergebnisse durch eine enge Einbindung der Firma EMB-Elektromaschinenbau GmbH, Biberach als Unterauftragnehmer sichergestellt werden. Die EMB sollte zudem für die fahrzeugtechnischen Themen, die außerhalb der Kernkompetenzen der involvierten Institute liegen, durch ihre Kompetenzen sowohl im Bereich Antriebsstrang/elektrische Maschinen als auch als Fahrzeughersteller (als Zulieferer für und über die Schwesterfirma emo-bike GmbH & Co. KG) das Verbundprojekt stärken.

2.3 Partner

In folgenden finden sich kurze Beschreibungen der Verbundpartner sowie des Unterauftragnehmers EMB-Elektromaschinenbau GmbH, Biberach.

Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik (MRM) der Universität Ulm (UULM).

Das Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik der Universität Ulm (UULM-MRM) unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Klaus Dietmayer entwickelt und nutzt moderne Verfahren der Mess- und Regelungstechnik sowie der Signalverarbeitung u.a. in den Anwendungsgebieten automatisiertes Fahren und Elektromobilität. Die Finanzierung der Forschungsprojekte umfasst dabei öffentliche Förderungen auf EU-, Bundes- und Landesebene ebenso wie bilaterale Forschungsaufträge von Unternehmen.

Projektschwerpunkte im Bereich Elektromobilität, der von Dr.-Ing. Michael Buchholz geleitet wird, waren und sind die datenbasierte Modellgewinnung von Komponenten und darauf aufbauend steuergerätetaugliche Überwachungs- und Diagnosefunktionen



sowie das gesamtheitliche Energiemanagement inkl. Fahrdynamikregelung von überaktuierten elektrischen Fahrzeugen (PKW und Zweirad).

Institut für Fahrzeugkonzepte (FK) im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Das DLR Institut für Fahrzeugkonzepte erforscht, entwickelt und bewertet neue Fahrzeugkonzepte und -Technologien vor dem Hintergrund zukünftiger Anforderungen an die künftige Mobilität. Als Systeminstitut erarbeitet und demonstriert das Institut neuartige und anwendungsorientierte Lösungen und trägt so zur Gestaltung einer nachhaltigen und wirtschaftlichen, nutzerorientierten, sicheren und vernetzten Mobilität bei. Die Beiträge reichen von Konzeption und Entwurf über Konstruktion, Berechnung und Simulation bis zur Darstellung von Forschungsdemonstratoren, -komponenten und -fahrzeugen.

Speziell das Know-How in den Bereichen Simulation und Auslegung von Komponenten des elektrischen Antriebstranges sowie des Energie- und Thermomanagements im Gesamtfahrzeug und der Entwicklung von rein elektrischen und brennstoffzellenbetriebenen Kleinfahrzeugen konnte im Projekt seine Anwendung finden. Darüber hinaus stützten die bereits bei der Entwicklung der Fahrzeugkonzepte im Next Generation Car entwickelten Methoden die anwendernahe Anforderungsableitung im Projekt.

EMB-Elektromaschinenbau GmbH

Die EMB Elektromaschinenbau GmbH hat sich seit der Gründung im Jahr 1979 auf die Entwicklung und Fertigung von elektrischen Sonderantrieben im Bereich der kleineren und mittleren Baugrößen spezialisiert. Das Unternehmen baut Prototypen oder Einzelstücke, aber auch Kleinserien bis zu mehreren tausend Stück im Jahr. EMB ist ein inhabergeführtes Unternehmen, welches mit seinen rund 45 Mitarbeitern Großes bewegt. Das mittelständische Unternehmen mit Sitz im oberschwäbischen Mittelbiberach legt großen Wert auf eine hohe Produktqualität und angemessene Preise. Dadurch konnte sich EMB innerhalb kurzer Zeit auf dem hart umkämpften Markt etablieren. Heute ist die EMB Elektromaschinenbau GmbH auch außerhalb Deutschlands für ihre qualitativ hochwertigen und zuverlässigen Motoren bekannt.



Großen Wert legt die Firma neben einem guten Preis-Leistungsverhältnis auf einen persönlichen und unbürokratischen Service. EMB hat die Flexibilität der Gründungsjahre bewahrt. So wird eine schnelle, aber individuelle Auftragsabwicklung gewährleistet. Unter Einsatz von altbewährtem, solidem Handwerk und modernster Technik bietet EMB eine auf Ihre Kunden zugeschnittene Lösung für ein sehr breites Spektrum von Antriebsproblemen.

Der Fokus der EMB liegt neben der Produktion auch auf der Forschung und Entwicklung neuer, zukunftsfähiger Technologien. Expertenteams forschen daher stetig an neuen Antriebstechniken für den urbanen Raum und entwickeln Sondermotoren für Applikationen in der Medizintechnik und Raumfahrt.

2.4 Projektplan

In Tabelle 1 sind die Arbeitspakete und die Meilensteine des Projektplans dargestellt.

Arbeitspakete	
AP 1	Anforderungsableitung und Geschäftsmodelle
AP 2	Schnellladefähiges Batteriesystem mit Thermomanagement und Onboard-Ladegerät
AP 3	Allradantriebsstrang und elektrisches Bremsen
AP 4	Konzeption und Auslegung Gesamtfahrzeug
AP 5	Aufbau Demonstratoren, Test und Optimierung
Meilensteine	
MS 1	Ergebnisse der Use-Case- und Geschäftsmodellanalyse liegen vor, Lasten-/Pflichtenheft ist fertiggestellt
MS 2	Erster Demonstrator für Allradversuche und erste Version des Batterie-Labormodells sind verfügbar
MS 3	

MS 4 Konzeption und Auslegung des Gesamtfahrzeugs ist fertiggestellt,
 Batterielaborsystem für finale Tests verfügbar, Antriebsstrang in finaler
 Version verfügbar
 MS 5 Demonstratoren für finale Tests verfügbar
 Projektabschluss

Tabelle 1: Projektübersicht mit Arbeitspaketen und Meilensteinen

Der ursprünglich geplante zeitliche Ablauf für die Projektdurchführung ist in Tabelle 2 dargestellt.

	Projektjahr 1												Projektjahr 2												Projektjahr 3											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
AP1																																				
AP 1.1																																				
AP 1.2																																				
AP 1.3																																				
AP 1.4																																				
AP 2																																				
AP 2.1																																				
AP 2.2																																				
AP 2.3																																				
AP 2.4																																				
AP 2.5																																				
AP 2.6																																				
AP 3																																				
AP 3.1																																				
AP 3.2																																				
AP 3.3																																				
AP 3.4																																				
AP 3.5																																				
AP 3.6																																				
AP 4																																				
AP 4.1																																				
AP 4.2																																				
AP 4.3																																				
AP 4.4																																				
AP 4.5																																				
AP 5																																				
AP 5.1																																				
AP 5.2																																				
AP 5.3																																				
AP 5.4																																				
AP 5.5																																				
MS																																				
MS 1																																				
MS 2																																				
MS 3																																				
MS 4																																				
MS 5																																				

Tabelle 2: Ursprüngliche Zeitplanung der Arbeitspakete und der Meilensteine

3 Wichtige Ergebnisse und Zielerreichung

Im Folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse nach Arbeitspaketen gegliedert angegeben. Zudem werden die erreichten Ergebnisse mit den formulierten Zielen abgeglichen. Sofern zutreffend, ist für die technischen Ergebnisse auch eine mögliche Übertragbarkeit auf die Wirtschaft dargestellt.

3.1.1 AP 1 Anforderungsableitung und Geschäftsmodelle

Das AP1 erarbeitete die Basis für die Arbeiten der nachfolgenden Arbeitspakete. In AP 1.1 wurden durch eine Use-Case-Analyse die möglichen Einsatzszenarien sowie daraus resultierende Fahrzeuganforderungen ermittelt. Am Ende des Arbeitspakets folgte die Analyse von möglichen Geschäftsmodellen. In AP 1.2 wurden die Anforderungen an das Gesamtfahrzeug und an die Komponenten in einem Lastenheft definiert. Erste Aussagen über die Eigenschaften der Antriebsstrangkomponenten wurden über Längsdynamiksimulationen ermittelt. Hierzu wurden in AP 1.3 geeignete Testzyklen definiert welche in AP 1.4 in die Simulationen einfließen. Eine Übersicht über die zeitliche Planung des AP 1 ist in Tabelle 3 zu finden.

3.1.2 AP 1.1 Use-Case-Analyse, Anforderungsableitung und Geschäftsmodelle

Die Kerninhalte in AP 1.1 sind die Herausbildung verschiedener Anwendungsfälle für batterie-elektrisch betriebene Lastenräder sowie die Ableitung von Geschäftsmodellen. Die Grundlagen lieferten Experteninterviews, schriftliche Umfragen sowie Literaturrecherche und Sekundärdatenanalyse. Für das Datenmaterial wurde größtenteils auf Angaben verschiedener Hersteller und auf Verbände zurückgegriffen, wie dem Zweirad-Industrie-Verband (ZIV).

Für eine umfassende Betrachtung des AP wurde von April bis August 2018 eine Wettbewerbsanalyse mit einer Dokumentation der Fahrzeugspezifikationen sowie -anwendungen erstellt. Betrachtet wurden zwei- und dreirädrige Lastenräder mit und ohne Versicherungskennzeichen sowie vergleichsweise Elektroroller. In die Auswertung flossen insgesamt 52 E-Lastenradmodelle ein, wobei 18 Modelle



dreirädrig und 34 Modelle zweirädrig sind (inklusive 6 E-Roller). Es ist eine leichte Dominanz der zweirädrigen Lastenräder sowie vorrangig deutscher Hersteller auf dem Markt erkennbar. Neben allgemeinen Fahrzeugspezifika wurden Transportboxen und Aufsätze verglichen. In der Gegenüberstellung von Rollern und Lastenrädern fällt das Stauvolumen der E-Roller im Durchschnitt etwas kleiner aus und sie weisen eine geringe Nutzlast auf. In der Long-John-Variante mit der Lastenposition vorne variiert die maximale Zuladung zwischen 160 bis 200 kg und das Lastenrad kann mit verschiedenen Transportboxen ausgestattet werden.

Anschließend folgte eine Stakeholder-Analyse, in der geeignete Akteure identifiziert und Interessengruppen kategorisiert wurden. Einsatzgebiete sind sowohl im Personen- als auch im Gütertransport zu sehen und teilen sich jeweils in Individual- und Wirtschaftsverkehr auf. Im Wirtschaftsverkehr steht der öffentliche Träger Kommune als Zielgruppe für potentielle Einsatzgebiete im Fokus, zum Beispiel in der Grünpflege oder der Straßenreinigung. Dem gegenüber stehen regionale Unternehmen im Service- und Dienstleistungsbereich, wie zum Beispiel Handwerker oder Pflege- und Apothekendienste. Im Gütertransport sind insbesondere die Kurier-Express-Palet- (Kurz KEP-)Branche und der Werksverkehr sowie Auslieferungen an Endkunden (z.B. Essens- oder Bürolieferung) interessante Akteure für die Nutzung von E-Lastenrädern.

Nach Herausstellen der Stakeholder wurden von September bis Dezember 2018 Befragungen durchgeführt. Um Ergebnisse aus der vorangegangenen Literaturrecherche zu verifizieren und sich auf mögliche Einsatzpotentiale hin zu orientieren, wurden vor und während der schriftlichen Befragung zehn Telefonate mit potenziellen Interessengruppen geführt. Dabei wurden insbesondere Kommunen, Lieferdienste und Akteure aus der KEP-Branche befragt. Aus diesen Informationen und durch interne Diskussionen wurde ein standardisierter Fragebogen erstellt, der in PDF-Form an die Befragten weitergegeben wurde. Inhalte der insgesamt 27 Fragen bezogen sich auf:

- Nutzer-/Tourenprofile,
- Transportgut,
- Transportbox,



- Nutzungsszenario,
- Beschaffungskriterien,
- Weitere Kommentare.

Das Beantworten der Fragen dauerte ungefähr 20 Minuten. Insgesamt wurde der Fragebogen an 49 Experten geschickt, wobei Rückmeldungen von 22 Personen kamen. Diese enthielten jedoch auch nicht verwendbare Fälle und begründete Absagen, was ebenfalls in die Auswertungen mit einfluss. Letztendlich konnten aus den Rückmeldungen fünf Use-Cases gebildet werden. Unterstützend zu den Ergebnissen der Expertenumfragen wurde eine Metaanalyse von bestehenden Konzepten durchgeführt und alle Ergebnisse anschließend zusammengeführt.

Basierend auf den Antworten der Umfrage wurden Parameter für eine morphologische Analyse abgeleitet um die Use-Cases anschließend vergleichen zu können. Hierbei standen zum einem die Tourenprofile und zum anderem die Transportgüter im Fokus.

Use-Case 1: KEP-Dienst mit Kleintransporter

Die Grundlage für den ersten Use-Case bildet die Rückmeldung eines KEP-Unternehmens, welche ihre Belieferungen mit einem Kleintransporter (3,5 t Nutzlast) durchführen. Die Routenplanung ist dabei sehr unbeständig und kann sowohl direkt als auch verteilt planungsgemäß oder spontan erfolgen. Eine Tourenlänge liegt durch die Verfügbarkeit des Transporters im Durchschnitt bei 80-100 km, wobei täglich 10 Fahrten abgedeckt werden zwischen 07:00-16:00 Uhr wochentags. Die Ergebnisse zeigen, was für eine reguläre städtische Belieferung benötigt wird und wo etwaige Substitutionspotenziale auftauchen. Auch aufgrund der geringen Durchschnittsgeschwindigkeit von 36-45 km/h ist hier der Einsatz von elektrischen Lastenrädern partiell und insbesondere in der letzten Meile denkbar.

Use-Case 2: Kurierdienste

Für den Anwendungsfall von Kurierdiensten konnte auf die Rückmeldung eines Fahrrad-Kurierdienstes zurückgegriffen werden. Die verteilten Tagestouren (wochentags, 10:00-18:00 Uhr) liegen jeweils bei bis zu 10 km und erreichen eine Tagesreichweite von bis zu 100 km. Die Standzeiten sind mit bis zu 30 Minuten relativ kurz. Die Durchschnittsgeschwindigkeit ist mit maximal 15 km/h ebenfalls sehr niedrig.



Die Räder der Kurierdienste sind tagsüber generell häufig im Einsatz, decken dabei jedoch mehrere kleine Routen ab.

Use-Case 3: Service-/Lieferdienst

Die Basis des dritten Use-Cases bildet ein Unternehmen, welches ihre mobilen Batteriepacks zur Ladung von elektrischen Sharing-Fahrzeugen per Lastenrad transportiert. Lösungen wie diese sind Nischenprodukte, welche effiziente Lösungen vor dem Hintergrund von verstopften Städten liefern. Hohe Service-Leistungen und die lange Ladedauer von 4 Stunden bedingen eine breite Zeitspanne, in der die Räder für eine Tour im Einsatz sind (täglich 06:00-23:00 Uhr). Die 11-20 km langen Touren ergeben sich spontan und direkt und werden mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 26-35 km/h angefahren. Ein Rad ist an einem Tag bis zu viermal im Einsatz.

Use-Case 4: Kommunale Straßenreinigung

Die kommunale Straßenreinigung unterscheidet sich von der Grünpflege insofern, als dass oft nur eine Tour pro Tag mit einer sehr geringen Tourenlänge (11-20 km) durchgeführt wird. Das Beispiel einer Stadt in Baden-Württemberg zeigt, dass die Innenstädte durch die Nutzung eines Lastenrades zugänglich werden und ein spezielles Einsatzgebiet liefern. Dazu haben die Räder während der Einsatzzeit zwischen 07:00-17:00 Uhr längere Standzeiten von bis zu einer Stunde.

Use-Case 5: Kommunale Grünpflege

Die kommunale Grünpflege tätigt ein bis zwei kürzere (11-20 km) Fahrten pro Tag. Im Falle der befragten Kommune in Baden-Württemberg sind die Einsatzzeiten wochentags morgens und mittags jeweils für zwei Stunden und am Wochenende mittags und nachmittags. Die Standzeiten von bis zu 30 Minuten decken sich mit den Pausen der Mitarbeiter. Obwohl in der Beispielkommune derzeit noch ein Pkw im Einsatz ist, liegt die Durchschnittsgeschwindigkeit nur bei bis zu 25 km/h. Daher könnte der Pkw einfach durch ein Lastenrad ersetzt werden.

Insgesamt unterscheiden sich die Routenplanungen sowie die Routenmuster stark nach Anwendungsfall. Die Tagesreichweiten liegen jedoch oft bei unter 50 km und die

Tourenlängen zwischen 10-20 km. Die Tourenanzahl variiert zwischen 1 und 10, wobei für viele Anwendungen bis zu vier Fahrten durchschnittlich gefahren werden. Die Einsatzzeiten überschneiden sich insbesondere wochentags zwischen 07:00-18:00 Uhr mit Standzeiten von durchschnittlich einer halben Stunde. Die Durchschnittsgeschwindigkeit reicht bei den Use Cases zwischen 0-35 km/h.

Transportierte Güter und Transportboxen

Durch die unterschiedliche Beschaffenheit der Transportgüter ergeben sich Anforderungen an die Transportboxen. Zu deren Ableitung wurden die Rückmeldungen für die Use-Cases sowie die zeitgleich durchgeführte Metaanalyse herangezogen.

Die benötigte Zuladung variiert sowohl in der Masse als auch im Volumen stark. Dennoch scheint es, als würden KEP-Dienste ein höheres Zuladegewicht (bis zu 250 kg) benötigen, während kommunale Dienste beispielsweise bis zu 100 kg benötigen. Für die kommunalen Dienste ist insbesondere der Transport von elektrischen sowie sperrigen Geräten ein Ausschlusskriterium. Im Service- und Dienstleistungsbereich könnten im Lebensmitteltransport eine aktive Kühlung bzw. Heizung notwendig sein.

	Kommunale Dienste			Service- und Dienstleister			KEP-Dienst			
Stakeholder	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zuladung (Masse)	100-150 kg (inkl. Fahrer)	26-50 kg	100 kg	151-200 kg		25 kg Frisch-fisch	201 bis 250 kg	<125 kg (ohne Fahrer)	201-250 kg (inkl. 72Kg)	
Zuladung (Volumen, LxBxH)	200 x 100 x 100 cm	100 x 80 x 50 cm		83,5 x 61,5 x 76,1 cm	60cm langer Aufbau		1 - 2 qm	80 x 120 x 100 cm	150 x 90 x 130 cm	Standard Umzugskarton
Weiteres Transportgut & elektr. Geräte	Schaufel, Besen (je 2m lang), Laubbläser	Heckenscheren, Laubbläser, Kettensäge, Freischneider	Rasenmäher	Mobile Ladestation, kleines Set Reinigungsequipment	Lebensmittel	Eiswürfel	Pakete			

Tabelle 4: Ergebnisse der Umfrage

Eine weitere geforderte Spezifikation der Transportbox ist für jede Branche die Abschließbarkeit. Darüber hinaus benötigen Lastenräder im Einsatz der KEP-Dienste oftmals abtrennbare Boxen, die bei Wechselbrücken einfacher austauschbar sind. Obwohl unter den Rückmeldungen kein intralogistischer Verkehr vertreten war, könnten standardisierte Maße, wie z.B. eine halbe Euro-Palette, sowie die Fahrbarkeit auf Rollen wichtig sein. Dies nimmt bei den übrigen betrachteten Verkehren einen geringeren Stellenwert ein.

Bei einem elektrisch betriebenen Lastenrad ist vorwiegend ein Bremsassistent gewünscht. Vereinzelt wurde ein Zweirad-ABS und haptisches Feedback am Lenker als Warnhinweis als Notwendigkeit in Betracht gezogen.

Die Ergebnisse der Use Case-Studie¹ wurden bei der 3. VDI-Fachtagung „Leichte E-Mobilität und Mikromobilität“ der Öffentlichkeit präsentiert.

Erster Entwurf für Geschäftsmodelle

Von den Ergebnissen der vorangegangenen Arbeitsschritte ausgehend wurde ein erster Entwurf für mögliche Geschäftsmodelle erstellt. Diese unterscheiden sich im Groben zum einen in der privaten Beschaffung der E-Lastenräder, was für einen Großteil der Use-Cases ein mögliches Geschäftsmodell darstellt. Des Weiteren ist ein Sharing-Konzept denkbar, welches unter der Nutzung Unternehmen steht. Dies ist insbesondere bei KEP-Diensten und in der Kommunalpflege, welche die Fahrräder nur in den Sommermonaten im Einsatz haben, eine Alternative. Darüber hinaus kann auch eine Langzeitmiete von Interesse für viele potentielle Einsatzgebiete sein.

Use Case	Sharing nur für Unternehmen	Finanzierung (Langzeitmiete)	Private Beschaffung
KEP-Dienst	X	(x)	x
Kurierzentrale			x
Serviceverkehr			x
Kommunalpflege	X	(x)	x

¹ Mayer, Bastian und Ewert, Amelie und Deniz, Özcan: *Entwicklung eines E-Cargo-Leicht-Motorrads: Anforderungen der gewerblichen Anwender*. In: Tagungsband zur 3. VDI-Fachtagung Leichte E-Mobilität und Mikromobilität. 3. VDI Fachtagung Leichte E-Mobilität und Mikromobilität, 24./25. Sept. 2019, Bad Soden, Deutschland.

Entsorgungsbetrieb		(x)	x
Essenslieferung			(x)
Werksverkehr	(x)	(x)	(x)
Reparaturservice	(x)	(x)	(x)
Einzelhandel-Lieferservice			(x)
Einzelhandel-Logistik	(x)	(x)	(x)

Tabelle 5: Übersicht des bevorzugten Geschäftsmodells

3.1.3 AP 1.2 Lasten-/Pflichtenhefte Gesamtfahrzeug und ggf. für Komponenten/Unteraufträge unter Berücksichtigung der funktionalen Sicherheit

Basierend auf den Ergebnissen der Use-Case-Analyse (AP 1.1) wurden die Systemanforderungen im Lastenheft definiert. Daraus leiten sich die Fahrzeug- und Nutzlastanforderungen ab. Diese definieren wiederum Anforderungen an die Komponenten wie z.B. das Batteriesystem, die Elektromotoren und das Ladegerät. Das Lastenheft-Dokument wurde so aufgebaut, dass die Zusammenhänge über eine definierte Nummerierung mit Querverweisen ersichtlich sind. Das Lastenheft wurde nach Rücksprache mit den Projektpartnern kontinuierlich aktualisiert und erweitert.

3.1.4 AP 1.3 Definition Testzyklen für Gesamtfahrzeug und Komponenten

In diesem Arbeitspaket erfolgte die Analyse der gegenwärtigen europäischen Testverfahren für die Fahrzeugklassen L1e und L3e. Der ECE R47 war bis Ende 2019 für die Typgenehmigung von Kleinkrafträdern gültig. Am 01. Januar 2020 wurde der ECE R47-Zyklus vom WMTC L1e-Zyklus abgelöst. Für Zweiräder der Kategorie L3e gilt der WMTC L3e-Zyklus bereits seit dem 01. Januar 2016.

Zusätzlich wurde zwei reale Stadtfahrzyklen mit einer Piaggio Sfera 50 NSL (1,7 kW, 49 ccm) in Ludwigsburg und ein Stadtfahrzyklus in Stuttgart mit einem E-Motorrad aufgezeichnet.

Der Stuttgart Fahrzyklus führt, wie in Abbildung 1 dargestellt, an der Wilhelma vorbei über den Pragsattel auf den Killesberg und durch die Innenstadt. Über den Stuttgarter Westen stoppt dieser am DLR Standort und führt über den Stuttgarter Süden und die Staatsgalerie zurück nach Bad Cannstatt.

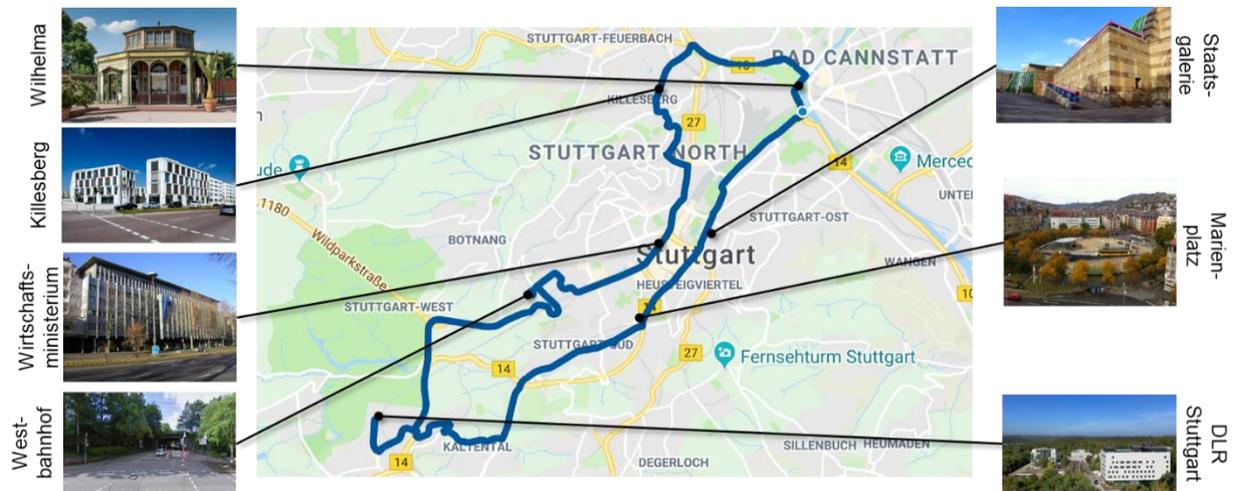


Abbildung 1: Streckenverlauf des Stuttgart Fahrzyklus

Die Erstellung der Realfahrzyklen wurde mithilfe einer Actioncam (Garmin VIRB Ultra) mit integrierten Sensoren für GPS, Beschleunigung, Drehraten und Luftdruck durchgeführt. So konnte neben dem Fahrzyklus auch die Verkehrssituation im Video festgehalten werden. Das in der Actioncam integrierte Barometer ermöglichte eine verbesserte Aufzeichnung der Straßenhöhe. Diese wird zwar auch durch das GPS ermittelt, allerdings mit einer unzureichenden Genauigkeit und teilweise Höhensprüngen durch fehlende Kommunikation mit den GPS-Satelliten in Häuserschluchten. Auch eine nachträgliche Auswertung mit Satellitendaten ist in Städten durch die großen Höhenunterschiede zwischen Häusern und Straßen nur unzureichend möglich.

Abbildung 2 zeigt die Unterschiede zwischen den mit den barometrischen Daten berechneten Höhendifferenzen und den Satellitendaten des Portals GPSies. Dabei wird deutlich, dass in den GPSies-Daten deutlich ausgeprägte Höhensprünge vorhanden sind. Allerdings zeigt sich auch, dass die barometrisch berechnete Höhendifferenz am Anfang und Ende des Fahrzyklus durch temperaturbedingte Druckunterschiede um 9,5 m abweichen.

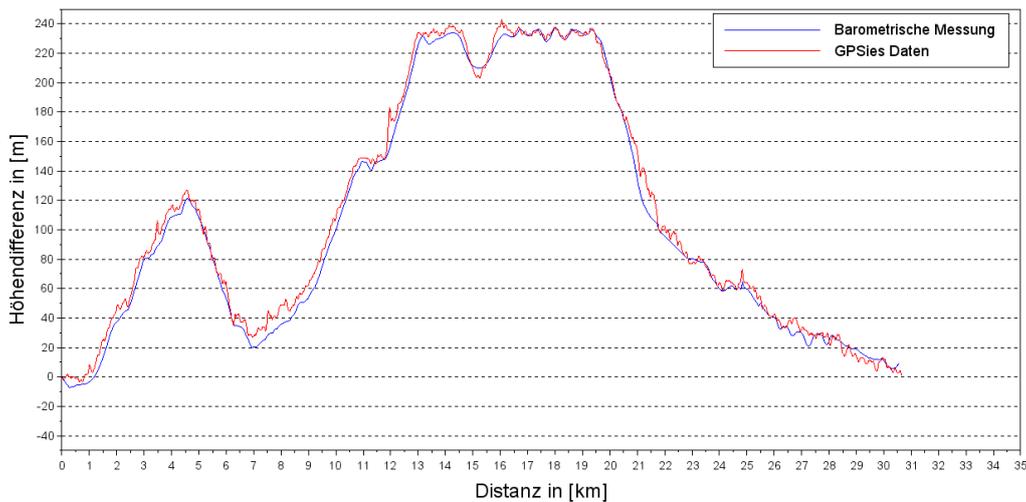


Abbildung 2: Vergleich der Höhendifferenz unterschiedlicher Berechnungsverfahren

Tabelle 6 fasst die Parameter der genormten Fahrzyklen und der Realfahrzyklen zusammen.

Parameter:	ECE R47	WMTC L1e	WMTC L3e	Testzyklus Ludwigsburg	Testzyklus Stuttgart
Distanz	7,37 km	7,6 km	26,74 km	9,46 km	30,5 km
maximale Geschwindigkeit	45 $\frac{km}{h}$	45 $\frac{km}{h}$	111,3 $\frac{km}{h}$	58,6 $\frac{km}{h}$	60 $\frac{km}{h}$
Durchschnittsgeschwindigkeit	29,82 $\frac{km}{h}$	22,76 $\frac{km}{h}$	53,51 $\frac{km}{h}$	19,6 $\frac{km}{h}$	27,3 $\frac{km}{h}$
maximale Beschleunigung	1,8 $\frac{m}{s^2}$	1,6 $\frac{m}{s^2}$	1,9 $\frac{m}{s^2}$	3,2 $\frac{m}{s^2}$	2,7 $\frac{m}{s^2}$
maximale Verzögerung	-0,8 $\frac{m}{s^2}$	-1,85 $\frac{m}{s^2}$	-2 $\frac{m}{s^2}$	-3,7 $\frac{m}{s^2}$	-2,6 $\frac{m}{s^2}$

Tabelle 6: Vergleich der Parameter für die Fahrzyklen

Die maximale Geschwindigkeit wird sowohl beim ECE R47 als auch beim WMTC für die L1e Fahrzeuge durch die Geschwindigkeitsbeschränkung dieser Fahrzeugklasse auf 45 km/h definiert. L3e Fahrzeuge besitzen keine Geschwindigkeitsbeschränkung. Für den Testzyklus Ludwigsburg und Stuttgart wurde mit den Testfahrzeugen beim Mitschwimmen im Verkehr eine maximale Geschwindigkeit von 58,6-60 km/h erreicht. Die Durchschnittsgeschwindigkeit des Testzyklus Ludwigsburg ist erstaunlicherweise deutlich kleiner als die der gesetzlich vorgegebenen Zyklen, was auf ein häufiges Stopp-and-Go zurückzuführen ist. Bezüglich der Beschleunigungen und

Verzögerungen sind die gesetzlichen Zyklen weit unter den im Realbetrieb auftretenden Anforderungen.

3.1.5 AP 1.4 Vorsimulation

Für die in AP1.4 durchgeführten Vorsimulationen werden sowohl die gesetzlichen Fahrzyklen sowie die Realfahrzyklen verwendet. Dies schafft sowohl die Vergleichbarkeit mit anderen Fahrzeugen als auch eine realistischere Angabe der Verbrauchswerte.

Bei den Längsdynamiksimulationen wurden sowohl die unterschiedlichen Raddurchmesser (26“ vorne und 20“ hinten) als auch die von EMB bereitgestellten Wirkungsgradkennfelder berücksichtigt. Das in Dymola simulierte Fahrzeugmodell mit zwei Antriebsmotoren ist in Abbildung 3 dargestellt.

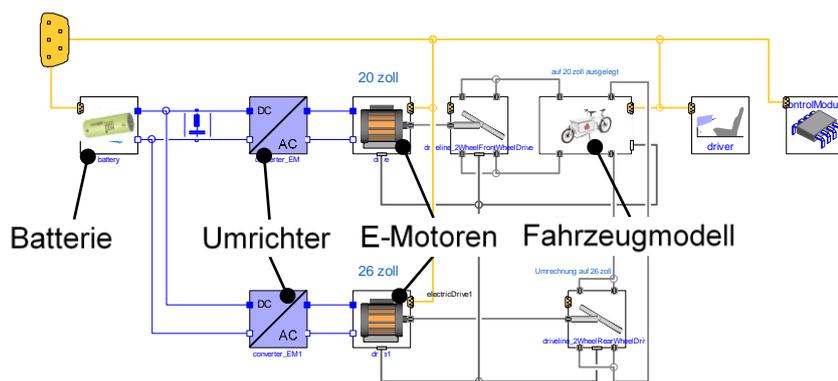


Abbildung 3: Dymola Simulationsmodell

Für die Vorsimulation wurden die in Tabelle 7 gezeigten Werte verwendet, um eine erste Abschätzung für die Reichweite und den Verbrauch zu generieren.

Parameter:	Wert	Parameter:	Wert
Fahrzeugmasse	300 kg	Wirkungsgrad LE	95 %
Reichweite	80 km	Wirkungsgrad E-Motoren	Kennfeld EMB
Stirnfläche	1 m ²	Kurzzeitleistung	15 s
c _w - Wert	0,7	Übersetzung	1:1
Rollwiderstandsbeiwert	0,015	Batterieenergie	2,86 kWh

Tabelle 7: Simulationsparameter

Die in Tabelle 8 gezeigten Ergebnisse konnten für die untersuchten Fahrprofile generiert werden.

Parameter:	ECE R47	WMTC L1e	WMTC L3e	Testzyklus Ludwigsburg	Testzyklus Stuttgart
Verbrauch	3,56 $\frac{kWh}{100 km}$	3,43 $\frac{kWh}{100 km}$	8,5 $\frac{kWh}{100 km}$	3,47 $\frac{kWh}{100 km}$	3,92 $\frac{kWh}{100 km}$
Reichweite	80 km	83 km	34 km	82 km	73 km
Ø-Wirkungsgrad	77 %/	67 % /	74% /	64 %/	65 % /
E-Motoren (VA/HA)	72%	68 %	76 %	64%	66 %

Tabelle 8: Verbrauchswerte der Fahrzyklen

Sowohl die Verbrauchswerte der gesetzlichen Fahrzyklen als auch die Realfahrzyklen befinden sich im Bereich von 3,43 bis 3,92 kWh pro 100 km. Der für Motorräder gedachte WMTC L3e Zyklus weist durch größere Durchschnittsgeschwindigkeit einen mehr als doppelt so großen Verbrauch auf.

3.2 AP 2 Schnellladefähiges Batteriesystem mit Thermomanagement und Onboard-Ladegerät

Das AP2 befasst sich mit dem Energiespeicher, dem dazugehörigen Thermomanagement und dem Onboard-Ladegerät. Dabei wurde in AP 2.1 eine autarke Batterietemperierung Batterie entwickelt. Die Entwicklung des Ladegeräts (AP 2.2) und des Batteriesystems (AP 2.3) wurden unterbeauftragt. Somit werden nur die an den Unterauftragnehmer kommunizierten Daten wiedergegeben. In AP 2.4 wurde ein Prüfstand für die Ermittlung der Kenndaten der Kältekreislaufkomponenten und die Erprobung der Regelungsstrategie (AP 2.5) aufgebaut. Vor dem Einbau in die Fahrzeuge wurden in AP 2.6 Tests am Prüfstand durchgeführt.

3.2.1 AP 2.1 Entwicklung und Auslegung Heiz- und Kühlkreisläufe

Basierend auf der Idee des autarken Kältekreislaufs für die Kühlung der Batterie während der Schnellladung wurde ein System entwickelt, welches sowohl die Batterie als auch das Ladegerät im ZEC-Bike kühlt. Die erste Abschätzung ergab, dass für die Abfuhr der Batterieabwärme während der 2C-Schnellladung (113-226 W) und der Abwärme des Ladegeräts (600 W) ein größerer Verdichter (2,8 cm³ statt 1,9 cm³

Hubvolumen) als ursprünglich geplant eingesetzt werden muss. Gleichzeitig ist durch die Schaltung von vier Magnetventilen eine Umschaltung zur Wärmepumpe zur Heizung der Batterie möglich.

Das Rohrleitungs- und Instrumenten (R&I)-Fließschema in Abbildung 4 verdeutlicht die Durchströmung des Kältekreislaufs zur Kühlung der Batterie und des Ladegeräts. Für eine Erwärmung der Batterie vor der Ladung werden die in der gezeigten Konfiguration geschlossenen Ventile (schwarz) geöffnet und die geöffneten Ventile (weiß) geschlossen. Dadurch wird die Batterie erwärmt, während das Ladegerät nicht durchströmt wird.

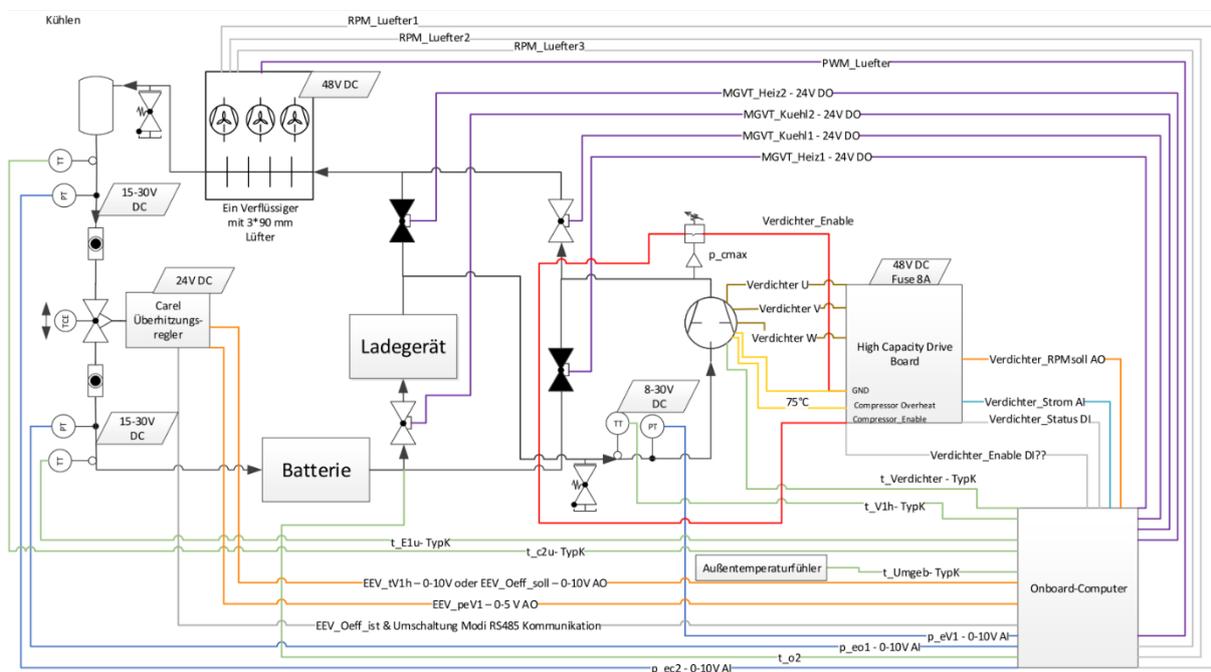


Abbildung 4: R&I-Fließschema des Kleinkältekreislaufs

Die Hardware-Abschaltung des Verdichters wird über einen Druckschalter realisiert, der den Stromkreis (rot) unterbricht und so dem Verdichter das Freigabesignal entzieht. So wird gewährleistet, dass innerhalb des Kreislaufs der maximale Druck von 24 bar nicht überschritten wird. Gezeigt sind weiterhin die benötigten Temperatursensoren (grün), Drucksensoren (blau) und die analogen (orange) und digitalen (violett) Steuersignale, mithilfe derer das Onboard-Steuergerät (OBS) den Kältekreislauf regelt.

Der Kleinkältekreislauf wird, wie in Abbildung 5 gezeigt, in den Demonstratoren zur öffentlichkeitswirksamen Präsentation innerhalb einer durchsichtigen Kiste auf der Nutzlastfläche transportiert. Auf diese lassen sich durch Aufnahmen an den Ecken weitere Auerboxen stapeln. An der linken Seite der Kiste befinden sich Lufteinlässe und an der rechten Seite der Verflüssiger mit integrierten Lüftern, die im Falle der Kühlung der Batterie die Abwärme der Verflüssigung und die Verdichterabwärme an die Umgebung abführen. Eine Integration des Kleinkältekreislaufs in das Driveboard konnte wegen der benötigten Bauräume für Ladegerät und Batterie im Rahmen des aktuellen prototypischen Aufbaus nicht stattfinden.

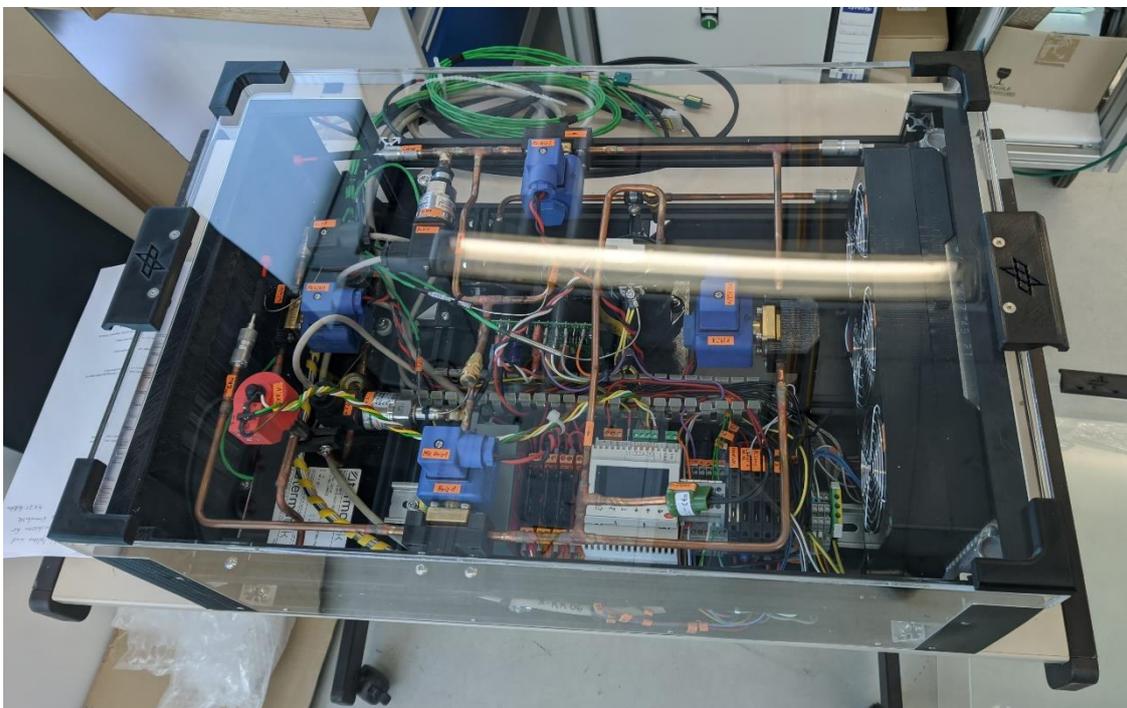


Abbildung 5: Durchsichtige Kiste mit Kleinkältekreislauf

3.2.2 AP 2.2 Entwicklung Onboard-Schnellladegerät (OBL)

Die Entwicklung des Onboard-Ladegeräts wurde als Unterauftrag an die Firma Finpower GmbH vergeben. Finpower besitzt durch bereits erfolgte Entwicklungsaufträge u. A. für die TU München das benötigte Know-How und entwickelte das Ladegerät auf Basis einer bereits existierenden bidirektionalen USV. Das Ladegerät besitzt drei Lademodi: Die Batterie wird im ersten Lademodus auf allen drei Phasen an einer Typ2-kompatiblen Ladestation/Wallbox mit 3 x 2 kW geladen.

Im zweiten Lademodus erfolgt eine Ladung auf zwei Phasen, während die dritte Phase für die Versorgung eines elektrischen Verbrauchers über eine Schukodose bereit steht. Im dritten Modus steht die Stromversorgung auf einer Phase auch während der Fahrt zur Verfügung. So können beispielsweise Powertool-Akkus während der Fahrt zum Arbeitsort geladen werden oder auch Kühlaggregate für verderbliche Waren mit Strom versorgt werden. Das Onboard-Ladegerät verriegelt das Ladekabel während der Ladung an der Ladesäule. So bietet es einen zusätzlichen Diebstahlschutz.

Um die Integration des Ladegeräts im Ladeboden zu vereinfachen und die Kühlung modular zu halten, wurde ein flaches Design gewählt. Dies hat den Vorteil, dass sich die zu kühlenden Komponenten an der Unterseite befinden und so die Kühlung variabel gestaltet werden kann (Luft,- Wasser,- oder Kältemittelkühlung). Das Ladegerät wird im Fahrzeug mithilfe des für die Batteriekühlung vorgesehenen Kältekreislaufs über die in Abbildung 6 gezeigte Kühlplatte an der Unterseite gekühlt.

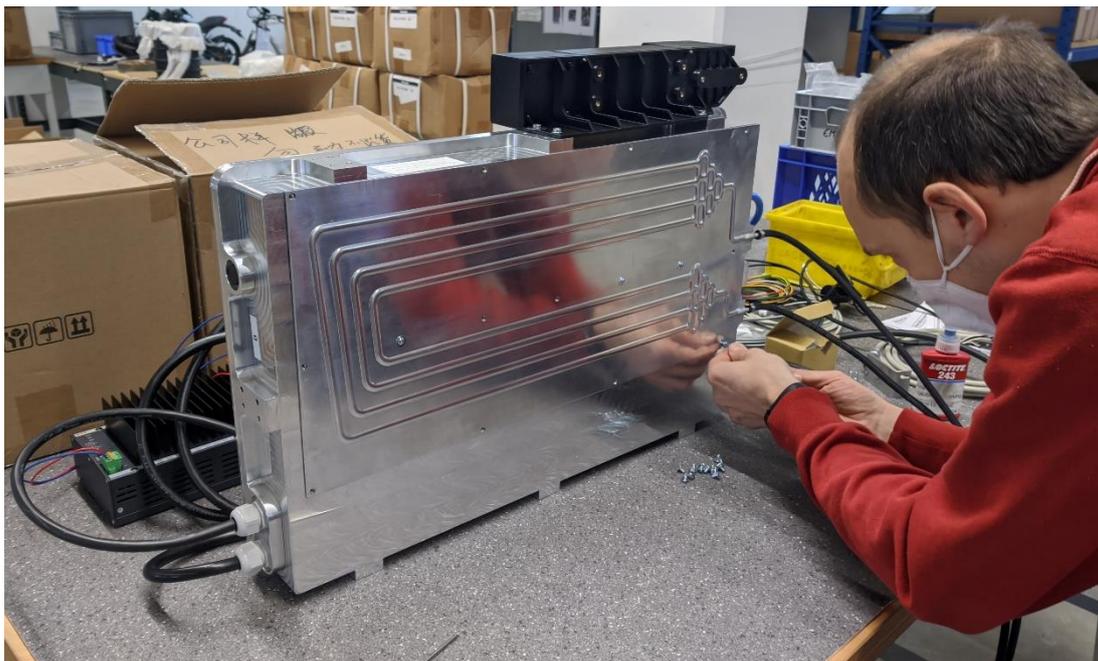


Abbildung 6: Montage der Kühlplatte an das Onboard-Ladegerät

Im Februar 2020 wurden bei Finepower Messungen bezüglich des Wirkungsgrads und der Eigenschaften des einphasigen Wechselstromausgangs durchgeführt. Wie in

Abbildung 7 zeigt, konnten überwiegend Wirkungsgrade weit oberhalb des geforderten Wirkungsgrads von 90 % ermittelt werden.

So ist in der linken Abbildung der AC/DC-Wirkungsgrad über die Batteriespannung bei

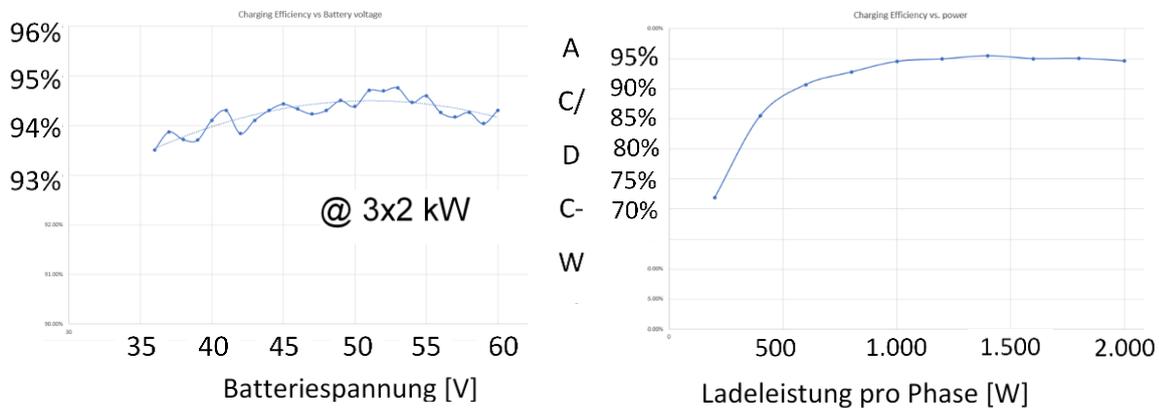


Abbildung 7: Wirkungsgrad des Onboard-Ladegeräts

3 x 2 kW dargestellt. Der Wirkungsgrad steigt von 93,5 % bei 36 V auf sein Maximum von 94,5 % bei 50 V, um dann bei höheren Spannungen wieder leicht abzufallen. In der rechten Abbildung wurde der Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Ladeleistung pro Phase untersucht. Es zeigt sich, dass bei kleinen Ladeleistungen von 250 W der Wirkungsgrad bei etwa 72 % liegt und dann ansteigt, bis er bei etwa 1.000 W in den Bereich von 95 % konstant zu liegen kommt.

3.2.3 AP 2.3 Entwicklung der Batterie (Bauform, interne Kühlanbindung, BMS, ...)

Die Entwicklung der Batterie erfolgte in Kooperation mit Varta Microbattery GmbH. Die Integration der vom DLR entwickelten Kühlplatten in die Batterie erforderte es das Batteriesystem in enger Kooperation zu entwickeln.

Die Systemspannung von 48 V wurde über die serielle Verschaltung von 14 Batteriemodulen bestehend aus 16 Einzelzellen (16 x 4 Ah = 64 Ah) erreicht. Der Brutto-Energieinhalt des Batteriesystems beträgt somit 3,2 kWh. Da die Zellen nur bis 56 V geladen werden, beträgt der Netto-Energieinhalt 2,86 kWh. Die maximale

Spannung der Lüfter begrenzt die maximale Systemspannung auf 56 V. Des Weiteren erhöht der Betrieb bei geringeren Zellspannung die Lebensdauer der Zellen.

Zur Kühlung der Batterie während der Schnellladung wurden im DLR Kühlplatten entwickelt, die an die Busbars der Batteriemodule genietet wurden. In den Kühlplatten verdampft das nichtleitende Kältemittel und nimmt so die Abwärme der Batteriezellen auf. Das Kältemittel wird über nichtleitende Schläuche zwischen den Kühlplatten geleitet. Die Kühlplatten wurden in dem im Kühlschranksbau gängigen Rollbondverfahren hergestellt.

Abbildung 8 zeigt sowohl das Kühlplattendesign als auch das Batteriesystem in ihrer jeweiligen Ausführung nach dem Design-Freeze. Die Batteriemodule wurden in zwei Hälften angeordnet. Dabei teilt sich die Kältemittelströmung vor den Batteriehälften auf und durchströmt diese jeweils erst auf der Unterseite bis diese am Ende der Hälfte nach oben umgelenkt wird (schwarz eingefärbtes Schlauchstück), um dann wieder an der Oberseite nach vorne zu fließen und gesammelt aus der Batterie geführt zu werden. So werden die Strömungsgeschwindigkeiten halbiert und der Druckverlust im Batteriesystem verkleinert.

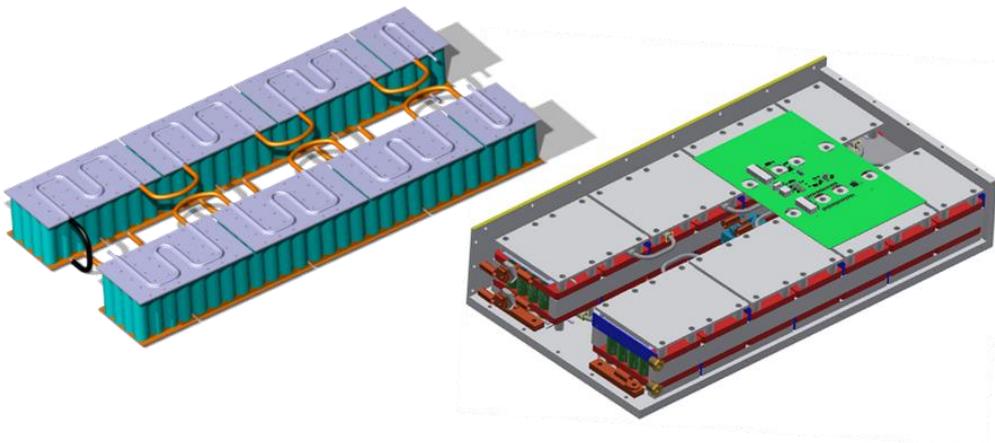


Abbildung 8: Finales Kühlplattendesign (links), Batteriesystem (rechts)

Auf der rechten Seite der Abbildung ist eine CAD-Darstellung des geöffneten Batteriesystems zu sehen. Auf den Ober- und Unterseiten befinden sich Kunststoffplatten (grau dargestellt) mit denen die Batteriezellen verspannt und am Batteriesystemgehäuse fixiert werden. Das Schütz befindet sich zwischen den Batteriehälften. Dieses wird von der Platine des Batteriemanagementsystems (grün

dargestellt) an der Oberseite bei sicherheitskritischen Systemzuständen wie beispielsweise Ober- Unterspannung und zu hohe Temperaturen geöffnet, um die Batterie zu schützen.

In Abbildung 9 wird ein Zwischenschritt bei der Fertigung des Batteriesystem gezeigt. Die im Hintergrund befindliche Hälfte der Batterie wurde bereits mit den Kühlplatten vernietet.



Abbildung 9: Batteriepack während der Integration der Kühlplatten

Trotz Corona-bedingter und weiterer Probleme mit Lieferanten von Rollbondkühlplatten konnten schließlich ein Lieferant gefunden und drei Batteriesysteme aufgebaut werden. Zwei davon wurden in die Demonstratorfahrzeuge eingebaut, während eines für Prüfstandtests genutzt wird.

3.2.4 AP 2.4 Aufbau thermisches Labormodell sowie Planung und Durchführung von ersten Testmessungen

Für die Demonstration und Charakterisierung der Bauteile des Kältekreislaufs wurde ein Teststand geplant und aufgebaut. Besonders die Daten des Verdichters, wie z.B. isentroper Gütegrad und Liefergrad, waren von Interesse, da noch keine Daten mit dem eingesetzten Kältemittel Propan vorlagen. Abbildung 1 zeigt das Verfahrensschaubild so wie die im Prüfstand vorhandenen Sensoren.

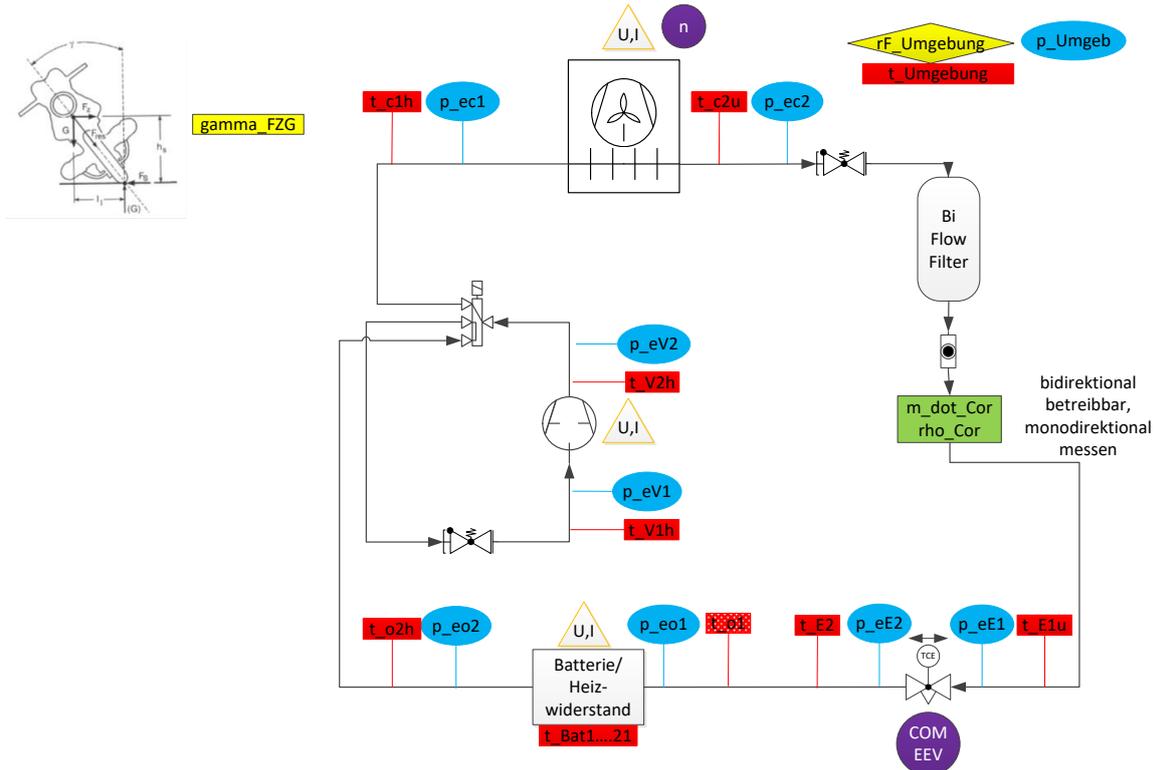


Abbildung 10: Verfahrensschaubild des Kleinkälteprüfstands

Dabei handelt es sich hauptsächlich um Druck- sowie Temperatursensoren. Zur Bestimmung des Massenstroms wurde nach dem Verflüssiger ein Coriolissensor montiert. Die Umgebungsbedingungen werden über einen Temperatursensor sowie einen Sensor für die relative Feuchtigkeit und einen Umgebungsdrucksensor erfasst. So kann sichergestellt werden, dass die Stoffdaten der für die Kühlung des Verflüssigers angesaugten Luft erfasst werden.

Es wurden 21 Messreihen für drei Verdampfungstemperaturen t_o (5 °C, 15 °C und 20 °C) bei konstanten Überhitzungen Δt_{o2h} von 5 K durchgeführt. Dabei wurden die Messdaten im thermisch stationären Zustand bei unterschiedlichen Verdichterdrehzahlen (2500-6500 RPM) aufgenommen. Einschränkend kam hinzu, dass der Verflüssigungsdruck von 23 bar nicht überschritten werden durfte, um den Verdichter nicht zu schädigen. Der Prüfstand wurde zudem für die Parametrisierung der Regelung im AP2.5 genutzt.

3.2.5 AP 2.5 Entwicklung Regelung Thermomanagement inkl. Tests an Labormodell

Mit dem Ziel, die Temperatur eines Wasserkreislaufs und die Überhitzungstemperatur des Kältemittelkreislaufs auf die Sollwerte von 25 °C bzw. 5 K zu regeln, wurde ein lineares modellbasiertes Regelkonzept entworfen. Im Zuge dessen wurde für das Kältemittelkreislaufsystem ein Modell aus experimentellen Untersuchungen an einem Prüfstand gewonnen. Dafür wurden mehrere Sprungantworten der Verdampfungs-, Überhitzungs- und Unterkühlungstemperatur aufgenommen und analysiert. Die Regelkreisstruktur wurde schließlich als duale SISO-Struktur (Single Input Single

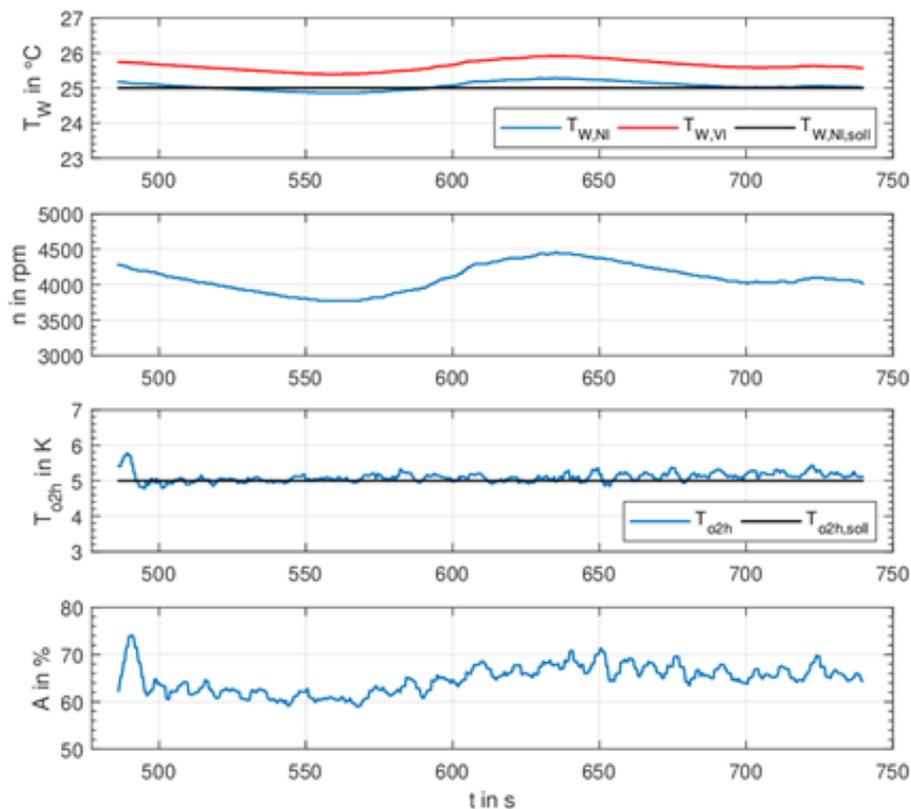


Abbildung 11: Regelung des Prüfstands bei konstantem Wärmestrom

Output) mit der Verdichterdrehzahl als Stellgröße zur Regelung der Wassertemperatur und der Ventilöffnung als Stellgröße zur Regelung der Überhitzungstemperatur aufgebaut. Zwei simultan agierende Proportional-Integral-Regler (PI-Regler) stellten sich für die Regelung als geeignet heraus. Die entwickelte Regelung wurde dann am Prüfstand mit verschiedenen Störeinflüssen getestet. Die Ergebnisse, wie im Beispiel in Abbildung 11 dargestellt, zeigen vor allem bei einer annähernd konstanten

Heizleistung des Temperiergeräts eine gute Regelung der Wasser- und Überhitzungstemperatur.

3.2.6 AP 2.6 Tests Batterie, Schnelllader und Thermomanagement am Labormodell in finaler Konfiguration

Bei Tests der Schnellladung konnte die anvisierte Ladezeit von 30 min erreicht werden. Die Batterie erreichte dabei eine Endtemperatur von 35 °C. Es zeigte sich, dass der Einfluss des Ladegeräts auf den Kältekreislauf die Regelung der Batterietemperatur erschwert.

Wegen des im Vergleich zur Batterie höheren Wärmeeintrags des Ladegeräts und der thermischen Trägheit des Batteriesystems wurde die Kühlung hauptsächlich vom Ladegerät in Anspruch genommen. Eine unabhängige Regelung der Batterietemperatur wird nur durch alleinige Kühlung der Batterie möglich. Das Ladegeräte müsste dabei optimalerweise luftgekühlt ausgeführt werden.

3.3 AP 3 Allradantriebsstrang und elektrisches Bremsen

In diesem Arbeitspaket wurde der Antriebsstrang des Lastenkraftrads mit Allradantrieb entwickelt. In AP 3.1 wurde zur späteren Entwicklung und Bewertung von Betriebsstrategien zunächst ein Simulationsmodell des Zweirads mit Allradantrieb aufgebaut. Der Antriebsstrang selbst wurde im Rahmen des AP 3.2 entwickelt. Die für die Betriebsstrategie notwendige Erkennung von Fahrzeug- und Fahrerzustand wurde mithilfe geeigneter Sensoren und Algorithmen im Rahmen des AP 3.3 erforscht. In AP 3.4 erfolgte die Entwicklung des Bremssystems für das elektrische Zweirad. Die übergeordnete energieeffiziente Betriebsstrategie mit Fahrsicherheitsfunktionen für das Fahrzeug wurde im Rahmen von AP 3.5 entwickelt. In AP 3.6 wurde schließlich erforscht, ob und wie ein haptisches Feedback am Lenker als geeignete Ergänzung für die Fahrsicherheitssysteme eingesetzt werden kann.

3.3.1 AP 3.1 Aufbau und Nutzung Simulation dynamisches Verhalten

Um das Fahrverhalten des Lastenrads bei unterschiedlichen Beladungszuständen bzw. Drehmomentverteilungen zu untersuchen ist eine Simulationsumgebung notwendig. Dafür wurde die Fahrdynamik-Simulationssoftware „MotorcycleMaker“ von der Firma IPG ausgewählt. Diese kommerzielle Software für Fahrdynamik-Simulationen beinhaltet ein frei parametrisierbares, nicht-lineares Motorradmodell inklusive eines virtuellen Fahrers.

Stabilisierung:

Zunächst war die Entwicklung eines Reglers zur Stabilisierung des Lastenrads notwendig, da das Fahrermodell von MotorcycleMaker nicht für Lastenräder geeignet war. Dafür wurde eine modellprädiktive Regelung (MPC) entwickelt. Der Stabilisierungsalgorithmus und dessen Entwicklung wird in Abschnitt 3.3.5 näher beschrieben. Abbildung 12 stellt die Struktur des Gesamtmodells dar.

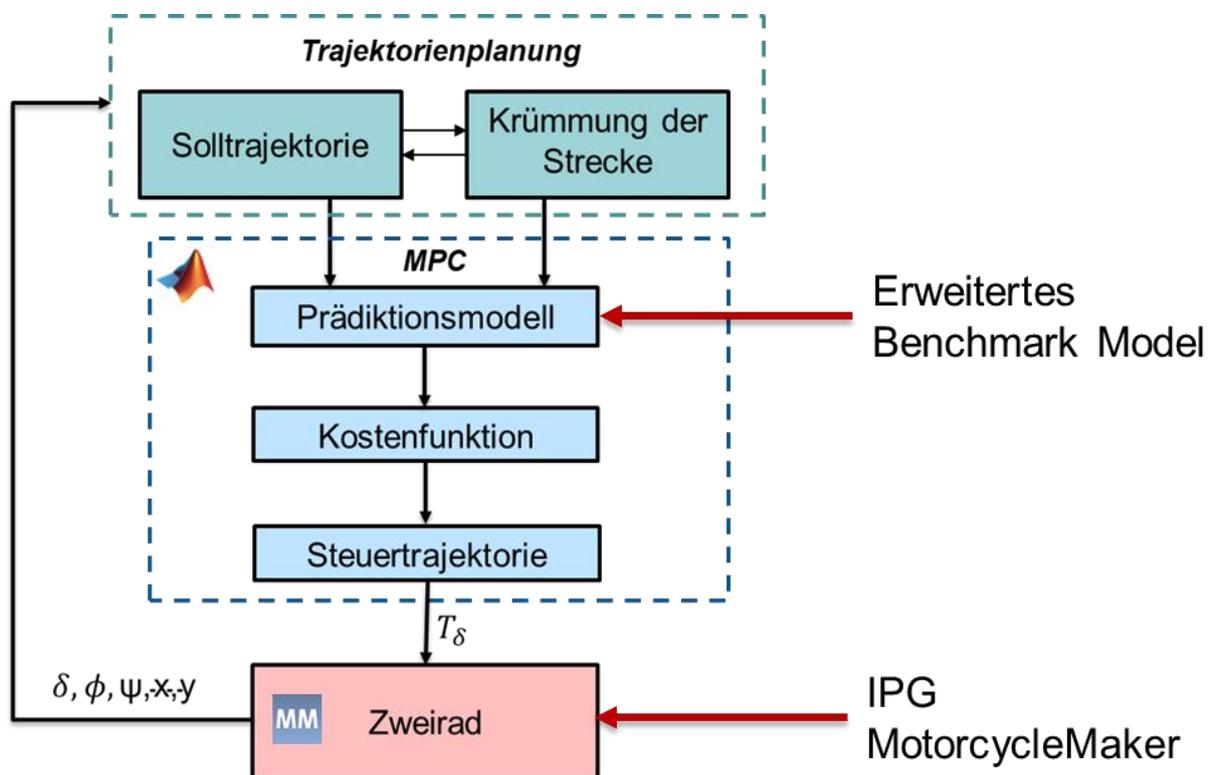


Abbildung 12: Struktur des Modells

Die MPC braucht ein Modell, welches das dynamischen Fahrverhalten von einem Lastenrad gut nachbildet. Dafür wurde ein Modellansatz, der in der Literatur als „Benchmark Modell“ bezeichnet wird, ausgewählt². Das Benchmark-Modell wurde zunächst um zwei weitere Zustände ergänzt, nämlich den Gierwinkel und die y-Position des Lastenrads im globalen Koordinatensystem, um das Fahrverhalten bei einer Kurvenfahrt zu analysieren. Es wurde in MATLAB implementiert und für das Lastenrad parametrisiert.

Drehmomentverteilung:

Die Simulation eines Allradantriebs war in der kommerziellen Software nicht vorgesehen. Daher wurde ein eigenes Antriebsstrangmodell implementiert. Wie in Abbildung 13 erkennbar ist, besitzt der Antriebsstrang als Eingänge das Widerstandsmoment sowie das Gasgriffsignal des Fahrers. Aus der Gasgriffstellung und der aktuellen Drehzahl des Motors wird anschließend das aktuelle Gesamtmotormoment bestimmt. Die Kennlinie der beiden Motoren wurde als Look-Up-Tabelle (LUT) gespeichert und wurde zur Generierung des Motormoments verwendet. Das Antriebsstrangmodell besitzt zwei Motoren, entsprechend muss eine Verteilung des vom Fahrer angeforderten Moments auf die einzelnen Motoren geschehen. Diese Momente wirken an den Rädern gegen Widerstandsmomente.

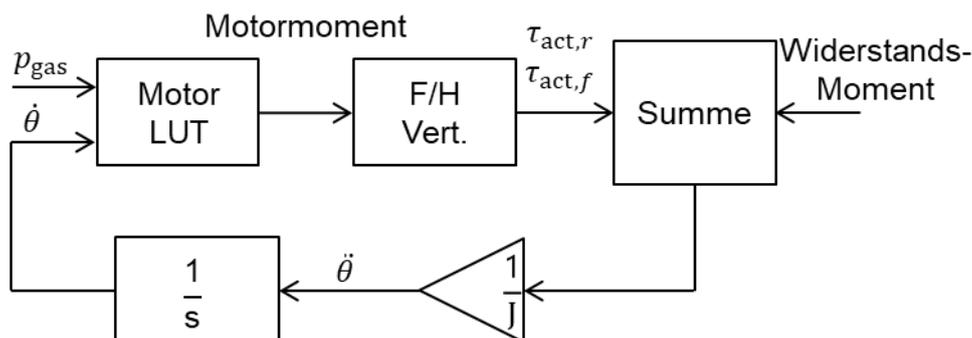


Abbildung 13: Das Elektro-Radnabenmotor-Antriebsstrangmodell

² Meijaard, Jaap P., et al. "Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: a benchmark and review." Proceedings of the Royal society A: mathematical, physical and engineering sciences 463.2084 (2007): 1955-1982.

Kraftsensormodell:

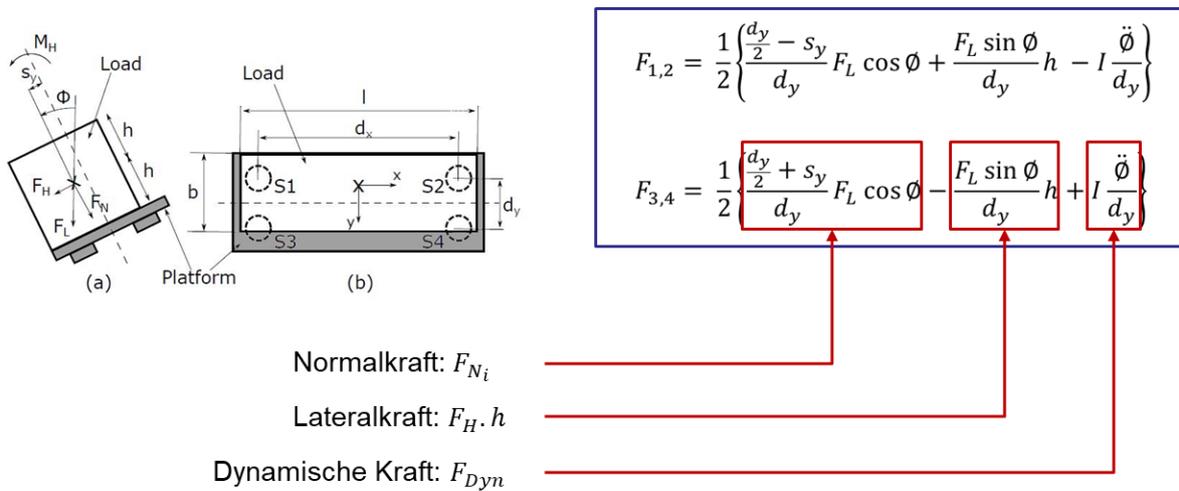


Abbildung 14: Kraftsensormodell

Die Nutzlast kann die Fahrdynamik maßgeblich beeinflussen. Daher ist die Berücksichtigung und Online-Schätzung von Masse, Position und Trägheitseigenschaften der Last wichtig. Dies erforderte die Entwicklung eines entsprechenden Schätzalgorithmus. Dafür wurde ein Mehrkörpermodell und ein mathematisches Kraftsensormodell in MATLAB/Simulink entwickelt. Abbildung 14 stellt das Mehrkörpermodell (links) dar, das dem Lastenrad entspricht. Auf dem Lastenrad wurde die Schätzung anhand von Messungen von vier Kraftsensoren (S1-S4) und einem Inertialsensor durchgeführt. Die mathematischen Gleichungen (rechts) entsprechen den theoretischen Kräften, die die Lastkraftsensoren messen. Sie werden vom Schätzalgorithmus als Eingänge verwendet.

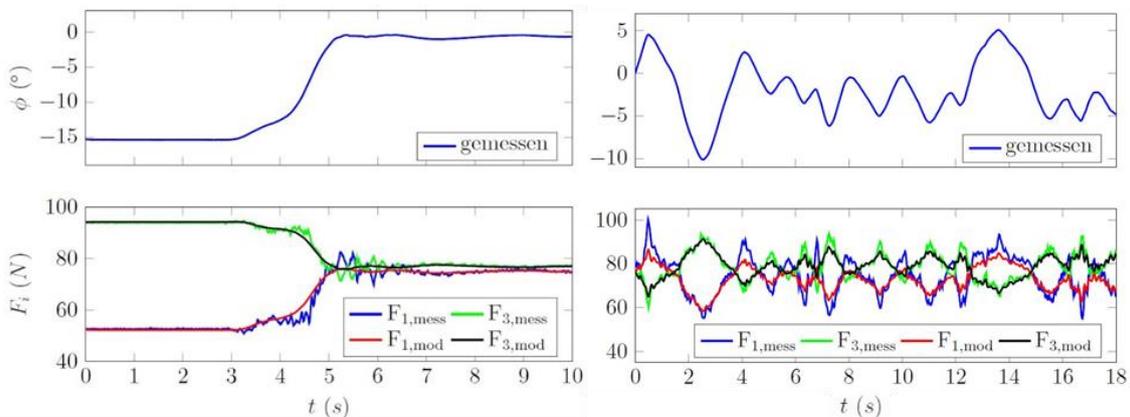


Abbildung 15: Validierung des mathematischen Modells

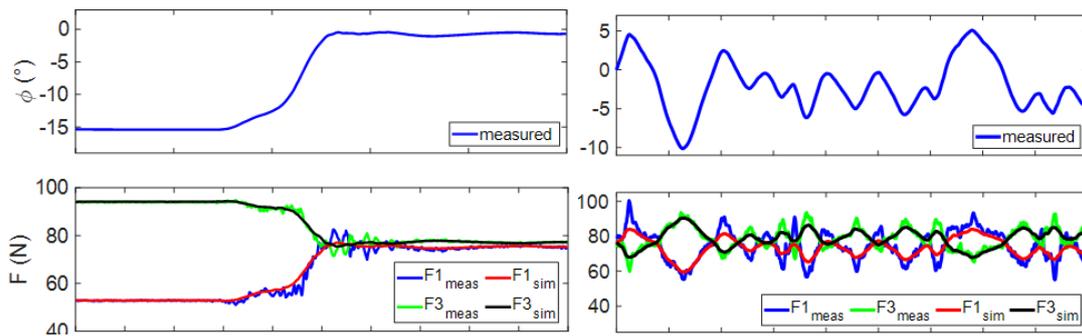


Abbildung 16: Validierung des Mehrkörpermodells

Beide Modelle wurden mit realen Messdaten vom Prüfstand validiert. Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen die Ergebnisse der Validierung. Der Aufbau des Simulationsmodells zusammen mit den Ergebnissen aus Abschnitt 3.3.5 wurden in der Zeitschrift *at - Automatisierungstechnik* veröffentlicht³.

3.3.2 AP 3.2 Elektrischer Allradantriebsstrang

Ein Prüfstand zweier gekoppelter Motoren wurde seitens EMB aufgebaut und für erste Tests der Betriebsstrategie bei der UULM eingesetzt (siehe Abbildung 17). Während



Abbildung 17: Prüfstand zweier gekoppelter Motoren

³ Pai, Suvrath, Benedikt Neuberger, and Michael Buchholz: *Adaptive model predictive stabilization of an electric cargo bike using a cargo load moment of inertia estimator*. In: *at-Automatisierungstechnik* 69.7 (2021): 632-642.

des Projektes wurde dieser auf neue Controller aus eigener Entwicklung von EMB, die im Lastenkraftrad verwendet werden, aktualisiert.

Für das Lastenkraftrad ist der hintere Radnabenmotor in einem 20-Zoll-Rad und der vordere Radnabenmotor in einem 26-Zoll-Rad untergebracht. Es gab dabei große Lieferverzögerungen bei den Motoren. In den Prototypen wird je Motor ein Controller eingesetzt, der die Drehmomentanforderung vom Steuergerät per CAN vorgegeben bekommt. Die Anforderung per CAN an den Motorcontroller wurde eigens für diesen Einsatzzweck entwickelt.

3.3.3 AP 3.3 Fahr- und Fahrerzustandserkennung (Sensorauswahl und Algorithmen)

Im Rahmen dieses Arbeitspaket wurde ein Sensorkonzept entwickelt, um die Fahrzustände zu erkennen. Die Drehraten und Beschleunigungen wurden anhand eines IMU-Sensors (MM7.10) von Bosch ermittelt. Für die Erfassung der Last wurden vier Kraftsensoren von Burster GmbH am Rahmen verbaut. Zusätzlich wurde noch vier identische Kraftsensoren Sensoren unter dem Sattel verbaut. Auf die Sensorik für die Messung des Lenkwinkels und Lenkmoments wird in Abschnitt 3.3.6 genauer eingegangen. Für die Fahr- und Fahrerzustandserkennung ist die Kenntnis einiger Messgrößen wichtig, die nicht direkt von Sensoren messbar sind. Diese sind unter anderem der Rollwinkel, das Lastgewicht und das Trägheitsmoment der Last. Diese Messgrößen wurden daher anhand der verfügbaren Sensoren geschätzt.

Rollwinkelschätzung

Die Drehraten und Beschleunigungen wurden mit einem IMU Sensor (MM7.10) von Bosch ermittelt. Der Rollwinkel wurden mithilfe des IMU-Sensors geschätzt. Dazu wurde einen Kalman-Filter-basierten Algorithmus verwendet⁴. Abbildung 18 zeigt die Validierung des Schätzalgorithmus.

⁴Emilio Sanjurjo, Miguel A. Naya, Javier Cuadrado & Arend L. Schwab (2019) Roll angle estimator based on angular rate measurements for bicycles, *Vehicle System Dynamics*, 57:11, 1705-1719, DOI: 10.1080/00423114.2018.1551554.

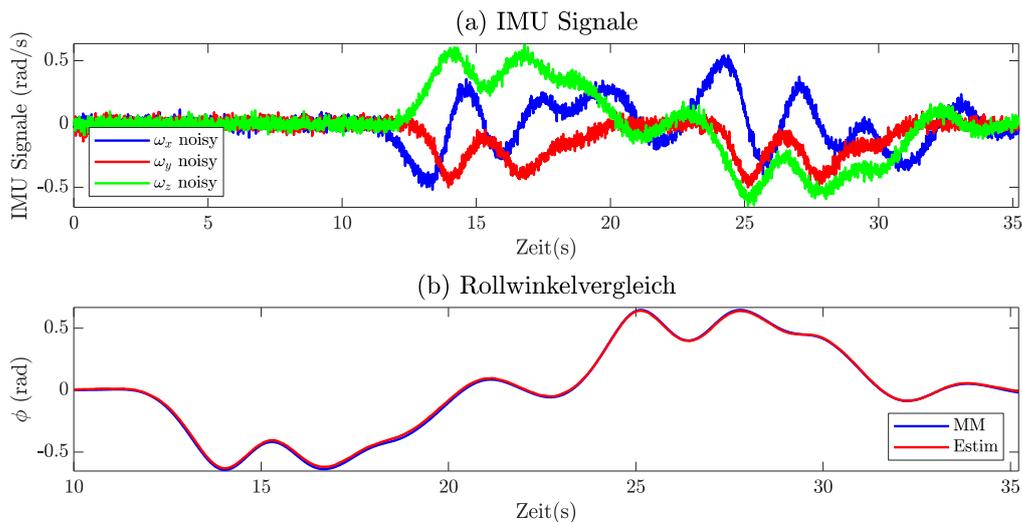


Abbildung 18: Validierung der Rollwinkelschätzung in IPG MM

Lastschätzung

Für die Erfassung der Last wurden vier Kraftsensoren von Burster GmbH am Rahmen verbaut. Die Messungen wurden vom Lastschätzungsalgorithmus als Eingänge verwendet. Zusätzlich wurden für die Erfassung der Fahrerlagerung noch vier Kraftsensoren unter dem Schaltschrank, der die Sattelstütze trägt, montiert. Zwei Kalman-Filter-basierte Algorithmen (ein lineares Kalman-Filter (LKF) und ein Unscented Kalman Filter (UKF)) wurden entwickelt, um die Masse (F_L), die laterale Position (s_y) und die Höhe (h) des Schwerpunkts sowie die Trägheitsmoment (J_{Lxx}) online zu schätzen. Dafür wurde das in Abschnitt 3.3.1 beschriebene, validierte mathematische Modell in den Algorithmen verwendet. Die Algorithmen wurden anhand von realen Messdaten validiert (siehe Abbildung 19). Zusätzlich wurden die Algorithmen für unterschiedliche Fahrscenarien in der Simulation evaluiert und verglichen. Die Methode und Ergebnisse der Arbeit wurden auf einer Konferenz veröffentlicht⁵.

⁵ Pai, Suvrath, Benedikt Neuberger, and Michael Buchholz: *Online Estimation of Mass and Moment of Inertia of Cargo Bike Payload using an Unscented Kalman Filter*. In: 2021 21st International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). IEEE, 2021.

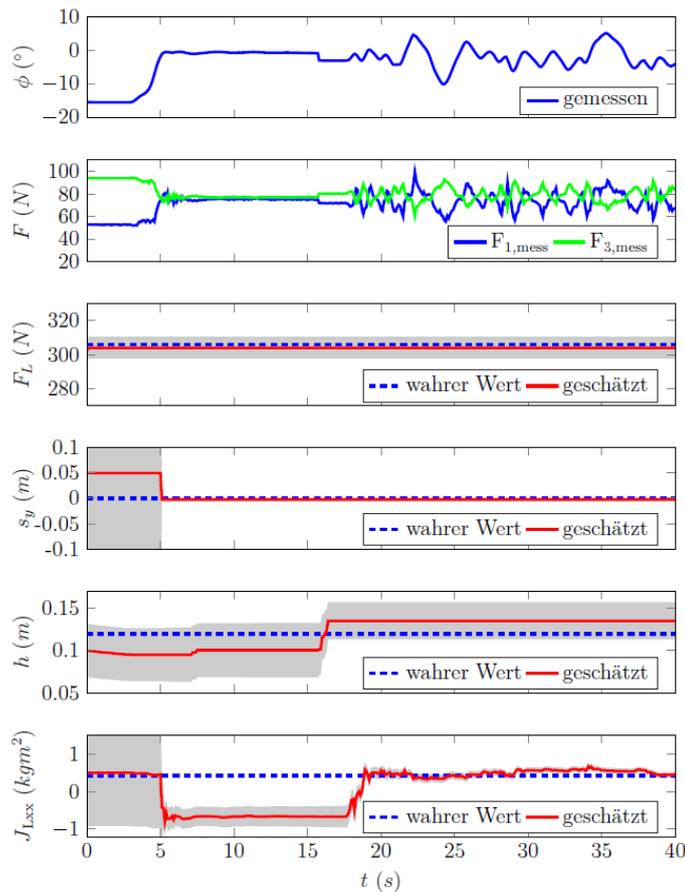


Abbildung 19: Validierung der Rollwinkelschätzung anhand von Messungen

3.3.4 AP 3.4 Bremssystem (elektrisch mit ABS, elektrohydraulisch (z.B. für Stillstand) und redundante Realisierung für Notfälle)

Die Controller können vom Steuergerät eine negative Drehmomentanforderung erhalten und ab ca. 10km/h die gewonnene Energie in die Batterie zurückspeisen. Unter 10km/h sind die Verluste (Zuleitungen, Magnetverluste, ...) höher als die gewonnene Bremsenergie.

Das redundante Bremssystem ist über herkömmliche Fahrradbremsen (Vorderrad: hydraulisch, Hinterrad: mechanisch) realisiert (siehe Abbildung 20). Zusätzlich ist eine mechanische Feststellbremse am Hinterrad verbaut, sodass beim Abstellen ein Wegrollen des Fahrzeugs verhindert werden kann.



Abbildung 20: links: Bremse und Feststellbremse hinten, rechts: Magura Bremse vorne

3.3.5 AP 3.5 Gesamtbetriebsstrategie (Energiemanagement, Momentverteilung Antriebs- und Bremsfall)

Die grundlegende Fahrdynamik und die damit verbundene Steuerung eines Lastenfahrers ähnelt der eines Motorrads. Allerdings kann ein Lastenrad auf viele verschiedene Arten beladen werden. Das maximal mögliche Gewicht der Ladung in der Größenordnung des Leergewichts des Fahrzeugs stellt eine besondere Herausforderung dar. In diesem Projekt wurde bei der Forschung auf folgende beiden Regelaufgaben fokussiert: Stabilisierung und Drehmomentverteilung.

Stabilisierung:

In Rahmen des Projekts wurde einen Regler zur Stabilisierung des Lastenrads mittels modellprädiktiver Regelung (MPC) entwickelt. Der entwickelte Algorithmus dient zwei Zwecken. Erstens kann das Standardfahrermodell in IPG MM ein Lastenrad nicht stabilisieren. Daher war selbst für einfache Simulationen ein eigener Regler notwendig. Zweitens hat die Last einen erheblichen Einfluss auf die Stabilität des Lastenrads. Unterschiedliche Lasten erfordern unterschiedliche Regelparameter. Mit Hilfe der eingebauten Sensoren und Schätzalgorithmen können diese Parameter durch den modellbasierten Ansatz während der Fahrt geändert werden.

Abbildung 21 stellt die Struktur der Stabilisierungsstrategie dar. Der in Abschnitt 3.3.3 entwickelten Schätzer wurde verwendet, um die Lastparameter online zu schätzen und die Modellparameter zu aktualisieren. Die Ergebnisse wurden in zwei Publikationen^{6,7} veröffentlicht. Es wurde gezeigt, dass der entwickelte, adaptive MPC-basierte Regler die Leistung verbessert und ein Lastenrad unabhängig vom Beladungszustand auch bei niedrigen Geschwindigkeiten stabilisieren kann.

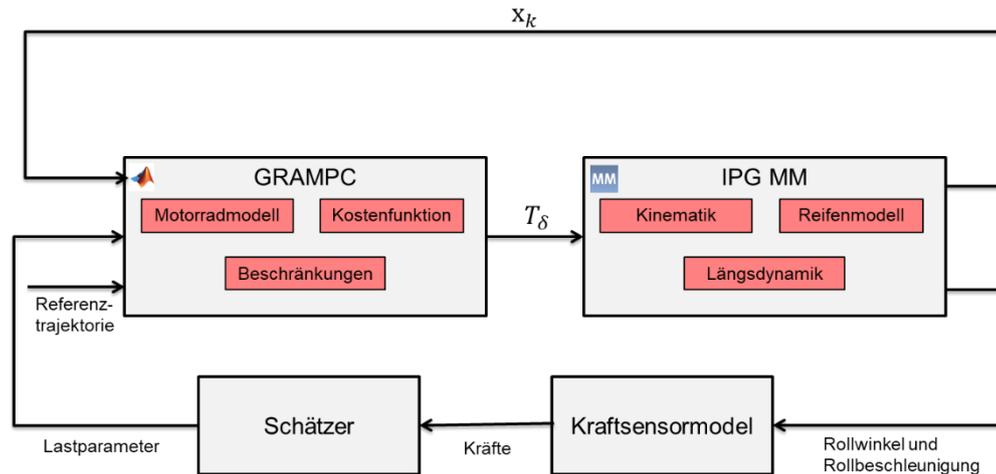


Abbildung 21: Simulationsstruktur

Drehmomentverteilung:

In der Literatur⁸ wurde das Verhalten des Allradantriebs in Kurven etwas genauer analysiert. Speziell wird beim Einfahren in die bzw. Ausfahren aus der Kurve eine Beschleunigung des Fahrzeugs bewirkt, was für unterschiedliche Radmomentverteilungen unterschiedliche Rollwinkel und Lenkwinkel erzeugt. Die Auswirkung des Allradantriebs eines Motorrads kann am Verhältnis zwischen Lenk- und Rollwinkel dargestellt werden. In dem genannten Paper wurde beobachtet, dass bei einer Verteilung, bei der hauptsächlich das Vorderrad in einer Kurve antreibt, das Lenk-Roll-Verhältnis größer ist. Das bedeutet, dass stärker eingelenkt werden kann

⁶ Pai, Suvrath, Benedikt Neuberger, and Michael Buchholz: *Adaptive model predictive stabilization of an electric cargo bike using a cargo load moment of inertia estimator*. In: *at-Automatisierungstechnik* 69.7 (2021): 632-642.

⁷ Pai, Suvrath, Benedikt Neuberger, and Michael Buchholz: *Online Estimation of Mass and Moment of Inertia of Cargo Bike Payload using an Unscented Kalman Filter*. In: *2021 21st International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. IEEE, 2021.

⁸ Bonci, Andrea; Longhi, Sauro und Scala, Giuseppe Antonio: *Towards an all-wheel drive motorcycle: Dynamic modeling and simulation*. In: *IEEE Access*, Band 8, Seiten 112867–112882, 2020.

um den gleichen Rollwinkel zu erzeugen, wodurch es möglich wird, engere Kurven zu fahren. Somit ist dieses Verhalten beim Einfahren in die Kurve von Vorteil, um den geringeren Radius zu bewirken. Beim Ausfahren aus der Kurve bewirkt es aber einen ungewünschten Verzögerungseffekt bei der Rückkehr in eine aufrechte Motorradstellung.

Diese erfordert eine Erkennung der Unterscheidung zwischen Einfahrt und Ausfahrt. Daher wurde einen Algorithmus zur Kurvenerkennung entwickelt. Das Lenkmoment ist in diesem Fall der sich am frühesten ändernden Zustand. Somit wäre eine Möglichkeit, den Rollwinkel sowie das Lenkmoment zu überwachen und eine Kurvenerkennung zu detektieren, wenn dieses einen Grenzwert überschreiten. Um eine vom Motorradtyp unabhängige Erkennung zu gewährleisten, wird zusätzlich die Gierrate betrachtet. Für die Kurvenerkennung wird angenommen, dass sich das Motorrad in drei Zuständen befinden kann. Diese sind die Geradeausfahrt, das Einfahren in die Kurve sowie das Ausfahren aus der Kurve. Abbildung 22 stellt die Strategie der Kurvenerkennung sowie die Simulationsergebnisse dar. Abbildung 23 zeigt das komplette System für die Drehmomentverteilung. Die maximal verfügbaren Drehmomente wurde anhand des Kammschen Kreises und der drehzahlabhängigen Beschränkung des Motormoments bestimmt. Die Sollkraft wird vom Fahrer vorgegeben. Zusätzlich zur Gesamtsollkraft werden das vordere und das hintere Antriebsmoment anhand von Motoreffizienz, Radaufstandskräfte und kurven

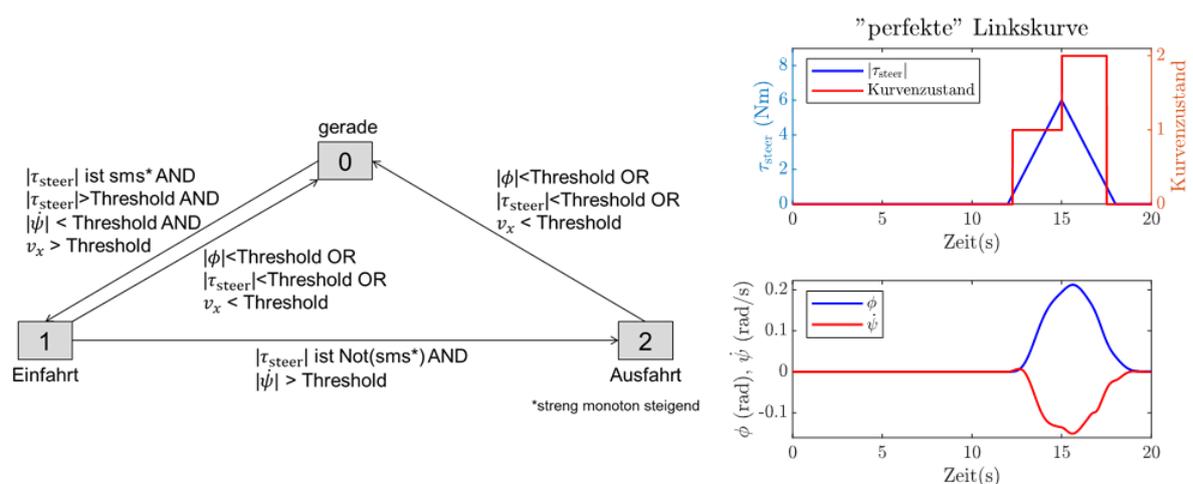


Abbildung 22: Kurvenerkennung- Strategie (Links), Ergebnisse: Lenkmoment (Rechts oben), Rollwinkel (ϕ), Gierrate ψ (Rechts unten)

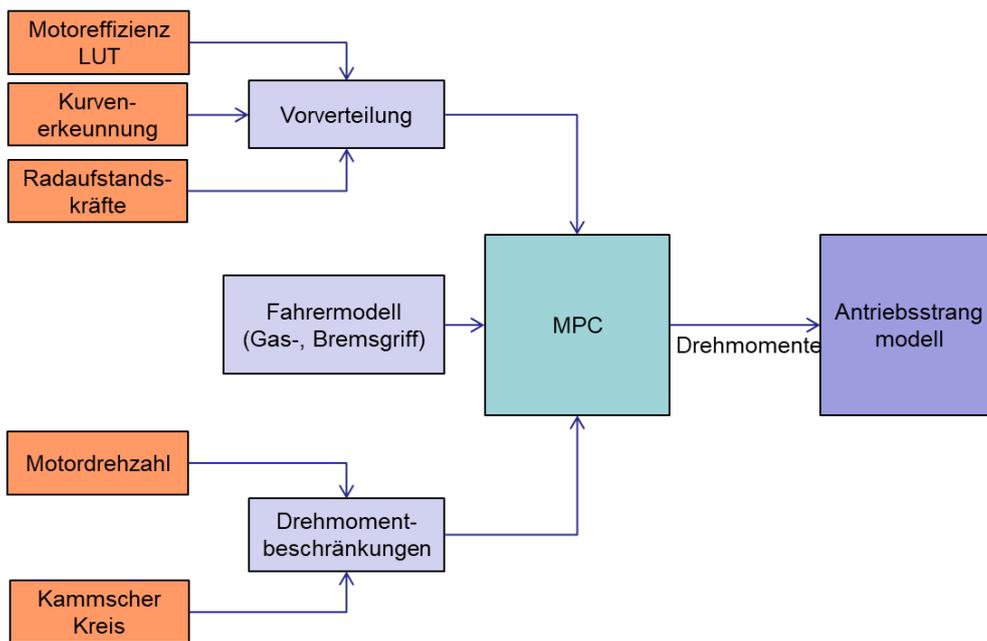


Abbildung 23: Gesamtmodell mit Kurvenerkennung

bezogene Zustand des Lastenrads bestimmt. Diese werden alle als Eingänge an die MPC übergeben. Ziel des Reglers ist die Erreichung der Soll Drehmomente unter Einhaltung der Begrenzungen. Abbildung 24 zeigt den Unterschied von Drehmomentverteilungen für eine Linksfahrt mit und ohne Erkennung. Wie ersichtlich ist, steigt das Vorderradantriebsmoment bei Einfahrt an und wird bei der Ausfahrt aus der Kurve reduziert.

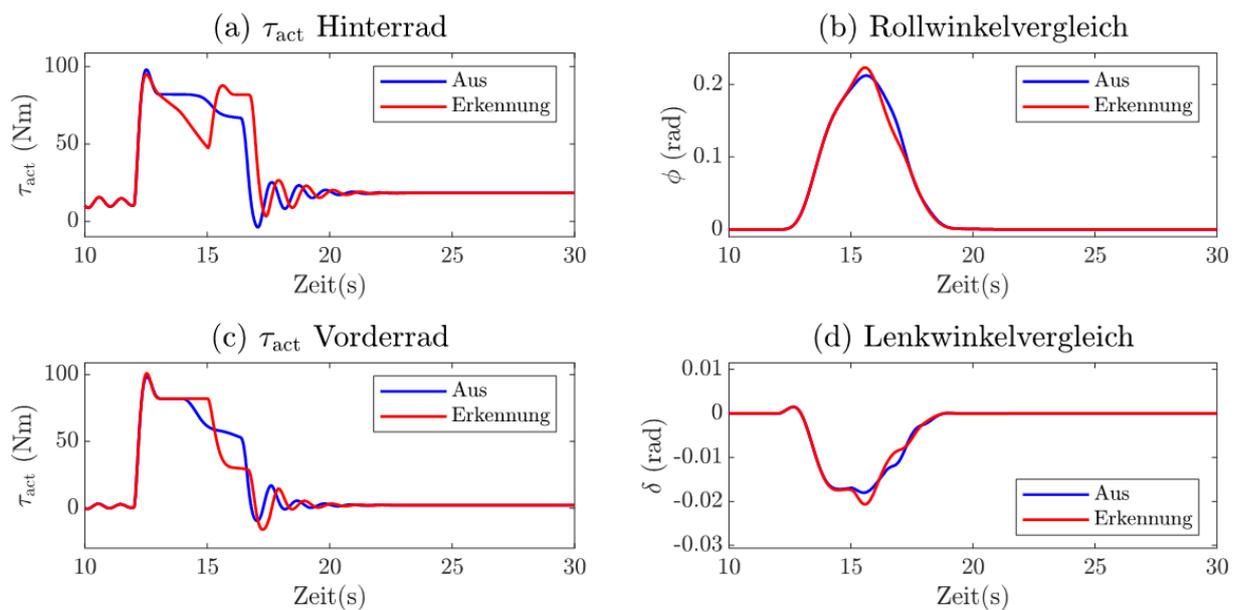


Abbildung 24: Drehmomentverteilung mit und ohne Kurvenerkennung

3.3.6 AP 3.6 Haptisches Feedback am Lenker

Für das haptische Feedback wird ein Motor am Lenker eingesetzt. Wie in Abbildung 25 zu sehen ist, verschwindet der Lenkmotor im Lenker. Das kleine Zahnrad überträgt der Kraft des Lenkmotors über den Zahnriemen an den Lenker mit einem

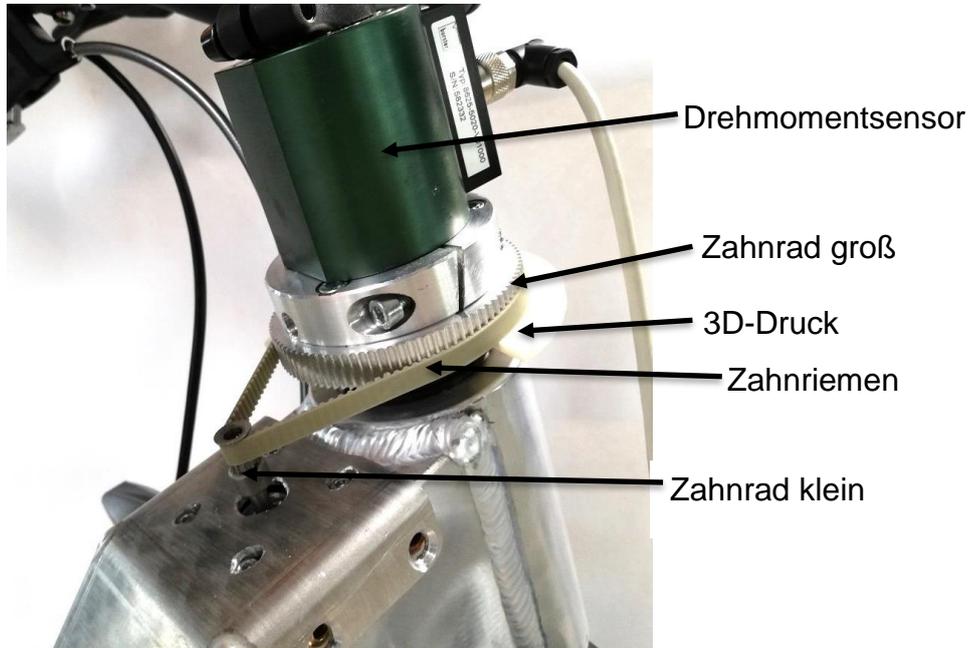


Abbildung 25: Lenkmotor

Übersetzungsverhältnis von 9,53. Damit wird die maximale Kraft von 0,5 Nm auf ca. 4,8 Nm an der Lenkstange des Lastenrads verstärkt. Die Kraft wurde so ausgelegt, dass sich der Fahrer aus Sicherheitsgründen immer ohne großen Kraftaufwand gegenüber dem Lenkmotor durchsetzen kann. Dennoch soll die Kraft so stark sein, dass diese deutlich spürbar ist. Um den Zahnriemen sicher zu halten, wurde zusätzlich eine 3D-Druck-Halterung eingebaut, die den Zahnriemen in seiner Führung hält. Der darüberliegende Drehmomentsensor misst die Gesamtkraft, die vom Fahrer und Lenkmotor ausgeübt werden. Der Lenkwinkel wird ebenfalls vom Lenkmotor ermittelt.

3.4 AP 4 Konzeption und Auslegung Gesamtfahrzeug

Im Arbeitspaket 4 wurden das Konzept sowie die Auslegung des Gesamtfahrzeugs entwickelt. Im AP 4.1 wurde zunächst untersucht, wie am sinnvollsten das zu befördernde Gut untergebracht bzw. fixiert werden kann, und zudem wurden die Bauräume für die Komponenten festgelegt. Im AP 4.2 wurde das Lastenmotorrad

gestaltet und die erforderlichen peripheren Komponenten (z.B. Blinker, Licht etc.) festgelegt. Unter Berücksichtigung der Nutzlast- und Bauraumdefinition aus AP 4.1 sowie in Rückkopplung mit dem Design aus AP 4.2 erfolgte im Rahmen des AP 4.3 die Auslegung von Fahrzeugrahmen und Fahrwerk. Im AP 4.4 wurden die Kleinkomponenten wie Abstellmechanismus ausgelegt. Die User-Interface-Funktionen und das Kommunikationsmodell zur Cloud wurden im Rahmen des AP 4.5 entwickelt.

3.4.1 AP 4.1 Nutzlastanbringung und Bauraumdefinition

Zur Entscheidung über die Nutzlastanbringung wurden Testfahrten mit unterschiedlichen Lastenrädern gemacht. Aufgrund der hohen angepeilten Nutzlast (ohne Fahrer) von 100 kg wurde aufgrund des deutlich stabileren Fahrgefühls eine Long-Tail-Variante bevorzugt. Im Gegensatz zu Pedelecs, bei denen dann eine lange Kette zum Hinterrad eingesetzt werden muss, stellt dies bei rein elektrisch getriebenen Zweirädern keinen Nachteil dar.

Die im Projekt entworfene Nutzlastanbringung ermöglicht die Beladung mit 9 (am Prototyp durch die Kühlung 8) Euro-Behältern (600x400x220 mm) auf der Ladefläche. Das entspricht einer $\frac{3}{4}$ Euro-Palette. Im Projekt werden hierbei durchbrochene Euro-Behälter verwendet, diese wurde für die Vorführungen des Fahrzeugs zum sichtbar machen der Last ausgewählt.

Ein Behälter (hinten unten) enthält die Kühl-Peripherie. Dabei ist diese Kühlkomponentenkiste mit einem Plexiglasdeckel und –seitenwänden ausgestattet, sodass die Funktion des Kühlkreislaufs veranschaulicht wird.

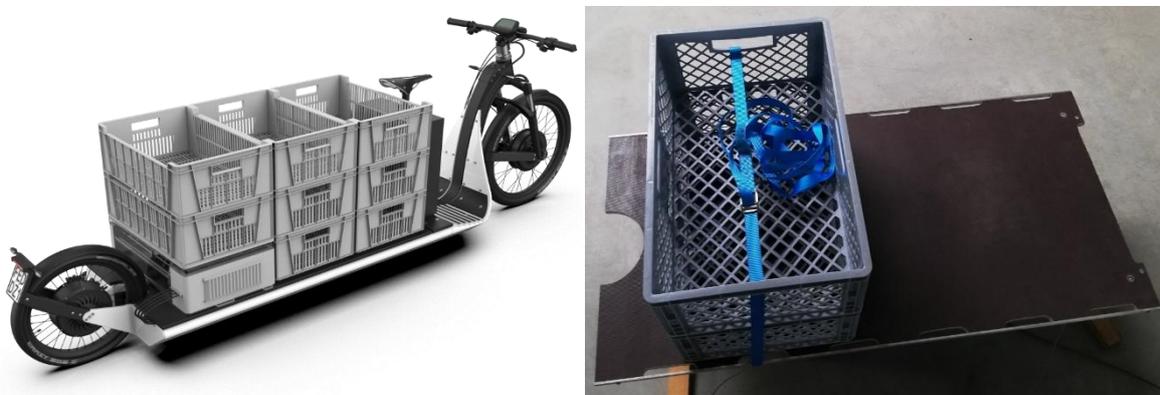


Abbildung 26: Nutzlastanbringung

Die Kisten werden, wie in Abbildung 26 zu sehen, über Ösen direkt an der Siebdruckplatte (Ladefläche) festgezurt. So kann auch die dynamische Messung der Last während der Fahrt gewährleistet werden.

3.4.2 AP 4.2 Fahrzeugdesign und Peripherie

Nach mehreren Iterationsschleifen mit dem Designer wurde auf Basis des FEDDZ das Design des Lastenkraftrads (siehe Abbildung 27) entwickelt. Zum Test der gewagten Aufstiegsart und der Bodenfreiheit wurde ein Ergonomie-Modell erstellt (siehe

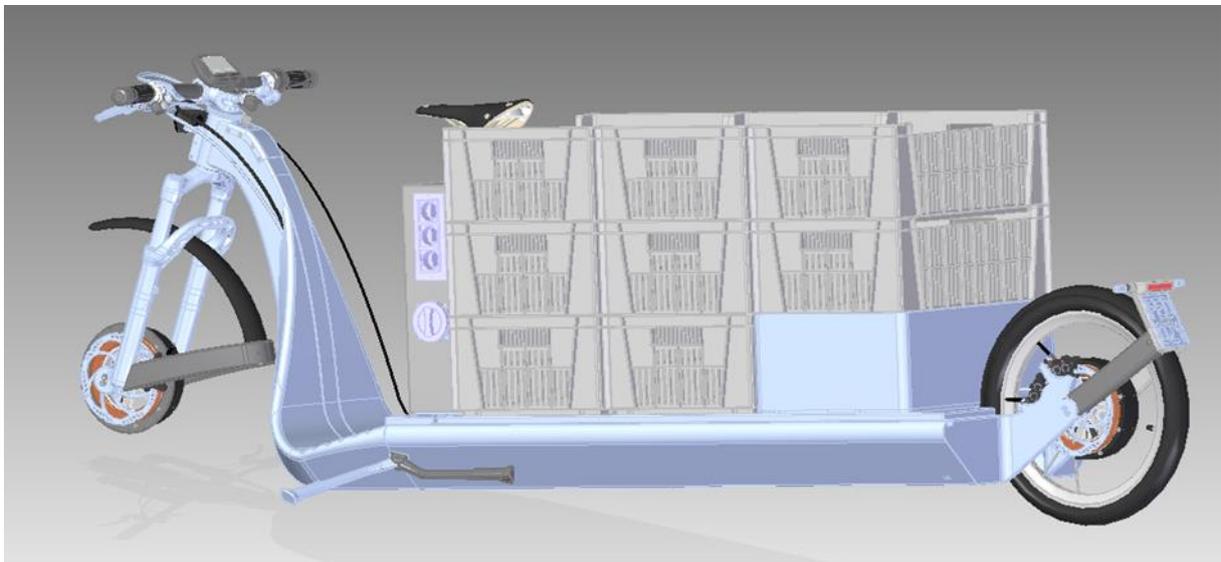


Abbildung 27: Lastenkraftradmodell oben: CAD-Modell, unten: Rendering

Abbildung 28). Auf dieser Basis wurde das CAD-Modell des finalen Demonstrators erstellt.



Abbildung 28: Ergonomie-Modell

3.4.3 AP 4.3 Auslegung Rahmen und Fahrwerk

Aufgrund der kleinen Stückzahlen und des Budgets wurden die Demonstratoren in einer geschweißten Alu-Rohr-Ausführung aufgebaut. Prinzipiell wären hier auch Alu-Druckgussteile und Faser-Verbund-Teile denkbar. Diese Techniken sind allerdings aus Kostengründen in diesem Projekt für Demonstratoren nicht umsetzbar. Ein lokaler Rahmenbauer mit entsprechenden Erfahrungen im Lastenkraftrad-Bau wurde mit der Fertigung der Rahmen beauftragt.

3.4.4 AP 4.4 Auslegung/Auswahl Kleinkomponenten (Abstellmechanismus, ...)

Die Kleinkomponenten wurden hauptsächlich wie im FEDDZ üblich verbaut. Frontlicht, Rücklicht, Kennzeichenbeleuchtung, Blinker, Taster, Seitenständer, Display usw. des FEDDZ wurden auch im Lastenkraftrad verwendet (siehe Abbildung 29). Dazu wurden entsprechend Adapter und Modifikationen am Lastenkraftrad

angebracht/durchgeführt. Zusätzlich wurde ein Not-Aus-Schalter ausgewählt, der es ermöglicht, die sicherheitsrelevanten Komponenten abzuschalten.



Abbildung 29: verbaute Kleinkomponenten

3.4.5 AP 4.5 User-Interface und Kommunikationsmodul zur Cloud

Die Bedienung des Lastenkradtrads erfolgt über fünf Taster an der Schaltkulisse (vgl. auch AP 4.4). Die zu Beginn des Projektes verwendeten Motorcontroller besitzen ein Bluetooth-Modul zur Kommunikation mit der Emerge EV App am Smartphone, mit welcher Parameter wie Geschwindigkeit, Durchschnittsgeschwindigkeit, gefahrene Kilometer, etc. auf dem Smartphone dargestellt werden können. Damit ist prinzipiell die Machbarkeit der Connectivity gezeigt.

Während des Projektzeitraums hat EMB einen hauseigenen Motorcontroller entwickelt und dieser wird auch im Lastenkraftrad eingesetzt. Bei diesem Motorcontroller läuft die Kommunikation per CAN: Prinzipiell kann dementsprechend ein Standard-Kommunikationsmodul Informationen auf dem CAN-Bus lesen und in die Cloud weiterleiten.

3.5 AP 5 Aufbau Demonstratoren, Test und Optimierung

In AP 5 wurden die Aufbauarbeiten der Prototypen, deren Testen und Optimierung durchgeführt. Im AP 5.1 wurde der erste Demonstrator aufgebaut. Die im AP 3 entwickelten Softwaremodule wurden im Rahmen des AP 5.2 in den Demonstratoren umgesetzt und getestet. Mit den gesammelten Erfahrungen wurden im Rahmen des AP 5.3 das Fahrwerk der finalen Demonstratoren gefertigt. In Rahmen des AP 5.4 wurden die finalen Demonstratoren aufgebaut. Schließlich wurden im AP 5.5 die Evaluation und Optimierung an den finalen Demonstratoren durchgeführt.

3.5.1 AP 5.1 Aufbau erster Demonstrator für Allradversuche

Der erste Vorab-Demonstrator (Abbildung 30) wurde auf Basis eines FEDDZ-Rahmen aufgebaut und mit einer Kippsicherung versehen. Dieser Demonstrator diente zur Durchführung verschiedener Versuche und zur finalen Festlegung des Fahrzeugdesigns im Rahmen des AP 4. So wurde unter anderem mit diesem



Abbildung 30: Erster Demonstrator mit Kippsicherung

Demonstrator das Fahrgefühl bei gleichem Drehmoment an Vorder- und Hinterrad bei einem Long-Tail-Rad vorab evaluiert.

3.5.2 AP 5.2 Tests Allradantrieb und haptisches Feedback

In Abbildung 31 ist einer der beiden finalen Demonstratoren dargestellt. Alle entwickelten und vorher beschriebene Teilkomponenten konnten erfolgreich integriert werden.



Abbildung 31: Finaler Demonstrator

Beide elektrische Motoren wurden in Betrieb genommen. Die Tests mit Allradantrieb wurden erfolgreich durchgeführt. Analog zum Gashebel wurde am linken Griff ein Bremshebel angebracht. Diese wurde für elektrisches Bremsen verwendet. Zusätzlich wurden Tests zur Überprüfung der Kraftdosierung des haptischen Feedbacks am echten Lenker im Stand durchgeführt, die gezeigt haben, dass die Auslegung korrekt erfolgt ist. Wie in Abschnitt 3.3.6 beschrieben wurde das maximal Lenkmoment von dem Motor so ausgewählt, dass der Fahrer immer gegenüber dem Lenkmotor durchsetzen kann.

3.5.3 AP 5.3 Fertigung Rahmen und Fahrwerk finaler Demonstratoren

Nachdem Designfreeze wurde die Konstruktion der einzelnen Komponenten in Zusammenarbeit mit dem Hersteller erstellt. Die zusammenschweißten Alu-Rahmen (Abbildung 32) wurden aufgrund der Corona-Pandemie erst mit großen Lieferverzögerungen angeliefert.



Abbildung 32: Gefertigtes Fahrwerk

3.5.4 AP 5.4 Aufbau finaler Demonstratoren

Bei vielen Bauteilen konnte auf lagernde Komponenten vom FEDDZ zurückgegriffen werden. Viele weitere Komponenten, wie Gabel, Schaltschrank, Lastplatte, usw. wurden zugekauft und mit dem Rahmen verbunden (Abbildung 34).

Mehrere Bauteile, wie z.B. die elfenbeinfarbige Abdeckung, sind aufgrund des Prototypenstatus und der damit zusammenhängenden geringen Stückzahlen für das Projekt recht kostspielig. Diese Kosten könnten bei einer Serienproduktion allerdings extrem verringert werden.

Nachdem das Grundgerüst des Lastenkraftrads aufgebaut war, wurde das Innenleben mit den Elektronikkomponenten und der dazugehörigen Verkabelung bestückt (siehe Abbildung 33). Um Probleme bei der Verkabelung/Spannungsversorgung ausmachen



Abbildung 34: Aufbau ohne Elektronikkomponenten



Abbildung 33: Einbau der Elektronikkomponenten

zu können, wurde zudem eine Systembeschreibung mit allen Komponenten und deren Verbindungen untereinander erstellt (siehe Abbildung 35).

Die Verspätung der Akkulieferung hat eine Übergangslösung der Akkus als Zwischenlösung notwendig gemacht. Dafür wurde der erste Prototyp des Lastenkrad umgebaut, sodass diese alternativen Akkus übergangsweise verwendet werden konnten. Abbildung 36 zeigt den ersten finalen Demonstrator mit den Ersatzbatterien. Nach Erhalt der finalen Batterien wurden die Ersatzbatterien im ersten finalen Demonstrator ausgetauscht.

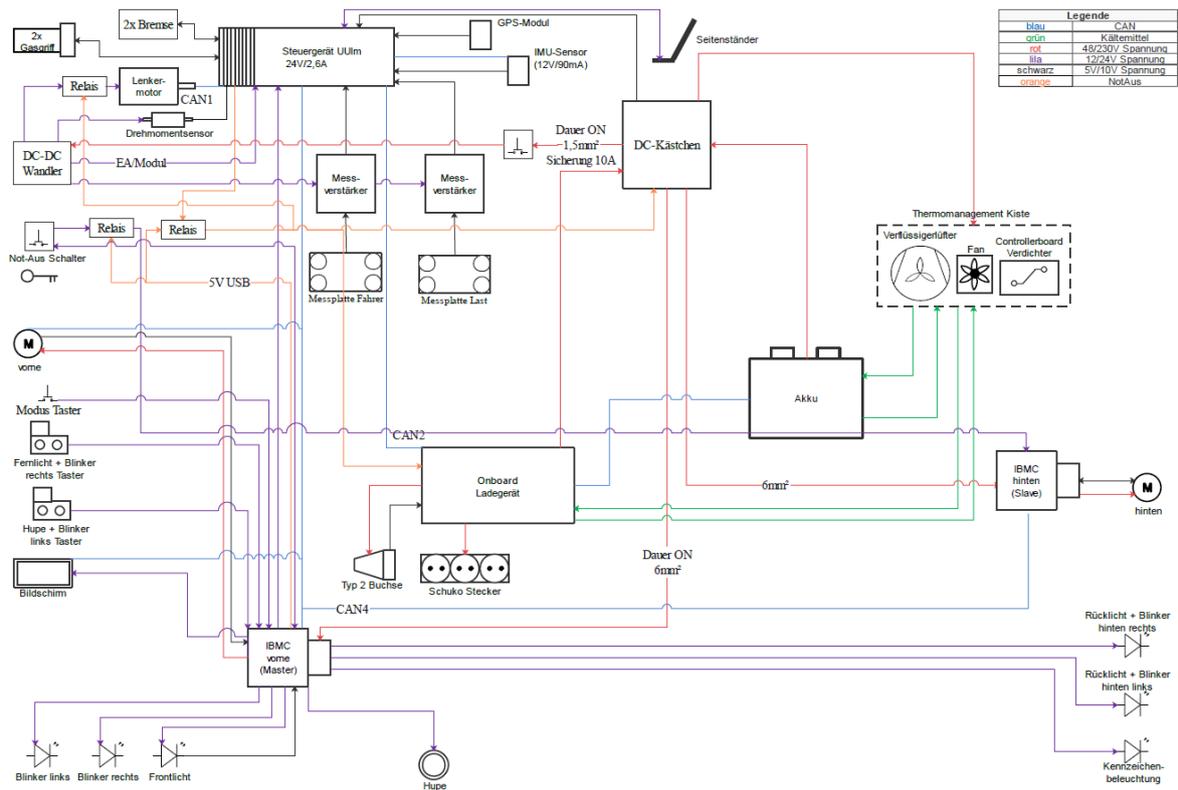


Abbildung 35: Systembeschreibung

Ein zweiter finaler Demonstrator wurde ebenfalls inklusive aller Komponenten fertig aufgebaut. Aufgrund eines Hardwareproblems im Batteriemangement-System des zweiten finalen Demonstrators, dass bis zum Projektende vom Zulieferer nicht gelöst werden konnte, konnten jedoch keine vollständige Inbetriebnahme und keine Fahrttests mit dem zweiten finalen Demonstrator durchgeführt werden. Dies wird nach Projektende noch nachgeholt.



Abbildung 36: Erster Demonstrator mit Ersatzbatterien



3.5.5 AP 5.5 Evaluation und Optimierung an finalen Demonstratoren

Die in Abschnitt 3.3.3 beschriebene Schätzalgorithmen wurden am finalen Demonstrator getestet. Anhand der Messungen der Kraftsensoren konnten das Gewicht und der laterale Schwerpunkt der Last genau abgeschätzt werden. Aufgrund der verrauschten IMU-Sensor-Messungen konnte die Rollbeschleunigung nicht genau geschätzt werden. Dies wiederum wirkte sich negativ auf die Schätzung des Trägheitsmoments aus. Die Parameter der Kalman-Filter zur Schätzung des Rollwinkels müssen daher in der Zukunft angepasst werden, um die Schätzung zu verbessern. Aufgrund der sehr späten Fertigstellung der Demonstratoren konnte dies nicht mehr im Projektzeitraum erfolgen.

Zusätzlich wurde auch der Einfluss der Aufteilung des Antriebsmoments auf die Fahrdynamik und das Fahrgefühl für Geradeausfahrt und Kurvenfahrt untersucht. Es wurde festgestellt, dass niedrigere Drehmomente am Vorderrad (bis zu 30% des Gesamtmoments) einen positiven Einfluss auf das Fahrgefühl haben. Das Vorderradmoment erleichtert das Einfahren in eine Kurve. Bei Geradeausfahrt fühlte sich das Lastenrad ebenfalls stabiler. Bei höheren Anteilen des Antriebsmoments am Vorderrad (> 50%) verschlechtert sich das Fahrerlebnis hingegen. So wurde in diesen Fällen festgestellt, dass die Ausfahrt aus der Kurve schwieriger ist. Auch bei der Geradeausfahrt hat das hohe Vorderradmoment die Fahrstabilität verschlechtert. Diese bestätigt die Erkenntnisse aus der Literatur.

3.6 Meilensteine

3.6.1 MS 1 Ergebnisse der Use-Case- und Geschäftsmodellanalyse liegen vor, Lasten-/Pflichtenheft ist fertiggestellt

Die Geschäftsmodelle wurden zu Beginn des Projekts grob umrissen und wurden unter Berücksichtigung der Kostenberechnung Ende 2018 quantifiziert und der Meilenstein damit abgeschlossen.



3.6.2 MS 2 Erster Demonstrator für Allradversuche und erste Version des Batterie-Labormodells sind verfügbar

Der Aufbau des Labormodells sowie die Durchführung von ersten Testmessungen wurden bis Mitte 2019 abgeschlossen. Der erste Demonstrator wurde verzögert Ende 2019 aufgebaut und zur Verfügung gestellt. Somit wurde der MS 2 verzögert erreicht.

3.6.3 MS 3 Konzeption und Auslegung des Gesamtfahrzeugs ist fertiggestellt, Batterielaborsystem für finale Tests verfügbar, Antriebsstrang in finaler Version verfügbar, die finalen Ergebnisse der Geschäftsmodellanalyse liegen vor

Die Tests am Batterielaborsystem zur Charakterisierung der Komponenten und Test der Regelungsalgorithmen wurden in 2019 erfolgreich durchgeführt. Der Antriebstrang wurde im Lastenrad integriert. Zusätzlich wurde ein Prüfstand mit zwei Elektromotoren entwickelt, um das Testen von Algorithmen für den Allradantrieb zu unterstützen. Die Ergebnisse der Geschäftsmodellanalyse lagen 2019 vor. Somit wurde der MS 3 leicht verzögert abgeschlossen.

3.6.4 MS 4 Demonstratoren sind für finale Tests verfügbar

Aufgrund der Corona-Pandemie sind erhebliche Verzögerungen im Projekt aufgetreten. Es traten große Verzögerungen bei der Lieferung von Motoren und Controller auf. Zusätzliche Verzögerungen bei der Herstellung der Kühlplatten haben weiterhin die Entwicklung der Batterie verzögert. Die Verspätung der Akkulieferung hat eine Verwendung anderer Akkus als Zwischenlösung notwendig gemacht. Dafür wurde der erste Prototyp des Lastenrades umgebaut, sodass diese alternativen Akkus übergangsweise verwendet werden können, und Ende 2021 an UULM ausgeliefert.

Die erste finale Batterie wurde Ende März 2022 fertiggestellt und mit der Batteriekühlung in Betrieb genommen. Nach Erhalt der Batterie 2 am 17.05.2022 wurde die Ersatzbatterie in den bis dahin vollständig aufgebauten zweiten Demonstrator integriert. Die ursprüngliche Planung, die Batterie am 24. Mai 2022 in Betrieb zu nehmen wurde, durch ein nicht vorherzusehendes Problem in der Platine



des Batterie-Management-Systems der Batterien 2 und 3 verhindert. Der zweite Demonstrator stand daher nicht für eine Inbetriebnahme und finale Tests zur Verfügung. Die Behebung des Problems bis zur Abschlusspräsentation scheint aber wahrscheinlich.

MS 4 wurde daher verzögert Anfang 2022 nur teilweise erreicht.

3.6.5 Abschluss MS 5 Projektabschluss

Das Projekt wurde aufgrund der bewilligten Verlängerung zum 31.05.2022 abgeschlossen. Auch wenn der zweite Demonstrator aufgrund notwendiger Nacharbeiten erst nach Projektende fertig gestellt werden wird, konnten die Forschungsinhalte dennoch erfolgreich abgeschlossen und, soweit zutreffend, am ersten finalen Demonstrator umgesetzt werden. MS 5 wurde somit Mitte 2022 erreicht.

4 Ergebnisverbreitung

Die im Rahmen des Projekts erarbeiteten wissenschaftlichen Ergebnisse wurden in folgenden Veröffentlichungen publiziert:

- Mayer, Bastian und Ewert, Amelie und Deniz, Özcan: *Entwicklung eines E-Cargo-Leicht-Motorrads: Anforderungen der gewerblichen Anwender*. In: Tagungsband zur 3. VDI-Fachtagung Leichte E-Mobilität und Mikromobilität. 3. VDI Fachtagung Leichte E-Mobilität und Mikromobilität, 24./25. Sept. 2019, Bad Soden, Deutschland.
- Pai, Suvrath, Benedikt Neuberger, and Michael Buchholz: *Adaptive model predictive stabilization of an electric cargo bike using a cargo load moment of inertia estimator*. In: *at-Automatisierungstechnik* 69.7 (2021): 632-642.
- Pai, Suvrath, Benedikt Neuberger, and Michael Buchholz: *Online Estimation of Mass and Moment of Inertia of Cargo Bike Payload using an Unscented Kalman Filter*. In: 2021 21st International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). IEEE, 2021.

Zudem wurde das ZEC-Bike-Projekt in den Broschüren zum Strategiedialog Automobilwirtschaft Baden-Württemberg vorgestellt.

Weitere geplante Projektvorstellungen für ein Fachpublikum beim Zwischenbilanztreffen des Strategiedialogs Automobilwirtschaft Baden-Württemberg sowie der allgemeinen Öffentlichkeit bei der Veranstaltung „Festival für digitale Mobilität“ in Ulm konnten aufgrund Corona-bedingter Einschränkungen bzw. Absagen trotz entsprechender Vorbereitung und Planung leider nicht stattfinden.

Die Firma Elektromaschinenbau GmbH wird die gewonnenen Erkenntnisse nutzen und eine abgewandelte Version des Lastenrads in Zukunft aufbauen und die Ergebnisse zudem für Werbezwecke verwenden.