

# Der Entwicklungsprozess automatisierter Mikromobile - Ein mechatronischer Ansatz

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

von M.Sc. Lars Junge  
geboren am 21. Februar 1984 in Staßfurt  
genehmigt durch die Fakultät Maschinenbau  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Stephan Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Benjamin Noack

Promotionskolloquium am 18. Februar 2025

## Kurzreferat

Mikromobilität ist eine Alternative zur Entlastung der Innenstädte vom Überfluss der verbrennungsmotorisch angetriebenen Personenkraftwagen. Durch die Verwendung von elektrischen Antrieben sowie Brems- und Lenksystemen können auf einem Mikromobil Funktionalitäten implementiert werden, die eine Automatisierung der Fahraufgaben ermöglichen. Dafür muss im ersten Schritt der rechtliche Rahmen abgesteckt werden und adäquate Komponenten zur Automatisierung identifiziert werden. Im nächsten Schritt werden die Methodik und die mathematischen Modelle zur Entwicklung automatisierter Mikromobile und den zugehörigen Automatisierungsfunktionen vorgestellt. Die Methodik umfasst ein adaptiertes Vorgehensmodell mit allen Prozessschritten zur Entwicklung automatisierter Mikromobile auf mechatronischer Ebene. Es werden zwei Fallbeispiele mit unterschiedlichem Automatisierungsgrad vorgestellt, anhand derer die einzelnen Prozessschritte anschaulich erläutert werden. Die Entwicklung beginnt mit dem Teilprozess Anforderungsanalyse, aus der ein Lastenheft mit den festgehaltenen und kategorisierten Anforderungen an das automatisierte Mikromobil hervor geht. Auf Basis der Anforderungen folgt die Entwurfsphase mit den Kernthemen Modellierung und Funktionsentwurf. Auf Grundlage von Simulationen können geeignete Hardwarekomponenten für die Automatisierungsfunktionalität identifiziert werden. Im nächsten Teilprozess werden die Hardware und die Funktionalitäten in das Mikromobil integriert und statische und dynamische Parameter ermittelt, um das Gesamtsystem automatisiertes Mikromobil in Betrieb zu nehmen. In der Finalisierungsphase werden die erreichten Funktionen mit den Anforderungen abgeglichen und durch Optimierungen angepasst. Das vorgestellte Vorgehensmodell zur Automatisierung von Mikromobilen bildet eine logisch aufeinander aufbauende Reihenfolge der Prozessschritte ab, um als Orientierungshilfe einen strukturierten Entwicklungsprozess zu ermöglichen.

## Abstract

Micromobility is an alternative to relieving city centers from the plenty of combustion engine-powered passenger cars. By using electric drives as well as braking and steering systems, functionalities can be implemented on a micromobile that enable driving tasks to be automated. In the first step, the legal framework must be defined and adequate components for automation must be identified. In the next step, the methodology and mathematical models for the development of automated micromobiles and the associated automation functions will be presented. The methodology includes an adapted process model with all process steps for the development of automated micromobiles on a mechatronic level. Two case studies with different degrees of automation are presented, which are used to nearly explain the individual process steps. Development begins with the requirements analysis sub-process, which produces a specifications document with the recorded and categorized requirements for the automated micromobile. Based on the requirements, the design phase follows with the core topics of modeling and functional design. Based on simulations, suitable hardware components for the automation functionality can be identified. In the next subprocess, the hardware and functionalities are integrated into the micromobile and static and dynamic parameters are determined in order to put the entire automated micromobile system into operation. In the finalization phase, the achieved functions are compared with the requirements and adjusted through optimizations. The presented process model for the automation of micromobiles represents a logical sequence of process steps in order to enable a structured development process as a guide.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>14</b>
2.1	Mikromobile und Mikrotransportmobile . . . . .	14
2.2	Automatisierungsgrade für Mikromobile . . . . .	18
2.3	Rechtliche Rahmenbedingungen . . . . .	20
2.4	Sicherheitsmanagement . . . . .	25
2.5	Komponenten für automatisierte Mikromobile . . . . .	26
2.5.1	Sensorik und Aktorik für den Antrieb . . . . .	26
2.5.2	Sensorik und Aktorik für die Bremse . . . . .	27
2.5.3	Sensorik und Aktorik für die Lenkung . . . . .	30
2.5.4	Weitere Sensorik für die Bestimmung der Fahrzustände . . . . .	33
2.5.5	Sensorik für die Umfeldwahrnehmung . . . . .	34
2.5.6	Planung der Sollwertvorgaben . . . . .	35
2.5.7	Filterung von Messwerten . . . . .	35
2.5.8	Regelungsstrategien . . . . .	36
2.6	Abgrenzung der eigenen Arbeit . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>39</b>
3.1	Methodik . . . . .	39
3.2	V-Modell der Mechatronik . . . . .	42
3.3	Risikobeurteilung . . . . .	43
3.3.1	Risikoanalyse . . . . .	44
3.3.2	Risikobewertung . . . . .	45
3.3.3	Risikominderung . . . . .	46
3.3.4	Weitere Methoden der Risikobeurteilung . . . . .	48
3.4	Fahrzeugmodelle . . . . .	49
3.4.1	Koordinatensysteme . . . . .	49
3.4.2	Modell der Längsdynamik . . . . .	50
3.4.3	Modell der Querdynamik . . . . .	53
3.4.4	Modell der Wankdynamik . . . . .	56
3.4.5	Modell der Nickdynamik . . . . .	58
3.4.6	Modell der Raddynamik . . . . .	59

3.4.7	weitere Dynamikmodelle . . . . .	63
3.5	Fahrzustandsbeobachtung . . . . .	67
3.5.1	Extended Kalman Filter . . . . .	68
<b>4</b>	<b>Anforderungsanalyse automatisierter Mikromobile</b>	<b>72</b>
4.1	Anwendungsbeispiele . . . . .	73
4.1.1	E-Trailer - Elektrisch unterstützter Fahrradanhänger . . . . .	73
4.1.2	AuRa - Autonomes Rad - Flexibler Einsatz autonomer Fahrradsysteme für Logistik- u. Beförderungsaufgaben . . . . .	74
4.2	Analyse des Einsatzszenarios . . . . .	76
4.3	Regulatorische Anforderungen . . . . .	80
4.4	Anforderungen an das Sicherheitsmanagement . . . . .	81
4.5	Erforderliche Module und Funktionsbausteine . . . . .	83
4.6	Anforderungen an die Aktorik und Sensorik . . . . .	85
<b>5</b>	<b>Systementwurf für automatisierte Mikromobile</b>	<b>90</b>
5.1	Funktionsorientiertes Modell und Teilfunktionen . . . . .	93
5.2	Modellierung des Mikromobils . . . . .	93
5.3	Analyse der Modelle . . . . .	95
5.4	Entwurf von Funktionen . . . . .	96
5.5	Dimensionierung der Funktionsparameter . . . . .	97
5.6	Simulation und Mehrkörpersimulation . . . . .	98
5.7	Robustheit und Parameterstudien . . . . .	99
5.8	Schwingungen und Thermik . . . . .	99
5.8.1	Komponentenbelastungen durch Schwingungen . . . . .	100
5.8.2	Wärmeableitung am Mikromobil . . . . .	101
5.9	Auswahl von Komponenten . . . . .	101
5.10	Entwurf von Funktionen des E-Trailers . . . . .	105
5.10.1	Modellbildung des E-Trailers . . . . .	105
5.10.2	Entwurf der Funktionen des E-Trailers . . . . .	109
5.10.3	Stabilität und Dimensionierung der Regler des E-Trailers . . . . .	119
5.10.4	Simulation der Regler des E-Trailers . . . . .	121
5.10.5	Variation der Fahrzeugmodellparameter für den Beobachter des E-Trailers . . . . .	122
5.10.6	Mehrkörpersimulation des E-Trailers . . . . .	124
5.10.7	Reduzierung der Schwingungen auf die Rechentechnik am E-Trailer	124
5.10.8	Auswahl der Rechentechnik des E-Trailers . . . . .	125
5.11	Entwurf von Funktionen im Projekt Aura . . . . .	126
5.11.1	Modellbildung des automatisierten Lastenrades . . . . .	126
5.11.2	Funktionen des automatisierten Lastenrades . . . . .	128

5.11.3	Stabilität und Dimensionierung des Querreglers im Projekt Aura . . .	131
5.11.4	Simulation des automatisierten Lastenrades . . . . .	133
5.11.5	Robustheit der Querregelung des automatisierten Lastenrades . . .	133
5.11.6	Wärmemanagement des automatisierten Lastenrades . . . . .	135
5.11.7	Auswahl der Schnittstellen des automatisierten Lastenrades . . . . .	135
<b>6</b>	<b>Implementierung eines automatisierten Mikromobils</b>	<b>137</b>
6.1	Montage, Energieversorgung und Schnittstellen der Komponenten . . . . .	138
6.2	Programmierung der Hardware . . . . .	139
6.3	Inbetriebnahme und Integration von Komponenten und Teilsystemen . . .	141
6.4	Signallauf- und Totzeiten . . . . .	142
6.5	Identifikation der Modellparameter . . . . .	144
6.5.1	Direkt bestimmbare Parameter . . . . .	145
6.5.2	Indirekt bestimmbare Parameter . . . . .	145
6.5.3	Referenzmesstechnik . . . . .	147
6.5.4	Optimierung der Modellparameter . . . . .	149
6.6	Vorabtests zur Inbetriebnahme des Gesamtsystems . . . . .	150
6.7	Inbetriebnahme des Gesamtsystems . . . . .	151
<b>7</b>	<b>Finalisierung des automatisierten Mikromobils</b>	<b>154</b>
7.1	Verifizierung . . . . .	154
7.2	Anpassungen an Anforderungen und Optimierung des Mikromobils . . . . .	156
7.3	Validierung . . . . .	157
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>159</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>162</b>
<b>A</b>	<b>Diagramme</b>	<b>168</b>
A.1	Mikromobile . . . . .	168
A.2	E-Trailer . . . . .	169
A.3	Automatisiertes Lastenrad . . . . .	171
<b>B</b>	<b>Berechnungen / Herleitungen</b>	<b>172</b>
B.1	Herleitung des Einspurmodells . . . . .	172
<b>C</b>	<b>Dokumente zu den Projekten</b>	<b>175</b>
C.1	E-Trailer Lastenheft . . . . .	175
C.2	E-Trailer Risikobeurteilung . . . . .	178

## Abkürzungsverzeichnis

<b>ABS</b>	Anti-Blockier-System
<b>ACC</b>	Abstandsregeltempomat, engl. Adaptive Cruise Control
<b>AFGBV</b>	Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs- und-Betriebs-Verordnung
<b>ASIL</b>	Sicherheitsintegritätslevel für Automobile, engl. Automotive Safety Integrity Level Direct Current
<b>BLDC</b>	Bürstenloser Gleichstrommotor, engl. Brushless Direct Current
<b>CAD</b>	Computer-gestützte Konstruktion, engl. Computer Aided Design
<b>CAN</b>	Controller Area Network
<b>COM</b>	Fahrzeugschwerpunkt, engl. Centre Of Mass
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung
<b>EN</b>	Europäische Norm
<b>EKF</b>	Erweitertes Kalman Filter, engl. Extended Kalman Filter
<b>eKFV</b>	Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung
<b>EPAC</b>	elektrisch unterstützte Fahrräder, engl. Electrically power assisted cycle
<b>ESP</b>	Elektronisches Stabilitätsprogramm
<b>FMEA</b>	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse, engl. Failure Mode and Effects Analysis
<b>FTA</b>	Fehlerbaumanalyse, engl. Fault Tree Analysis
<b>FuE</b>	Forschung und Entwicklung
<b>GPS</b>	Globales Positioniersystem, engl. Global Positioning System
<b>HMI</b>	Mensch-Maschine-Schnittstelle, engl. Human-MACHINE-Interface
<b>IMU</b>	Inertiale Messeinheit, engl. Inertial Measurement Unit

<b>IP</b>	Schutzart, engl. Ingress Protection
<b>ISO</b>	Internationale Organisation für Normung, engl. International Organization for Standardization
<b>ITF</b>	International Transport Forum
<b>KFZ</b>	Kraftfahrzeug
<b>Lidar</b>	optische Abstands- und Geschwindigkeitsmessung, engl. Light detection and ranging
<b>LTE</b>	Mobilfunkstandard der 4.Generation, engl. Long term evolution
<b>MEMS</b>	Mikro-Elektro-Mechanisches System, engl. Micro-Electro-Mechanical System
<b>MKS</b>	Mehrkörpersystem
<b>MTM</b>	Mikrotransportmobil
<b>OECD</b>	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, engl. Organization for Economic Co-operation and Development
<b>PC</b>	Personalcomputer
<b>Pedelec</b>	Tretkraftunterstütztes elektrisches Fahrrad, engl. Pedal Electric Cycle
<b>POI</b>	Ort von Interesse, engl. Point Of Interest
<b>SAE</b>	Verein der Automobilingenieure, engl. Society of Automotive Engineers
<b>SI</b>	Internationales Einheitensystem, franz. Système international d'unités
<b>SIL</b>	Sicherheitsintegritätslevel, engl. Safety integrity level
<b>STAMP</b>	Systemtheoretisches Unfall- und Prozessmodell, engl. Systems-Theoretic Accident Model and Processes
<b>STPA</b>	Systemtheoretische Prozessanalyse, engl. Systems Theoretic Process Analysis
<b>StVG</b>	Straßenverkehrsgesetz
<b>StVO</b>	Straßenverkehrsordnung
<b>StVZO</b>	Straßenverkehrszulassungsordnung
<b>SUV</b>	Stadtgeländewagen, engl. Sports utility vehicle
<b>TCP/IP</b>	Übertragungsprotokoll, engl. Transmission Control Protocol/Internet Protocol

<b>UDP</b>	Nutzerübertragungsprotokoll, engl. User Datagram Protocol
<b>USB</b>	Universelles Datenübertragungssystem, engl. Universal Serial Bus
<b>VwV</b>	Verwaltungsvorschrift
<b>WLAN</b>	Kabelloses lokales Netzwerk, engl. Wireless local area network

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Transportbedarf und Strecken . . . . .	12
2.1	Klassifizierung der Mikromobile nach Transportfähigkeit . . . . .	17
2.2	Mikrotransportmobil:Lastkraftflitzer . . . . .	17
2.3	Motor aus dem Lastenrad Segment und beispielhafte Einbaulage am Lastenrad	27
2.4	Patente zu elektromechanischen Bremsanlagen in Kleinstfahrzeugen . . . . .	29
2.5	Schematische Darstellungen hydraulischer Lenkungen . . . . .	32
2.6	Patentierete Lenksysteme für Mikromobile . . . . .	32
2.7	Details von patentierten Lenksystemen . . . . .	33
2.8	Regelkreis . . . . .	36
2.9	Kaskadierte und parallele Reglerstruktur . . . . .	37
3.1	Auflösungsgrad einzelner Entwicklungsmethoden . . . . .	40
3.2	Vorgehensmodell nach VDI 2221 . . . . .	40
3.3	Münchener Vorgehensmodell . . . . .	41
3.4	V-Modell der Mechatronik . . . . .	43
3.5	Darstellungsformen zur Risikobewertung . . . . .	46
3.6	Koordinatensysteme . . . . .	50
3.7	Kräfte am Fahrzeug bei beschleunigter Steigungsfahrt . . . . .	51
3.8	Einspurmodell . . . . .	53
3.9	kinematisches Einspurmodell . . . . .	55
3.10	Modell der Wankdynamik . . . . .	56
3.11	Modell der Nickdynamik . . . . .	58
3.12	Modell der Raddynamik . . . . .	60
3.13	qualitative Reifenkennlinie . . . . .	61
3.14	Reifenlängs- und Querkraft . . . . .	62
3.15	Einordnung der Raddynamik im Einspurmodell . . . . .	63
3.16	Ebenes Zweispurmodell . . . . .	65
3.17	Koordinatentransformation . . . . .	66
3.18	Beobachter in der Regelungstechnik . . . . .	68
3.19	Auswirkung der Änderung in den Kovarianzmatrizen . . . . .	70
4.1	Prozessschritte der Anforderungsanalyse . . . . .	73
4.2	CAD-Modell des E-Trailers . . . . .	74

---

4.3	Anwendungsszenario im Projekt AuRa [60] . . . . .	75
4.4	CAD-Modell des Lastenrades mit Steuerungstechnik . . . . .	76
4.5	Betriebszustände des E-Trailers . . . . .	78
4.6	Module eines Automatisierungssystems für Fahraufgaben . . . . .	83
4.7	Ablaufdiagramm zur Auswahl der nötigen Aktoren/Sensoren für automati- sierte Mikromobile . . . . .	86
5.1	Prozessschritte des Entwurfsprozesses . . . . .	92
5.2	Dekomposition eines funktionsorientierten Blockschaltbildes . . . . .	93
5.3	Funktionsorientiertes Blockschaltbild des E-Trailers . . . . .	105
5.4	Modellierungsgrundlage des E-Trailers als Draufsicht von oben . . . . .	106
5.5	Draufsicht auf das Aufstandsdreieck des E-Trailers . . . . .	108
5.6	Statische Kräfte am Fahrzeugquerschnitt zur Ermittlung der Kippstabilität	109
5.7	Struktur der E-Trailer Funktionalitäten . . . . .	109
5.8	Kräfte am Zugfahrzeug und Anhänger . . . . .	111
5.9	Blockschaltbild des Summenreglers mit Strecke . . . . .	112
5.10	Geschwindigkeiten der Radaufstandspunkte des E-Trailers . . . . .	113
5.11	Ermittlung der Gierrate aus den Radgeschwindigkeiten . . . . .	115
5.12	Blockschaltbild des Differenzreglers mit Strecke . . . . .	115
5.13	Blockschaltbild des Gesamtreglers für Zugkraft und Gierrate . . . . .	116
5.14	Simulierte Sprungantwort der Regelstrecken des E-Trailers . . . . .	122
5.15	Fehlermaß des Beobachters bei unterschiedlichen Modellparametern . . . . .	123
5.16	Funktionsorientiertes Blockschaltbild des Autonomen Lastenrades . . . . .	126
5.17	Längs- und Querabstand von der Istposition zur Sollposition . . . . .	129
5.18	System in Zustandsraumdarstellung mit Polvorgabe durch Zustandsrück- führung . . . . .	131
5.19	Zustandsrückführung des Querreglers im Projekt Aura . . . . .	131
6.1	Prozessschritte der Implementierung . . . . .	138
6.2	Substitution des Modells durch Schnittstellen für die Programmierung der Automatisierungsfunktion . . . . .	140
6.3	Schema der Wirkkette des Teilsystems Lenkung . . . . .	141
6.4	Schema der Totzeiten in der Signalverarbeitungskette der Bahnregelung im Projekt Aura . . . . .	143
6.5	Blockschaltbild eines Smith-Predictors . . . . .	144
6.6	Gemessener Rollwiderstand und zugehörige Regressionsgerade . . . . .	147
6.7	Messwerte und Referenzmesswerte des automatisierten Lastenrades . . . . .	148
7.1	Prozessschritte der Finalisierung . . . . .	154
7.2	Verifizierung der Verzögerung und des Notstopps . . . . .	156

A.1	Entwicklungsprozess eines automatisierten Mikromobils . . . . .	168
A.2	Sicherheitsmanagement Modul des Steuergerätes auf dem E-Trailer . . . .	169
A.3	Zustandsverläufe und Filter-Schätzungen des Trailers bei Kreisfahrt links .	170
A.4	Sicherheitsmanagement Graph im Projekt Aura . . . . .	171

## Tabellenverzeichnis

2.1	Klassifizierung der Mikromobile nach SAE J3194 . . . . .	15
2.2	Klassifizierung der Mikromobile nach OECD/ITF . . . . .	16
2.3	Auszug aus der Klassifizierung der Mikromobile nach EU 168/2013 . . . . .	16
2.4	Automatisierungsgrade des automatisierten Fahrens . . . . .	19
2.5	Anforderungen aus der eKFV . . . . .	21
2.6	Anforderungen aus der DIN 79010 . . . . .	22
2.7	Gesetze und Verordnungen für automatisierte Mikromobile . . . . .	24
2.8	Komponenten automatisierter Mikromobile . . . . .	26
2.9	Suchanfragen für die Patentrecherche mit DEPATISnet . . . . .	29
2.10	Sensoren für die Umfeldwahrnehmung . . . . .	35
3.1	Reihenfolge der Drehungen . . . . .	67
4.1	Anforderungen im Lastenheft . . . . .	79
C.1	Auszug aus dem Lastenheft Teil 1 . . . . .	176
C.2	Auszug aus dem Lastenheft Teil 2 . . . . .	177
C.3	Risikobeurteilung E-Trailer Teil 1 . . . . .	182
C.4	Risikobeurteilung E-Trailer Teil 2 . . . . .	183

# 1 Einleitung

Die urbane Mobilität befindet sich in einem ständigen Wandlungs- und Wachstumsprozess. Dabei ist die Wandlungsdynamik der Verkehrsmittel sehr viel schneller als die der trägen städtischen Infrastruktur. Zum derzeitigen Stand können die innerstädtischen Verkehrswege das hohe Verkehrsaufkommen mit den aktuellen individuellen Fortbewegungsmitteln nur begrenzt bewältigen. Das Resultat sind verstopfte Verkehrswege in den Stadtzentren verbunden mit einer erhöhten Belastung der Umwelt durch Lärm und Emissionen.

Die Entlastung sowohl der aktiven als auch passiven Verkehrsteilnehmer ist derzeit eine akute Herausforderung, die bei der Gestaltung zukünftiger Verkehrswege und Verkehrsmittel stark berücksichtigt werden muss. Ein Trend des letzten Jahrzehnts sind Kraftfahrzeuge, die mit leistungsstarken Verbrennungsmotoren ausgestattet werden und in Form von SUVs eine größere Karosserie besitzen. Dadurch wird ein erhöhter Raumbedarf in urbanen Gebieten beansprucht und im Vergleich zu kleineren Fahrzeugen mehr Emissionen produziert. Im öffentlichen Interesse aller Verkehrsteilnehmer und als Notwendigkeit für den Klimawandel sollte der Raumbedarf eines Fortbewegungsmittels für den individuellen Personentransport drastisch reduziert werden und die Antriebe in Relation zur verringerten Fahrzeugmasse entsprechend kleiner dimensioniert werden. Die Fahrzeughersteller werden neben den Regularien zur Lärm- und Abgasreduzierung auch durch die hohen Energiekosten gezwungen, bei der Entwicklung und Markteinführung neuer Mobile umzudenken.

In allen Städten existieren bereits Lösungen zur Reduzierung der Anzahl an Fahrzeugen und der Umweltbelastung in Form der öffentlichen Verkehrsmittel. Diese sind aufgrund ihrer Fahrtrouten oder fest installierten Infrastruktur wie zum Beispiel Schienen und Oberleitungen nur begrenzt für alle Nutzer der öffentlichen Verkehrsmittel geeignet, da die Anzahl an Haltepunkten für Zu- oder Ausstiege nicht beliebig skaliert werden kann. Der Nutzer öffentlicher Verkehrsmittel muss die erste/letzte Meile zwischen Start und Haltestelle bzw. Haltestelle und Ziel individuell zurücklegen. Auch für diese Problematik wurden in den letzten Jahren Lösungsansätze entwickelt. In vielen Städten gibt es Sharing-Konzepte für Kleinstfahrzeuge, die die öffentlichen Verkehrsmittel ergänzen sollen. Um eine hohe Verfügbarkeit und homogene Verteilung der Kleinstfahrzeuge auf dem Stadtgebiet zu gewährleisten, muss jedoch eine hohe Fahrzeuganzahl innerhalb der Sharing-Flotte bereitgehalten werden, wodurch erneut ein Platzbedarf im öffentlichen Verkehrsraum erforderlich wird.

Dass auch Kleinstfahrzeuge den individuellen Transportbedarf bewältigen können, zeigen Studien, welche die Zusammenhänge zwischen Transportbedarf, Transportmenge und Transportweg untersuchen. In [1], [2] und [3] wird aufgezeigt, wie sich der Großteil aller Fahrten im urbanen Raum zusammensetzt (siehe auch Abb. 1.1). In der Regel beschränkt sich die Personenzahl im Kraftfahrzeug auf eine Person und das mitgeführte Transportgut ist sehr gering. Die zurückgelegten Einzelfahrstrecken liegen in Distanzbereichen, für die ein konventioneller Personenkraftwagen überdimensioniert ist.

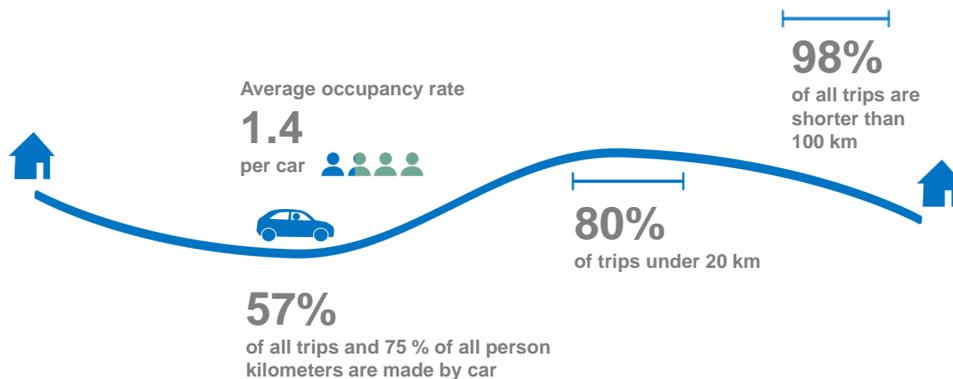


Abbildung 1.1: Transportbedarf und Strecken [3]

Der Trend in der Entwicklung neuartiger Fortbewegungsmittel geht in Richtung Kleinstfahrzeuge und Mikromobile, die mit einem elektrischen Antrieb ausgestattet und dem individuellen Transportbedarf angepasst sind. Viele kleine Startup-Unternehmen bilden sich und produzieren verschiedenartige Mikromobile für den Markt. Aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung des Antriebs sowie der Brems- und Lenksysteme können auch Assistenzsysteme implementiert werden, die eine Automatisierung des Fahrzeuges ermöglichen. Mit steigendem Automatisierungsgrad müssen entsprechende Vorschriften und Regularien bei der Entwicklung und Inbetriebnahme der Mikromobile angewendet werden. Speziell für die neuartigen Mikromobile gibt es nur wenige Regularien, die beim Entwicklungsprozess angewendet werden können.

In dieser Arbeit soll unter anderem ermittelt werden, welche Normen und Richtlinien für die Entwicklung von automatisierten Mikromobilen angewendet werden können und müssen. Für den Entwicklungsprozess wird das V-Modell aus der Mechatronik adaptiert und anhand von zwei Fallbeispielen diskutiert. Das V-Modell ist ein etabliertes Entwicklungsmodell in Unternehmen, die Übertragbarkeit des Modells auf automatisierte Mikromobile muss jedoch evaluiert werden. Diese Arbeit zeigt explizit die Prozessschritte auf, die während der Anwendung des Modells für die Entwicklung automatisierter Mikromobile besonders beachtet werden müssen und bettet diese in einen Ablaufplan.

---

Zusammengefasst lassen sich daraus folgende Forschungsfragen ableiten:

- Welche veröffentlichten Regularien sind für die Entwicklung automatisierter Mikromobile anwendbar?
- Lassen sich etablierte Entwicklungsprozesse wie das V-Modell der Mechatronik auf automatisierte Mikromobile anwenden?
- Welche Prozessschritte müssen spezifisch für automatisierte Mikromobile beachtet werden und welche logisch aufeinander aufbauende Reihenfolge der Prozessschritte sollte eingehalten werden?

Zunächst wird der aktuelle Entwicklungsstand im Bereich der Mikromobile aufgezeigt und die relevanten Regularien zum Thema aufgelistet. Für die Automatisierung werden sowohl Hardware- als auch Softwaremodule vorgestellt, die im Gesamtsystem Mikromobil obligatorisch sind. Weiterhin werden die maßgebenden Modelle aufgeführt, auf deren Grundlage der Entwicklungsprozess und die Automatisierung aufbaut. Danach ist der inhaltliche Aufbau der Arbeit analog zum V-Modell gegliedert. Beginnend mit der Anforderungsanalyse wird der Ausgangspunkt für die Entwicklung gelegt. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden anhand von zwei Fallbeispielen die Prozessschritte vom Systementwurf über die Implementierung bis zur Finalisierung exemplarisch durchlaufen, um den Entwicklungsprozess automatisierter Mikromobile darzustellen.

## 2 Stand der Technik

Mikromobilität verbreitet sich in den letzten Jahren rasant und gewinnt sowohl im kommerziellen als auch im privaten Sektor zunehmend an Bedeutung und Beliebtheit. Die Gründe dafür sind vor allem stetig steigende Energiepreise, die z.B. durch Krisen und Kriege oder weltweite Pandemien hervorgerufen werden. Daraus entsteht der Zwang den Energieverbrauch der Fortbewegungsmittel effizienter zu gestalten, um die steigenden Kosten zu kompensieren. Ein Ansatz zum Senken des Energieverbrauchs ist das Downsizing der Fahrzeuggröße verbunden mit einer erheblichen Reduzierung der Fahrzeugmasse. Dadurch werden die Fahrwiderstände erheblich verringert und der Energiebedarf langfristig gesenkt. In [1], [2] und [4] wird gezeigt, welche Fahrten in innerstädtischen Bereichen zu welchen Zwecken und mit welchen Distanzen durchgeführt werden. Aus den Studien hat sich eine Fahrzeuginsassenzahl von 1,5 Personen [3], [4] und eine durchschnittliche innerstädtische Einzelfahrstrecke zwischen 11 und 13 km ergeben [1]. Viele dieser Fahrten benötigen sehr wenig bis keine Transportkapazität von Gütern und können folglich mit Mikromobilen durchgeführt werden. Auch im kommerziellen Bereich können eine Vielzahl der Fahrten aufgrund der Weglänge und Transportkapazität mit deutlich kleineren Fahrzeugen getätigt werden, wie in [1] und [2] gezeigt wird. Der Anteil an Fahrten mit Lastentransportbedarf kann jedoch nicht oder nur unzureichend mit Mikromobilen durchgeführt werden, da hier eine stark begrenzte Zuladungsmöglichkeit und Transportkapazität besteht. Um diesen Nachteil zu kompensieren, können Kleinstfahrzeuge durch Anhänger ergänzt oder durch Mikrotransportmobile (MTM) ersetzt werden. Im Folgenden wird eine Abgrenzung zwischen den Kleinstfahrzeugen definiert und mögliche Automatisierungsstufen auf den jeweiligen Plattformen aufgezeigt.

### 2.1 Mikromobile und Mikrotransportmobile

In [5] wird die Mikromobilität als Fortbewegung mit elektrisch angetriebenen Kleinst- und Leichtfahrzeugen sowie Pedelecs definiert, jedoch wird zusätzlich angemerkt, dass es in der wissenschaftlichen Literatur keine allgemeingültige Definition für den Begriff gibt. In dieser Arbeit wird der Begriff Mikromobile für die vielfältigen Ausführungen von Kleinst- und Leichtfahrzeugen verwendet. Eine Einstufung in die Fahrzeugklasse nach festgelegten Kriterien wie Fahrzeugmasse, Anzahl der Räder bzw. Achsen, der bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit, maximale Personenzahl oder Leistung sind bisher

gesetzlich nicht geregelt. Eine Ausnahme bilden Elektroroller, Segways und ähnliche. Für die genannten Fahrzeuge existiert die Elektrokleinstfahrzeug-Verordnung (eKFV), in der die technischen Spezifikationen klar vorgeschrieben sind. Der Geltungsbereich dieser Verordnung deckt allerdings nicht alle Mikromobile ab, da darin z.B. die maximale Fahrzeugmasse auf 55 kg begrenzt wird [6].

Aufgrund der hohen Diversität der Klasse Mikromobile können die Unterklassen ebenfalls nach vielen Merkmalen kategorisiert werden. Im Standard nach SAE International werden die Mikromobile anhand von vier Merkmalen klassifiziert [7]. Die Merkmale sind das Leergewicht, die Fahrzeugbreite, die Höchstgeschwindigkeit und die Energiequelle. In der Tabelle 2.1 sind die Abstufungen der einzelnen Merkmale und die zugehörige Kodierung aufgelistet.

Tabelle 2.1: Klassifizierung der Mikromobile nach SAE J3194 [7]

Bezeichnung	Kodierung	Beschreibung
<b>Leergewicht</b>		
ultra-leichtgewichtig	WT1	Leergewicht $\leq 23$ kg
leichtgewichtig	WT2	$23 \text{ kg} < \text{Leergewicht} \leq 45$ kg
mittelgewichtig	WT3	$45 \text{ kg} < \text{Leergewicht} \leq 91$ kg
mittelgewichtig plus	WT4	$91 \text{ kg} < \text{Leergewicht} \leq 227$ kg
<b>Fahrzeugbreite</b>		
normal breit	WD1	Fahrzeugbreite $\leq 0,9$ m
breit	WD2	$0,9 \text{ m} < \text{Fahrzeugbreite} \leq 1,2$ m
extra breit	WD3	$1,2 \text{ m} < \text{Fahrzeugbreite} \leq 1,5$ m
<b>Höchstgeschwindigkeit</b>		
ultra langsam	SP1	Höchstgeschwindigkeit $\leq 13$ km/h
langsam	SP2	$13 \text{ km/h} < \text{Höchstgeschwindigkeit} \leq 32$ km/h
mittel schnell	SP3	$32 \text{ km/h} < \text{Höchstgeschwindigkeit} \leq 48$ km/h
<b>Antriebsart</b>		
elektrisch	E	angetrieben durch Elektromotor
Verbrennung	C	angetrieben durch Verbrennungsmotor

Als Beispiel zur Nutzung der Tabelle 2.1 wird ein elektrisch angetriebener Tretroller mit einem Gewicht von 18 kg, einer Breite von 60 cm und einer Höchstgeschwindigkeit von 25 km/h betrachtet. Nach SAE J3194 erfolgt die Klassifizierung als WT1/WD1/SP2/E Roller. Dieser Standard beinhaltet nur Mikromobile, die vorrangig zur Personenbeförderung bestimmt sind.

Eine weitere Klassifizierung wird in [8] nach Höchstgeschwindigkeit und Gewicht angewendet (siehe Tabelle 2.2). Anhand dieser zwei Klassifizierungsmerkmale lassen sich die formenvielfältigen Mikromobile sehr einfach den einzelnen Typen zuordnen. Zum Typ A gehören zum Beispiel alle Tretroller oder Pedelecs, hingegen beinhaltet Typ B die schwereren Lastenräder. In den Typ C lassen sich die Speed-Pedelecs einordnen und

elektrische Motorroller zum Typ D. Beide zuletzt genannten Vertreter sind in Deutschland zwar zulassungsfrei, benötigen aber ein Versicherungskennzeichen und dürfen nicht mehr auf Fuß- oder Radwegen gefahren werden.

Tabelle 2.2: Klassifizierung der Mikromobile nach OECD / ITF [8]

	Typ A	Typ B	Typ C	Typ D
Geschwindigkeit	motorisiert oder unmotorisiert bis 25 km/h		motorisiert bis 45 km/h	25 km/h bis
Gewicht	< 35 kg	35 kg bis 350 kg	< 35 kg	35 kg bis 350 kg

Die EU-Verordnung 168/2013 regelt die Genehmigung von zwei- oder dreirädrigen und vierrädrigen Fahrzeugen. In ihr werden die Fahrzeugklassen L1e bis L7e definiert und nach festgelegten technischen Spezifikationen in Unterklassen unterteilt. Die Klasse L umfasst alle leichten Kraftfahrzeuge wie zum Beispiel Pedelecs, Motorräder oder Quads. In der Tabelle 2.3 werden die für diese Arbeit relevantesten Unterklassen aufgeführt. Die technischen Spezifikationen der Klasse L aus der EU-Verordnung treffen auf Mikromobilen zu.

Tabelle 2.3: Auszug aus der Klassifizierung der Mikromobile nach EU 168/2013 [9]

Unterklasse	Bezeichnung	Kriterien
L1e-A	Fahrrad mit Antriebssystem	-Pedalantrieb mit Unterstützungsfunktion -Hilfsantriebs mit max. Geschwindigkeit von 25 km/h -maximale Nenndauerleistung $\leq 1000$ W -ein drei- oder vierrädriges Fahrrad mit den spezifischen Kriterien gilt als technisch gleichwertig
L1e-B	Zweirädriges Kleinkraftrad	-sonstiges Fahrzeug der Klasse L1e, das nicht L1e-A entspricht -Höchstgeschwindigkeit $\leq 45$ km/h -maximale Nenndauerleistung $\leq 4000$ W
L2e-P	Dreirädriges Kleinkraftrad für Personenbeförderung	-Masse $\leq 270$ kg -Höchstgeschwindigkeit $\leq 45$ km/h -maximale Nenndauerleistung $\leq 4000$ W -maximal 2 Sitzplätze
L2e-U	Dreirädriges Kleinkraftrad für Güterbeförderung	-technische Anforderungen wie L2e-P - ausschließlich zur Beförderung von Gütern - Ladefläche nimmt Mindestvolumen eines Würfels mit Kantenlänge 600 mm auf

Der Großteil der Mikromobile ist vorrangig für den individuellen Personentransport vorgesehen und bietet daher wenig bis keine Möglichkeit größere Gegenstände auf dem

Fahrzeug zu befördern. In dieser Arbeit werden Mikromobile, wie auf Abbildung 2.1 zu sehen, nach ihrem Transportgut unterschieden. Ähnlich zur Klasse L2e der EU-Verordnung 168/2013 wird hier zwischen Personen- und Güterbeförderung klassifiziert. Im Gegenteil zur Verordnung wird jedoch nicht zusätzlich nach Anzahl der Räder am Fahrzeug unterschieden. Alle Mikromobile die vorrangig oder ausschließlich zur Güterbeförderung vorgesehen sind, werden als Mikrotransportmobile klassifiziert. Diese Mobile können durch das Merkmal Automatisierungsgrad in weitere Unterklassen aufgeteilt werden. Ein Beispiel für die Klasse der Mikrotransportmobile ist der auf Abbildung 2.2 gezeigte Lastkraftflitzer.

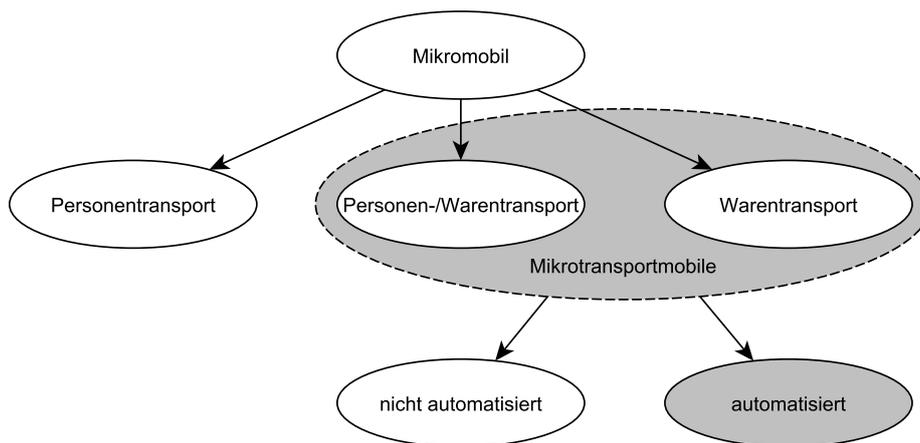


Abbildung 2.1: Klassifizierung der Mikromobile nach Transportfähigkeit



Abbildung 2.2: Mikrotransportmobil: Lastkraftflitzer [10]

## 2.2 Automatisierungsgrade für Mikromobile

Die Automatisierung von Mikromobilen kann auf verschiedenen Ebenen und Funktionalitäten erfolgen. Im Sinne dieser Arbeit bezieht sich die Automation auf den dynamischen Fahrprozess, bei dem die Längs- und/oder Querführung des Mikromobils von einem Automatisierungssystem übernommen wird. Die Abstufung der Automatisierungsgrade für Kraftfahrzeuge, die am Straßenverkehr teilnehmen erfolgt in [11] durch die Society of Automotive Engineers(SAE). Da Mikromobile vorrangig im urbanen Verkehrsraum agieren, werden die Automatisierungsgrade des Standards für die Kleinstfahrzeuge adaptiert. Die Abstufung der Automatisierungsgrade erfolgt in sechs Stufen und reicht von Level 0 „Keine Fahrautomatisierung“ bis Level 5 „Vollautomatisierung der Fahraufgabe“. Wie in Tabelle 2.4 zu sehen ist, ändern sich mit ansteigender Stufe die Fahrzeugführungsaufgaben zwischen Fahrer und Automatisierungssystem. Während der Fahrer bis Stufe 2 auch dauerhaft für die Systemüberwachung verantwortlich sein muss, beginnt ab Stufe 3 das Automatisierungssystem alle Führungsaufgaben des Fahrprozesses ohne permanente Überwachungspflicht des Fahrers durchzuführen. Ab dieser charakteristischen Stufe ändert sich die Rolle des Fahrers während einer Autofahrt vom aktiven Kontrollorgan zum Passagier.

Zum Zeitpunkt der Entstehung dieser Arbeit bildet das StVG die gesetzliche Grundlage in Deutschland für den Betrieb von hoch- oder vollautomatisierten Fahrfunktionen in Kraftfahrzeugen. Aufgrund des rechtlichen Rahmens dieses Gesetzes dürfen SAE Stufe 4 Systeme in festgelegten Anwendungsfällen im öffentlichen Straßenverkehr betrieben werden [13]. Solche Szenarien sind zum Beispiel Shuttle-Verkehre auf festgelegten Routen oder Dual Mode Fahrzeuge, die während des Automated Valet Parking selbstständig die Strecke zwischen Parkplatz und Übernahme durch den Fahrer bewältigen. Der festgelegte Anwendungsfall bzw. Betriebsbereich wird durch die Verordnung zum autonomen Fahren (AFGBV) geregelt [14].

Im Bereich der Automobilbranche ist derzeit nur ein zertifiziertes SAE Stufe 3 System kommerziell erhältlich. Der Mercedes-Benz Drive Pilot arbeitet im spezifischen Anwendungsfall Autobahn mit hohem Verkehrsaufkommen. Auf geeigneten Autobahnabschnitten wird die Fahraufgabe bis zu einer Geschwindigkeit von 60 km/h an das Automatisierungssystem übergeben. Der Fahrer muss jederzeit in der Lage sein, die Kontrolle wieder zu übernehmen, wenn er vom System dazu aufgefordert wird [15].

Gesondert betrachtet werden muss die Funktion und Position des Fahrers eines automatisierten Mikromobils in den jeweiligen Automatisierungsgraden. Im Fall von ferngesteuert überwachten Mikrotransportmobilen ist die Übergabe der Verantwortung für die Fahraufgabe vom Automatisierungssystem an den Fahrer nur bedingt in den definierten Zeiträumen

Tabelle 2.4: Automatisierungsgrade des automatisierten Fahrens nach [11] und [12]

Stufe 0 Keine Auto- matisierung	Stufe 1 Assistiert	Stufe 2 Teilauto- matisiert	Stufe 3 Bedingt au- tomatisiert	Stufe 4 Hoch auto- matisiert	Stufe 5 Vollauto- matisiert
Fahrer führt dauerhaft Längs- <b>und</b> Quer- führung aus	Fahrer führt dauerhaft Längs- <b>oder</b> Quer- führung aus	Fahrer <b>muss</b> das System <b>dauerhaft</b> überwachen	Fahrer <b>muss</b> das System <b>nicht</b> mehr <b>dauerhaft</b> überwachen, aber potentiell in der Lage sein, zu übernehmen	<b>Kein</b> Fahrer erforderlich im spe- zifischen Anwen- dungsfall	<b>Kein</b> Fahrer erforderlich
unterstützt durch Sicherheits- systeme	System über- nimmt die je- weils andere Funktion	System übernimmt Längs- <b>und</b> Quer- führung in einem spezifischen Anwen- dungsfall	System übernimmt Längs- <b>und</b> Quer- führung in einem spezifischen Anwen- dungsfall Es erkennt Systemgren- zen und fordert den Fahrer zur Übernahme mit aus- reichender Zeitreserve auf	System <b>kann im</b> <b>spezifi- schen</b> <b>Anwen- dungsfall</b> alle Si- tuationen automatisch bewältigen	System über- nimmt die Fahraufgabe <b>vollum- fänglich</b> bei allen Stra- ßentypen, Geschwin- digkeitsbe- reichen und Umfeldbe- dingungen

der einzelnen Automatisierungsstufen möglich bzw. unmöglich. Verbleibt der Fahrer im Fahrzeug wird er während der Automatisierungsstufen 4 und 5 zum Passagier. Im Gegensatz dazu werden ferngesteuert bediente Vehikel in den Stufen 4 und 5 eindeutig fahrerlos und der Bediener unterstützt und überwacht nur fernsteuernd.

Einhergehend mit steigendem Automatisierungsgrad gemäß 2.4 werden in den Stufen 4 und 5 entsprechende Anforderungen in [11] und [14] gestellt. In beiden Dokumenten werden funktionale Anforderungen für Kraftfahrzeuge mit automatisierter Fahrfunktion gestellt, die für Mikromobile adaptiert werden können.

Während der Entwicklung automatisierter Mikromobile muss der Automatisierungsgrad bereits in der Anforderungsanalyse berücksichtigt werden. Je höher das angestrebte Automatisierungslevel, desto umfangreicher werden die Anforderungen an die Sicherheitsmaßnahmen und sicherheitskritischen Komponenten eines Kleinstfahrzeuges. Die Automatisierungsgrade nach [11] können für Mikromobile adaptiert werden. Es gibt jedoch Anwendungsszenarien im Bereich der Mikromobilität, die eine Einstufung in die definierten Automatisierungsgrade nicht eindeutig erfüllen.

### 2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Im Entwicklungsprozess dürfen die geltenden Rechtsverordnungen nicht missachtet werden. Aufgrund dessen werden relevante Verordnungen betrachtet, deren Festlegungen für die Entwicklung und Nutzung automatisierter Mikromobile angewendet werden können. Im Straßenverkehrsgesetz (StVG) und in der Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs-und-Betriebs-Verordnung (AFGBV) wird die Nutzung automatisierter Kraftfahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr geregelt. Laut §1 des Satz 3 StVG gelten Fahrzeuge nicht als Kraftfahrzeug, wenn die Fortbewegung durch Muskelkraft erfolgt, der elektromotorische Hilfsantrieb höchstens 250 W besitzt und bei Erreichen von einer Geschwindigkeit oberhalb von 25 km/h unterbrochen wird. Kleinstfahrzeuge mit leistungsstarken Antrieben gelten demzufolge als Kraftfahrzeug.

Die für Elektroroller u. Ä. geltende Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung (eKFV) gibt die rechtlichen Bedingungen für die Nutzung dieser Fahrzeugtypen im Straßenverkehr vor. In Tabelle 2.5 sind die relevantesten Anforderungen an ein Vehikel im Sinne der Verordnung aufgeführt. Die Vorschriften aus der eKFV können nicht für alle Mikromobile oder Mikrotransportmobile adaptiert werden. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit durch einen elektromotorischen Antrieb ist im Gegensatz zu Pedelecs auf 20 km/h und das Maximalgewicht auf 55 kg beschränkt. Weitere wesentliche Nachteile der Verordnung für die Fahrzeugklasse Mikrotransportmobil sind die verbotene Mitnahme weiterer Personen und der verbotene Anhängerbetrieb.

Tabelle 2.5: Anforderungen aus der eKFV [6]

Merkmal	Anforderung
Antrieb	elektrisch
Geschwindigkeit	$6 \text{ km/h} \leq v \leq 20 \text{ km/h}$
Nenndauerleistung	$\leq 500 \text{ W}$ bzw. $1400 \text{ W}$ (bei 60% Leistung für Selbstbalancierung)
Gesamtbreite	$\leq 700 \text{ mm}$
Gesamthöhe	$\leq 1400 \text{ mm}$
Gesamtlänge	$\leq 2000 \text{ mm}$
Gesamtmasse	$\leq 55 \text{ kg}$
Inbetriebsetzung	Betriebserlaubnis Versicherungsplakette Fahrzeug-Identifizierungsnummer, Fabrikschild
Berechtigung zum Führen	14. Lebensjahr vollendet
Verzögerungseinrichtung	zwei voneinander unabhängige Bremsen mind. $3,5 \text{ m/s}^2$ drei- oder vierrädrige Vehikel: Feststellbremse
Lichttechnische Einrichtungen	Gemäß §67 StVZO Ausstattung mit Fahrtrichtungsanzeigern ist zulässig
Schallzeichen	Gemäß §64a StVZO
Personenbeförderung	nicht gestattet
Anhängerbetrieb	nicht gestattet
StVO	Elektrokleinstfahrzeuge unterliegen den Vorschriften

Mikromobile sind vorwiegend für die Fortbewegung im öffentlichen Straßenverkehr konzipiert und unterliegen somit den Regeln der Straßenverkehrs-Ordnung (StVO). Weiterhin ist die Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) essentiell für Teilnahme am Straßenverkehr. In den allgemeinen Vorschriften der StVZO müssen Fahrzeuge laut §30 so beschaffen sein, dass sie niemanden schädigen, gefährden, behindern oder belästigen und die Insassen vor Verletzungen schützen bzw. Verletzungen minimieren [16]. Aus dieser Anforderung der StVZO resultiert die Notwendigkeit einer umfassenden Risikobewertung und -minimierung für den Betrieb von Mikromobilen. Für das Risikomanagement können die entsprechenden Normen für Maschinen angewendet werden. Auf die Richtlinien und Festlegungen des Risikomanagements nach DIN EN ISO 12100 und DIN ISO/TR 14121-2 wird gesondert in Abschnitt 3.3 eingegangen.

Eine weitere zutreffende Vorschrift für Mikromobile ist die DIN 79010. Darin werden Anforderungen an Lastenräder und die Prüfverfahren zur Einhaltung der Norm festgelegt. Diese DIN fokussiert insbesondere auf den Schutz des Nutzers durch definierte Testverfahren,

um Lastenräder als sicheres Produkt für den Endverbraucher zu gestalten. Tabelle 2.6 beinhaltet eine Zusammenfassung der wichtigsten Anforderungen aus der Norm für die Entwicklung automatisierter Mikrotransportmobile des Typs Lastenrad. Während es in der DIN keine Festlegung für Länge und Höhe eines Cargo-Bikes gibt, wird die maximale Fahrzeugbreite für ein- und mehrspurige Transporträder begrenzt. Da diese Fahrzeuge als Fahrräder gelten, dürfen und müssen sie bei entsprechender Beschilderung gemäß §2 Abs.4 StVO auf Radwegen fahren [17]. Neu angelegte Wege für Fahrräder müssen eine vorgeschriebene Mindestbreite von 1,50 m aufweisen (zu §2 zu Absatz 4 Satz 2 II 2. a) aa) VwVStVO [18]). Der Großteil älterer Radwege besitzt zudem noch eine deutlich schmalere Bauweise. Sehr breite Lastenräder (nach DIN 79010 bis zu 2 m) müssen dann auf die Straße ausweichen, um den Fußgängerverkehr nicht zu behindern. Bei der Entwicklung solcher Mobile muss die jeweilige Verkehrsfläche mitberücksichtigt werden und die daraus resultierenden Sicherheitsanforderungen für die Nutzer und Verkehrsteilnehmer.

Tabelle 2.6: Anforderungen aus der DIN 79010 [19]

Merkmal	Anforderung
Antrieb	elektrisch
Geschwindigkeit	$\leq 25 \text{ km/h}$
Nennleistung	$\leq 250 \text{ W}$
Gesamtbreite	$\leq 1000 \text{ mm}(\text{einspurig}), \leq 2000 \text{ mm}(\text{mehrspurig})$
Gesamtmasse	$\leq 250 \text{ kg}(\text{einspurig}), \leq 300 \text{ kg}(\text{mehrspurig})$
Verzögerungseinrichtung	zwei voneinander unabhängige Bremsen (eine Vorderachse und eine Hinterachse) mind. $3,4 \text{ m/s}^2$ eine Achse mind. $2,2 \text{ m/s}^2$ jede weitere Achse kein erhöhtes Ruckeln oder Blockieren des Vorderrades mechanische Feststellfunktion
Kippstabilität	kein Rad darf sichtbar den Bodenkontakt verlieren
Lenker	$350 \text{ mm} \leq x \leq 1000 \text{ mm}$ kein Flattern
Lichttechnische Einrichtungen	Gemäß §67 StVZO
Schallzeichen	Gemäß §64a StVZO
Personenbeförderung	gestattet
Güterbeförderung	gestattet
Anhängerbetrieb	gestattet
StVO	Lastenräder unterliegen den Vorschriften

Aufgrund einer meist kostensparenden und robusten Rahmenkonstruktion der Mikromobile werden keine oder nur unzureichende Feder-Dämpfer-Elemente in den Fahrwerken

montiert. Neben der Vibrationsbelastung des Nutzers muss auch die Einwirkung auf elektromechanische Komponenten durch Vibrationen und Stöße während der automatisierten Fahrt berücksichtigt werden. Als normative Grundlage dient die DIN EN 1032. In dieser werden die Prüfverfahren durch mechanischen Schwingungen an beweglichen Maschinen dokumentiert [20].

Mit der Automatisierung eines Mikromobils werden elektronische und elektromechanische Komponenten im Fahrzeug integriert, deren funktionale Sicherheit durch die ISO 26262 normiert wird. Darin wird der Entwicklungsprozess für sicherheitsrelevante Elektronik in Kraftfahrzeugen als Vorgehensmodell mit allen Aktivitäten und Methoden festgelegt. Die Anwendung der Anforderungen aus der ISO 26262 werden verbindlich, wenn es sich bei der Entwicklung um ein Serienprodukt im Kraftfahrzeugbereich handelt [21].

Ab Automatisierungsgrad Stufe 2 und höher wird die ISO 21448 relevant bei der Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen für ein Mikromobil. Die Anwendung dieser Norm soll Gefahren minimieren, die durch Funktionsmängel der beabsichtigten Funktionalität oder vorhersehbaren Falschgebrauch durch Personen entstehen.

In der folgenden Tabelle sind die essentiellen Gesetze und Verordnungen für die Entwicklung von automatisierten Mikromobilen im Sinne dieser Arbeit aufgeführt.

Tabelle 2.7: Gesetze und Verordnungen für automatisierte Mikromobile

Verordnung	Relevanter Inhalt für Mikromobile
StVG	Unterscheidung Kraftfahrzeug/ Nicht-Kraftfahrzeug
StVO	Regeln für den öffentlichen Straßenverkehr
StVZO	Beschaffenheit von Fahrzeugen
AFGBV	ähnlich zur StVZO, aber für Kraftfahrzeuge mit autonomer Fahrfunktion
Elektrokleinstfahrzeuge- Verordnung	ähnlich zur StVZO, aber für Elektrokleinstfahrzeuge
DIN 79010 Fahrräder – Transport- und Lastenfahrrad	Allgemeine Anforderungen für ein- und mehrspurige Lasten- räder
DIN EN ISO 12100 Sicherheit von Maschinen	Leitfaden für Risikobeurteilung und Risikominderung
DIN ISO/TR 14121-2 Risiko- beurteilung	Instrumente für Risikoeinschätzung
DIN EN 61508 Funktiona- le Sicherheit sicherheitsbezo- gener elektrischer/ elektroni- scher/ programmierbarer elek- tronischer Systeme	Anforderungen an die Entwicklung sicherheitsrelevanter elek- trischer Systeme
ISO 26262 Road Vehicles - Functional Safety	Anforderung an sicherheitsrelevante elektrische Systeme in Serienkraftfahrzeugen
ISO 21448 Road Vehicles - Sa- fety of the intended functiona- lity	Leitfaden für die Entwicklung von Automatisierungsfunktio- nen

Die veröffentlichten Regularien lassen sich für den Entwicklungsprozess automatisierter Kleinstfahrzeuge adaptieren. Der Umfang der anzuwendenden Regularien ist an den Automatisierungsgrad und die Einstufung des Mikromobils als Kraftfahrzeug oder Nicht-Kraftfahrzeug gebunden. Die Einhaltung der gesetzlichen und normativen Anforderungen am Gesamtsystem automatisiertes Lastenrad muss auch durch die einzelnen Baugruppen, insbesondere durch die Aktorik und Sensorik gewährleistet sein. Für die einzelnen Teilsysteme und das Gesamtsystem ist daher ein Sicherheitsmanagement entsprechend der Normen obligatorisch.

## 2.4 Sicherheitsmanagement

Einer der wichtigsten Aspekte bei der Entwicklung automatisierter Mikromobile ist die Implementierung eines Sicherheitsmanagements, um die einhergehenden Gefahren vom System zu erkennen, zu minimieren oder sogar zu verhindern. Neben der Ausfallsicherheit der sicherheitsrelevanten elektrischen Systeme muss auch die implementierte Automatisierungsfunktion und davon ausgehende Gefahren beurteilt werden. Dafür gibt es in den Normen festgelegte Vorgehensweisen für die Einstufung in Sicherheitsintegritätslevel [21], [22]. Anhand des eingestuften Levels müssen Maßnahmen erfolgen, die eine erwartete Gefahr abwehren oder auf ein erträgliches Maß reduzieren.

Für Kraftfahrzeuge ist die ISO26262 die Norm für sicherheitsrelevante elektronische Komponenten in Serienfahrzeugen. Sie beinhaltet ein Vorgehensmodell für die Umsetzung der funktionalen Sicherheit. In der Norm werden Methoden und Werkzeuge beim Entwicklungsprozess von Systemen, Hardware und Software bereitgestellt, die entsprechend der ASIL-Einstufung angewendet werden können, um die Sicherheitsanforderungen der jeweiligen Level umzusetzen.

Automatisierte Fahrfunktionen für Mikromobile unterliegen als Software auch den Bestimmungen der Norm [21]. Sie werden als Fahrerassistenzsysteme bezeichnet und sollen je nach Automatisierungsgrad die Fahraufgabe zum Teil oder vollumfänglich übernehmen. Dafür sind Softwaremodule notwendig, die das Automatisierungssystem überwachen und Fehlerstrategien durchführen. Mit steigendem Automatisierungsgrad (ab Stufe 2) sollten während des Entwicklungsprozesses die Maßnahmen der ISO21448 angewendet werden, um mit entsprechenden Fehlerstrategien auf bekannte unsichere Szenarien reagieren zu können. Weiterhin werden in der Norm [23] Handlungsweisen innerhalb der Risikobeurteilung aufgezeigt, die unbekannte unsichere Szenarien einer Automatisierungsfunktion feststellen und durch entsprechende Eingriffstrategien in bekannte oder sichere Szenarien umwandeln sollen. Ein besonders hervorzuhebendes Attribut des Automatisierungssystems, dass aus den normativen Handlungen resultiert, ist das Erkennen der eigenen Systemgrenzen. Werden diese erreicht, greift das Sicherheitsmanagement ein und überführt das Fahrzeug in einen sicheren Zustand.

Das Sicherheitsmanagement soll in erster Linie den Menschen vor der Maschine schützen und die Auswirkungen einer Fehlfunktion auf ein erträgliches Maß reduzieren. Dafür müssen die notwendigen Schritte eines Sicherheitsmanagements bereits bei Implementierung der Sensorik und Aktorik des Mikromobils angewendet werden.

## 2.5 Komponenten für automatisierte Mikromobile

Anhand des Automatisierungsgrades eines Mikromobils werden Komponenten für die Längs- und/oder Querführung des Fahrzeugs benötigt. Bereits ab dem teilautomatisierten Fahren müssen Komponenten für Antrieb, Bremse und Lenkung implementiert werden. Dafür müssen Sensoren und Aktoren in die einzelnen Teilsysteme des Mikromobils integriert werden, um die Fahraufgabe mit Hilfe von Regelkreisen zu bewältigen. Neben der Sensorik zur Bestimmung der Fahrzustände müssen für die Automatisierung eines Mikromobils auch Signale aus dem Fahrzeugumfeld erfasst werden. Mit Hilfe aller Sensordaten des Mikromobils können Sollvorgaben für die Aktorik von Antrieb, Bremse und Lenkung bestimmt werden und mit festgelegten Regelstrategien zu den Stellgrößen der Aktorik gewandelt werden. Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht der benötigten Komponenten eines automatisierten Mikromobils und deren Funktion im Gesamtsystem.

Tabelle 2.8: Komponenten automatisierter Mikromobile

Komponente	Funktion
Fahrzeugsensorik	Erfassung fahrzeugspezifischer Messgrößen wie z.B. Beschleunigung, Bremsdruck, Lenkwinkel, Drehzahlen
Fahrzeugaktorik	Stellmotoren zur Beeinflussung der Fahraufgabe wie z.B. Antriebsmotor, Bremsaggregat, Lenkmotor
Umfeldsensorik	Erfassung der Position und Bewegung anderer Verkehrsteilnehmer und Hindernisse
Planung der Sollwerte	Trajektorien-generierung für Regelkreise
Filterung von Messwerten	Glättung verrauschter Messsignalverläufe für Stellgrößenberechnung
Regelungsstrategien	gezieltes Beeinflussen der Längs- und Querführung eines automatisierten Mikromobils

### 2.5.1 Sensorik und Aktorik für den Antrieb

Im Bereich der Sensorik und Aktorik des Antriebs eines Mikromobils kann auf das breit gefächerte Sortiment im EPAC/Pedelec Segment zurückgegriffen werden. Der stetig wachsende Absatz an elektrisch unterstützten Fahrrädern der letzten Jahre [24], [25], hat eine hohe Vielfalt und ein hohes Angebot an Elektromotoren hervorgerufen, die in variierender Einbauposition für den nötigen Vortrieb der Fahrräder sorgen. Abbildung 2.3 zeigt exemplarisch den Antrieb eines Lastenrades mit Hilfe zweier Radnabenmotoren an der Hinterachse. Der Großteil der Elektromotoren sind mit Sensoren für die feldorientierte Regelung ausgestattet und können die Drehzahl des angetriebenen Rades mit Hilfe des

Motorcontrollern bestimmen. Aufgrund dessen wird keine zusätzliche externe Sensorik zur Bestimmung der Raddrehzahlen angetriebener Räder benötigt.



Abbildung 2.3: Motor aus dem Lastenrad Segment und beispielhafte Einbaulage am Lastenrad [26]

Bei der Auswahl eines geeigneten Motors für Mikrotransportmobile muss neben dem Spannungsniveau vor allem auf ausreichend Drehmoment für die Automatisierungsaufgabe geachtet werden. Bei bekannter Schnittstellendefinition kann das abrufbare Drehmoment von einem Steuergerät vorgegeben werden, zusätzlich zum Vorwärtsdrehen sollte der Motor auch in umgekehrter Richtung drehen können.

### 2.5.2 Sensorik und Aktorik für die Bremse

Für ein automatisiertes Bremssystem wird eine Bremsbetätigungseinrichtung in Form eines Energiewandlers benötigt, der z.B. elektrische Energie in mechanische umwandelt. Diese mechanische Arbeit wird dann mit Hilfe einer Bremsenmechanik in die Bremsleistung an den Fahrzeugrädern umgesetzt. Der geringe Bauraum an den Radaufhängungen erfordert zusätzlich ein Übertragungsmedium vom Ort der Energiewandlung zur Bremsenmechanik an den Rädern.

Für die weiteren Betrachtungen werden nur hydraulisch betätigte Scheibenbremsanlagen berücksichtigt. Die thermischen und mechanischen Vorteile einer Scheibenbremse tragen zur weiten Verbreitung bei [27] und begünstigen dadurch die niedrigen Anschaffungskosten der Anlagen. Eine hydraulische Übertragung der Bremskraft hat die Vorteile einer frei wählbaren Kraftübersetzung und guter Dosierbarkeit zur Einstellung einer spezifischen Verzögerung. Zur Druckerzeugung im Hydraulikbremskreislauf werden Energiewandler eingesetzt, die elektrische Energie in mechanische umwandeln. Dies können z.B. Pumpen sein, die von einem Elektromotor angetrieben werden.

Für eine geregelte Verzögerung während des Bremsvorgangs werden Sensoren zur Erfassung einzelner Zustände eingesetzt. Einfache sensorgestützte Bremsassistenten benötigen die Raddrehzahlen angetriebener und nicht angetriebener Räder und einen Bremsdruckwert. Die weiterentwickelten Bremsassistentensysteme verwenden zusätzlich die Messwerte aus inertialen Sensoren zur Erfassung der Beschleunigungen [27]. Für die zuvor genannten Messwerte gibt es eine Vielzahl kommerziell verfügbarer Sensoren mit verschiedenen Messprinzipien.

In [28] wird ein Fahrerassistenzsystem für Fahrradbremsen entwickelt, das ein Blockieren des Vorderrades und einen Überschlag verhindern soll. Ähnlich zum ABS in Kraftfahrzeugen soll das Assistenzsystem den Fahrer in kritischen Situationen unterstützen und Unfälle durch instabiles Fahrzeugverhalten reduzieren. Dafür wurde eine Simulationsumgebung für die Analyse des Bremsvorgangs entworfen und mit Messwerten aus praktischen Versuchen parametrisiert. Die Funktion des Fahrrad-ABS wurde zunächst in der Simulation entworfen und in praktischen Versuchen evaluiert. Das System wird durch das Betätigen des Handbremshebels aktiviert. Mit Hilfe der Daten eines Drucksensors, einer inertialen Messeinheit und den Raddrehzahlsensoren wird der Fahrzustand ausgewertet und der Bremsdruck bei instabilen Situationen von einer zentralen Druckregeleinheit moduliert und gemindert. Das entwickelte System ist als Serienprodukt kommerziell erhältlich und kann für verschiedene Fahrradtypen angepasst werden [29]. Die gleiche Funktionalität des Blockier- und Überschlagverhinderers wird auch in weiteren serienreifen ABS implementiert [30]. Bei beiden Assistenzsystemen wird der Bremsdruck aufgrund der Handhebelbetätigung erzeugt und von der Reguleereinheit gegebenenfalls reduziert. Eine Druckerhöhung kann nicht durch die Steuereinheit, sondern nur durch erneutes Betätigen des Handbremshebels erzielt werden.

Mit Hilfe des Online-Dienstes DEPATISnet [31] des Deutschen Patent- und Markenamtes wurden Recherchen zu automatisierten Brems- und Lenksystemen für Mikromobile durchgeführt. Die Formulierungen der Suchanfrage für den Expertenmodus des DEPATISnet sind in Tabelle 2.9 aufgelistet.

Tabelle 2.9: Suchanfragen für die Patentrecherche mit DEPATISnet [31]

Baugruppe	Rechercheformulierung
automatisierte Bremse	TI=(Brems?) AND BI=(automat?) AND BI=(elektr?) AND (BI=(Fahrrad) OR BI=(Mikromobil?) OR BI=(Klein?fahrzeug?))
automatisierte Bremse(engl.)	TI=(brak?) AND TI=(automat?) AND BI=(electr?) AND (BI=(bike) OR BI=(bicycle) OR BI=(micromobil?))
automatisierte Lenkung	TI=(Lenk?) AND BI=(automat?) AND BI=(elektr?) AND (BI=(Fahrrad) OR BI=(Mikromobil?) OR BI=(Klein?fahrzeug?))
automatisierte Lenkung(engl.)	TI=(steer?) AND BI=(automat?) AND BI=(electr?) AND (BI=(bike) OR BI=(bicycle) OR BI=(micromobil?))

Die Ergebnisse der DEPATISnet-Recherche wurden nach adäquaten Patenten und Erfindungsmeldungen für automatisierte Bremsanlagen für Mikromobile durchsucht. Einige Patente bilden die Funktionalität einer automatisierten Bremse ab und können für Mikromobile adaptiert werden. Auf Abbildung 2.4 werden zwei mögliche Baumuster zur elektromechanischen Erzeugung eines Bremsdruckes gezeigt.

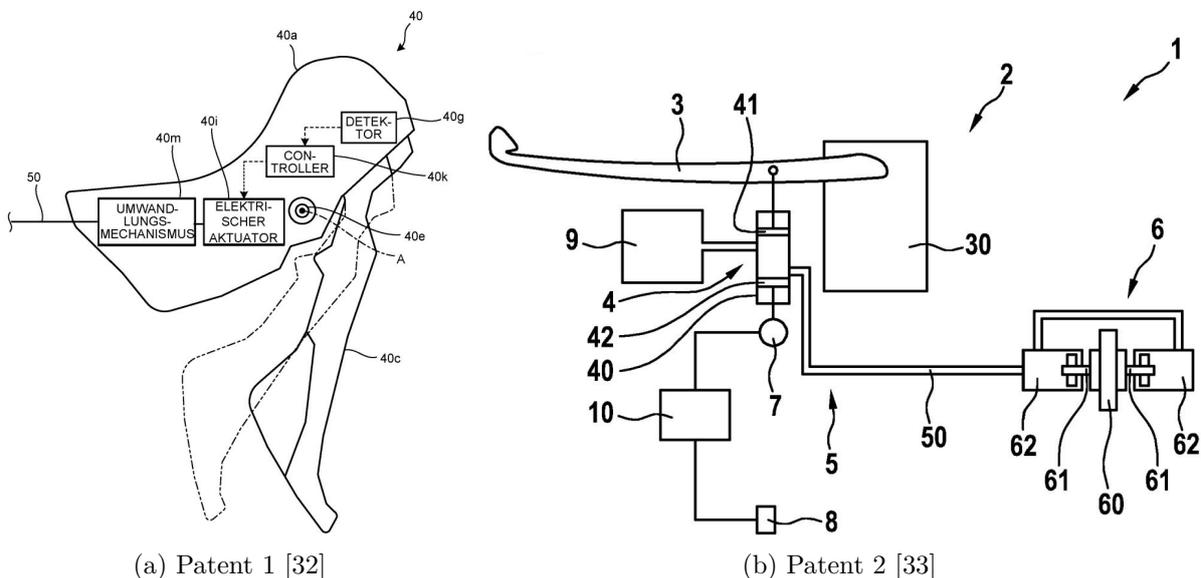


Abbildung 2.4: Patente zu elektromechanischen Bremsanlagen in Kleinstfahrzeugen

In [32] wird ein System beschrieben, dass die Bewegung eines Betätigungselements erfasst und als Stellgröße von einem elektrischen Aktuator zur Bremsdruckerzeugung verarbeitet wird. Die Funktionalität des Patentes entspricht einem Brake-by-wire System, bei dem die Bremsintention des Fahrers sensorisch erfasst wird und über elektrische Signale zu einem mechanisch entkoppelten Aktor übertragen wird. Für die Automatisierung dieses

Systems könnte die Ansteuerung des elektrischen Aktuators auch über Signale von einer Steuerungseinheit erfolgen, ohne das Betätigungselement bewegen zu müssen.

Eine vollständige mechanische Entkopplung des Bremssystems wie in 2.4a ist aus Sicherheitsgründen problematisch, da die Bremsfunktion für den Fahrzeugführer auch bei Elektronikfehlern erhalten bleiben muss. Bei [33] bleibt die Handbetätigung der Bremse permanent mit einem Geberkolben mechanisch verbunden (siehe Abbildung 2.4b). Zusätzlich zum ersten Kolben befindet sich ein weiterer Kolben im selben Zylinder, der von einem elektromechanischen Wandler angetrieben wird. Aufgrund der Bewegung des zweiten Kolbens im Hydraulikzylinder kann der Druck im Bremssystem erhöht oder verringert werden. Ohne eine Bewegung des Handhebels könnte automatisiert ein Bremsdruck erzeugt werden. Allerdings beschreibt das Patent ein Sicherheitssystem zur aktiven Bremskräfteeinstellung um z.B. die Funktionalität eines ABS zu implementieren. An der Gebereinrichtung mit zwei Kolben befindet sich der obligatorische Ausgleichbehälter, dessen Zulauf zum Hydrauliksystem durch die Bewegung des handbetätigten Kolbens versperrt wird. Erst dann kann ein Bremsdruck erzeugt werden, da sonst Hydraulikflüssigkeit in den Ausgleichbehälter gepresst wird.

In [34] wird die Entwicklung eines Bremssystems gezeigt, dass Lastenräder während einer automatisierten Fahrt ohne Eingreifen eines Fahrzeugführers verzögern soll. Dazu wird der Geberkolben einer kommerziellen Fahrradbremse mit Hilfe eines Linearmotors aktuiert. Anstelle des Handbremshebels wird der Kolben durch die Längsbewegung der Motorspindel und einer Kupplung aktuiert, um den Bremsdruck im hydraulischen Scheibenbremssystem zu erzeugen. Der Linearaktor erhält seine Stellgröße als elektrisches Signal bildet damit die Grundlage für ein automatisiertes Verzögerungssystem.

Ein weiteres Bremssystem zum Anhalten automatisierter Mikromobile in Notsituationen wird in [35] gezeigt. Als möglicher Fehler wird der Ausfall der Energieversorgung eines automatisierten Mikromobils adressiert. Daraus resultiert die Notwendigkeit einer Energiespeicherbremse, um mögliche Schäden durch ein unkontrolliert rollendes Fahrzeug zu mindern. In der Speicherbremse wird der Geberkolben eines separaten Hydraulikkreises durch eine vorgespannte Druckfeder aktuiert. Das System ist für die einmalige Auslösung bei Energieausfällen konzipiert und erzielt die maximale Bremskraft aus der vorgespannten Druckfeder.

### 2.5.3 Sensorik und Aktorik für die Lenkung

Analog zu den Bremssystemen wird zur Automatisierung von Lenkungen an Mikromobilen ein Wandler benötigt, der z.B. elektrische Energie in eine Drehbewegung umwandeln kann. Weiterhin wird für das gezielte Stellen eines Lenkwinkels Sensorik zur Erfassung der Lage

benötigt. Die Lenkwinkelsensorik kann dabei im Stellglied der Lenkung integriert sein oder als externer Lagegeber ausgeführt werden.

Im Bereich der Lagegeber zur Erfassung des Lenkwinkels kann auf eine Vielzahl kommerziell erhältlicher Sensoren der Automatisierungstechnik mit unterschiedlichen Messprinzipien zurückgegriffen werden. Weit verbreitet sind Sensoren, die elektrische Änderungen durch den Einfluss eines richtungsgebundenen Magnetfeldes erfassen und mit Hilfe von Algorithmen den Winkel bestimmen. Diese Messprinzipien haben den Vorteil, dass sie als berührungslose Varianten verfügbar sind. Dadurch können die Sensoren mit geringem Konstruktionsaufwand und höheren Fertigungstoleranzen in der Lenkmechanik integriert werden. Das Ausgangssignal der Winkelsensoren ist je nach Bedarf der Anwendung in unterschiedlichen Konfiguration möglich. Dabei können sowohl Spannungs- oder Stromsignale als auch digitale Impulse ausgegeben werden. Um den Implementierungsaufwand eines selbst programmierten Algorithmus zur Winkelbestimmung einzusparen werden entsprechende Sensoren auch mit eingebetteten Mikrocontrollern und diversen Übertragungsprotokollen angeboten.

Eine typische Form des Aktors ist der elektromechanische Wandler, der elektrische Energie in eine Linear- oder Drehbewegung wandelt. Die Automatisierungstechnik bietet dafür eine Vielzahl an Motortypen mit unterschiedlichen Leistungsklassen. Da bei einer Lenkung im Vergleich zu hochdrehenden Anwendungen das erzeugbare Drehmoment und die Positioniergenauigkeit vorrangig ist, eignen sich Schrittmotoren oder BLDC-Motoren.

Anstelle elektromechanischer Wandler können auch elektrohydraulische Lösungen für die Lenkung eines Mikromobils benutzt werden. In Kraftfahrzeugen und landwirtschaftlichen Maschinen weit verbreitet, wird bei diesem System die Lenkbewegung des Fahrers durch die Druckkraft einer hydraulischen Flüssigkeit unterstützt. Dazu wird ein doppelt wirkender Hydraulikkolben bzw. -zylinder in Reihe zum Lenkgetriebe angeordnet und mit der Lenkmechanik gekoppelt (siehe Abbildung 2.5a). Für eine Automatisierung dieses Lenkgetriebes kann das Drehventil angesteuert werden. Ein verwandte Funktionsweise wird bei hydrostatischen Lenkungen verwendet (Abbildung 2.5b). Sie unterscheidet sich durch das Fehlen einer mechanischen Verbindung zwischen Lenkrad und den zu lenkenden Bauteilen. Dadurch ist das System für hohe Lenkübersetzungen geeignet und wird z.B. bei schwereren landwirtschaftlichen Nutzfahrzeugen und zum Schwenken von Bootsmotoren eingesetzt. Zur Automatisierung dieser Lenkung kann der Lenkwinkelsollwert dem Steuergerät mit einem übergeordneten Controller vorgegeben werden.

Um signifikante Patente für automatisierte Lenksysteme zu identifizieren, wurde mit dem Online-Dienst DEPATISnet [31] des Deutschen Patent- und Markenamtes recherchiert. Die verwendeten Suchtexte der Recherche für den Expertenmodus sind in Tabelle 2.9 aufgeführt.

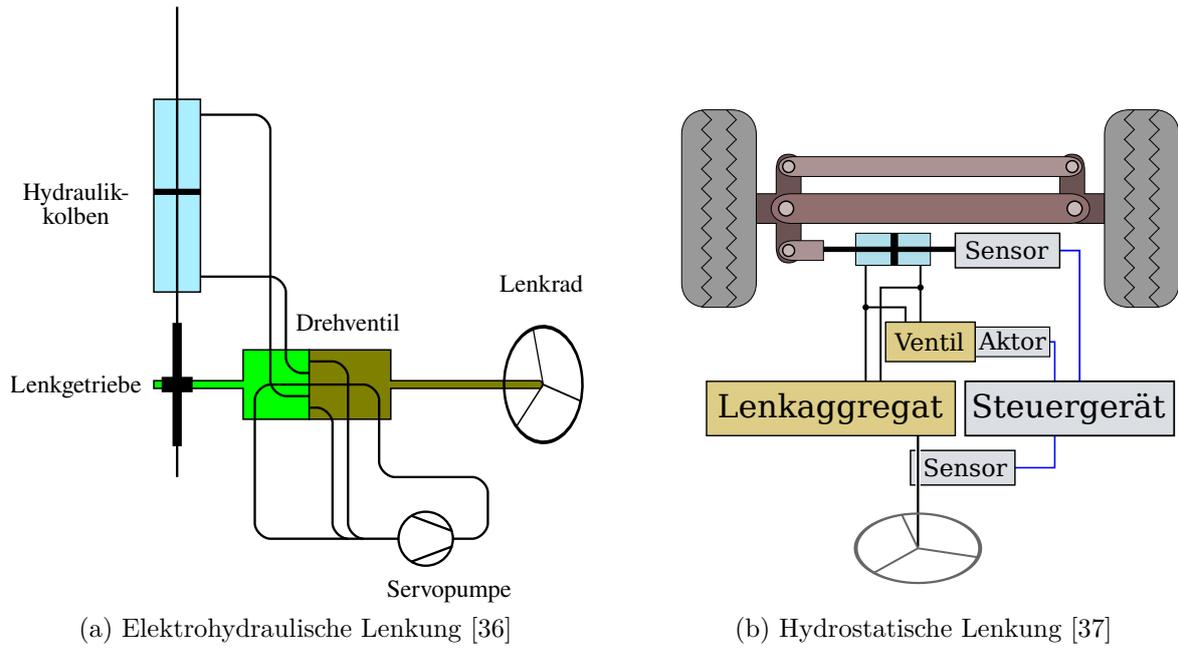


Abbildung 2.5: Schematische Darstellungen hydraulischer Lenkungen

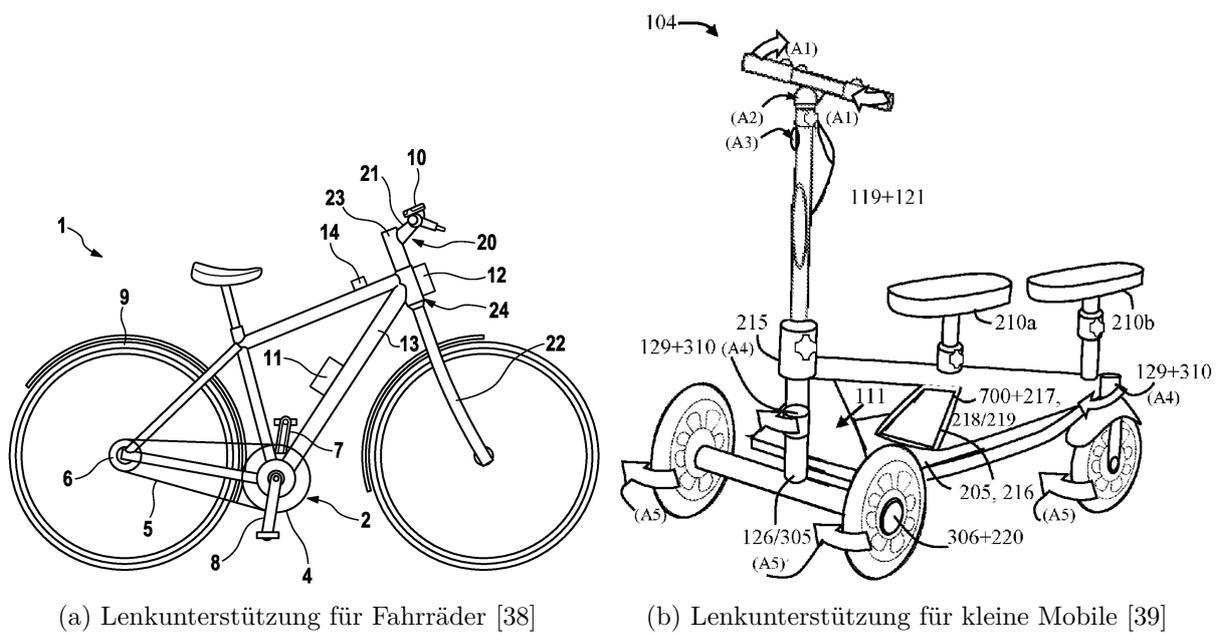


Abbildung 2.6: Patentierte Lenksysteme für Mikromobile

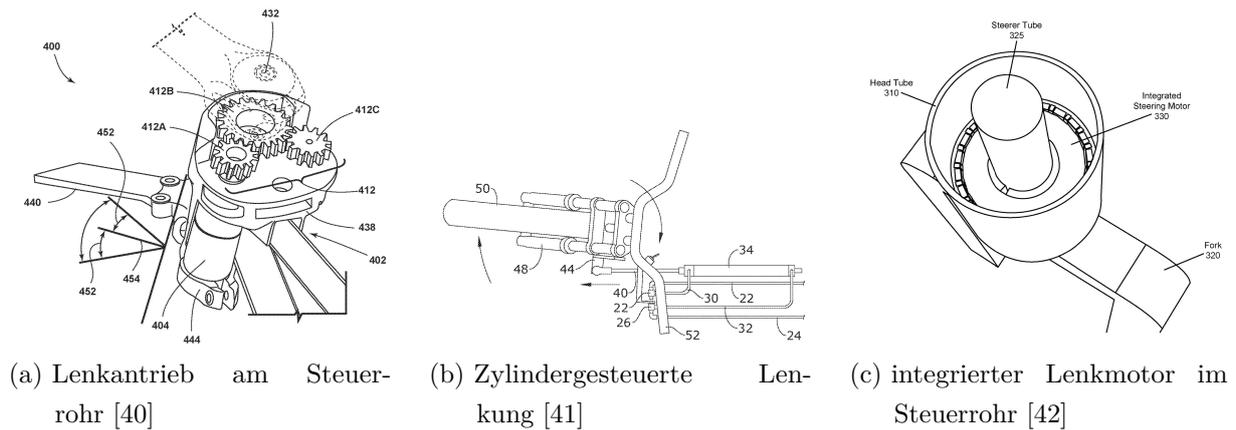


Abbildung 2.7: Details von patentierten Lenksystemen

Bei den hier auszugsweise vorgestellten Ergebnissen der Patentrecherche (Abbildungen 2.6, 2.7) werden vorrangig elektromechanische Antriebe für die Aktuierung der Lenkungen verwendet. Diese sind entweder direkt innerhalb des Steuerrohrs integriert (Abb.: 2.7c) oder mit einem Getriebe an die Lenkung gekoppelt (Abb.: 2.7a). In [41] (Abb.: 2.7b) wird hingegen eine Lenkunterstützung beschrieben, die einen Lenkwinkel mit Hilfe eines pneumatischen oder hydraulischen Zylinders stellt. Dazu wird ein Ende des Zylinders am Rahmen des Fahrzeugs montiert und das freie Ende des Kolbens an der Gabel des Vorderrades. Der Vorschub des Kolbens wird dadurch in eine Drehbewegung am Steuerrohr umgewandelt. Die hier gezeigten Lenksysteme können neben der unterstützenden Assistenzfunktion auch für eine automatisierte Fahrfunktion verwendet werden oder sind direkt für eine Automation konzipiert.

In [34] wird die Entwicklung eines Lenksystems für automatisierte Lastenräder gezeigt. Neben der manuellen Lenkung des Fahrzeugs durch einen aufsitzenden Fahrer soll die Lenkung zeitlich getrennt auch automatisiert durch eine Elektromechanik realisiert werden. Dazu wird die Drehbewegung aus zwei Richtungen einerseits vom Lenker und andererseits von einem Elektromotor auf einen zentralen Steuerkopf übertragen. Dieser übersetzt die Drehbewegung über Spurstangen und Achsschenkel an die beiden Vorderräder des Fahrzeugs. Der Lenkwinkel wird von einem Sensor erfasst und über CAN-Nachrichten zur Motorsteuerung übertragen. Aus Sollwertvorgabe und Lenkwinkelsensorwert wird dann die Stellgröße vom Motorcontroller generiert und als Lenkwinkel an den Rädern umgesetzt.

#### 2.5.4 Weitere Sensorik für die Bestimmung der Fahrzustände

Anhand des Automatisierungsgrades der Fahraufgabe eines Mikromobils und den implementierten Funktionalitäten müssen auch weitere Fahrzustände wie zum Beispiel Beschleunigungen, Rotationen und Positionsdaten des Mikromobils erfasst werden.

Für die Bestimmung der inertialen Beschleunigungen und Drehungen eignen sich die günstigen MEMS-Sensoren, da diese entsprechend der benötigten Freiheitsgrade in vielfältiger Auswahl kommerziell verfügbar sind. Es gibt auch Kombinationen aus Beschleunigungs- und Gyrosensoren, um die Lage im Raum aufgrund diverser Messdaten zu bestimmen. Diese kostengünstigen Sensoren sind aufgrund ihrer Bauform mit Drift und Offset behaftet. Eine präzise Bestimmung der inertialen Zustände kann durch den Einsatz redundanter Sensoren oder modellbasierter Filtertechniken erfolgen.

Um die globale Position des Mikromobils zu ermitteln, kann ebenfalls auf vielfältige kostengünstige Sensoren zurückgegriffen werden. Mit Hilfe der GPS-Signale lassen sich jedoch nur unzureichende Positioniergenauigkeiten erreichen. Je nach Satellitensystem kann die Genauigkeit der zum Teil für militärische Zwecke entworfenen Systeme künstlich beeinflusst und verschlechtert werden. Durch die variierende Positionsgenauigkeit bietet ein einzelner GPS-Empfänger eine zu ungenaue Auflösung der Position. Eine höhere Genauigkeit kann durch die Nutzung differentieller Systeme erzielt werden, die mit Hilfe von Referenzstationen und der Übermittlung von Korrekturdaten Genauigkeiten im Zentimeterbereich erzielen. Eine Kombination der Messungen aus inertialer Messeinheit und GPS-Empfänger kann unter Einbeziehung eines Filters die Fahrzustände des Mikromobils genau einschätzen.

### 2.5.5 Sensorik für die Umfeldwahrnehmung

Neben den Sensoren zur Erfassung der eigenen Fahrzustände auf Low-Level-Ebene werden für die höher automatisierten Fahrfunktionen eines Mikromobils auch Sensoren zur Erfassung der Umgebung benötigt. Dafür eignen sich die kommerziell erhältlichen Produkte aus dem Automotive- und Automatisierungsbereich.

Grundsätzlich können die Umfeldsensoren nach Erfassungsbereichen untergliedert werden. Für die geringen Fahrgeschwindigkeiten eines Mikromobils sind Sensoren für den nahen und mittleren Entfernungsbereich relevant. Im Nahbereich können z.B. Ultraschallsensoren verwendet werden, um die Objekterfassung im Umkreis von bis zu 5 m abzudecken. Für den mittleren Entfernungsbereich eignen sich Lidar- und Kamerasensoren, um Objekte und Hindernisse zu detektieren. Die Vor- und Nachteile der jeweiligen Sensortypen sind in der nachfolgenden Tabelle 2.10 aufgelistet.

Tabelle 2.10: Sensoren für die Umfeldwahrnehmung [43]

Sensortyp	Erfassungsbereich	Vorteile	Nachteile
Ultraschall	$\approx 50 \text{ cm} - 150 \text{ cm}$	robust, kostengünstig	keine Unterscheidung zwischen großen und kleinen Objekten
Kamera	bis $\approx 80 \text{ m}$	Erkennung von Objekten	hohe Wetterabhängigkeit
Lidar	$\approx 1 \text{ m} - 150 \text{ m}$	hohe Auflösung	keine direkte Geschwindigkeitsmessung
Radar	$\approx 30 \text{ m} - 250 \text{ m}$	hohe Wetterrobustheit	geringe Raumwinkelauflösung

### 2.5.6 Planung der Sollwertvorgaben

Je nach Automatisierungsgrad des Mikromobils und Abstraktionsgrad der Modelle müssen Sollwerte für die Regelung und Steuerung festgelegt werden. Dies kann zum Beispiel die Trajektorienvorgabe für die Bahn eines selbst fahrenden Mikromobils sein oder die Sollwertvorgaben bei Distanz- und Geschwindigkeitsregelsystemen. Bei der Berechnung der Sollvorgaben für eine Regelgröße müssen die physikalischen und technischen Randbedingungen berücksichtigt werden, damit keine Stellgrößen abgerufen werden, die vom Stellglied nicht erzeugt werden können. Das kann zum Beispiel eine Lenkwinkeländerung bei der Bahnführung sein, die der Lenkmotor aufgrund seiner maximalen Drehzahl nicht stellen kann. Dadurch wird der geforderte Sollwert aufgrund der Stellgrößenbegrenzung nicht zum erwarteten Zeitpunkt erreicht. Zur Vermeidung einer Sättigung der Stellgröße kann der zeitliche Verlauf der Sollgrößen so geplant werden, dass die Differenzen zwischen den Sollvorgaben entsprechend den technischen Spezifikationen des Stellgliedes erzeugt werden. Die Erzeugung der Vorgabeverläufe kann mit Hilfe von Filtern und Zwangsbedingungen erfolgen.

### 2.5.7 Filterung von Messwerten

Im Gegensatz zur Sollvorgabe wird die Regelgröße von den On-Board-Messsystemen erfasst und ist aufgrund der Messmethoden mit einer Varianz behaftet. Als Folge der Nutzung von ungefilterten Messsignalen kann die berechnete Stellgröße eines Reglers im zeitlichen Verlauf ebenfalls verstärkt variieren und abnorme Bewegungen des Mikromobils verursachen. Eine einfache Methode zur Glättung der Messsignale ist die Verwendung von Filtern. Je nach Ordnung des Filters erfolgt dadurch jedoch ein ungewollter zeitlicher Versatz der Regelgröße aus den Messwerten, so dass die Stellgröße nicht zum Prozess passend generiert wird. Oftmals entstehen auch aufgrund der Signalverarbeitungskette Totzeiten im Prozess, die einen zeitlichen Versatz der Messgrößen verursachen. Dies muss bei der Auslegung

der Regelung mitberücksichtigt werden. Als Beispiele für einfache Filter können hier der gleitende Mittelwertfilter oder Tiefpassfilter genannt werden. Gefilterte Messwerte bilden die obligatorische Grundlage für die smarte Regelung eines automatisierten Mikromobils.

### 2.5.8 Regelungsstrategien

Für das gezielte Stellen des Motormoments, des Bremsmoments und des Lenkwinkels eines Mikromobils werden Regelkreise implementiert (siehe Abbildung 2.8). Die einzelnen Bestandteile des idealen Regelkreises werden hier kurz am Beispiel des Antriebes erläutert. Als Führungsgröße wird eine Sollgeschwindigkeit des Mikromobils festgelegt. Aus der Differenz von Sollgeschwindigkeit und zurück geführter Istgeschwindigkeit wird der Regelfehler gebildet. Der Regler wird dabei als Software auf einen Mikrocontroller oder Steuergerät implementiert und berechnet ein Drehmoment als Stellgröße, welche an das Stellglied übergeben wird. Die Übertragung der Stellgröße kann z.B. über einen CAN-Bus oder analoge Stellsignale erfolgen. Das Stellglied wird durch den Motorcontroller gebildet, der aus dem angeforderten Drehmoment die Phasenströme des Motors stellt. Zur Vollständigkeit muss hier erwähnt werden, dass die Kombination Motorcontroller/Motor einen eigenen unterlagerten Regelkreis bildet, auf den an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird. Im angeführten Beispiel besteht die Regelstrecke aus dem Motor, der aus den eingprägten Phasenströmen eine Drehung generiert. Diese Drehung wird vom Messglied Raddrehzahlsensor erfasst und über Algorithmen zur Istgeschwindigkeit umgerechnet. Mit der Rückführung des Ist- bzw. Messwertes wird die gesamte Struktur zum geschlossenen Regelkreis.

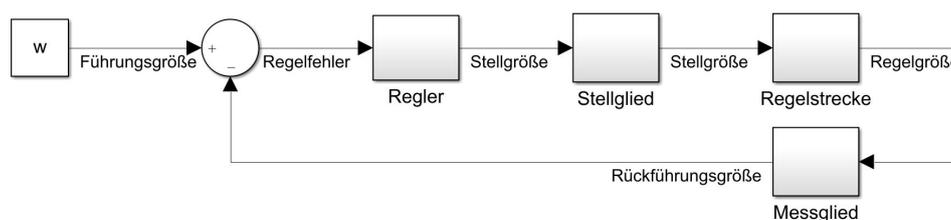


Abbildung 2.8: Regelkreis

Je nach Automatisierungsgrad muss die Reglerstruktur eines einzelnen Steuerungssystems (z.B. Antrieb, Bremse oder Lenkung) entsprechend einfach oder komplex ausgelegt werden. Zur Erzeugung der Stellgrößen am Mikromobil können Reglerstrukturen angewendet werden, die anhand einer oder mehrerer Messgrößen die Sollvorgaben für die Aktorik berechnen. Bei Mehrgrößensystemen werden dazu parallele oder kaskadierte Reglerstrukturen implementiert (siehe Abbildung 2.9), um die Stellgrößen entsprechend den Führungsgrößen bzw. den Regelfehlern anzupassen oder die Stabilität des Regelkreises durch Polvorgaben zu erreichen. Bei Regelstrecken mit starken Querkopplungen zwischen zwei oder mehreren

Regelgrößen empfiehlt sich die Verwendung eines Entkopplungsgliedes, um die Regelstrecke in unabhängige Eingrößenregelkreise zu überführen [44]. Dadurch kann eine dezentrale Regelung und die bekannten Verfahren für Eingrößensysteme angewendet werden. Die Reglerparameter müssen dabei so gewählt werden, dass die Stabilitätsreserven sowohl für die Sollgrößenfolge als auch für Störgrößenkompensation ausreichend sind. Dafür bieten sich auch adaptive Verfahren an, die den Regler entsprechend der ermittelten Parameter im laufenden Betrieb anpassen und zum Beispiel die Verstärkungsfaktoren (Gain-Scheduling) entsprechend dem geforderten Systemverhalten nachführen.

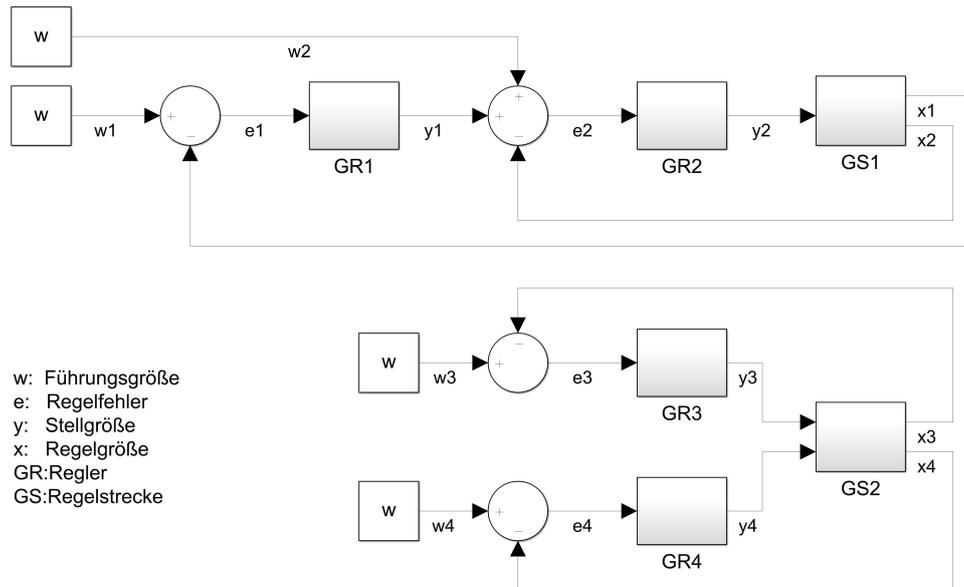


Abbildung 2.9: Kaskadierte (oben) und parallele Reglerstruktur(unten)

In vielen Anwendungsfällen ist die Verwendung zeitkontinuierlicher/linearer Regler nicht möglich, da z.B. aufgrund einer Stellgrößenbegrenzung des Stellgliedes nicht alle Vorgaben des Reglers befolgt werden können. Als Resultat der Stellgrößenbegrenzung wird zum einen das erwartete Systemverhalten zeitlich verändert und zum Anderen ein integraler Stellgrößenanteil eines Reglers entsprechend hochgesetzt. Dies kann zwar mit Anti-Windup-Methoden begrenzt werden, doch dadurch könnte ein nicht gewünschtes Systemverhalten durch den I-Anteil beim Unterschreiten der Stellgrößenbegrenzung verursacht werden.

Für die Auslegung der Regelkreise ist die genaue Kenntnis über die Dynamik der Regelstrecke obligatorisch. Die Parametrierung der Regelkreise kann entweder anhand von mathematischen Modellen oder Messdaten eines Versuchsträgers erfolgen. Um die Regelstrecke anhand der Messdaten zu identifizieren, muss zunächst der offene Regelkreis betrachtet werden und gegebenenfalls mit der Modellierung verglichen werden. Aufgrund der Systemarchitektur und den damit verbundenen Rechen- und Signalübertragungszeiten entstehen neben der Grunddynamik auch Totzeiten, die bei der Auslegung der Regelalgorithmen berücksichtigt werden müssen. Als Regelziel wird dabei meist das lineare Verhalten der Regelstrecke definiert.

## 2.6 Abgrenzung der eigenen Arbeit

In dieser Arbeit soll die Anwendung etablierter Entwicklungsprozesse und Regularien auf Mikromobile mit automatisierten Fahrfunktionen gezeigt werden. Dazu soll ein geeigneter Prozess identifiziert und für die Entwicklung auf mechatronischer Low-Level-Ebene adaptiert werden. Im Verlauf dieser Arbeit werden die Besonderheiten im Entwicklungsprozess der automatisierten Mikromobile aufgezeigt und anhand von zwei Fallbeispielen mit unterschiedlichem Automatisierungsgrad erläutert. Es wird ein Prozessmodell mit allen erforderlichen Prozessschritten angewendet, die eine logisch aufeinander aufbauende Reihenfolge abbilden, um automatisierte Fahrfunktionen in Mikromobilen zu implementieren.

Im Kapitel wurden neben der Begriffsklärung bzw. Klassifizierung und den Einzelkomponenten zur Automatisierung die derzeit gültigen Regularien zur Entwicklung automatisierter Mikromobile aufgezeigt. Aus den Regularien wurde die Relevanz für automatisierte Mikromobile identifiziert, um deren Vorgaben im nachfolgenden Entwicklungsprozess zu berücksichtigen. Zuvor werden jedoch geeignete Methoden und mathematische Modelle im nachfolgenden Kapitel gezeigt.

## 3 Grundlagen

Bevor der Entwicklungsprozess eines automatisierten Mikromobils beginnt, müssen Methoden und Werkzeuge identifiziert werden, um die Aufgabenstellung bewältigen zu können. Dazu werden in diesem Kapitel verschiedene Methoden für den Entwicklungsprozess und dessen Bestandteile gezeigt und erläutert. Ein wichtiger Schritt im Entwicklungsprozess ist die Risikobeurteilung, aus der sich einzuhaltende Randbedingungen für das technische Erzeugnis ergeben. Dafür wird die Beurteilungsmethode anhand der geltenden Normen gezeigt. Nachdem die Randbedingungen und Anforderungen festgelegt wurden, ist die Kenntnis über die Dynamik der automatisierten Mikromobile obligatorisch. Dazu werden die wichtigsten Modelle zur Abstraktion der Fahrdynamik eines Mikromobils aufgeführt. Im letzten Abschnitt des Kapitels werden numerische Methoden zum Filtern der Messwerte gezeigt.

### 3.1 Methodik

In der methodischen Produktentwicklung gibt es eine Vielzahl an Vorgehensmodellen, die nur geringfügig voneinander abweichen. Grundsätzlich kann man die Methoden anhand ihres Bearbeitungshorizontes unterscheiden [45]. Dieser reicht von elementaren Handlungen auf Mikroebene bis hin zu komplexen Modellen für das Gesamtprojekt auf Makroebene. Ein Beispiel für die elementaren Handlungsabläufe ist das TOTE-Modell von George A. Miller bei dem der gewünschte Zielzustand iterativ nach Modifikationen mit dem Ausgangszustand verglichen wird, bis der geforderte Zustand erreicht wurde. Auf Ebene der operativen Arbeitsschritte werden die Vorgehensmodelle komplexer, indem nach einer Analyse zuerst die Problemstellung geklärt wird. Anhand der Problemstellung werden dann Lösungen generiert und bewertet. Aufgrund der Bewertung wird dann eine Auswahl der Lösung getroffen und implementiert. Dieses Schema findet sich dann in ähnlicher Weise bei den langfristigen Entwicklungsmethoden wieder, bei denen der Entwicklungsprozess in Teilprozesse und Prozessschritte zerlegt wird. Ein Vorgehensmodell kann im Gesamtprozess kaskadiert und für die Teilprozesse in Iterationen durchlaufen werden. Ein Beispiel für die makroskopische Betrachtung des gesamten Entwicklungsprozesses ist die Unterteilung in Teilprozesse, die wiederum durch eigene Vorgehensmodelle unabhängig voneinander durchführbar sind.

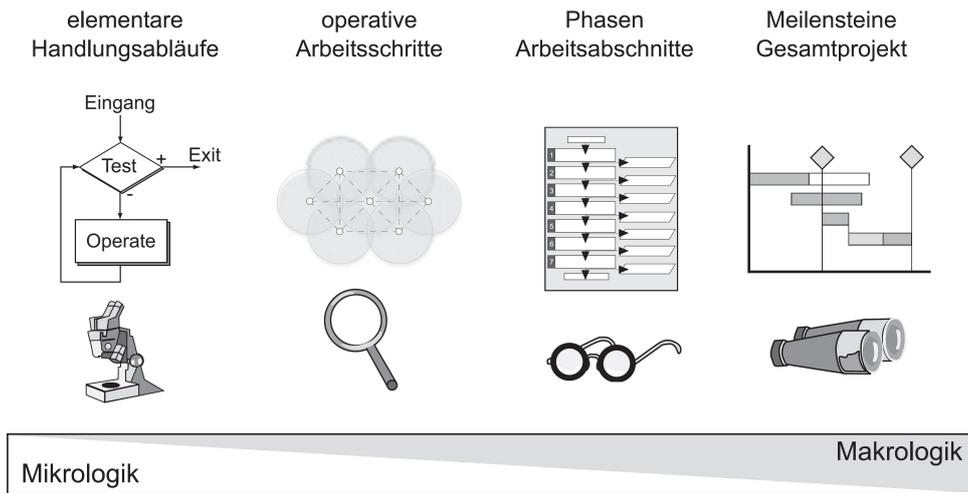


Abbildung 3.1: Auflösungsgrad einzelner Entwicklungsmethoden [45]

In [46] wird eine Methode für die Entwicklung technischer Produkte beschrieben (siehe Abbildung 3.2). Im Modell befinden sich in den einzelnen Ebenen als grundlegende 4 Phasen: Anforderungen klären, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten. Trotz des seriell wirkenden Aufbaus können die einzelnen Arbeitsebenen durchaus iterativ durchlaufen werden.

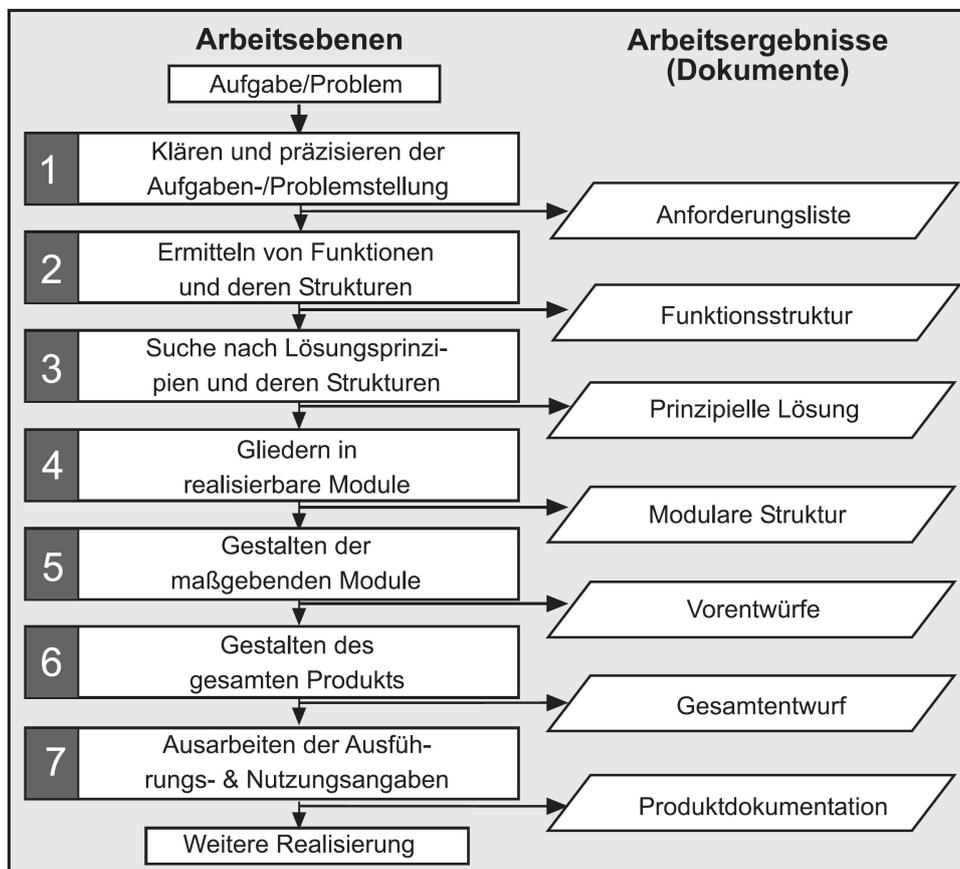


Abbildung 3.2: Vorgehensmodell nach VDI 2221 [46]

Ein analoges Modell stellt das Münchener Vorgehensmodell dar (siehe Abbildung 3.3). Das Modell wurde entwickelt, um die sequentielle und lineare Darstellung der Entwicklungsschritte anderer Modelle zu vermeiden. Das Standardvorgehen in der Reihenfolge der einzelnen Prozessschritte ist dabei wieder ähnlich zu anderen Modellen:

- Ziel planen
- Ziel analysieren
- Problem strukturieren
- Lösungsideen ermitteln
- Eigenschaften ermitteln
- Entscheidungen herbeiführen
- Zielerreichung absichern

Jedoch soll die netzartige Darstellung ohne Nummerierung einen starren Prozessablauf unterbinden und projektangepasste Phasenreihenfolgen ermöglichen. Im Vergleich zu anderen Vorgehensmodellen soll dadurch die Adaption für die eigene Entwicklung um ein Vielfaches vereinfacht werden.

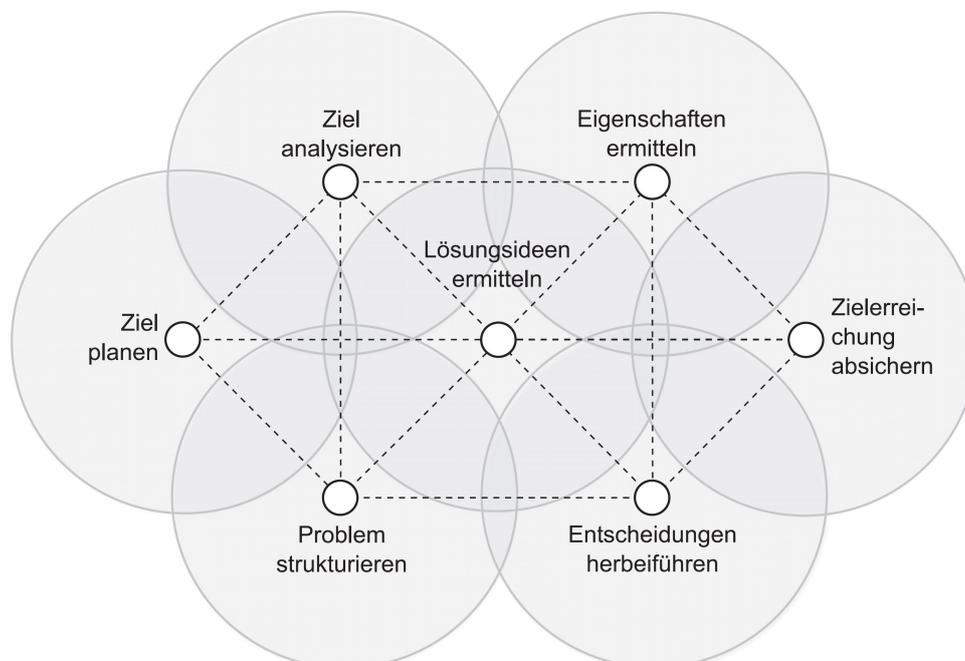


Abbildung 3.3: Münchener Vorgehensmodell [45]

Den operativen und strategischen Vorgehensmodellen stehen agile Entwicklungsprozesse mit kurzen Entwicklungszyklen entgegen. Das Entwickeln einer Lösung zur gestellten

Anforderung soll dadurch flexibler und schneller erfolgen ohne ein striktes Prozessmodell durchlaufen zu müssen. Diese Methoden sind vor allem in der Software-/ Funktionsentwicklung verbreitet, um eine Anwendung ohne zeitintensive Entwurfsphasen so schnell wie möglich umzusetzen.

Eine weitere Möglichkeit den Entwicklungsprozess auf strategischer Ebene zu strukturieren, erfolgt anhand der Wirkrichtung der Teilprozesse. Es gibt zum einen das Top-Down Prinzip, bei dem vom Gesamtprozess ausgehend eine Dekomposition bis hin zum kleinsten Element in der Entwicklung durchgeführt wird. Dem entgegen steht das Prinzip Bottom-Up. Dabei werden zuerst die Prozessschritte gelöst, um den übergeordneten Prozess zu bewältigen. Beide Methoden werden im V-Modell der Mechatronik nach [47] in den beiden Ästen adaptiert.

## 3.2 V-Modell der Mechatronik

Die VDI/VDE 2206 bildet ein Vorgehensmodell für die Entwicklung mechatronischer Systeme ab. In diesem Modell werden die Entwicklungsphasen Anforderungsdefinition, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten auf den zwei Ästen eines V angeordnet und durch eine Validierung ergänzt (siehe Abbildung 3.4). Dafür existieren zwischen den Phasen Rückkopplungen, die gestellte Anforderungen absichern und verifizieren sollen. Ausgehend von einem Gesamtmodell werden zunächst die Anforderungen extrahiert. Anhand dieser Anforderungen wird am Ende das Resultat der Entwicklung evaluiert. Während des Entwicklungsprozesses wird zunächst das Gesamtsystem mit seinen Funktionen in Teilsysteme oder -funktionen zerlegt. Die Feinausarbeitung der Teilsysteme (z.B. Mechanik, Elektrik, Software) kann dann parallel durchgeführt und in unterlagerten V-Modellen entwickelt werden. Nach der Entwicklung der Teilsysteme werden diese im Gesamtsystem integriert und getestet. Dann kann ein Soll-Istabgleich mit den Anforderungen erfolgen und der Prozess bei Abweichungen iterativ durchlaufen werden, bis der geforderte Sollzustand erreicht wird. Aufgrund der Komplexität eines Entwicklungsprozesses wird ein Zyklus des V-Modells mehrmals in Iterationen durchlaufen. Bis zur Implementierung des Gesamtsystems kann das V-Modell innerhalb der Entwicklungsstufen (Versuchsträger, Prototyp, Serienmuster) auch mit Simulationen durchlaufen und validiert werden. Im Anhang A.1 befindet sich ein detailliertes Vorgehensmodell des Entwicklungsprozesses automatisierter Mikromobile auf Grundlage des V-Modells. Darin sind die Teilprozesse Anforderungen, Entwurf, Implementierung und Finalisierung enthalten. Diese 4 Teilprozesse werden auf der Abbildung in feingliederte Prozessschritte unterteilt. Die sequentielle Reihenfolge zwischen den Prozessschritten soll dabei nur eine Orientierungshilfe vorgeben. Es können gemäß des V-Modells Rücksprünge und iterative Durchläufe zwischen den Prozessschritten durchgeführt werden.

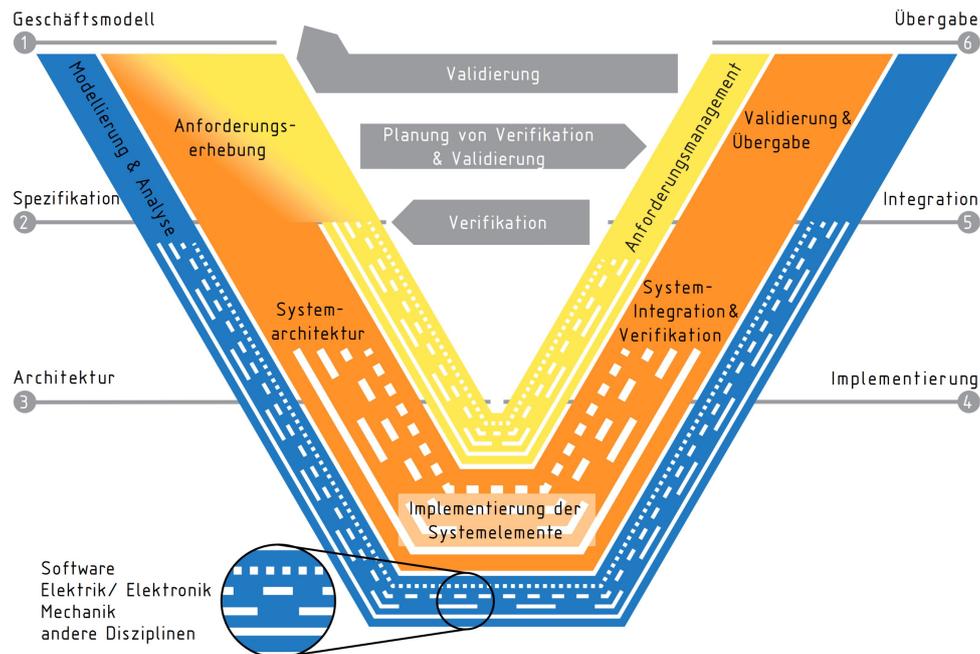


Abbildung 3.4: V-Modell der Mechatronik [47]

Für die Entwicklung automatisierter Mikromobile wurde das V-Modell gewählt, weil es eine grundlegende Basis mit logisch aufeinander aufbauenden Teilprozessen bietet. Dabei berücksichtigt das V-Modell die Vielfalt der Disziplinen wie Mechanik, Elektrik und Software zur Entwicklung mechatronischer Gesamtsysteme. Für die Automatisierung eines Mikromobils wird kostenintensive Hardware benötigt, die aufgrund einer Entwurfsphase entsprechend zur Funktionalität dimensioniert werden soll. Das V-Modell beinhaltet eine umfangreiche Entwurfsphase, dadurch können Fehlumsetzungen bei der Hardware-Auswahl reduziert werden. Ein weiterer Vorteil ist die Durchführung von Test- und Verifikationsphasen auch während iterativer Durchläufe des Modells, um den erreichten Istzustand des automatisierten Mikromobils mit den gestellten Anforderungen abzugleichen.

### 3.3 Risikobeurteilung

Ein grundlegender Bestandteil der Anforderungserhebung im Entwicklungsprozess ist die Risikobeurteilung und Risikominimierung. Je nach Klassifizierung des Produktes stehen dafür entsprechende Dokumente für die Durchführung eines Risikomanagements zur Verfügung (z.B. [48], [49], [21]). Als Strategie zur Risikobeurteilung kann dafür folgende Schrittreihenfolge gemäß [48] angewendet werden:

1. Risikoanalyse
  - Festlegen der Grenzen der Maschine

- Identifizieren von Gefährdungen
  - Risikoeinschätzung
2. Risikobewertung
  3. Risikominimierung

#### 3.3.1 Risikoanalyse

Zu Beginn einer Risikoanalyse müssen die Grenzen des Produktes während des gesamten Produktlebenszyklus' festgelegt werden. Dafür werden alle Leistungsmerkmale der Maschine, der Umgebung und beteiligter Personen genau bestimmt.

- Verwendungsgrenzen
- Räumliche Grenzen
- Zeitliche Grenzen
- Weitere Grenzen

Zu den Verwendungsgrenzen zählt neben dem bestimmungsgemäßen Gebrauch auch die vernünftigerweise vorhersehbare Fehlanwendung. Dazu zählen die Betriebsarten einer Maschine und Eingriffsmöglichkeiten des Nutzers auch bei Fehlfunktionen. Weiterhin muss festgelegt werden, in welchem Bereich die Maschine eingesetzt wird und welche Personen mit welchem Ausbildungsstand oder Fähigkeiten Zugang haben. Als räumliche Grenzen muss der Bewegungsraum der Maschine sowie Personen im Umgang während des Betriebes berücksichtigt werden. Zu den zeitlichen Grenzen zählen die Lebensdauer der Maschine oder einzelner Bauteile und entsprechende Wartungsintervalle. Weitere Grenzen können z.B. durch Reinigungsempfehlungen oder Umgebungs-/Witterungsbedingungen gesetzt werden, die über die IP-Schutzarten gegen Staub und Wasser nach [50] klassifiziert werden können.

Der wichtigste Bestandteil der Risikoanalyse ist die systematische Identifizierung von Gefährdungen in allen Phasen der Lebensdauer. Dazu müssen alle Gefährdungen durch das Eingreifen von Personen bei der Durchführung folgender Aufgaben berücksichtigt werden.

- Einrichten, Prüfen, Einlernen (Teachen)/Programmieren
- Umrüsten, Anlauf, alle Betriebsarten
- Maschinenbeschickung

- Entnahme des Produktes aus der Maschine
- Stillsetzen der Maschine/ im Notfall
- Wiederherstellung des Betriebs nach Stau oder Blockierung
- Wiederanlauf nach außerplanmäßigem Stillsetzen
- Fehlersuche und Fehlerbeseitigung (Eingreifen der Bedienperson)
- Reinigung und Sauberhaltung
- Präventive Instandhaltung, Fehlerbehebende Instandhaltung

Weiterhin müssen die Gefährdungen während des Normalbetriebes und auch im Fehlerfall festgestellt werden, die durch unbeabsichtigtes Verhalten der Bedienperson oder vernünftigerweise vorhersehbarer Fehlanwendung erfolgen können. Nachdem alle Gefährdungen identifiziert wurden, erfolgt eine Risikoeinschätzung für jede Gefährdungssituation.

### 3.3.2 Risikobewertung

In den genannten Normen zum Thema Sicherheitsmanagement werden grundsätzlich ähnliche Verfahren zur Bestimmung des Risikos aufgeführt. Sie beinhalten die Grundkriterien Schadensausmaß, Aufenthaltsdauer und Gefahrenabwehr (engl. Exposure, Severity, Controllability). Zuerst wird das Schadensausmaß von leichten bis schweren Verletzungen ermittelt. Dann wird in der Exposition die Dauer des Risikos nach ihrer Häufigkeit von selten bis häufig eingestuft. Ein weiteres Kriterium ist die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses, die ebenfalls über die Häufigkeit bemessen wird. Zuletzt hat auch die Möglichkeit einer Schadensbegrenzung oder -vermeidung einen Einfluss bei der Einstufung des Risikos.

Das Risiko stellt dabei eine Funktion des Schadensausmaßes und der Eintrittswahrscheinlichkeit des Schadens dar. Das Schadensausmaß kann nach dem Ausmaß der Verletzungen von leicht bis tödlich oder dem Schadensumfang von einer bis mehreren Personen eingestuft werden. Bei der Eintrittswahrscheinlichkeit wird u.a. die Gefährdungsexposition von Personen berücksichtigt, indem die Häufigkeit von Personenzugang zur Gefährdungssituation bemessen wird. Weiterhin werden der Eintritt eines Gefährdungsereignisses nach Häufigkeit und die Möglichkeit der Vermeidung oder Begrenzung des Schadens bei der Risikoeinschätzung berücksichtigt. Zu den Faktoren, um die Vermeidung eines Schadens einschätzen zu können, gehören personenbedingte Aspekte wie z.B. ob qualifizierte/unqualifizierte Personen der Gefahr ausgesetzt sind, mit welcher Geschwindigkeit der Schaden Eintritt und Menschen darauf reagieren können oder besteht ein Risikobewusstsein durch Benutzerinformationen und Warnzeichen/Anzeigeelementen an der Maschine. Mit diesen

Risikoelementen kann im nächsten Schritt eine Bewertung durchgeführt werden, um darauf folgend das Restrisiko mit angemessenen Maßnahmen auf ein erträgliches Maß zu senken.

Die Risikobewertung kann z.B. in Form eines Graphen oder einer Matrix dargestellt werden (siehe Abbildung 3.5). Beide Varianten dienen der quantitativen Einstufung eines festgestellten Risikos. Zur Bestimmung des Risikoindex oder Sicherheitsintegritätslevel wird das festgestellte Risiko in festgelegter Reihenfolge anhand der Grundkriterien eingestuft und eine quantitative Kennzahl ermittelt. Entsprechend dem festgestellten Risiko bzw. Sicherheitsintegritätslevel werden Sicherheitsmaßnahmen bzw. Maßnahmen zur Vermeidung einer Gefährdung angewendet. Diese Maßnahmen können zum Beispiel unterschiedlich quantifizierte Sicherheitsfaktoren bei einer Konstruktion sein oder eine definierte Ausfallwahrscheinlichkeit bei den verwendeten elektrischen Komponenten. Nach der angewendeten Maßnahmen kann die Risikobewertung iterativ erfolgen, bis das festgestellte Risiko auf ein erträgliches Maß reduziert wurde.

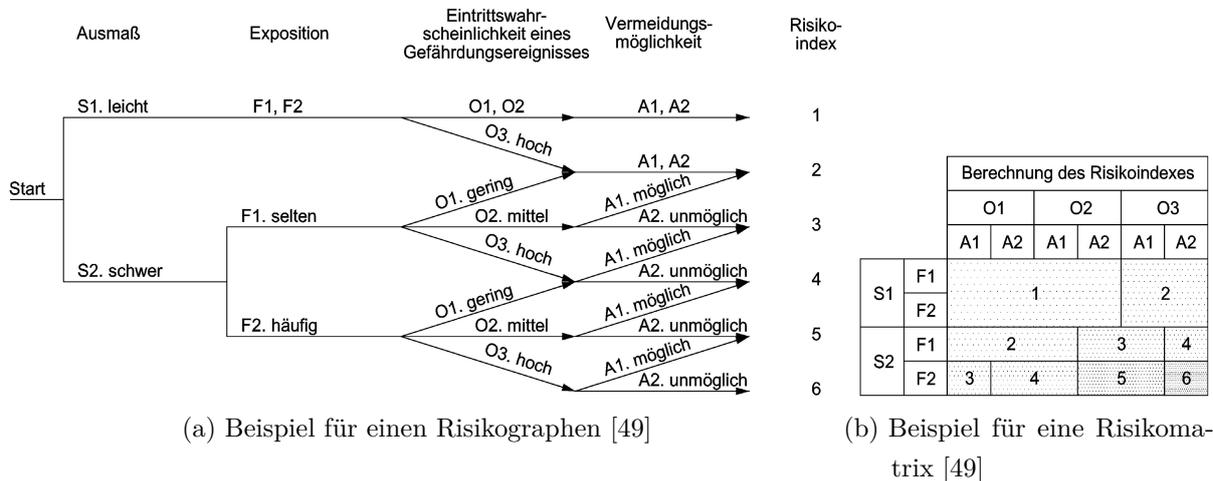


Abbildung 3.5: Darstellungsformen zur Risikobewertung

- S - Schadensausmaß(Severity)
- E - Aufenthaltsdauer(Exposure)
- O - Eintrittswahrscheinlichkeit(Occurrence)
- A - Schadensbegrenzung/-vermeidung(Avoidance)

### 3.3.3 Risikominderung

Im Anschluss an die Risikobewertung erfolgen Schutzmaßnahmen die in folgender Reihenfolge eine Risikominderung erzielen sollen.

1. Inhärent sichere Konstruktion
2. Technische und/oder ergänzende Schutzmaßnahmen
3. Benutzerinformation

Vor allen anderen Schritten der Risikominderung ist die inhärent sichere Konstruktion der wichtigste Schritt, um wirksame Schutzmaßnahmen für Personen zu schaffen. Im Gegensatz zu technischen Schutzmaßnahmen und Benutzerinformationen, die durch Nutzer Umgangen werden können, wird beim inhärent sicheren Konstruieren durch geeignete Konstruktionsmerkmale an der Maschine selbst eine Risikominderung erzielt. Geeignete Faktoren sind nachfolgend aufgeführt.

- Geometrische Faktoren, Physikalische Aspekte
- Berücksichtigung des allgemeinen technischen Wissens zur Konstruktion
- Auswahl geeigneter Technologien
- Anwenden des Prinzips der mechanisch zwangsläufigen Wirkung
- Standsicherheit
- Wartungsfreundlichkeit, Ergonomie
- Elektrische, Pneumatische und Hydraulische Gefährdungen
- Maßnahmen für Steuerungen
- und weitere

Wird das Risiko durch inhärent sichere Konstruktion nicht ausreichend gemindert, müssen trennende und nichttrennende Schutzeinrichtungen angewendet werden, um Personen vor Gefährdungen zu schützen. Die Auswahl einer geeigneten Schutzeinrichtung resultiert dabei aus den Gefährdungen, die von der Maschine ausgehen und den dem nötigen Zugang des Menschen für die Bedienung und Interaktion. Trennende Schutzeinrichtungen verhindern den Zugang von Personen oder äußeren Einflüssen zu den sich bewegenden und kraftübertragenden Teilen. Nichttrennende Maßnahmen erkennen die Interaktion eines Menschen in unmittelbarer Nähe zum Gefährdungsbereich und steuern das Verhalten der Maschine, damit die Gefährdung gemindert wird.

Das Erstellen einer Benutzerinformation ist fester Bestandteil im Entwicklungsprozess, aber sie stellt das letzte Mittel zur Minderung eines Risikos dar. Falls trotz inhärent sicherer Konstruktion und technischen Schutzmaßnahmen ein Restrisiko durch eine Gefährdung bei bestimmungsgemäßen Gebrauch besteht, wird der Benutzer durch das Dokument informiert und gewarnt.

Analog zur beschriebenen Vorgehensweise zur Risikobeurteilung in den Abschnitten 3.3.1 bis 3.3.3 erfolgt das hazard analysis and risk assessment in [21] für die Entwicklung von Serienfahrzeugen im Straßenverkehr.

#### 3.3.4 Weitere Methoden der Risikobeurteilung

Als weitere Methoden der Risikobeurteilung sind die Fehlerbaumanalyse (FTA) und die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) aufzuführen. Beide sollen den Ausfall des Gesamtsystems und die damit verbundenen Risiken identifizieren und quantifizieren.

Einer FTA liegt ein Top-Event wie z.B. der Gesamtsystemausfall zugrunde, der als Top-Down Analyse zu den vernünftigerweise vorhersehbaren Ursachen verzweigt wird [51]. Ein Fehlerfall kann dabei entweder durch eine einzelne Ursache hervorgerufen werden oder durch das Zusammenwirken mehrerer Anlässe. In der graphischen Abbildung des Fehlerbaums werden die Ursachen mit Hilfe von logischen Verknüpfungen dargestellt und in mehrere Ebenen vom Gesamtsystem über Komponenten bis Bauteilen dekomponiert. Tritt ein Fehlerfall bereits durch eine einzelne Ursache auf, wird ein logisches Oder als Verknüpfung verwendet. Führen mehrere Ursachen zu einem Systemfehler wie z.B. redundante Komponenten, sind Ursache und Folge durch ein logisches Und miteinander verknüpft. Den jeweiligen Ursachen kann eine Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet werden, um mit Hilfe der Berechnungsvorschriften für Logikgatter eine quantitative Aussage über den Eintritt des Top-Events zu treffen.

Im Gegensatz zur Top-Down-Methode der FTA wird bei einer FMEA häufiger das Bottom-Up-Prinzip angewendet. Dafür wird von einem Fehler auf Komponentenebene ausgegangen und die möglichen Folgen ermittelt [52]. Nachdem für alle Elemente eines Systems Effekte identifiziert wurden, können die weiteren Schritte der Risikobeurteilung angewendet werden (Vergleich Abschnitte 3.3.2 bis 3.3.3). Innerhalb der FMEA kann entweder eine quantitative Risikobewertung oder eine qualitative Risikoeinschätzung vorgenommen werden, bei der die ermittelten Maßnahmen für Komponentenfehler nach Priorität angewendet werden.

Methoden zur Gefahrenanalyse auf systemtheoretischer Abstraktionsebene werden in [53] aufgeführt. Die Methoden STAMP und STPA betrachten komplexe Automatisierungssysteme als Ganzes. Aufgrund der Modellierung als Systemtheorie unter Nutzung von Regelkreisen sollen geeignete Zwangsbedingungen für Gefahrensituationen ermittelt werden.

Bei allen Methoden soll aufgrund der quantitativen oder qualitativen Beurteilung das Eintreten eines Fehlers unter Identifizierung geeigneter Maßnahmen auf ein erträgliches Maß gemindert werden.

## 3.4 Fahrzeugmodelle

Je nach Automatisierungsgrad der Fahraufgabe von Mikromobilen müssen für die Dimensionierung der Regelkreise oder die Filterung der Messwerte einfache oder komplexe Fahrzeugmodelle analysiert und auf Steuergeräten programmiert werden. Die genaue Kenntnis der Dynamik eines Fahrzeuges ist dabei obligatorisch, um eine geregelte Automatisierung zu ermöglichen. Dafür wird das Verhalten eines Fahrzeuges mit Hilfe von Modellgleichungen vereinfacht abgebildet. Mit Hilfe der Fahrzeugmodellierung kann der Entwicklungsprozess komplexer Automatisierungssysteme in einer Simulation erfolgen. Der Detailgrad der Modellierung reicht dabei von einfachen Längsdynamikmodellen mit nur einem Freiheitsgrad bis hin zu Mehrkörpersystemen mit deutlich höherer Anzahl an Freiheitsgraden.

### 3.4.1 Koordinatensysteme

Vor der Modellierung muss eine Konvention über die verwendeten Koordinatensysteme getroffen werden. In dieser Arbeit werden die normativen Festlegungen aus [54] für Straßenfahrzeuge verwendet (Vergleich Abbildung 3.6). Alle Achsen der verwendeten Koordinatensysteme stehen jeweils orthogonal zueinander. Das ortsfeste Koordinatensystem (Referenz-Koordinatensystem) folgt dabei der ENU-Ausrichtung (East, North, Up). Das bedeutet, dass der Referenzpunkt auf einer horizontalen Ebene senkrecht zur Richtung der Schwerkraft liegt. Die Z-Achse ist parallel zur Richtung der Schwerkraft ausgerichtet und zeigt nach oben. Die X-Achse liegt parallel zur Ostausrichtung und die Y-Achse zur Nordausrichtung.

Zur Bestimmung der Lage eines Fahrzeuges im ortsfesten Koordinatensystem wird ein Fahrzeugreferenzpunkt festgelegt (zumeist im Fahrzeugschwerpunkt oder mittig zwischen den hinteren beiden Rädern). Die X-Achse liegt kollinear zur Fahrzeuglängsachse, die Y-Achse parallel zur Querachse und die Z-Achse ist parallel zur Hochachse des Fahrzeugs. Je nach Freiheitsgrad des Modells kann zusätzlich noch zwischen horizontiertem (Abb. 3.6 Index Vh) und fahrzeugfestem (Index V) Koordinatensystem unterschieden werden. Beim horizontiertem werden Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeugs vernachlässigt.

Weiterhin ist es sinnvoll radfeste Koordinatensysteme zur Transformation der Fahrzustände zwischen Fahrzeugschwerpunkt und den einzelnen Rädern zu definieren. Der Ursprung kann im Radmittelpunkt oder auf Fahrbahnebene (X-Y-Ebene des Referenzkoordinatensystems) liegen. Die Y-Achse ist parallel zur Radrotationsachse ausgerichtet und die X-Achse parallel zur Reifenlängsrichtung. Die Z-Achse des Radkoordinatensystems ist senkrecht nach oben parallel zur Z-Achse des Referenzkoordinatensystems ausgerichtet.

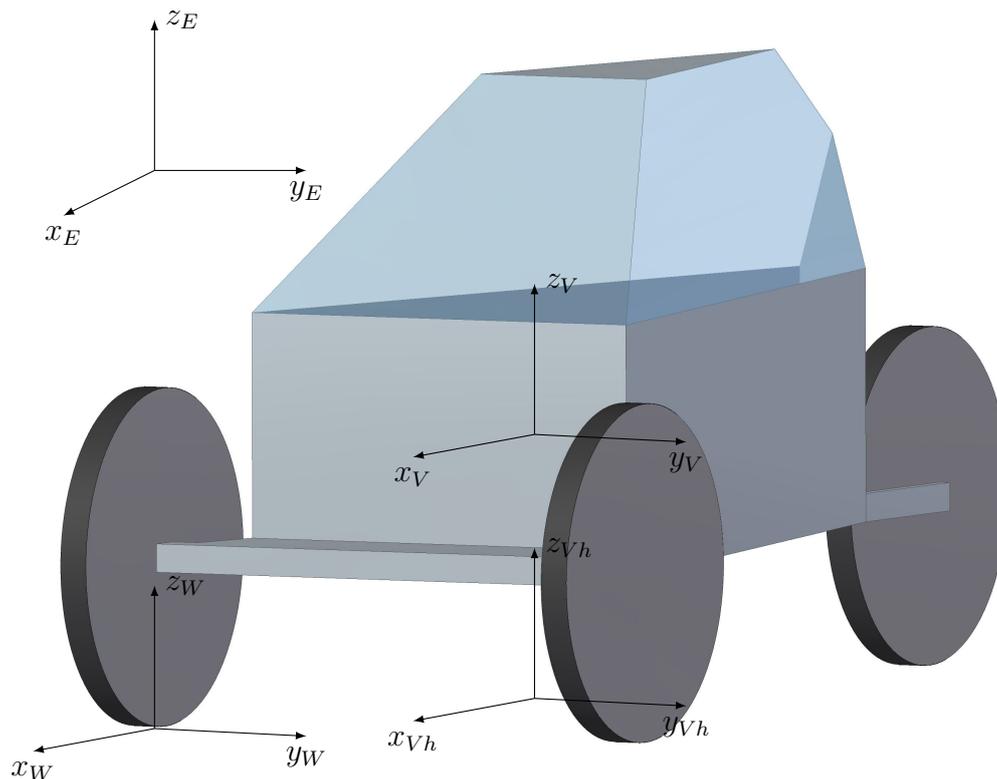


Abbildung 3.6: Koordinatensysteme nach [54]

- E - ortsfestes Koordinatensystem(Earth)
- V - Fahrzeugkoordinatensystem(Vehikel)
- Vh - horizontiertes Fahrzeugkoordinatensystem
- W - Radgebundenes Koordinatensystem(Wheel)

Neben den translatorischen Freiheitsgraden aufgrund der definierten orthogonalen Koordinatensysteme lässt sich die Bewegung des Fahrzeugs auch durch rotatorische Freiheitsgrade beschreiben. Die Gierbewegung erfolgt um die Z-Achse des Fahrzeugkoordinatensystems, der zugehörige Winkel mit seinen Derivaten wird mit  $\psi$  benannt. Die Wank- oder Rollbewegung wird durch den Winkel  $\phi$  entlang der Y-Achse beschrieben. Das Nicken erfolgt um die Y-Achse (Winkel  $\theta$ ). Die Drehrichtung aller Winkel wird im mathematisch positiven Sinne entlang der Koordinatenachsen festgelegt.

### 3.4.2 Modell der Längsdynamik

Für ein Modell der Längsdynamik werden die wirkenden Kräfte entlang der Fahrzeuglängsachse betrachtet [55]. Eine einfache Abstraktion der Längsdynamik kann mit dem auf Abbildung 3.7 gezeigtem Modell erfolgen. Es beschränkt sich auf den Freiheitsgrad der Bewegung in X-Richtung des Fahrzeugkoordinatensystems und kann für die Modellierung der Dynamik einer Geradeausfahrt genutzt werden. Die gesamte Fahrzeugmasse ist im Schwerpunkt konzentriert und die Quer-, Wank- und Nickdynamik werden vernachlässigt.

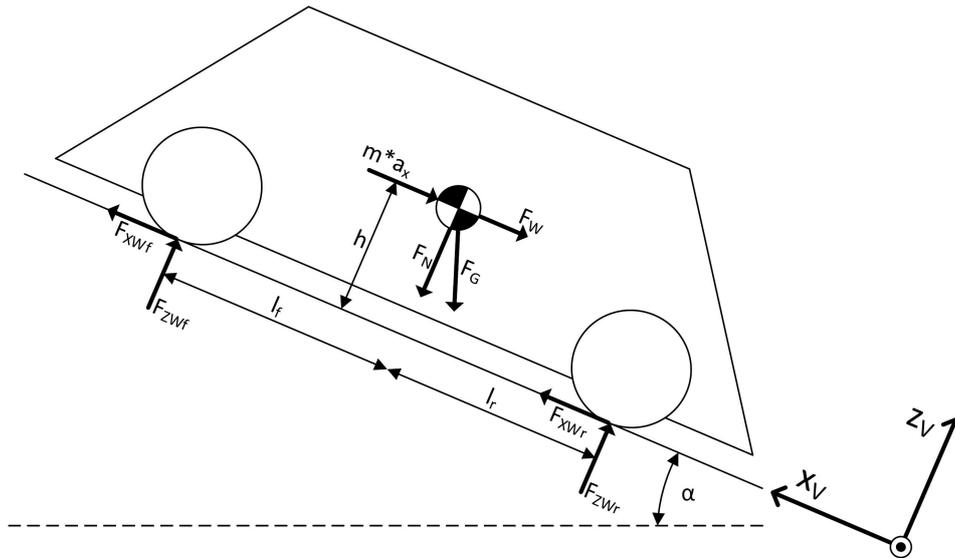


Abbildung 3.7: Kräfte am Fahrzeug bei beschleunigter Steigungsfahrt

$m \cdot a_x$  - Beschleunigungswiderstand

$F_W$  - Fahrwiderstände

$F_G$  - Gewichtskraft

$F_N$  - Normalkraft

$F_{XWf(r)}$  - Reifenlängskraft vorn (hinten)

$F_{ZWf(r)}$  - Reifenaufstandskraft vorn (hinten)

$l_{f(r)}$  - Abstand COM zur Vorderachse (Hinterachse)

$h$  - Höhe Schwerpunkt über Boden

$\theta$  - Nickwinkel

$\alpha$  - Steigungswinkel

Der Fahrwiderstand  $F_W$  setzt aus den Komponenten Rollwiderstand, Luftwiderstand und Steigungswiderstand zusammen:

$$F_W = F_{Roll} + F_{Luft} + F_{Steig} \quad (3.1)$$

Die einzelnen Komponenten des Fahrwiderstandes können wie folgt berechnet werden:

$$F_W = k_{Roll} \cdot m \cdot g + k_{Luft} \cdot (v - v_{Wind})^2 + m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (3.2)$$

$k_{Roll}$  und  $k_{Luft}$  sind fahrzeugspezifische Koeffizienten und können durch eine Parameteridentifikation ermittelt werden. Der dynamische Fahrwiderstand setzt sich aus dem Fahrwiderstand und dem Beschleunigungswiderstand zusammen.

$$F_{WDyn} = F_W + m \cdot a_x \quad (3.3)$$

Die Radaufstandskräfte  $F_{ZWf(r)}$  setzen sich aus einem statischen, einem Steigungs- und dynamischen Anteil zusammen (Auftriebskräfte werden für Mikromobile aufgrund der geringen Fahrgeschwindigkeiten vernachlässigt):

$$F_{ZW} = F_{ZWstat} + F_{ZWsteig} + F_{ZWdyn} \quad (3.4)$$

$$F_{ZWf} = m \cdot g \cdot \left( \frac{l_r}{l} \cdot \cos \alpha - \frac{h}{l} \cdot \sin \alpha \right) - m \cdot a_x \cdot \frac{h}{l} \quad (3.5)$$

$$F_{ZW_r} = m \cdot g \cdot \left( \frac{l_f}{l} \cdot \cos \alpha + \frac{h}{l} \cdot \sin \alpha \right) + m \cdot a_x \cdot \frac{h}{l} \quad (3.6)$$

Die Reifenlängskräfte können je nach Antriebsart entsprechend formuliert werden. Für den Frontantrieb:

$$F_{XWf} = F_{Antrieb} - F_{Luft} - F_{Roll} - F_{Steig} - F_{Beschl} \quad (3.7)$$

$$F_{XWf} = \frac{M_{Motor}}{r_{Wf}} - k_{Luft} \cdot (v - v_{Wind})^2 - k_{Roll} \cdot F_{ZWf} - m \cdot g \cdot \sin \alpha - m \cdot (1 + \varepsilon) \cdot a_x \quad (3.8)$$

Für den Heckantrieb gilt äquivalent:

$$F_{XWr} = F_{Antrieb} - F_{Luft} - F_{Roll} - F_{Steig} - F_{Beschl} \quad (3.9)$$

$$F_{XWr} = \frac{M_{Motor}}{r_{Wr}} - k_{Luft} \cdot (v - v_{Wind})^2 - k_{Roll} \cdot F_{ZW_r} - m \cdot g \cdot \sin \alpha - m \cdot (1 + \varepsilon) \cdot a_x \quad (3.10)$$

$\varepsilon$  ist der Drehmassenzuschlagfaktor, der alle rotierenden Trägheiten des Antriebsstranges zusammenfasst.

### 3.4.3 Modell der Querdynamik

Eine Erweiterung des Längsdynamikmodells um zwei weitere Freiheitsgrade erfolgt mit dem Einspurmodell nach [56]. Dadurch kann das Fahrverhalten eines Fahrzeuges in der Kurve modelliert werden. Die Fahrzeugmasse wird analog zu 3.4.2 im Schwerpunkt in einer Punktmasse konzentriert. Die Räder der Achsen werden zu je einem virtuellen Rad an Vorder- und Hinterachse zusammengefasst, daraus leitet sich auch der Name Einspurmodell ab. Wank- und Nickbewegungen werden ebenfalls vernachlässigt und es werden keine Radlastschwankungen modelliert. Wie auf Abbildung 3.8 zu sehen, eignet sich die Ansicht aus der Vogelperspektive zur Darstellung der wirkenden Kräfte und Momente.

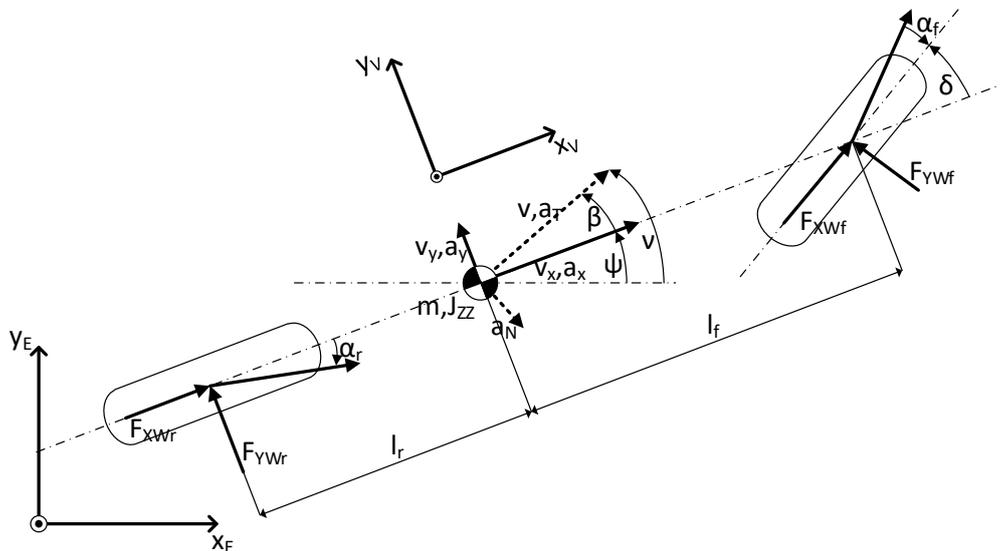


Abbildung 3.8: Einspurmodell nach [56]

$F_{XWf(r)}$  - vordere(hintere) Radlängskraft

$F_{YWf(r)}$  - vordere(hintere) Radseitenkraft

$v$  - Kursgeschwindigkeit

$v_x, v_y$  - Geschwindigkeitskomponenten in Fahrzeugkoordinaten

$a_x, a_y$  - Beschleunigungen in Fahrzeugkoordinaten

$a_N$  - Beschleunigung in Normalrichtung (Punktmasse auf Kreisbahn)

$\alpha_{f(r)}$  - vorderer(hinterer) Schräglaufwinkel

$\beta$  - Schwimmwinkel,  $\delta$  - Lenkwinkel,  $\psi$  - Gierwinkel,  $\nu$  - Kurswinkel

Eine ausführliche Herleitung der Differentialgleichungen zum Einspurmodell befinden sich im Anhang B.1. Das lineare Einspurmodell wird durch die nachfolgenden Gleichungen beschrieben.

$$\dot{\beta} = -\dot{\psi} + \frac{1}{m \cdot v} \cdot ((F_{XW_r} + F_{XW_f}) \cdot \beta + F_{YW_r} + F_{YW_f}) \quad (3.11)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{1}{J_{ZZ}} \cdot (F_{YW_r} \cdot l_r - F_{YW_f} \cdot l_f) \quad (3.12)$$

$$\dot{v} = \frac{1}{m} \cdot (F_{XW_r} + F_{XW_f}) \quad (3.13)$$

Eine weitere Vereinfachung des linearen Modells ist die lineare Approximation der Radseitenkräfte aus den Schräglaufwinkeln und Schräglaufsteifigkeiten  $c_{f(r)}$ .

$$F_{YW_{f(r)}} = c_{f(r)} \cdot \alpha_{f(r)} \quad (3.14)$$

Die nichtlinearen Zusammenhänge der Schräglaufwinkel aus B.15 und B.16 vereinfachen sich nach der Linearisierung zu:

$$\alpha_r = \frac{l_r \cdot \dot{\psi}}{v} - \beta \quad (3.15)$$

$$\alpha_f = \delta - \frac{l_f \cdot \dot{\psi}}{v} - \beta \quad (3.16)$$

Das lineare Einspurmodell kann für die Untersuchungen bei langsamer Kreisfahrt noch weiter vereinfacht werden, indem nur kinematische Zusammenhänge betrachtet werden (Vergleich Abb. 3.9).

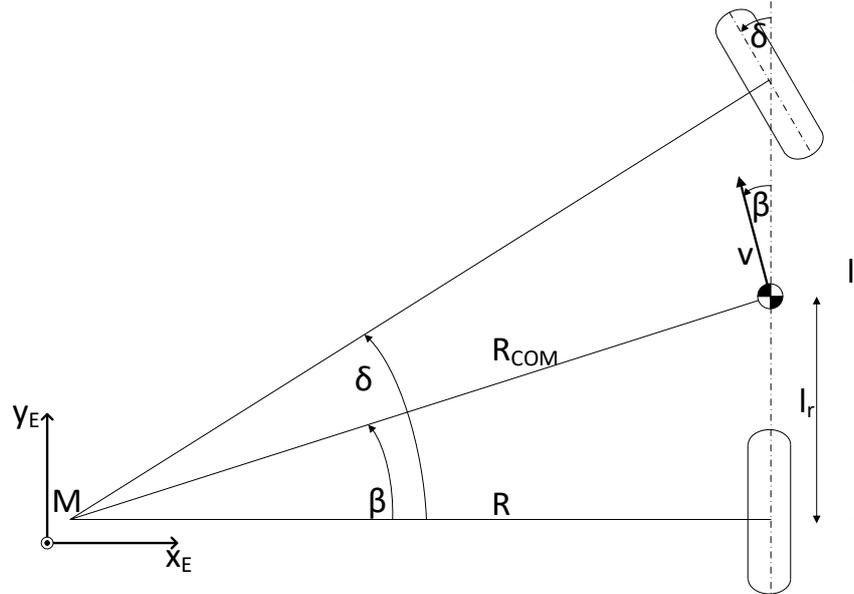


Abbildung 3.9: kinematisches Einspurmodell

 $R_{COM}$  - Kurvenradius des Schwerpunktes $R$  - Kurvenradius des Hinterrads

Auf der Abbildung 3.9 sind die geometrischen Zusammenhänge zur Berechnung der Winkel und Kreisradien dargestellt. Aus dem Lenkwinkel als Eingangsgröße lässt sich der Radius des Hinterrads zum Momentanpol  $M$  ermitteln.

$$R = \frac{l}{\tan \delta} \quad (3.17)$$

Der Schwimmwinkel lässt sich im Gegensatz zum Differentialgleichungssystem des linearen und nichtlinearen Einspurmodells aus geometrischen Winkelbeziehungen bestimmen.

$$\tan \beta = \frac{l_r}{R} = \frac{l_r}{\sqrt{R_{COM}^2 - l_r^2}} \quad (3.18)$$

Die Gierrate kann als Kreisgeschwindigkeit aus tangentialer Fahrgeschwindigkeit und dem Bahnradius bestimmt werden.

$$\dot{\psi} = \frac{v}{R_{COM}} \quad (3.19)$$

Der gefahrene Radius lässt sich aus den Dreiecksgleichungen bestimmen.

$$R_{COM} = \sqrt{l_r^2 + R^2} \quad (3.20)$$

Mit 3.17 eingesetzt in 3.20 und in 3.19 folgt:

$$\dot{\psi} = \frac{v}{\sqrt{l_r^2 + \frac{l}{\tan \delta}}} \quad (3.21)$$

Die Fahrzeuggeschwindigkeit lässt sich analog zum linearen Einspurmodell bestimmen (siehe Gleichung B.23). Alle Einspurmodelle dienen der Approximation der Fahrzustände für die Längs- und Querbewegung eines Fahrzeuges.

### 3.4.4 Modell der Wankdynamik

Aus dem Einspurmodell werden die Fahrzustände der Längs- und Querdynamik bestimmt. Mit Hilfe dieser Zustände kann ein Modell das Wanken des Fahrzeugaufbaus gebildet werden [55]. Insbesondere die Querbewegung eines Fahrzeuges, bildet eine essentielle Eingangsgröße für die Modellierung der Wankdynamik (siehe Abbildung 3.10).

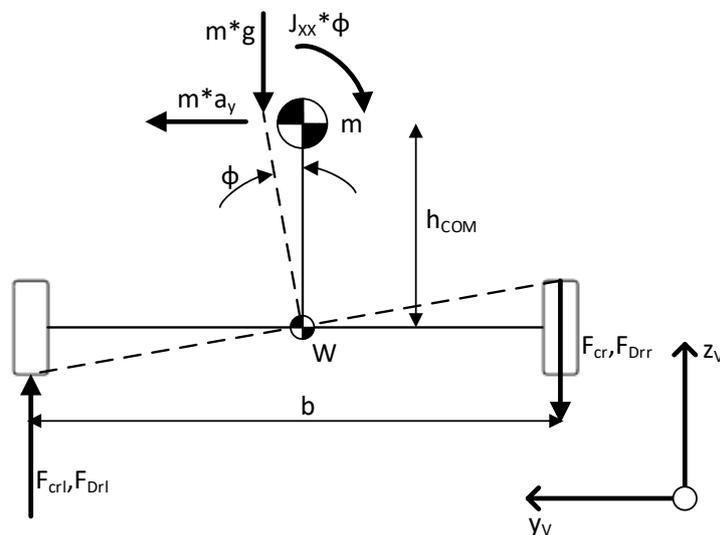


Abbildung 3.10: Modell der Wankdynamik

$F_{Cl(r)}$  - Federkraft links(rechts)

$F_{Dl(r)}$  - Dämpferkraft links(rechts)

$J_{XX}$  - Massenträgheitsmoment um die Längsachse

$b$  - Breite der Radaufstandspunkte

$h_{COM}$  - Höhe des Schwerpunktes über der Wankachse

$\phi$  - Wankwinkel

Das Wankdynamik kann als System mit einem Freiheitsgrad modelliert werden, indem die Querbeschleunigung als Eingangsgröße im Schwerpunkt des Wankmodells eingeleitet wird. Daraus resultiert eine Auslenkung des Schwerpunktes mit dem Wankwinkel  $\phi$  um die Wankachse  $W$ . Diese wird mittig zwischen den linken und rechten Fahrzeigrädern positioniert, ihre Höhenlage über der Fahrbahn ist von der Geometrie der Radaufhängungen abhängig. Das Kräftegleichgewicht wird um den Drehpunkt  $W$  der Wankachse aufgestellt.

$$\begin{aligned}
 J_{XX} \cdot \ddot{\psi} &= m \cdot a_y \cdot h_{COM} \cdot \cos \phi + m \cdot g \cdot h_{COM} \cdot \sin \phi \\
 &+ (F_{ZW_r} + F_{c_r} + F_{d_r} - F_{ZW_l} + F_{c_l} + F_{d_l}) \cdot \frac{b}{2} \cdot \cos \phi
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

Im quasistatischen Zustand bei ausgelenktem Wankwinkel  $\phi$  ergeben sich die Radlasten  $F_{ZWl(r)}$  wie folgt:

$$F_{ZW_l} = m \cdot g \cdot \left( \frac{1}{2} + \frac{h_{COM}}{b} \cdot \tan \phi \right) \tag{3.23}$$

$$F_{ZW_r} = m \cdot g \cdot \left( \frac{1}{2} - \frac{h_{COM}}{b} \cdot \tan \phi \right) \tag{3.24}$$

Die Federkräfte  $F_{cl(r)}$  und die Dämpferkräfte  $F_{dl(r)}$  werden mit Hilfe geometrischer Beziehungen und des Wankwinkels berechnet.

$$F_{cl(r)} = c_{l(r)} \cdot \frac{b}{2} \cdot \sin \phi \tag{3.25}$$

$$F_{dl(r)} = d_{l(r)} \cdot \frac{b}{2} \cdot \sin \dot{\phi} \tag{3.26}$$

Mit der Festlegung, dass  $F_{ZW_l} \approx F_{ZW_r}$ ,  $c_l = c_r = c$ ,  $d_l = d_r = d$  ist und die Kleinwinkelnäherungen nach B.17 vorgenommen werden, vereinfacht sich die Gleichung 3.22 zu:

$$\ddot{\psi} = \frac{1}{J_{XX}} \cdot \left( m \cdot h_{COM} \cdot (a_y + g \cdot \phi) + d \cdot \frac{b^2}{2} \cdot \dot{\phi} + c \cdot \frac{b^2}{2} \cdot \phi \right) \tag{3.27}$$

## 3.4.5 Modell der Nickdynamik

Analog zum Wankmodell aus dem vorherigen Abschnitt kann der Nickwinkel als eindimensionale Bewegung modelliert werden [55]. Die Eingangsgröße für das Nickmodell ist die Längsbeschleunigung und das Antriebs-/Bremsmoment des Fahrzeuges. Die Auslenkung erfolgt um die Nickachse (in Abbildung 3.12 um den Punkt  $N$ ). Seine Lage entlang der Fahrzeuglängsachse wird entsprechend der Schwerpunktlage festgelegt, die Höhe über der Fahrbahn ist abhängig von der Geometrie der Radaufhängung.

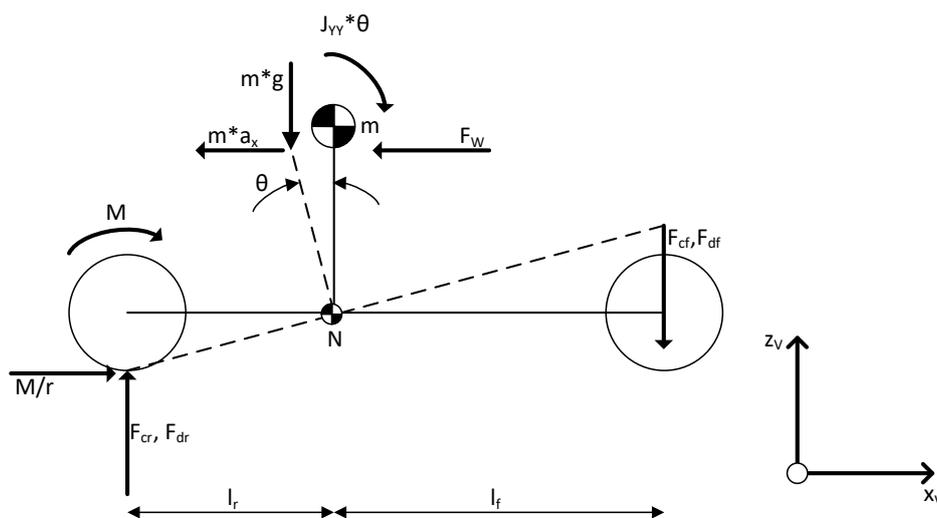


Abbildung 3.11: Modell der Nickdynamik

$F_{Cf(r)}$  - Federkraft vorn(hinten)

$F_{df(r)}$  - Dämpferkraft vorn(hinten)

$F_W$  - Fahrwiderstand

$M$  - Antriebsmoment

$J_{YY}$  - Massenträgheitsmoment um die Querachse

$h_{COM}$  - Höhe des Schwerpunktes über der Wankachse

$\theta$  - Nickwinkel

Die Dynamik des Nickwinkels kann mit der Aufstellung des Kräftegleichgewichts um die Nickachse  $N$  erfolgen.

$$J_{YY} \cdot \ddot{\theta} = M + m \cdot a_x \cdot h_{COM} \cdot \cos \theta + m \cdot g \cdot h_{COM} \cdot \sin \theta + F_W \cdot h_{COM} \cdot \cos \theta - (F_{ZWr} + F_{cr} + F_{dr}) \cdot l_r \cdot \cos \theta - (-F_{ZWl} + F_{cf} + F_{df}) \cdot l_f \cdot \cos \theta \quad (3.28)$$

Im quasistatischen Zustand bei ausgelenktem Nickwinkel  $\theta$  ergeben sich die Radlasten  $F_{ZWf(r)}$  wie folgt:

$$F_{ZW_r} = m \cdot g \cdot \left( \frac{l_f}{l_f + l_r} + \frac{h_{COM}}{l_f + l_r} \cdot \tan \theta \right) \quad (3.29)$$

$$F_{ZW_f} = m \cdot g \cdot \left( \frac{l_r}{l_f + l_r} - \frac{h_{COM}}{l_f + l_r} \cdot \tan \theta \right) \quad (3.30)$$

Die Federkräfte  $F_{cf(r)}$  und die Dämpferkräfte  $F_{df(r)}$  werden mit Hilfe geometrischer Beziehungen und des Nickwinkels bestimmt.

$$F_{cf(r)} = c_{f(r)} \cdot l_{f(r)} \cdot \sin \theta \quad (3.31)$$

$$F_{df(r)} = d_{f(r)} \cdot l_{f(r)} \cdot \sin \dot{\theta} \quad (3.32)$$

Mit den Gleichungen 3.29 bis 3.32 eingesetzt in 3.28,  $F_{Zwf} \approx F_{ZW_r}$  und der Anwendung der Kleinwinkelnäherungen erhält man eine vereinfachte Differentialgleichung:

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{J_{YY}} (M + m \cdot h_{COM} \cdot (a_x + g \cdot \theta) + F_W \cdot h_{COM} - (d_f \cdot l_f^2 + d_r \cdot l_r^2) \cdot \dot{\theta} - (c_f \cdot l_f^2 + c_r \cdot l_r^2) \cdot \theta) \quad (3.33)$$

### 3.4.6 Modell der Raddynamik

Für die Modellierung der Raddynamik wird die Momentenbilanz um den Radmittelpunkt, der Radachse gebildet [55]. Das Modell wird auf den Freiheitsgrad Raddrehzahl  $\omega$  reduziert, die Eingangsgrößen sind Antriebs- bzw. Bremsmomente  $M$  und die Reifenlängskraft  $F_{XW}$ .

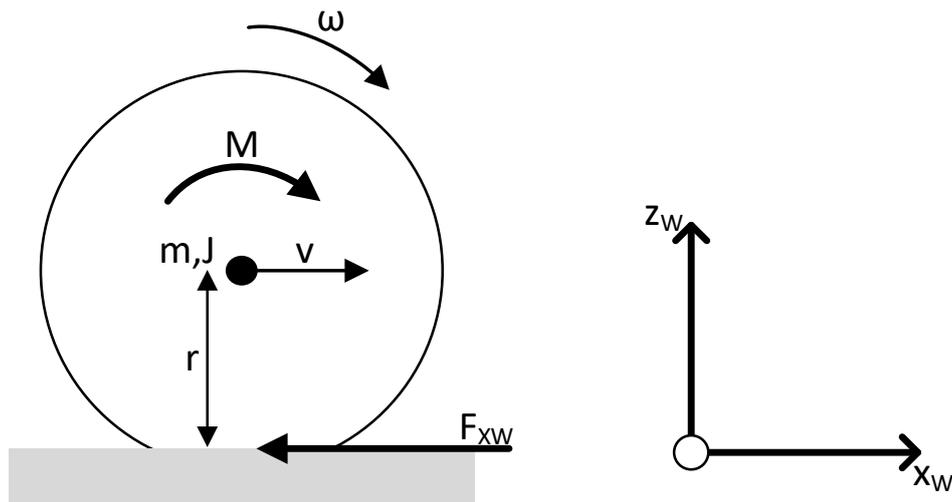


Abbildung 3.12: Modell der Raddynamik  
 $r$  - Wirkradius

Die Momentenbilanz im Radmittelpunkt wird wie folgt berechnet:

$$J \cdot \dot{\omega} = M - F_{xW} \cdot r \quad (3.34)$$

Geschwindigkeitsabhängige innere Reibungskräfte des Rades werden bei diesem reduzierten Modell aufgrund der Größenordnung gegenüber den Reifenlängskräften vernachlässigt. Die Reifenlängskräfte werden anhand des Reifenschlupfes  $s_{xW}$  und der Radaufstandskraft  $F_{zW}$  ermittelt.

$$F_{xW} = \mu(s_{xW}) \cdot F_{zW} \quad (3.35)$$

Die Berechnung des Kraftschlussbeiwertes  $\mu(s_{xW})$  erfolgt aus einer reifenspezifischen Kennlinie die mit unterschiedlichen Modellen abgebildet werden kann (Beispiele zur Reifenmodellierung werden in [57] aufgeführt). Exemplarisch ist auf Abbildung 3.13 eine qualitative Darstellung einer Reifenkennlinie abgebildet. Der Reifenschlupf wird aus der Radgeschwindigkeit  $\omega \cdot r$  und der Radaufstandspunkt-Geschwindigkeit  $v$  gebildet.

$$\begin{aligned} \text{Antriebsschlupf} : s_{xW} &= \frac{\omega \cdot r - v}{\omega \cdot r} \\ \text{Bremsschlupf} : s_{xW} &= -\frac{v - \omega \cdot r}{v} \end{aligned} \quad (3.36)$$

Bei der Implementierung der Modellgleichungen des Schlupfs muss eine Umschaltlogik für Antriebs- und Bremsschlupf berücksichtigt werden. Der Antriebsschlupf hat den Wert Null,

wenn Radnabe und Radumfangsgeschwindigkeit gleich groß sind, und erreicht den Wert Eins, wenn das Rad durchdreht. Beim Bremsschlupf hingegen wird der Wert Minus Eins beim Blockieren des Rades eingenommen. Die Bezugsgeschwindigkeit für beide Schlupfe unterscheidet sich zudem voneinander. Beim Antriebsschlupf wird die Raddrehzahl als Bezug verwendet, der Bremsschlupf bezieht sich auf die Fahrgeschwindigkeit.

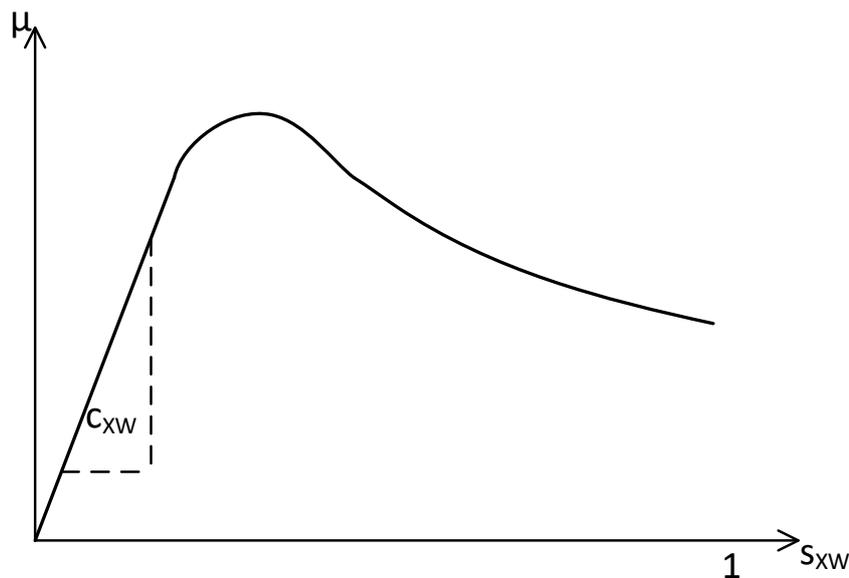


Abbildung 3.13: qualitative Reifenkennlinie

$s_{xw}$  - Reifenlängsschlupf

$\mu$  - Kraftschlussbeiwert

$c_{xw}$  - Koeffizient im linearen Bereich der Kennlinie

Im linearen Bereich der Kennlinie kann die Kraftschlussbeiwert wie folgt approximiert werden.

$$\mu = c_{xw} \cdot s_{xw} \quad (3.37)$$

Die Reifenlängskraft hat demzufolge nach Gleichung 3.35 ebenfalls einen linearen Zusammenhang zum Längsschlupf im unteren Wertebereich. Nach dem Überschreiten des Schlupfmaximalwertes(Schlupfoptimum) geht die Kennlinie in einen stark nichtlinearen Verlauf über. Das Maximum des Kraftschlussbeiwertes ist überschritten und die Reifenkraft geht von einer haftenden in eine gleitende Bewegung über.

Die ausgeübte Längs- und Querkraft am Reifen kann von der Kennlinie auf die XY-Ebene des Rades übertragen werden. Um den Radaufstandspunkt herum kann die maximal

übertragbare Reifenkraft  $\mu_{max} \cdot F_{ZW}$  als Kreis grafisch dargestellt werden. Je nach Reifentyp können die Reifenmaximalkräfte auch ein Oval anstelle eines Kreises bilden.

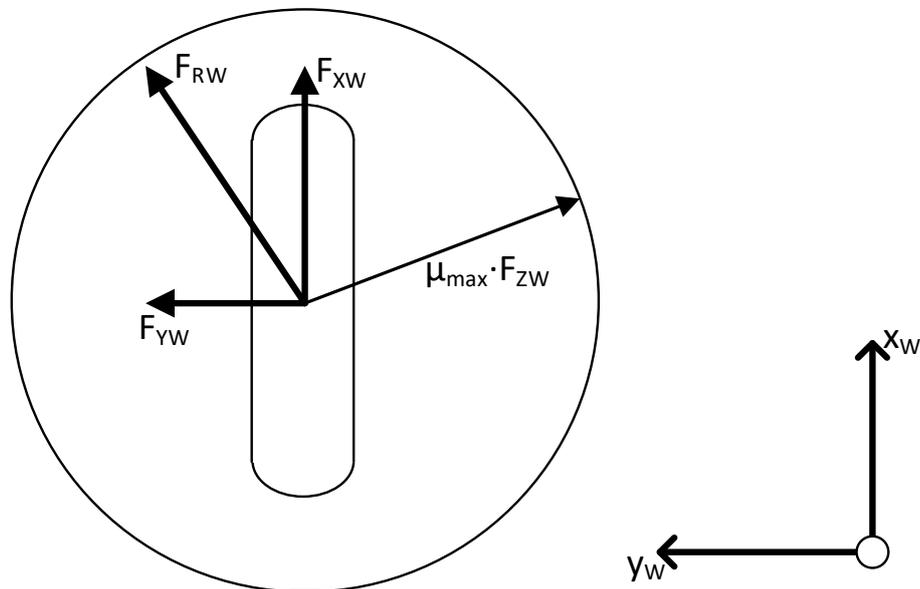


Abbildung 3.14: Reifenlängs- und Querkraft

$F_{RW}$  - resultierende Reifenkraft aus Längs- und Querkomponenten

Die resultierende Reifenkraft  $F_{RW}$  darf dabei die maximal übertragbare Reifenkraft für eine optimale Kraftübertragung nicht überschreiten.

$$F_{RW} = \sqrt{F_{XW}^2 + F_{YW}^2} \stackrel{!}{\leq} \mu_{max} \cdot F_{ZW} \quad (3.38)$$

Abbildung 3.15 zeigt exemplarisch die Einordnung und Abhängigkeiten der Raddynamik und der Reifenlängskraft in Kombination mit dem linearen Einspurmodell. Für die Bestimmung des Radschlupfs ist eine genaue Kenntnis der Übergrundgeschwindigkeit des Rades und dem aktuellen Wirkradius des Reifens obligatorisch. Aus dem Schlupf lässt sich dann mit Hilfe einer gut parametrisierten Reifenkennlinie und der aktuellen Radaufstandskraft die Reifenlängskraft bestimmen und anschließend in den Gleichungen des Einspurmodells verwenden.

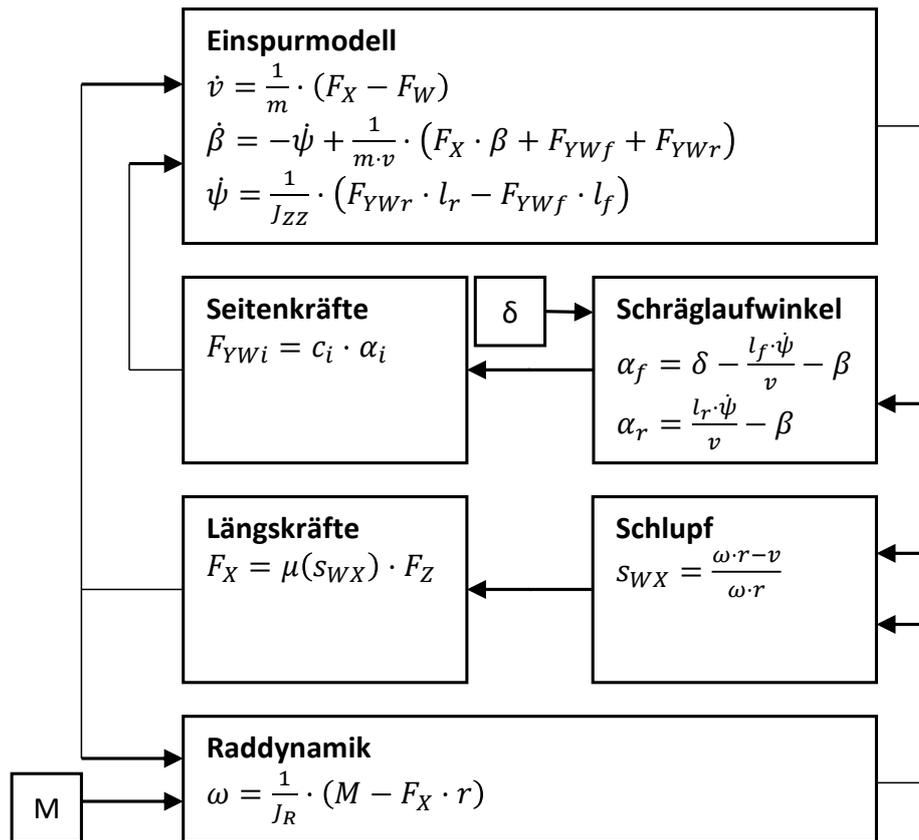


Abbildung 3.15: Einordnung der Raddynamik im Einspurmodell

### 3.4.7 weitere Dynamikmodelle

In den vorherigen Abschnitten wurden Teilbewegungen der Fahrzeugdynamik vorgestellt und modelliert. Kombiniert man die Dynamik von Wanken, Nicken Quer- und Längsbeschleunigung erhält man ein räumliches Zweispurmodell mit zahlreichen Freiheitsgraden. Die Dynamik der Translation und Rotation lässt sich analog zu den Gleichungen des Einspurmodells mit dem Impuls- und Drallsatz für den Massenschwerpunkt im fahrzeugfesten Koordinatensystem beschreiben.

$$\Sigma \mathbf{F} = m \cdot (\dot{\mathbf{v}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}) \quad (3.39)$$

$$\Sigma \mathbf{M} = \mathbf{J} \cdot (\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{J} \cdot \boldsymbol{\omega}) \quad (3.40)$$

Mit den drei Raumachsen  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  bzw. den Kardanwinkeln  $\psi$ ,  $\theta$  und  $\phi$  ergeben sich die Gleichungssysteme.

$$\begin{bmatrix} F_{XV} \\ F_{YV} \\ F_{ZV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{v}_X \\ \dot{v}_Y \\ \dot{v}_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\theta} \cdot v_Z - \dot{\psi} \cdot v_Y \\ \dot{\phi} \cdot v_Z - \dot{\psi} \cdot v_X \\ \dot{\phi} \cdot v_Y - \dot{\theta} \cdot v_X \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

$$\begin{bmatrix} M_{XV} \\ M_{YV} \\ M_{ZV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_X & 0 & 0 \\ 0 & J_Y & 0 \\ 0 & 0 & J_Z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\theta} \cdot \dot{\psi} \cdot (J_Z - J_Y) \\ \dot{\phi} \cdot \dot{\psi} \cdot (J_Z - J_X) \\ \dot{\phi} \cdot \dot{\theta} \cdot (J_Y - J_X) \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Da die Bewegungsgleichungen im Fahrzeugkoordinatensystem aufgestellt werden, müssen die äußeren Kräfte (Gewichtskraft  $F_G$ , Luftwiderstand  $F_L$ ) auf das fahrzeugfeste Koordinatensystem übertragen werden (Gewichtskraft  $F_{GV}$ , Luftwiderstand  $F_{LV}$ ). Die Radkräfte  $F_{XW}, F_{YW}, F_{ZW}$  müssen ebenfalls für alle Räder auf das Fahrzeugkoordinatensystem transformiert werden.

$$\Sigma \mathbf{F} = \mathbf{F}_{GV} + \mathbf{F}_{LV} + \mathbf{F}_{WVfl} + \mathbf{F}_{WVfr} + \mathbf{F}_{WVrl} + \mathbf{F}_{WVrr} \quad (3.43)$$

$$\Sigma \mathbf{M} = \mathbf{R}_{fl} \times \mathbf{F}_{WVfl} + \mathbf{R}_{fr} \times \mathbf{F}_{WVfr} + \mathbf{R}_{rl} \times \mathbf{F}_{WVrl} + \mathbf{R}_{rr} \times \mathbf{F}_{WVrr} \quad (3.44)$$

Aus den Gleichungen des dreidimensionalen Zweispurmodells lässt sich ein ebenes Modell für die XY-Ebene des ortsfesten Koordinatensystems ableiten. Dafür werden Nick- und Wankbewegung vernachlässigt und die Räder sind starr an den Fahrzeugaufbau gekoppelt. Die Schwerpunktlage des Fahrzeuges wird auf der Fahrzeuglängsachse zwischen Vorder- und Hinterachse festgelegt. Dadurch vereinfachen sich die Gleichungssysteme 3.41 bis 3.44, da  $\dot{v}_Z = 0$ ,  $\ddot{\phi} = 0$ ,  $\ddot{\theta} = 0$  sind.

$$F_{XV} = m \cdot (\dot{v}_x - \dot{\psi} \cdot v_Y) \quad (3.45)$$

$$F_{YV} = m \cdot (\dot{v}_y - \dot{\psi} \cdot v_X) \quad (3.46)$$

$$M_{ZV} = J_Z \cdot \ddot{\psi} \quad (3.47)$$

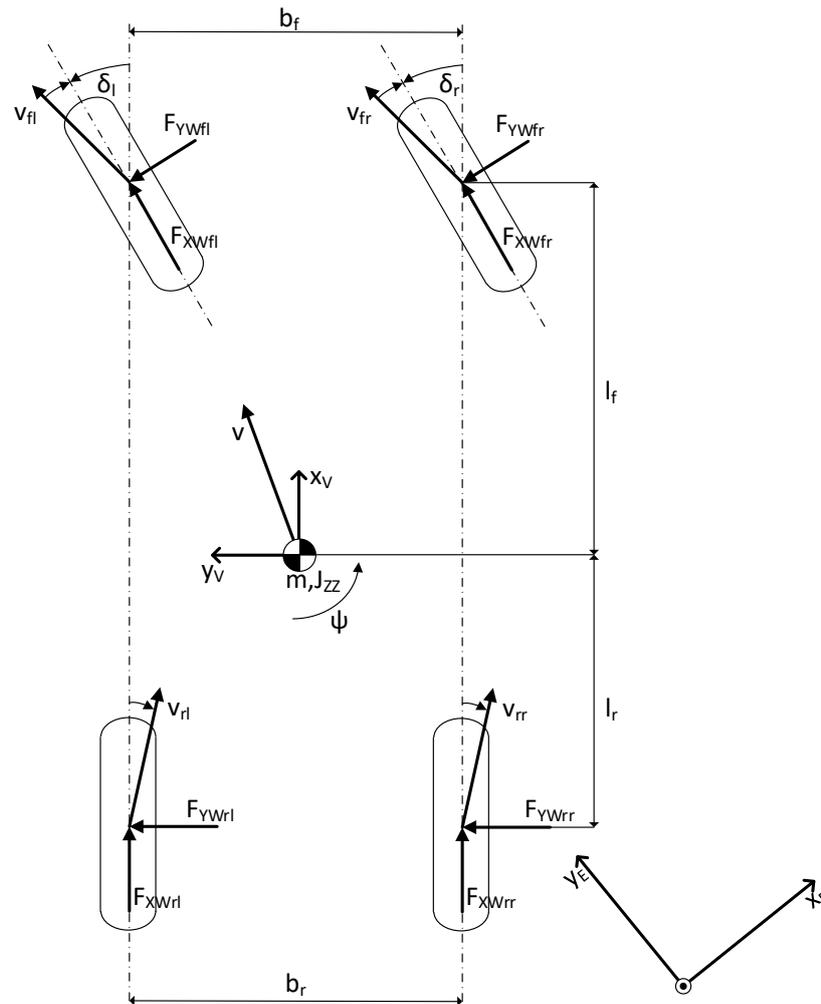


Abbildung 3.16: Ebenes Zweispurmodell

- $fl$  - vorn links (front left)
- $fr$  - vorn rechts (front right)
- $rl$  - hinten links (rear left)
- $rr$  - hinten rechts (rear right)
- $b_{f(r)}$  - Spurbreite vorn(hinten)

Analog zum Einspurmodell aus Abschnitt 3.4.3 können die äußeren Kräfte auf das Fahrzeugkoordinatensystem transformiert werden und in den Gleichungen 3.45 bis 3.47 einbezogen werden. Die radindividuellen Längs- und Querkräfte können gemäß Abschnitt 3.4.6 in Verbindung mit den Radaufstandskräften modelliert werden.

Die Komplexität der vorgestellten Modellgleichungen der vorherigen Abschnitte ist im Vergleich zu Mehrkörpersystemen eher gering. Mit den MKS-Modellen soll eine feingranuliertere Simulation der Dynamik der Fahrzeugkomponenten ermöglicht werden. Bei diesen Systemmodellen werden mehrere massebehaftete Körper über Kopplungen miteinander verbunden. Diese Kopplungen können zum einen Gelenke sein, die die Bewegung der einzelnen Körper einschränken und zum anderen Kraftübertragungsglieder wie zum Beispiel

Federn, Dämpfer und Aktoren, die die Bewegung nicht einschränken. Zur Beschreibung der Bewegung einzelner Komponenten im MKS-Modell sind die Elementardrehungen zwischen Koordinatensystemen essentiell. Abbildung 3.17 zeigt beispielhaft die Transformation der Koordinaten von Fahrzeugkoordinaten in ein Inertialsystem.

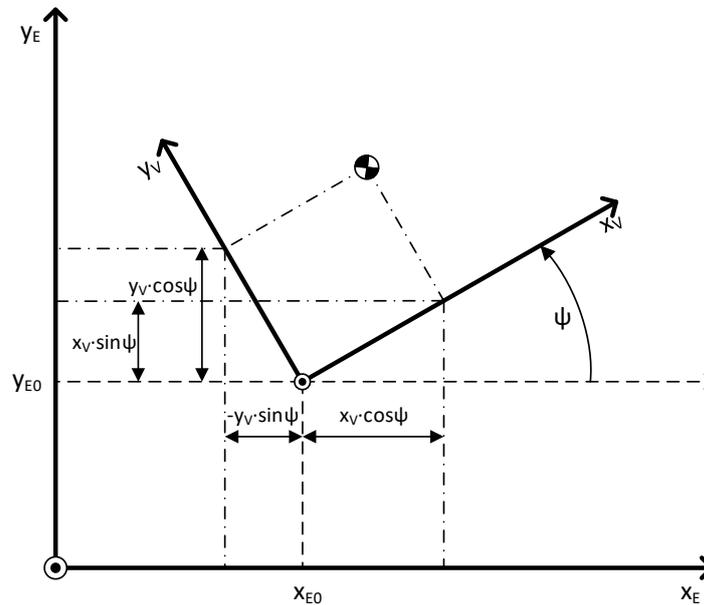


Abbildung 3.17: Koordinatentransformation

$$\begin{bmatrix} X_E \\ Y_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{E0} \\ Y_{E0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_V \\ Y_V \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Analog zur Zweidimensionalen Transformation kann die Drehung  $R_i$  im Raum um jeweils eine der drei Raumachsen  $i$  beschrieben werden.

$$\mathbf{R}_Z = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

$$\mathbf{R}_Y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

$$\mathbf{R}_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Unter Beachtung der Norm [54] wird eine Transformation der Bewegungen zwischen verschiedenen Koordinaten eines Fahrzeugs bzw. von einer zur anderen Fahrzeugkomponente mit folgender Winkelreihenfolge durchgeführt.

Tabelle 3.1: Reihenfolge der Drehungen [54]

Reihenfolge	Winkel	Achse
erste Drehung	Gierwinkel ( $\psi$ )	Drehung um die Z-Achse
zweite Drehung	Nickwinkel ( $\theta$ )	Drehung um die Y-Achse
dritte Drehung	Wankwinkel ( $\phi$ )	Drehung um die X-Achse

Die Festlegung einer einheitlichen Drehreihenfolge für eine Transformation zwischen einzelnen Koordinatensysteme ist zwingend erforderlich, da unterschiedliche Reihenfolgen der Drehungen die Ausrichtung der Koordinatensysteme ändert, wodurch sich auch die Teilsysteme anders ausrichten. In technischen Systemen wird die Transformation gemäß der Tabelle 3.1 wie folgt berechnet werden.

$$\mathbf{R}_{Kardan} = \mathbf{R}_Z \cdot \mathbf{R}_Y \cdot \mathbf{R}_X \quad (3.52)$$

Aufgrund der Vielzahl an Teilkörpern in der Fahrzeugmodellierung und der damit verbundenen hohen Anzahl an Differentialgleichungen wird eine händische Aufstellung der Modellgleichungen sehr unübersichtlich oder sogar unmöglich. Dafür werden Simulationstools wie z.B. Simscape Multibody verwendet, die die Bewegungsgleichungen für komplexe Mehrkörpersysteme numerisch lösen und grafisch abbilden. Für die Abbildung der Zwangsbedingungen zwischen den Körpern des Systems stehen Koppellemente in jeglicher Form zur Verfügung, die Kräfte und Momente zwischen den Komponenten übertragen oder sperren. Eine Übersicht der räumlichen Gelenke findet sich in [58].

### 3.5 Fahrzustandsbeobachtung

Mit der Implementierung automatisierter Fahrfunktionen auf Mikromobilen werden Regelkreise in den Systemen integriert, die gezielte Stellgrößen für die Aktorik generieren sollen. Ein wesentlicher Bestandteil der Regelkreise ist die Differenzenbildung aus Zielvorgabe und tatsächlichem Prozesswert, welche vom Regler in eine Stellgröße umgerechnet wird. Damit die Stellgröße nicht zu starken Schwankungen unterliegt, ist ein geglätteter Soll- und Istwertverlauf der Regelgröße nötig. Messwerte unterliegen aufgrund der Messprinzipien starken Schwankungen, die sich im Messrauschen widerspiegeln. Anstelle von zeit- und frequenzabhängigen Filtermethoden können modellbasierte Zustandsschätzer benutzt werden.

Bei dieser Methode wird die Messgröße mit einem physikalischen/ mathematischen Modell unterstützt (siehe Abbildung 3.18). Das Modell bildet dabei das Verhalten eines realen Systems möglichst genau ab und berechnet modellierte Zustandsgrößen. Zu jedem Zeitschritt wird der verrauschte Messwert des realen Systems mit den berechneten Zustandsgrößen abgeglichen. Durch diese Rückführung wird das Rauschen eines Sensorsignals bei einer bekannten Varianz gefiltert und eine Schätzung rekonstruiert, die keinen zeitlichen Versatz zum Prozess besitzt. Zusätzlich können mit den modellbasierten Beobachtern auch nicht messbare Zustände ausgewertet und für die Regelung betrachtet werden. Als eines der bekanntesten Beobachtermethoden ist das Kalman-Filter zu nennen.

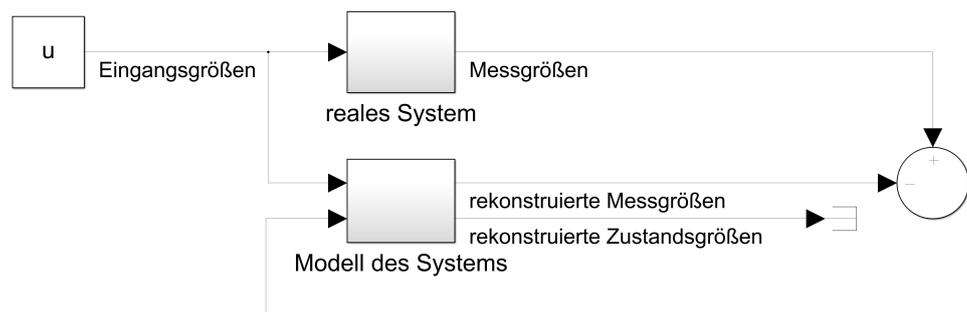


Abbildung 3.18: Beobachter in der Regelungstechnik

### 3.5.1 Extended Kalman Filter

Das Kalman-Filter ist ein rekursiver Algorithmus, um Systemzustände möglichst genau abzubilden. Dabei werden die im ersten Schritt ermittelten Zustände im Folgeschritt mit Messwerten abgeglichen und durch einen Verstärkungsfaktor korrigiert. Da bei jedem System ein Mess- und Prozessrauschen existiert, werden die Varianzen des Rauschens im Filteralgorithmus berücksichtigt und in einer Kovarianzmatrix miteinander korreliert. Aufgrund dieser Matrix ist die Varianz des geschätzten ermittelten Systemzustands geringer als die Einzelvarianzen von Mess- und Prozesswert. Da das Kalman Filter für lineare Systeme entwickelt wurde und die Modellierung technischer Systeme oftmals Nichtlinearitäten aufweist, wurde der Filteralgorithmus für nichtlineare Systeme erweitert.

Ausgangspunkt des erweiterten Kalman-Filters (EKF) ist ein zeitdiskretes nichtlineares Systemverhalten, welches in der Zustandsraumdarstellung der Gleichung 3.53 gezeigt wird. Der im nächsten Zeitschritt  $k + 1$  ermittelte Zustand  $\mathbf{x}$  ist dabei von dem aktuellen Systemzustand  $\mathbf{x}_k$  und dem Systemeingang  $\mathbf{u}_k$  abhängig. Mit der Beobachtungsmatrix  $\mathbf{h}$  wird der Ausgang der Beobachtungsgleichung  $\mathbf{y}_{k+1}$  des Systems bestimmt. Dabei unterliegen sowohl die Systemdynamik als auch das Messen dem Rauschen  $\mathbf{w}$  bzw.  $\mathbf{v}$ .

Die zeitdiskreten Systemgleichungen des EKF sehen wie folgt aus.

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_{k+1} &= f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_{k+1} &= \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k\end{aligned}\tag{3.53}$$

Zur Anwendung des Filteralgorithmus werden zunächst die nichtlinearen Systemgleichungen für jeden Zeitschritt  $k$  linearisiert.

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}_k \cdot \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_k \cdot \mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_{k+1} &= \mathbf{C}_k \cdot \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k\end{aligned}\tag{3.54}$$

Die Systemmatrizen entstehen aus den partiellen Ableitungen der Gleichungen nach den Zuständen und Eingängen zum Zeitpunkt  $k$ .

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_k &= \left. \frac{\partial f(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_k, \mathbf{u}=\mathbf{u}_k} & \mathbf{B}_k &= \left. \frac{\partial f(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_k, \mathbf{u}=\mathbf{u}_k} \\ \mathbf{C}_k &= \left. \frac{\partial h(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_k, \mathbf{u}=\mathbf{u}_k}\end{aligned}\tag{3.55}$$

Im Prädiktionsschritt wird der a priori Zustand  $\mathbf{x}_{k+1}^-$  mit dem nichtlinearen Prozessmodell 3.53 ermittelt. Die Kovarianzmatrix  $\mathbf{P}_{k+1}^-$  wird aus dem linearisierten Modell gebildet.

Prädiktionsschritt:

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_{k+1}^- &= f(\mathbf{x}_k^+, \mathbf{u}_k) \\ \mathbf{P}_{k+1}^- &= \mathbf{A}_k \cdot \mathbf{P}_k^+ \cdot \mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q}\end{aligned}\tag{3.56}$$

Im Anschluss an die Prädiktion erfolgt die Korrektur, in der der Verstärkungsfaktor  $\mathbf{K}_{k+1}$  (auch Kalman-Gain genannt) unter Einbindung der Messkovarianz  $\mathbf{R}$  berechnet wird. Mit dem Verstärkungsfaktor werden die Systemzustände  $\mathbf{x}_{k+1}^-$  a posteriori aktualisiert. Dazu wird die Differenz aus den aktuellen Messwerten  $\mathbf{y}_{k+1}$  und dem geschätzten Systemausgang gebildet und mit dem Kalman-Gain zum korrigierten Zustand  $\mathbf{x}_{k+1}^+$  überführt. Die Fehlerkovarianzmatrix  $\mathbf{P}$  wird ebenfalls durch das Kalman-Gain korrigiert.

Korrekturschritt:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{K}_{k+1} &= \mathbf{P}_{k+1}^- \cdot \mathbf{C}_k^T \cdot (\mathbf{C}_k \cdot \mathbf{P}_{k+1}^- \cdot \mathbf{C}_k^T + \mathbf{R})^{-1} \\
 \mathbf{x}_{k+1}^+ &= \mathbf{x}_{k+1}^- + \mathbf{K}_{k+1} \cdot (\mathbf{y}_{k+1} - \mathbf{C}_k \cdot \mathbf{x}_{k+1}^-) \\
 \mathbf{P}_{k+1}^+ &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \cdot \mathbf{C}_k) \cdot \mathbf{P}_{k+1}^-
 \end{aligned} \tag{3.57}$$

Die Prozessvarianz  $\mathbf{Q}$  und die Messvarianz  $\mathbf{R}$  können zum Einstellen des Filters angepasst werden. Abbildung 3.19 zeigt die qualitativen Zusammenhänge bei Werteänderungen innerhalb der Kovarianzen. Je nach Anpassungen in den Matrizen wird entweder den Prozesswerten oder den Messwerten mehr Vertrauen geschenkt und eine Gewichtung getätigt.

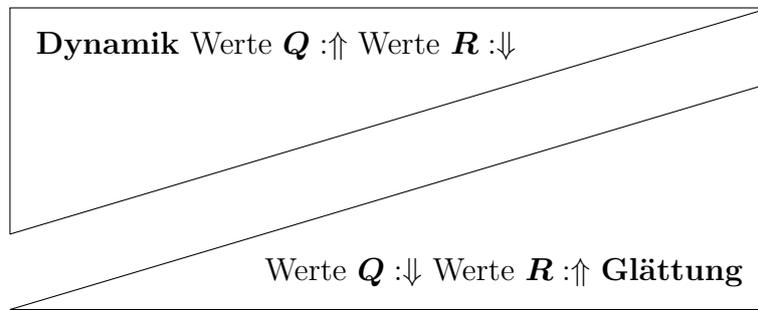


Abbildung 3.19: Auswirkung der Änderung in den Kovarianzmatrizen

Neben den Systemzuständen kann das Kalman-Filter auch unbekannte Parameter eines Systems schätzen [59]. Dazu werden die Gleichungssysteme und Zustände mit dem zu ermittelnden Parametersatz ergänzt. Ausgangspunkt ist wieder ein Prozessmodell.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{x}_{k+1} &= f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{p}_k) + \mathbf{w}_k \\
 \mathbf{y}_{k+1} &= \mathbf{h}(\mathbf{x}_k, \mathbf{p}_k) + \mathbf{v}_k
 \end{aligned} \tag{3.58}$$

Im Vektor  $\mathbf{p}_k$  sind die unbekanntenen Modellparameter enthalten. Zur Ermittlung der Parameter wird der Vektor als zusätzlicher Zustandsvektor betrachtet.

$$\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{p}_k + \mathbf{w}_k \tag{3.59}$$

Der ursprüngliche Zustandsvektor  $\mathbf{x}$  wird dann um den Parametervektor erweitert.

$$\tilde{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{p} \end{bmatrix} \tag{3.60}$$

Aufgrund des erweiterten Zustandsvektors  $\tilde{\mathbf{x}}$  wird das Systemverhalten nichtlinear und kann wie nachfolgend beschrieben werden.

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{x}}_{k+1} &= \tilde{f}(\tilde{\mathbf{x}}_k, \mathbf{u}_k) + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_{k+1} &= \tilde{\mathbf{C}}_k \cdot \tilde{\mathbf{x}}_k + \mathbf{v}_k\end{aligned}\quad (3.61)$$

Der Parametervektor ist nichtlinear mit den Zuständen verbunden.

$$\tilde{f}(\tilde{\mathbf{x}}_k) = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_k \cdot \mathbf{x}_k \\ \mathbf{p}_k \end{bmatrix}\quad (3.62)$$

Aufgrund des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Zuständen und Parametern müssen zwangsläufig die Schritte des EKF-Algorithmus angewendet werden. Bei der Linearisierung des Systems zur Form in 3.54 muss zum Aufstellen der Dynamik-Matrix  $\mathbf{A}_k$  neben den Zuständen auch die Parameter berücksichtigt werden.

$$\mathbf{A}_k = \left. \begin{bmatrix} \frac{\partial f(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{u})}{\partial \mathbf{x}} \\ \frac{\partial f(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{u})}{\partial \mathbf{p}} \end{bmatrix} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_k, \mathbf{p}=\mathbf{p}_k, \mathbf{u}=\mathbf{u}_k}\quad (3.63)$$

Zur Schätzung der Zustände und Parameter werden im Anschluss an die Linearisierung die Filterschritte entsprechend den Gleichungen 3.55 bis 3.56 angewendet. Mit der Implementierung eines erweiterten Filters können nicht messbare oder veränderliche Fahrzeugparameter Online bestimmt werden und z.B. für die Dimensionierung der Regelparameter berücksichtigt werden.

In diesem Kapitel wurden die methodischen und mathematischen Grundlagen für die Entwicklung automatisierter Mikromobile dargestellt. Dazu wurde insbesondere das V-Modell der Mechatronik näher betrachtet, um die Schritte des Modells für den Entwicklungsprozess der Mikromobile zu adaptieren. Das Modell ist grundsätzlich geeignet und wird im weiteren Verlauf für die einzelnen Disziplinen zur Automatisierung von Mikromobilen angewendet.

## 4 Anforderungsanalyse automatisierter Mikromobile

In diesem Kapitel werden gemäß des V-Modells 3.2 die fundamentalen Prozessschritte für die Entwicklung automatisierter Mikromobile durchgeführt. Dazu werden zuerst zwei Fallbeispiele erläutert, an denen im weiteren Verlauf der Arbeit immer wieder exemplarisch das Vorgehen bei allen Teilprozessen des V-Modells erläutert wird. Abbildung 4.1 zeigt die einzelnen Prozessschritte des Teilprozesses Anforderungsanalyse.

Ausgangspunkt bei der Anforderungsanalyse sind die vom Auftraggeber festgelegten Anforderungen, die in einem Lastenheft dokumentiert sind.

Danach werden die Einsatzszenarios der Mikromobile untersucht und der Automatisierungsgrad des Mikromobils festgelegt. Daran anschließend können Anforderungen an das Sicherheitsmanagement und die nötigen Funktionen bzw. Module identifiziert werden. Nachdem die Komponenten für ein Mikromobil ermittelt wurden, können die Anforderungen an Sensorik und Aktorik ermittelt werden. Die Ergebnisse der Anforderungsanalyse bilden den Ausgangspunkt für den folgenden Systementwurf und die weiteren Teilprozesse. Im letzten Teilprozess des V-Modells werden die erreichten Eigenschaften des Mikromobils mit den hier identifizierten Anforderungen verifiziert und validiert.

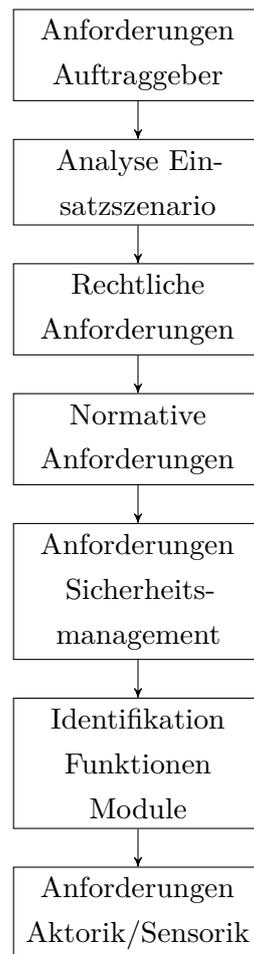


Abbildung 4.1: Prozessschritte der Anforderungsanalyse

## 4.1 Anwendungsbeispiele

Der Abschnitt beschreibt die beiden Fallbeispiele, an denen der Entwicklungsprozess automatisierter Mikromobile anschaulich erläutert werden soll. Die beiden Beispiele weisen einen unterschiedlichen Automatisierungsgrad auf und erfordern daher unterschiedlich komplexe Schritte innerhalb des Entwicklungsprozesses.

### 4.1.1 E-Trailer - Elektrisch unterstützter Fahrradanhänger

Im FuE-Projekt E-Trailer wird ein dreirädriger Lastenanhängen entwickelt, der per Hand oder hinter einem Fahrrad mitgeführt werden soll (siehe Abbildung 4.2). In beiden Betriebsmodi sollen die schweren Lasten auf dem Anhänger und die damit verbundenen erhöhten Fahrwiderstände für den Fahrradfahrer oder den Handbediener nicht spürbar sein. Dazu muss die Zug-/Druckkraft entlang der Anhängerdeichsel auf null geregelt

werden. Der Lastenanhänger soll die Transportleistung für Fahrräder durch die Aufnahmefähigkeit von Paletten bedeutend erhöhen, um eine umweltfreundliche Alternative zu verbrennungsmotorisch angetriebenen Lieferfahrzeugen zu bieten.

Das Fahrgestell des Anhängers besitzt eine Ladefläche zwischen den hinteren Rädern, die als Gabelzinken ähnlich zu einem Gabelstapler oder Palettenhubwagen ausgeführt sind. Auf den Gabelzinken kann eine Euro-Palette mit den Abmaßen 1,2m x 0,8m inklusive Transportgut platziert werden. Die Gabelzinken sind zudem höhenverstellbar, damit Lasten von bis zu 500 kg durch eine integrierte Hydraulik automatisch angehoben werden können. Vor der Ladefläche befindet sich ein Technik-Abteil, innerhalb dessen die Energieversorgung sowie Rechen- und Steuerungstechnik untergebracht werden kann. Ergänzend zu den beiden Hinterrädern besitzt der Anhänger ein zentrales Vorderrad, das drehbar mit einem Steuerkopf am Trailer gelagert ist. Am Steuerrohr ist eine Zugdeichsel befestigt, die einerseits die Zugkräfte der Deichsel auf das Fahrgestell überträgt und andererseits den Lenkwinkel der Deichsel als Lenkbewegung an das Vorderrad leitet. Die Fahrtrichtungsvorgabe bzw. der Deichsellenwinkel wird in beiden Betriebsmodi durch die Richtung des Ziehenden vorgegeben.

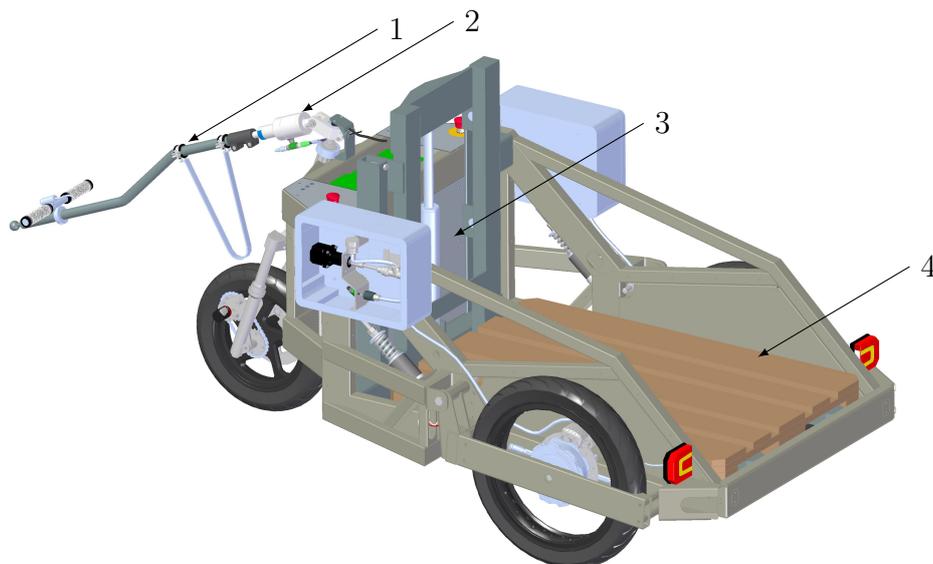


Abbildung 4.2: CAD-Modell des E-Trailers

1 - Zugdeichsel, 2 - Zug-/Drucksensor, 3 - Technik-Abteil, 4 - Ladefläche

### 4.1.2 AuRa - Autonomes Rad - Flexibler Einsatz autonomer Fahrradsysteme für Logistik- u. Beförderungsaufgaben

Das Projekt AuRa beinhaltet einen ganzheitlichen Ansatz für eine automatisierte Lastenrad-Dienstleistung [60]. Die Grundidee besteht aus einer Sharing-Flotte mit Lastenrädern, die ähnlich zu den Verleihsystemen in Großstädten sind, aber die einhergehenden logistischen

Probleme großer Fahrzeugflotten umgehen sollen. Anders als beim klassischen Fahrrad-Sharing sind die Räder nicht stationsbasiert angebunden oder im urbanen Raum verteilt, sondern bewegen sich automatisiert von ihrer Position zum Nutzer. Aufgrund dessen muss sich der Nutzer der Lastenrad-Dienstleistung nicht zum Fahrzeug begeben.

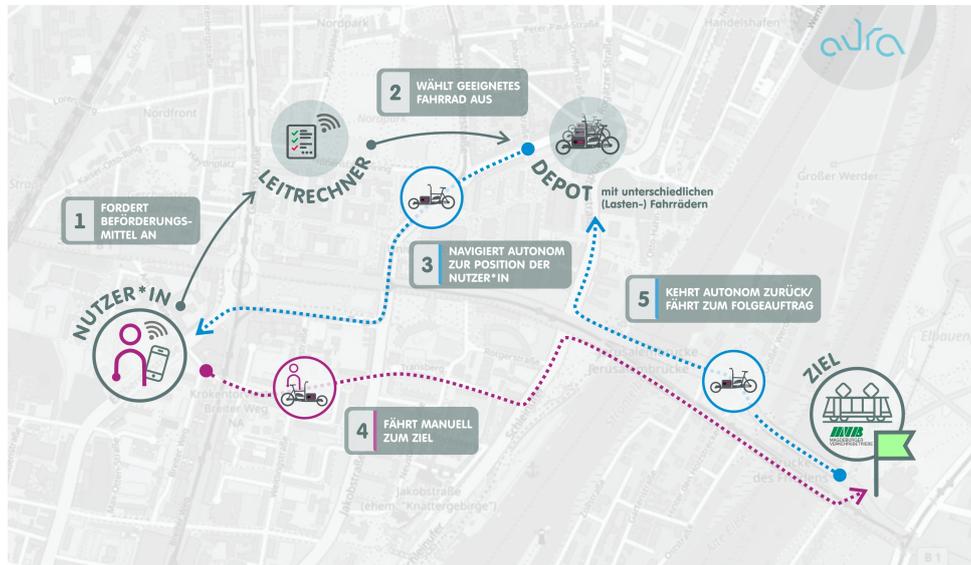


Abbildung 4.3: Anwendungsszenario im Projekt AuRa [60]

Im ersten Schritt (Punkt 1 in Abbildung 4.3) teilt der Nutzer den Bedarf eines Lastenrades per Smartphone-App einem Server mit, auf dem ein Flottenmanagement hinterlegt ist. Das Management wählt im zweiten Schritt ein geeignetes Lastenrad für die spezifische Anforderung des Nutzers aus und übermittelt eine Fahrroute an das entsprechende Lastenrad. Anhand des Fahrauftrages manövriert das Lastenrad automatisiert vom Start bis zum Zielpunkt (Punkt 3 in Abbildung 4.3). Dabei wird die Trajektorie den aktuellen Verkehrsbedingungen angepasst und ein optimierter Sollpfad erzeugt. Mit der On-Board Sensorik und Aktorik soll eine Bahnregelung erfolgen, die das Lastenrad auf der Route bis zum Standort des Nutzers stabilisiert. Am Zielort angekommen, wechselt das automatisierte Lastenrad in einen manuellen Modus. Von der gesamten Aktorik des Lastenrades für die automatisierte Fahrfunktion steht dem Nutzer dann nur noch die Tretkraftunterstützung eines Pedelecs zur Verfügung, um ein komfortables Vorankommen des relativ schweren Lastengefährts zu ermöglichen. Der aufsitzende Fahrer bestimmt in diesem Betriebsmodus über die Längs- und Querführung indem er selbst antreibt, bremst und lenkt (Punkt 4 in Abbildung 4.3). Am Zielort angekommen wechselt das Fahrzeug wieder in den automatisierten Modus, nachdem der Fahrer abgestiegen ist und seinen Transportbedarf in der Smartphone-App beendet. Die automatisierte Fahrfunktion des Lastenrades folgt dann wieder den Vorgaben des Leitrechners und übernimmt die Längs- und Querführung auf vorgegebenen Fahrtrouten.

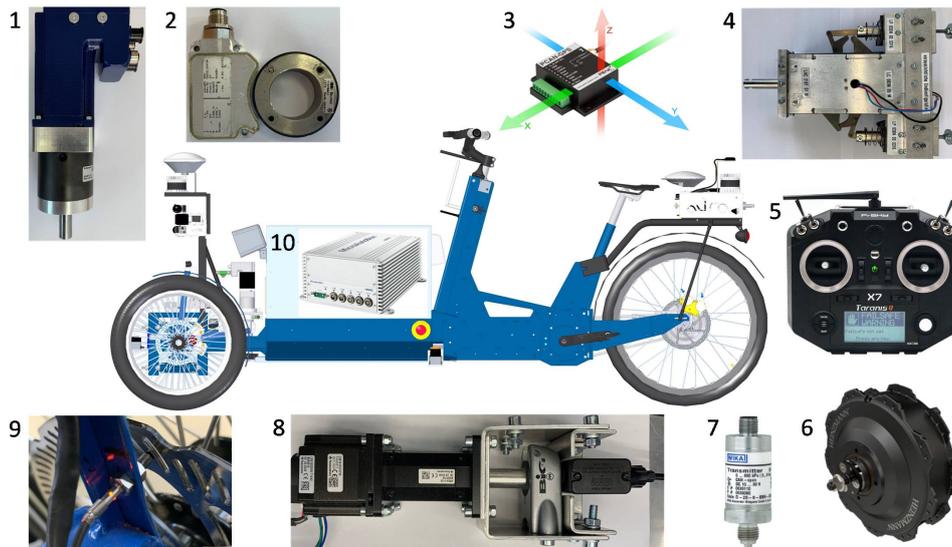


Abbildung 4.4: CAD-Modell des Lastenrades mit Steuerungstechnik

- 1 - Lenkmotor, 2 - Lenkwinkelsensor, 3 - IMU & GPS, 4 - Notbremssystem,  
5 - Fernbedienung, 6 - Antriebsmotor, 7 - Bremsdrucksensor,  
8 - Bremsaktuator, 9 - Raddrehzahlsensor, 10 - Echtzeitsteuergerät

Die beiden Beispiele des Abschnitts werden hier zunächst nur grob skizziert. Sie werden zur Veranschaulichung der einzelnen Prozessschritte herangezogen und die automatisierten Funktionalitäten im Verlauf der Arbeit entwickelt. Nachfolgend wird im Wesentlichen der Entwicklungsprozess dargestellt.

### 4.2 Analyse des Einsatzszenarios

Zu Beginn eines Projektes wird ein Szenario festgelegt, in dem die Randbedingungen für die Nutzung einer Entwicklung festgehalten werden. Aus dieser Beschreibung resultieren konkrete Spezifikationen, die z.B. in einem Lastenheft festgehalten werden können. Das Lastenheft beschreibt die „vom Auftraggeber festgelegte Gesamtheit der Forderungen an die Lieferungen und Leistungen eines Auftragnehmers innerhalb eines Auftrages“ [61]. Anhand des Lastenheftes können Merkmale einer Entwicklung mit den konkretisierten Anforderungen abgeglichen und gegebenenfalls korrigiert werden. Zu den Inhalten eines Lastenheftes können folgende Punkte gehören:

- Ist-Zustand und Zielsetzung
- Beschreibung, Spezifikationen & Funktionen
- Rahmenbedingungen (z.B. Normen)
- Nichtfunktionale Anforderungen (z.B. Zuverlässigkeit)

- Funktionale Anforderungen (z.B. Temperaturbereich)
- Vertragsrahmen (z.B. Abnahmekriterien)
- Anforderungen an den Dienstleister (z.B. Zertifizierungen)
- Anforderungen an das Projektmanagement (z.B. Dokumentation)

In [62] wird eine Struktur vorgegeben, die individuell für die Analyse eines Einsatzszenarios zugeschnitten werden kann. Die einzelnen Punkte des Vorgehens werden hier anhand des Beispiels aus 4.1.1 erläutert. Als Ist-Zustand bzw. Grund für die Entwicklung wird der erhöhte Transport- und Auslieferungsbedarf unter Nutzung klimafreundlicher Fahrräder in den Innenstädten adressiert. Als Zielsetzung wird die Entwicklung eines automatisierten Lastentransportanhängers (e-Trailer) zur Erhöhung der Transportleistung von Lastenrädern festgelegt. Es besteht ein Bedarf an elektrisch unterstützenden Lastenanhängern für Fahrräder, um große und schwere Lasten klimafreundlich zu transportieren. Dafür soll ein Anhänger entwickelt werden, der selbstständig Lasten aufnehmen kann und diese ohne zusätzlichen Kraftaufwand hinter einem Fahrrad mitführt.

Um eine Übersicht über die Entwicklung zu geben, werden auf allgemeiner Ebene die Hauptelemente des Systems, einschließlich menschlicher Elemente, und wie sie funktionieren oder interagieren beschrieben. Die Systemübersicht enthält geeignete Diagramme und Erläuterungen, um den Kontext bereitzustellen und definiert alle wesentlichen Schnittstellen, die die Systemgrenzen überschreiten.

Beim Anwendungsfall Trailer ist ein Hauptelement die Lasthebevorrichtung, die vom Nutzer nur im Stillstand des Trailers bedient werden kann. Der Trailer soll manuell per Hand mitgeführt oder hinter einem Fahrrad angekuppelt werden. Die Kupplung erfolgt dabei händisch durch den Bediener. Wird durch den Nutzer eine Zugkraft auf die Deichsel des Anhängers aufgebracht, unterstützt dieser automatisiert mit einem elektrischen Antrieb bis zu einer festgelegten Geschwindigkeit. In definierten Fehlerfällen soll der Antrieb des Anhängers deaktiviert oder der Trailer selbstständig bis zum Stillstand abgebremst werden. Der Anhänger kann nicht selbstständig ohne eine Interaktion durch den Nutzer Lasten Heben oder Senken und nicht ohne eine Zugkraft auf der Deichsel Lasten bewegen. Abbildung 4.5 zeigt die Betriebszustände des Trailers und deren Übergänge zueinander.

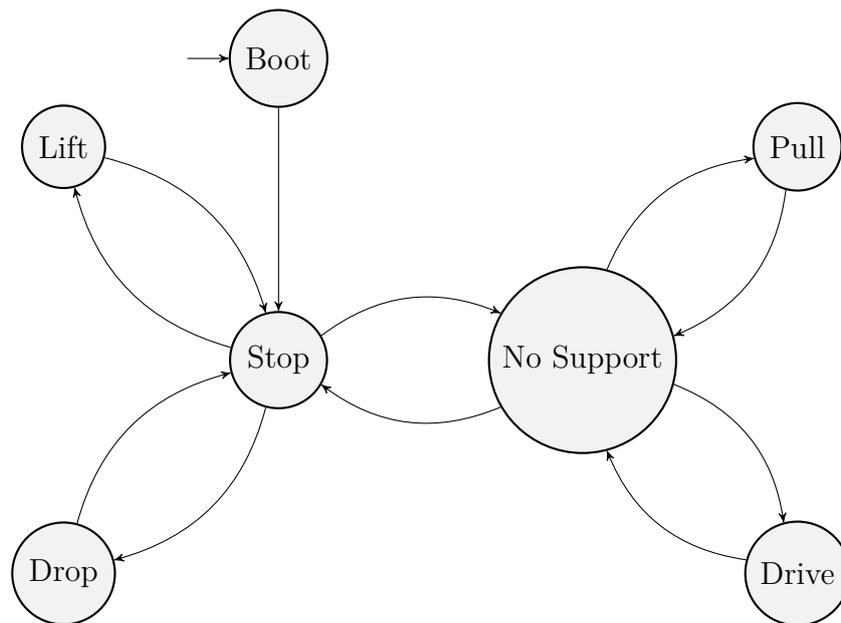


Abbildung 4.5: Betriebszustände des E-Trailers

Boot - Automatisierungssystem wird gestartet

Stop - Parken, Nothalt

No Support - Räder frei beweglich, keine Antriebsunterstützung

Pull - Handwagenbetrieb, Unterstützung bis 6 km/h

Drive - Anhängerbetrieb, Unterstützung bis 25 km/h

Lift - Anheben des Transportgutes

Drop - Absenken des Transportgutes

Die Hauptfunktionen des Trailers spiegeln sich in den Betriebszuständen der Grafik 4.5 wieder. Der Anhänger soll im Stillstand Lasten anheben und wieder abstellen können und unter sicherer Handhabung hinter einem Zugfahrzeug oder per Hand kraftfrei mitgeführt werden können. Dafür müssen alle sicherheitsrelevanten Sensoren innerhalb ihrer Parameter funktionieren und alle Sicherheitseinrichtungen entsprechend betätigt werden. Die charakteristischen Nutzer des E-Trailers sind Einzelunternehmer oder Unternehmen, die mittelschwere Transportgüter innerhalb der Reichweite des Anhängers im urbanen Raum ausliefern. Wartung und Instandsetzung des Anhängers muss jedoch durch Fachpersonal in Werkstätten erfolgen.

Die im vorherigen Absatz beschriebenen Eigenschaften gehören zum einleitenden Teil des Lastenheftes. Der darauffolgende Abschnitt erfasst alle Anforderungen in qualitativer und quantitativer Form. Die Unterkategorien der Anforderungen nach [62] werden in Tabelle 4.1 gezeigt, erläutert und mit Beispielen für den E-Trailer veranschaulicht. Im Anhang C.1 befindet sich ein Auszug des Lastenheftes für das Projekt E-Trailer 4.1.1. Die zusammengetragenen Anforderungen des Lastenheftes bilden das Pflichtenheft für den Auftragnehmer. In den nachfolgenden Prozessschritten 4.3 bis 4.6 werden weitere Anforderungen identifiziert und abgeleitet, die ebenfalls zum Pflichtenheft beitragen.

Tabelle 4.1: Anforderungen im Lastenheft [62]

Anforderungen	Erläuterung	Beispiel E-Trailer
Funktionale	Beschreiben wie sich das System Verhalten soll	Der Anhänger soll nur im Stillstand Ladung anheben oder absenken
Nutzbarkeit	Nutzerfreundlichkeit, Effizienz, Vermeidung falscher Bedienung	Unterstützungsmodus des Antriebs soll nur im angekuppelten Zustand an das Zugfahrzeug möglich sein
Performante	Dynamische Anforderungen, Dauerhaltbarkeit, Produktlebensdauer	Die maximale Beschleunigung soll $1 \text{ m/s}^2$ betragen
Schnittstellen	Abhängigkeiten zu anderen Systemen inklusive zum Menschen	Die Zustände des Anhängers sollen über Schalter und Tasten an der Karosserie steuerbar sein
Operationelle	Menschliche Interaktion, Wartung, Zuverlässigkeit	Mensch muss Schalter an der Zugdeichsel Bedienen
Betriebszustände	Definition eventueller Betriebszustände und Transitionen	Der Anhänger soll einen Stillstandmodus zum Heben und Senken der Last haben
Physikalische	Konstruktionsbedingte, geometrische Charakteristiken	Die Ladefläche muss eine Europalette mit $0,8 \times 1,2 \text{ m}$ aufnehmen können
Umweltbedingte	Bedingungen, denen das System ausgesetzt ist/widerstehen muss	Temperaturbereich während der Verwendung von $-5$ bis $40 \text{ }^\circ\text{C}$
Sicherheitsbedingte	Schutz des Systems vor anderen und Andere vor dem System	Der Stillstand soll selbstständig eingenommen werden, wenn die Kupplung abreißt
Rechtliche	gesetzliche Vorschriften, Normen, Regelwerke	Gemäß StVG sollen die Vorschriften für Fahrräder angewendet werden
Produktlebenszyklus	Support, Ersatzteile, Wartung, Schulung	Ersatzteile zur Reparatur sollen 10 Jahre beschaffbar sein
Logistik	Transport des Systems	Transport soll nur mit angezogener Feststellbremse erfolgen

Anhand der im Lastenheft geforderten, funktionalen Anforderungen kann der Automatisierungsgrad des Vehikels gemäß 2.2 eingestuft werden. Am Beispiel des Trailers 4.1.1 soll die Automatisierung als assistiertes System für die Längsführung des Anhängers erfolgen, während der Ziehende die Querführung bestimmt. Gemäß den Automatisierungsgraden wird das System als Level 1 „Assistiert“ eingestuft. Im Projekt AuRa 4.1.2 ist das Fahrzeug im autonomen Modus per Szenariodefinition ohne aufsitzenden Fahrer unterwegs. Da das Automatisierungssystem hier im spezifischen Anwendungsfall alle Situationen bewältigen kann, wird das System als Level 4 „Hoch Automatisiert“ eingestuft (siehe Tabelle 2.4).

Das Einsatzszenario beschreibt die Verwendung eines Mikromobils und dessen Funktionalitäten und Beschränkungen. Aus der Analyse des Einsatzszenarios resultiert der erforderliche Automatisierungsgrad für das Mikromobil. Aufgrund dieser Einstufung der automatisierten Fahrfunktion resultiert der Umfang des Arbeitsaufwandes der nachfolgenden Prozessschritte.

### 4.3 Regulatorische Anforderungen

Nachdem der Automatisierungsgrad im vorherigen Abschnitt bestimmt wurde, können die gesetzlichen und normativen Anforderungen an ein automatisiertes Mikromobil entsprechend der Einstufung gestellt werden. Im Abschnitt 2.3 befindet sich eine Sammlung gesetzlicher und normativer Regularien, die für den Entwicklungsprozess automatisierter Mikromobile zutreffend sind. Dabei gibt es Dokumente, die generell bei der Entwicklung technischer Systeme angewendet werden sollten und spezifische, die nur in bestimmten Fällen zur Anwendung kommen.

Die grundsätzlichen Kriterien für den Umfang der anzuwendenden Regularien bilden der Automatisierungsgrad und die Einstufung als Kraftfahrzeug. Umfangreiche Regularien wie z.B. die AFGBV, welche für Automatisierungsgrade ab Stufe 2 anzuwenden ist, betreffen derzeit nur Kraftfahrzeuge im Sinne des StVG.

Das vorgestellte Beispiel des automatisierten Lastenanhängers gilt nicht als Kraftfahrzeug, da seine Gesamtantriebsleistung die gesetzliche Vorgabe für die Definition als Kraftfahrzeug nicht überschreitet. Folglich müssen wenige Regularien in den Anforderungen berücksichtigt werden. Das automatisierte Lastenrad wird hingegen höher eingestuft (Level 4). Aufgrund der Tatsache, dass hier während der automatisierten Fahrt keine Fortbewegung mit Muskelkraft erfolgt, resultiert die Einstufung als Kraftfahrzeug und die genannten Vorschriften und Normen aus 2.3 müssen berücksichtigt werden. Die Anforderungen aus den Regularien tragen zum Pflichtenheft bei und müssen bei der Entwicklung des Mikromobils erfüllt werden.

## 4.4 Anforderungen an das Sicherheitsmanagement

Ein weiterer Prozessschritt der Anforderungserhebung im V-Modell 3.2 stellt die Risikobeurteilung und die daraus folgenden Maßnahmen zur Risikominderung im Sicherheitsmanagement dar. Da der Einsatz von Mikromobilen im öffentlichen Straßenverkehr erfolgt, sind immer Personen in unmittelbarer Nähe zum automatisierten Vehikel und müssen daher durch entsprechende Maßnahmen geschützt werden. Aus der Durchführung einer Risikobeurteilung resultieren diese Maßnahmen, um das bewertete Risiko auf ein erträgliches Maß zu mindern. Zur Minderung des festgestellten Risikos stehen als Mittel die inhärent sichere Konstruktion, technische Schutzmaßnahmen und Benutzerinformationen zur Verfügung. Um eine Gefährdung aufgrund implementierter Funktionalitäten signifikant zu senken stehen folgende Mittel zur Verfügung.

- Verwendung zuverlässiger Bauteile (mit spezifiziertem Ausfallverhalten)
- Redundanz von Bauteilen oder Teilsystemen
- Unterbrechung der Energiezufuhr
- Plausibilitätsprüfung
- Selbsttest
- Selbstüberwachung
- Validierung von Programmierungen

Die Fahraufgabe eines automatisierten Mikromobils ist aufgrund der Einstufung nach 2.2 an unterschiedlich ausgeprägte Funktionalitäten gebunden, die mit der nötigen Steuerungstechnik ausgeführt werden sollen. Mit steigendem Automatisierungsgrad eines Mikromobils erhöht sich die Anzahl zu beurteilender Risiken, da die Fahraufgabe zunehmend vom Fahrer zum Automatisierungssystem übergeht. Zur Senkung des festgestellten Risikos können die oben erwähnten Mittel angewendet werden. Welches Mittel zur Minimierung der Gefährdung angewendet wird, ergibt sich aus der Risikobeurteilung. Ob das gewählte Mittel geeignet ist, muss durch eine erneute Risikobeurteilung bis zur hinreichenden Erträglichkeit des Restrisikos festgestellt werden.

Für die Anwendungsbeispiele automatisiertes Lastenrad 4.1.2 und E-Trailer 4.1.1 wurde eine Risikobeurteilung für alle Betriebszustände während der Verwendung der Mikromobile durchgeführt. Aufgrund des unterschiedlichen Automatisierungsgrades der beiden Anwendungen fallen die Anforderungen an das jeweilige Sicherheitsmanagement unterschiedlich komplex aus.

Im Anhang C.2 befinden sich beispielhaft die Dokumente zur Risikobeurteilung für das Einsatzszenario E-Trailer. Im Trailermodus Anhängerbetrieb wurden Gefährdungen identifiziert, die durch entsprechende Maßnahmen reduziert werden sollen. Für den Ausfall von Komponenten während der Fahrt wurde die Maßnahme Sicherheitsmanagement auf Software-Ebene gewählt, um eine Gefährdung durch das unkontrollierte Fahrzeug zu reduzieren. Beim E-Trailer wird aufgrund des geringen Automatisierungsgrades und den ermittelten Risikoindizes der Gefährdungen ein zentrales Steuergerät integriert, auf dem das Sicherheitsmanagement in Form des Zustandsautomaten 4.5 programmiert ist. Dieser Automat muss alle Betriebszustände des E-Trailers abbilden, die über definierte Transitionen erreicht werden können. Als Input für die Zustandsmaschine dienen die elektrischen Schaltsignale am Fahrzeug, sowie alle Sensor- und Aktuatorendaten. Je nach Zustand und Inputs des Trailers werden die Sollwertvorgaben für Antriebe und Bremsen angepasst, um in Fehlerfällen einen sicheren Zustand zu gewährleisten. Aufgrund der permanenten Anwesenheit eines Fahrzeugbedieners während des Anhängerbetriebes muss der Ausfall des Steuergerätes oder der Kommunikationsverbindungen nicht durch redundante Steuergeräteüberwachung abgedeckt werden. Der Bediener hat aufgrund der Deichsel eine dauerhafte mechanische Verbindung zum Trailer und kann bei einem Komponentenausfall weiterhin auf den Anhänger einwirken. Um die Gefährdungen des Steuergeräteausfalls zu minimieren, wird zusätzlich eine harte Verdrahtung der Sicherheitsschalter zu den Controllern und Relais der Aktoren erfolgen. Aufgrund dieser Verdrahtung kann eine Notbremsung auch bei einer Fehlfunktion des Steuergerätes ausgeführt werden, indem der Bremscontroller einen hohen Bremsdruck stellt und die Motorphasenströme getrennt werden.

Der höhere Automatisierungsgrad und die Abwesenheit eines unmittelbaren Bedieners am automatisierten Lastenrad resultieren in komplexeren risikomindernden Maßnahmen. Aufgrund der Gefährdungen und eines hohen Risikoindexes aus der Risikobewertung werden folgende beispielhafte Maßnahmen zur Minderung ergriffen. Der Ausfall eines Steuergerätes des automatisierten Lastenrades als Gefährdung aufgrund unkontrolliertem Vehikel im Straßenverkehr kann nicht immer durch einen menschlichen Eingriff kompensiert werden. Dafür muss ein zweites Steuergerät eingebunden werden, das die Funktionen der Sicherheits-Zustandsmaschine auf dem ersten Steuergerät redundant abdeckt. Die Steuergeräte überwachen sich gegenseitig und überführen das Fahrzeug bei Ausfall eines der Geräte gemäß der Zustandsmaschine in einen sicheren Zustand. Die kooperierenden Zustandsautomaten der beiden Steuergeräte befinden sich im Anhang A.4. Mit Hilfe der redundanten Auslegung kann die Gefährdung erfolgreich gemindert werden. Eine weitere Gefährdung entsteht aufgrund des Ausfalls der Kommunikation zwischen den Steuergeräten, den Sensoren und der Aktorik. Das Gefährdungspotential eines solchen Ausfalls wird als zu hoch eingestuft und muss durch Maßnahmen vermindert werden. Neben einer Plausibilitätsprüfung der Stellgrößen durch die Aktorik erfolgt eine harte Verdrahtung der Notaus-Signale zu den Bremsen und eine Unterbrechung der Motorphasenströme mit Hilfe

von Trennrelais. Dadurch kann das selbstfahrende Vehikel sicher zum Stillstand gebracht werden und die Gefährdung ausreichend gemindert. Ein großes Gefahrenpotential besteht durch den Ausfall der Energieversorgung während sich das Lastenrad im automatisierten Fahrmodus befindet. Um in diesem Fall das Risiko durch ein unkontrolliert rollendes Fahrzeug zu mindern, wird eine Energiespeicherbremse benötigt, die das Vehikel bei Ausfall der Energieversorgung sicher zum Stillstand bremsen kann.

Eine Risikobeurteilung sollte während des Entwicklungsprozesses für automatisierte Mikromobile obligatorisch sein. Dadurch können Gefährdungen systematisch identifiziert und aufgrund einer Bewertung durch geeignete Maßnahme gemindert werden. Zusätzlich ist die Risikobeurteilung als Dokumentation in der Entwicklung sicherheitsrelevanter Systeme geeignet. Vergleichbar zum Prozess in 3.3 wird in den Normen [21] und [22] analog zum Risikoindex das ASIL oder SIL für Serienfahrzeuge bestimmt. Diese Level quantifizieren Anforderungen an die Ausfallsicherheit der elektrischen Komponenten sowie deren Programmierungen und bieten entsprechende Maßnahmen zur Steigerung des Zuverlässigkeitslevels. Diese Methoden für Kraftfahrzeuge in Serienproduktion sind sehr umfangreich und sind daher weniger für den Entwicklungsprozess von Mikromobilen in Kleinserien geeignet.

## 4.5 Erforderliche Module und Funktionsbausteine

Die Verwendung einer Vielzahl an Sensorik und Aktorik zur Automatisierung der Fahraufgabe eines Mikromobils bedingt eine Steuerung mit Algorithmen zur Datensammlung, -aufbereitung, -verarbeitung und -ausgabe. Die Algorithmen repräsentieren die automatisierte Fahraufgabe im Anwendungsfall und setzen sich aus mehreren Teilfunktionen zusammen. Die benötigten Funktionsbausteine für Automatisierungsarchitekturen sind grundlegend ähnlich und in unterschiedlicher Struktur miteinander verbunden. Abbildung 4.6 zeigt eine allgemeine Struktur und die dazugehörigen Signalflüsse.

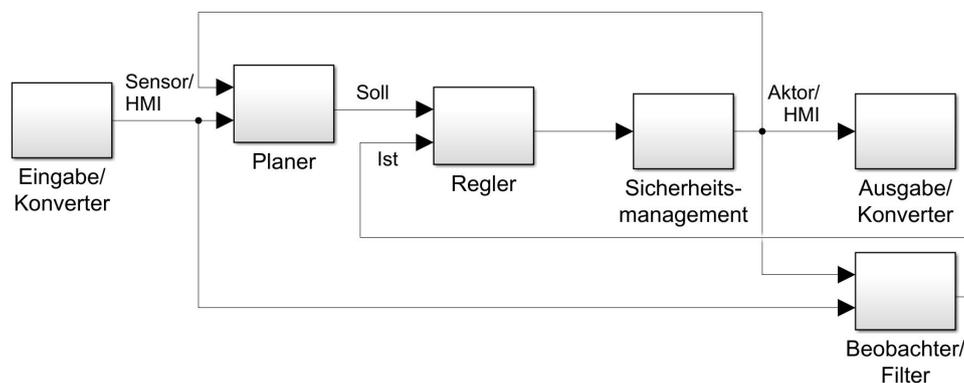


Abbildung 4.6: Module eines Automatisierungssystems für Fahraufgaben

Die Ein- und Ausgabebausteine bilden dabei die Schnittstellen zum Prozess bzw. zum Fahrverhalten des Mikromobils. Konverter sollen die Messsignale für die Weiterverarbeitung auf das notwendige Datenformat wandeln.

Für die Automatisierung einer Fahraufgabe müssen folgende grundsätzlichen Funktionalitäten vorhanden sein:

- Wo befindet sich das Mikromobil
- Wo soll es sich hinbewegen
- Wie gelangt es dort hin

Damit sich ein Mikromobil automatisiert zu einem Punkt bewegen kann, wird ein Planer benötigt, der eine fahrbare Trajektorie für das Mikromobil aus den Inputdaten und dem aktuellen Zustand generiert. Eine Regelung übernimmt dann den Soll-Istvergleich und berechnet die Stellgrößen für die Fahraufgabe. Zur Risikominderung werden die Stellgrößen des Reglers vor der Weiterleitung an die Aktorik durch ein Sicherheitsmanagement überprüft. Die Sollvorgaben werden dann gegebenenfalls zum Planer zurückgeführt und für den Regler angepasst. Die vom Sicherheitsmanagement bereitgestellten Stellgrößen werden dann an die Aktorik und einem Beobachter-/Filtermodul übertragen. Neben den Stellgrößen erhält der Beobachter auch die verrauschten Sensordaten, um daraus einen modellbasierten Istzustand für den Regler zu filtern. In unmittelbarer Nähe zu den In- und Outputmodulen sind Konverterbausteine erforderlich, die die Kommunikationssignale des Fahrzeuges für die zentralen Funktionsbausteine in entsprechende Größenordnungen umrechnet. Für die Berechnungen im Planer, Regler und Beobachter empfiehlt sich die Verwendung von SI-Einheiten, um eine physikalische Nachvollziehbarkeit bei der Dimensionierung und Parametrierung zu ermöglichen.

Diese grundlegende Struktur der Funktionsbausteine für automatisierte Mikromobile lässt sich auch auf die beiden Anwendungsbeispiele übertragen. Im Projekt E-Trailer kann diese Architektur auf einem zentralen Steuergerät ausgeführt werden, das über die Schnittstellen Eingabe/Ausgabe mit den Sensoren und Aktoren kommuniziert. Ein Modul Planer wird für die Vorgabe der Sollgrößen eines Summen- und Differenzreglers der beiden Antriebe benötigt. Als Sollvorgabe für den Summenregler gibt der Planer eine konstante Nullkraft vor. Für den Differenzregler soll mit den Differenzdrehzahlen der beiden Antriebsräder eine Sollgierrate vom Planer berechnet werden. Aus den Zielvorgaben und den aktuellen Zuständen müssen Regler die Stellgrößen Antriebsdrehmoment und Bremsmoment berechnen. Vor der Ausgabe der Stellgrößen über die Schnittstellen müssen die Signale ein Sicherheitsmanagement durchlaufen. Im Modul Sicherheitsmanagement können die Stellgrößen anhand des Betriebszustandes überschrieben werden und Vorgaben für den Planer und Regler gesteuert werden. Die Stellgrößen werden zusätzlich zur Ausgabeschnittstelle dem

Beobachter übergeben, um mit modellbasierten Filtern unter Einbeziehung der Messwerte unverrauschte Fahrzustände für den Regler erzeugen zu können.

Für das hoch-automatisierte Lastenrad im Projekt Aura sind die Aufgaben der erforderlichen Funktionsbausteine ähnlich aber komplexer ausgeführt. Im Planer müssen im Gegensatz zum E-Trailer optimale fahrbare Trajektorien entlang von Routen und Hindernissen für das Lastenrad generiert werden. Mit diesen Zieltrajektorien sollen kaskadierte Regler für die Längs- und Querdynamik des Mikromobils gespeist werden. Die aktuellen Fahrzustände müssen mit einem Beobachter geschätzt und geglättet werden, da zum einen nicht alle benötigten Regelgrößen direkt messbar sind und zum anderen verrauschte Istwerte zu verstärkten Stellgrößenschwankungen am Reglerausgang werden. Die Aufgaben eines Sicherheitsmanagements am automatisierten Rades bleiben gleich, sollen aber redundant mit Hilfe von zwei unabhängigen Hardware-Ressourcen parallel auf die Aktorik des Mikromobils wirken können. Bei beiden Anwendungsfällen sind die oben beschriebenen Funktionsbausteine obligatorisch zur Implementierung der automatisierten Fahraufgaben.

### **4.6 Anforderungen an die Aktorik und Sensorik**

Das benötigte Spektrum der erforderlichen Sensoren und Aktoren für automatisierte Mikromobile ist im Wesentlichen vom Automatisierungsgrad der Fahrfunktion abhängig. Dazu wird zunächst gemäß der Analyse in 4.2 der nötige Automatisierungsgrad des Mikromobils festgelegt. Bei assistierenden Systemen muss zur Auswahl der Sensoren noch zwischen längs- und querführender Assistenz unterschieden werden. Für die Längsführung eines Mikromobils werden die Stellglieder Antriebe und Bremsen benötigt, um das Fahrzeug zu beschleunigen bzw. zu verzögern. Zur Erkennung anderer Verkehrsteilnehmer und Hindernisse werden nach vorn gerichtete Umfeldsensoren zur Objekterkennung und Abstandsmessung benötigt. Die Querführung eines automatisierten Mikromobils erfolgt mit der Beeinflussung des Lenkwinkels durch einen Lenkmotor. Zusätzlich zur vorwärts gerichteten Umfeldsensorik werden für die Querdynamik jedoch seitliche und rückwärts gerichtete Sensoren nötig.

Bereits ab Automatisierungsgrad 2 2.4 werden alle Stellglieder für Antrieb, Bremse und Lenkung obligatorisch, damit das Automatisierungssystem die Längs- und Querführung übernehmen kann. Für die geregelte Einstellung des Lenkwinkels oder der Fahrzeuggeschwindigkeit werden zusätzlich Winkelsensoren oder Lagegeber an der Lenkung und den Rädern nötig. Sollen hydraulische Bremssysteme eingesetzt werden, empfiehlt sich eine unterlagerte Bremsdruckregelung zur Verzögerung des Mikromobils. Des Weiteren werden

je nach Assistenz- bzw. Automatisierungssystem Umfeldsensoren zur Abstands- oder Objekterkennung nötig. Abbildung 4.7 zeigt die Abhängigkeit der benötigten Komponenten entsprechend zum Automatisierungsgrad.

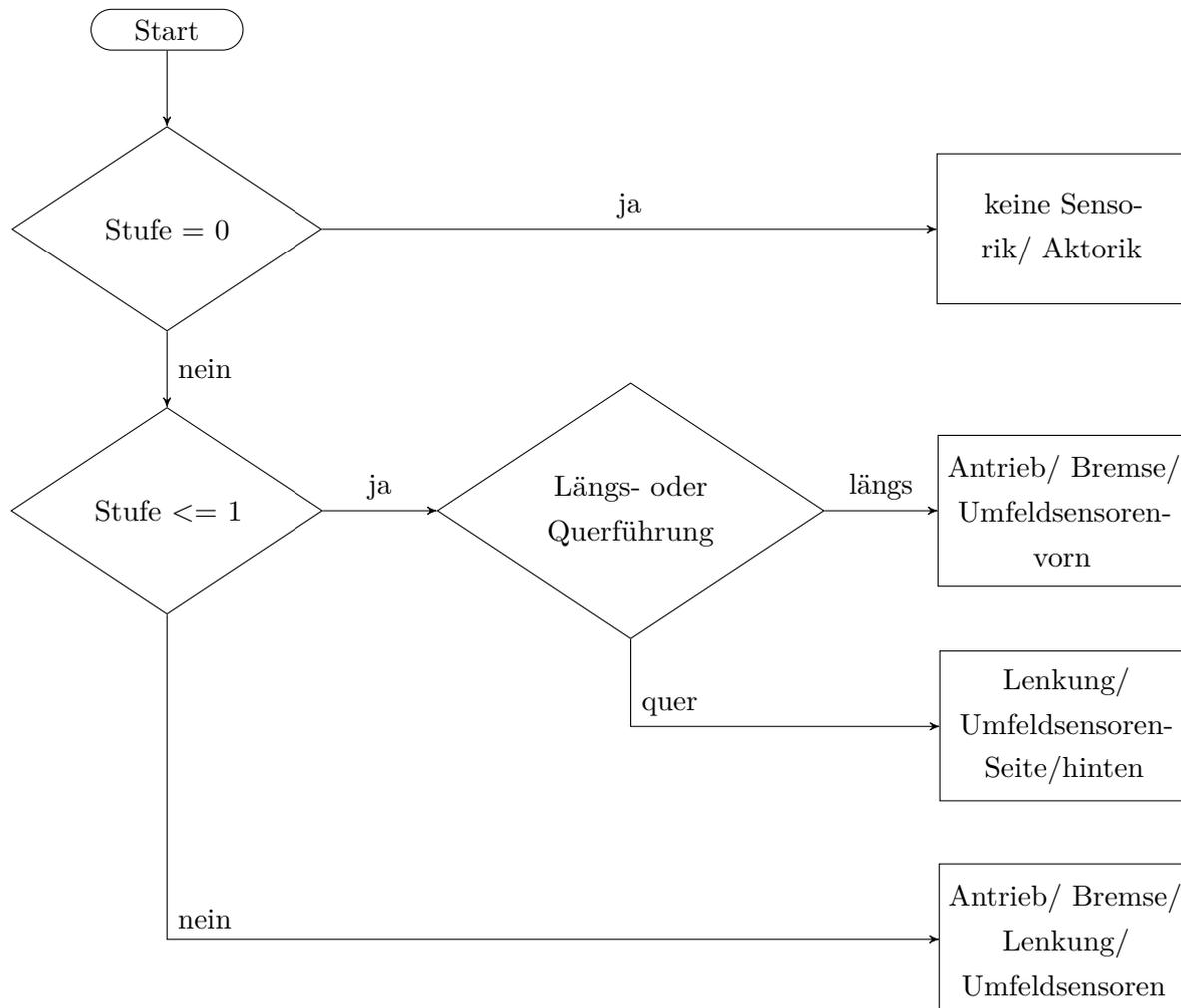


Abbildung 4.7: Ablaufdiagramm zur Auswahl der nötigen Aktoren/Sensoren für automatisierte Mikromobile

Für die Regelung auf Stabilisierungsebene werden die Fahrzustände der Einspurmodelle 3.4.3 benötigt. Zur vollständigen Zustandsbeschreibung der Modelle kann ein Teil mit einer IMU gemessen oder in Kombination mit modellbasierten Filtern geschätzt werden. Auf Bahnplanungs- und Bahnführungsebene werden Information zum Bezugskordinatensystem relevant, die z.B. mit einem GPS Empfänger ermittelt werden können.

Als Sicherheitsrelevante Anforderungen an die Aktorik und Sensorik kann die Ausfallsicherheit und Unempfindlichkeit gegen Störungen in der Energieversorgung definiert werden. Zudem müssen die Geräte auch unter den im Lastenheft geforderten Umweltbedingungen für das Gesamtfahrzeug operieren. Dabei sollte die Klassifizierung nach der IP-Schutzart der Verwendeten Sensorik und Aktorik im Mikromobil beachtet werden. Anhand der Risi-

kobeurteilung der automatisierten Funktionen des Mikromobils müssten die Anforderungen der Normen auch an Einzelkomponenten gemäß dem ermittelten Sicherheitsintegritätslevel erfüllt werden. Jedoch kann das SIL der Einzelkomponenten herabgesetzt werden, indem eine Dekomposition der Funktionalität auf verteilte Sensorik/Aktorik angewendet wird (z.B. Redundanz, zusätzliche Aktorik für Notfälle).

Neben den sicherheitsrelevanten und umgebungsbedingten Aspekten bei der Auswahl geeigneter Aktoren ist die abrufbare Leistung von Bedeutung. Mit Hilfe von Modellen oder Messverfahren muss die erforderliche Kraft der jeweiligen Fahrzeugbewegung während der Entwurfsphase festgestellt werden, um geeignete Aktoren auszuwählen. Für den Antrieb können einfache längsdynamische Modelle mit einem Freiheitsgrad betrachtet werden. Bei der Aktorik für die Lenkung empfiehlt sich eine Betrachtung des Reifenbohrmoments im Stillstand des Fahrzeuges, da hier die höchsten Kräfte zur Stellung eines Lenkwinkels zu erwarten sind.

Analog zur Leistungsklasse der Aktoren müssen auch die Sensoren einen geeigneten Messbereich für den jeweiligen Einsatzzweck aufweisen. Bei digitalen Sensoren muss zusätzlich die Auflösung und die Datenaktualisierungsrate für die Erfüllung der Regelaufgabe berücksichtigt werden.

Zur Integration der Aktoren und Sensoren im Gesamtfahrzeug müssen die vorhandenen Spannungsniveaus beachtet werden und die Kommunikationsprofile für den Datenaustausch zueinander passen. Bei den Schnittstellen der Aktorik müssen darüber hinaus Signaleingänge vorhanden sein, die sicherheitsrelevante Steuerleitungen verarbeiten können.

Nachfolgend sind die Anforderungen an Aktorik und Sensorik nochmal zusammenfassend aufgeführt.

- Umgebungsbedingungen/Schutzart
- Bauform/Baugröße
- Energieversorgung/-niveau
- Kommunikations-Schnittstellen
- Drehmoment/Kraft
- Messbereich
- Abtastrate
- Gesetze/Normen
- Sicherheitsintegritätslevel
- Funktionen

Am Anwendungsbeispiel E-Trailer ist im Vergleich zu anderen Anwendungen eine geringfügige Anzahl an Sensoren und Aktoren notwendig. Für die Hauptfunktionalität, die Zugkraft-Kompensation, ist lediglich ein Zugkraftsensor und die Antriebsmotoren im Bereich der Aktorik notwendig. Da aber während Kurvenfahrten bei mehrspurigen Fahrzeugen unterschiedliche Radgeschwindigkeiten auftreten, müssen die Antriebsmomente entsprechend der Kurvenfahrt an beiden Rädern unterschiedlich aufgeteilt werden. Das Erkennen einer Kurvenfahrt kann über einen Sensor zur Bestimmung des Vorderrad-Lenkungswinkels erfolgen. Bei der Auswahl geeigneter Komponenten muss dabei besonders auf das hohe Fahrzeuggewicht bei maximaler Beladung geachtet werden, damit die geforderte Beschleunigung des Vehikels bei jedem Beladungszustand erreicht werden kann. Trotz angestrebter Nullkraft in der Deichsel muss der Wertebereich und die Überlastfähigkeit des Zugkraftsensors zum hohen Anhängerweight passen. Da die maximale Verzögerung der Antriebsmotoren auch der maximalen Beschleunigungsfähigkeit entspricht, muss eine zusätzliche Bremsaktorik implementiert werden, um höhere Bremsmomente erzeugen zu können. Zu den Sicherheitsfunktionen des Anhängers gehört eine selbstständige Verzögerung falls der Trailer von der Kupplung abreißt. Neben den Stellsignalen des zentralen Steuergerätes für Antrieb und Bremse sollen zusätzliche Steuerleitungen die Notbremsfunktion redundant abbilden.

Die automatisierte Fahrfunktion im Projekt Aura beinhaltet ein Level 4 System nach [11]. Dadurch muss neben dem Antrieb und der Bremse auch die Lenkung aktuiert und geregelt werden. Insgesamt müssen aufgrund des Automatisierungsgrades höhere Anforderungen an

die Sensorik und Aktorik gestellt werden, da alle Funktionen vom Automatisierungssystem ausgeführt werden. Insbesondere die Eigenschaften Zuverlässigkeit und Ausfallsicherheit müssen aufgrund entsprechender Gefährdungen höher eingestuft werden. Für den Datenaustausch zwischen der umfangreichen Sensorik, Aktorik und Steuerung der Längs- und Querführung wird ein einheitlicher Kommunikationsbus empfohlen, welcher bereits Sicherheitsfunktionalitäten mit Hilfe von Protokollen und Diensten bereitstellt. Die Verwendung eines Bussystems verursacht eine digitale Übertragung der Signale und es müssen zusätzliche Anforderungen an die Datenaktualisierungs- und Übertragungsraten festgelegt werden.

In beiden Anwendungsfällen ist die Sensorik und Aktorik aufgrund der minimalistischen Bauformen und Karosserien direkt den Umweltbedingungen ausgesetzt, daher müssen die Einzelkomponenten bereits konkrete Schutzarten erfüllen. Im Sinne der Mikromobilität sollen sie jedoch eine geringe Baugröße aufweisen.

In diesem Kapitel wurden die Anforderungen an ein automatisiertes Mikromobil ermittelt. Bestandteil des Teilprozesses ist die Analyse des Einsatzszenarios, woraus der Automatisierungsgrad ermittelt wird. Aus dieser Einstufung und der Klassifizierung des Mikromobils resultiert die Komplexität der darauffolgenden Prozessschritte der Anforderungsanalyse.

## 5 Systementwurf für automatisierte Mikromobile

Nachdem im vorherigen Kapitel die Anforderungen für die Entwicklung eines automatisierten Mikromobils festgelegt wurden, wird in diesem Kapitel der nachfolgende Teilprozess Entwurf von Teilsystemen und Systemen gezeigt. Dazu wird zuerst auf die Entwurfsmethoden für Mikromobile eingegangen, die simulativ untersucht werden können und damit die Grundlage für die Auswahl geeigneter Hardware bilden. Der Entwurfsprozess für Funktionen automatisierter Mikromobile wird in den letzten beiden Abschnitten des Kapitels durch die praktischen Anwendungsbeispiele aus 4.1 erläutert.

Abbildung 5.1 zeigt die Prozessschritte des Entwurfsprozesses für automatisierte Mikromobile in einer sequentiellen Darstellungsweise. Dabei soll die Pfeilrichtung mit durchgezogenen Linien eine logische Reihenfolge der Schritte aufzeigen. Zwischen den Prozessschritten können Rücksprünge und iterative Schleifen durchlaufen werden (dargestellt durch gestrichelte Linien), falls die jeweiligen Ergebnisse nicht für eine Fortführung des Prozessmodells geeignet sind. Des Weiteren können Rücksprünge auch von den nachfolgenden Teilprozessen Implementierung 6 und Finalisierung 7 erfolgen. Diese werden durch die seitlichen Quereinstiege in der Abbildung dargestellt.

Der Ausgangspunkt zum Entwurf einer Automatisierung für Mikromobile bildet ein funktionsorientiertes Modell, welches die Wirkkette zwischen Eingängen und Ausgängen abbildet. Als Darstellungsform eignen sich dafür Blockschaltbilder bzw. Datenflussdiagramme und Zustandsautomaten. Ausgehend vom Gesamtsystem können die Funktionen mit Hilfe der Top-Down-Methode von ausführlichen zu einfachen Modellen abstrahiert werden. Anhand der zu entwerfenden Funktion muss das Modell die nötigen Eingänge, Zustände und Ausgänge aufweisen. Zur mathematischen Beschreibung des Verhaltens bzw. der physikalischen Zusammenhänge werden differential algebraische Gleichungen verwendet, die aus Impuls- bzw. Drallsatz oder dem Energieerhaltungssatz hervorgehen. Da eine analytische Lösung von Differentialgleichungen für die Implementierung einer Automatisierungsfunktion auf Rechentechnik ungeeignet ist, können sie mit Hilfe numerischer Verfahren in Differenzgleichungen gewandelt werden. Der Prozessschritt ist optional, da leistungsstarke Tools existieren, die integrierte numerische Lösungsverfahren zur Simulation von Systemen und Programmierung beinhalten. Die Modellierung eines automatisierten Mikromobils kann sowohl auf kontinuierliche als auch auf diskrete Weise erfolgen. Die Übertragungsfunktion bildet einen weiteren elementaren Baustein bei der mathematischen Beschreibung eines

---

Systems vom Eingang zum Ausgangsverhalten. Anhand der Übertragungsfunktion lassen sich aufgrund der Frequenzabhängigkeit dynamische Eigenschaften des Systems ablesen bzw. modellieren. Ebenfalls können anhand der diskreten oder kontinuierlichen Übertragungsfunktion Stabilitäts- und Beobachtbarkeitsuntersuchungen durchgeführt werden. Diese Untersuchungen bilden die Voraussetzung für den Entwurf von Funktionen der Automatisierung. Im folgenden Schritt können die Funktionen und modellierten Mikro-mobile mit den festgelegten Anforderungen des Lastenheftes dimensioniert werden. Die entworfenen Funktionen und modellierten Systeme können dann anhand der differential algebraischen Gleichungen oder Übertragungsfunktionen in Simulationen analysiert werden. Mit Simulationstools lassen sich auch komplexere Modelle simulieren, um die entworfenen Funktionen z.B. in Mehrkörpersimulationen zu erproben. Mit den Simulationsumgebungen können dann auch Parameterstudien durchgeführt werden, indem z.B. die Parameter der Fahrzeugmodellierung geändert und deren Auswirkungen auf die Funktionsrobustheit untersucht werden. Anhand der Simulationsergebnisse können dann Sensoren, Aktoren, Rechentechnik und Energieversorgung identifiziert werden.

Geeignete Methoden innerhalb der Prozessschritte des Entwurfsprozess sind nicht exakt festgelegt und sollten durch Expertise und Kompetenz des Ingenieurs gewählt werden [63].

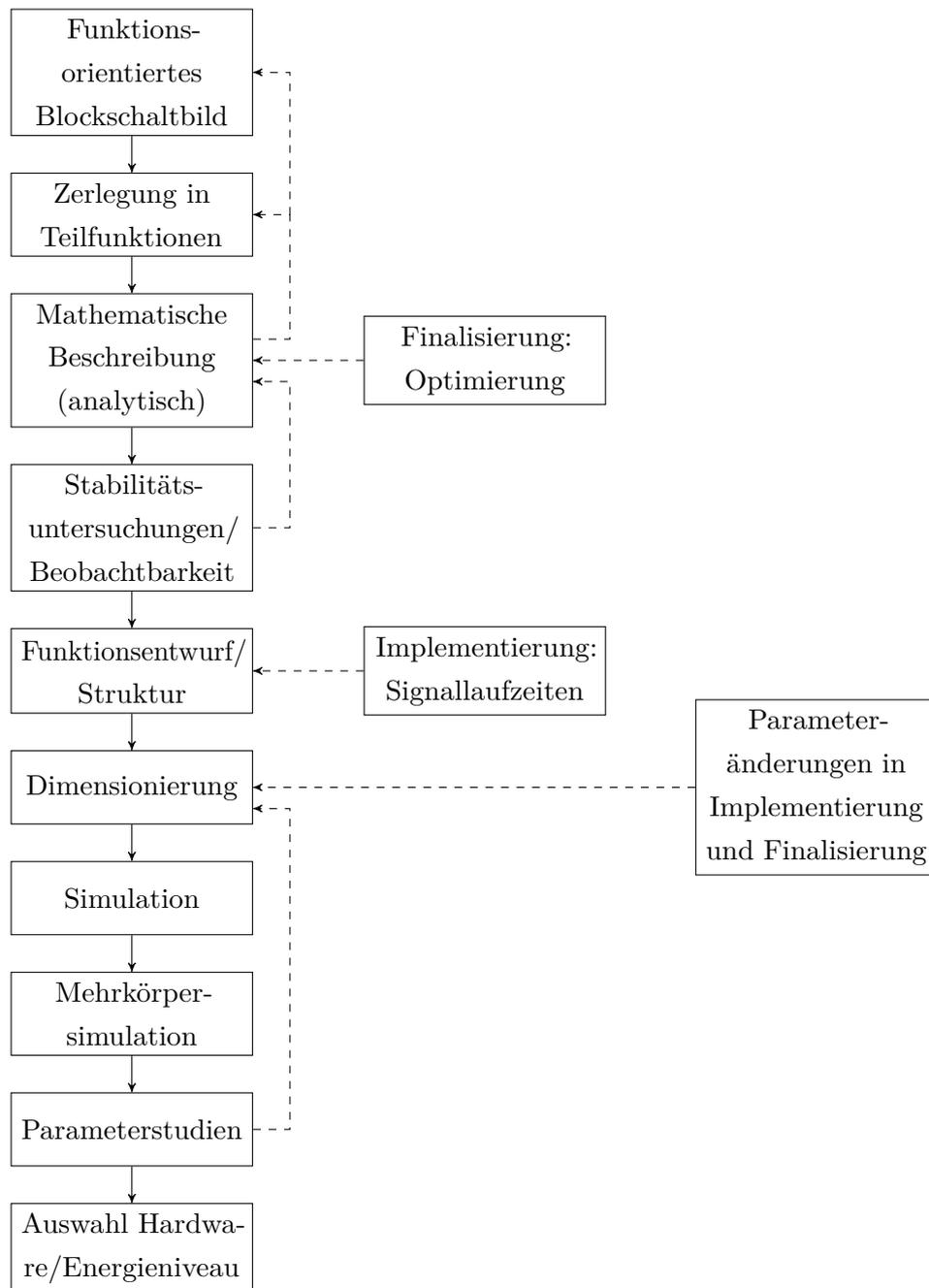


Abbildung 5.1: Prozessschritte des Entwurfsprozesses

↘ - Reihenfolge zwischen den Prozessschritten

↗ - Vor- und Rücksprünge

Quereinstiege sind Rücksprünge aus nachfolgenden Teilprozessen

## 5.1 Funktionsorientiertes Modell und Teilfunktionen

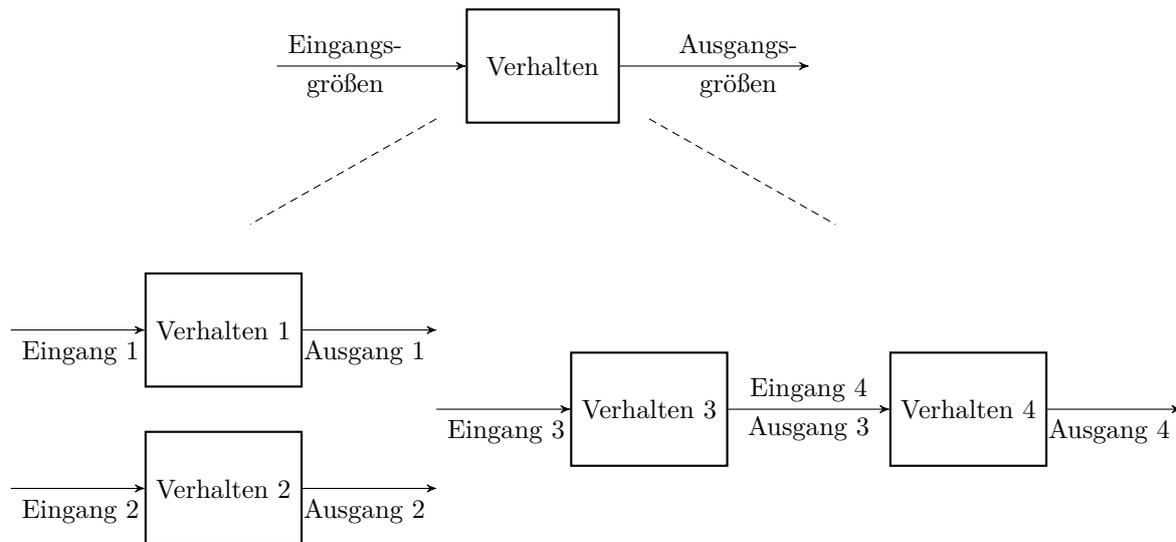


Abbildung 5.2: Dekomposition eines funktionsorientierten Blockschaltbildes

Zu Beginn der Entwurfsphase sollte das Automatisierungssystem für Mikromobile mit visuellen Methoden vereinfacht dargestellt werden. Dafür muss identifiziert werden, welche Eingangsgrößen auf das System wirken und welche Ausgangsgrößen das System liefert (Vergleich dazu oberer Teil der Abbildung 5.2). Für den Entwurf einer Funktionalität muss ein komplexes Gesamtsystemverhalten unter Umständen zu einfacheren Teilsystemen dekomponiert werden. Unter Anwendung der Top-Down-Methode können Systeme in Teilsysteme und diese weiter bis zur nötigen Feingranulierung zerlegt werden. Dabei können die Teilsysteme entweder unabhängig eine parallele Struktur bilden oder als serielle Struktur aufeinander aufbauen (Vergleich dazu unterer Teil der Abbildung 5.2). Insbesondere bei der parallelen Dekomposition sollte darauf geachtet werden, ob Ein- und Ausgänge der Teilsysteme untereinander abhängig sind und sich gegenseitig beeinflussen. Für die weitere Modellierung können dann die einzelnen Teilsysteme analysiert werden, die für die Automatisierung des Mikromobils von Bedeutung sind. Die Anwendungsbeispiele werden im Teilprozess Systementwurf nicht abschnittsweise aufgeführt, sondern zusammenhängend nach den Prozessschritten 5.10, 5.11. Die funktionsorientierten Blockschaltbilder der Anwendungsbeispiele befinden sich in 5.10.1 und 5.11.1. Dieser Prozessschritt liefert eine vereinfachte graphische Darstellung des Systemverhaltens eines Mikromobils.

## 5.2 Modellierung des Mikromobils

Die Modellierung des Systemverhaltens von Mikromobilen erfolgt, um anhand der Modelle eine Automatisierungsfunktionalität entwerfen zu können. Nachdem das Verhalten des

Mikromobils mit identifizierten Ein- und Ausgängen dekomponiert und für den Entwurf eines Automatisierungssystems abstrahiert wurde, kann die mathematische Beschreibung des Systemverhaltens erfolgen. Dazu werden physikalische Zusammenhänge in differential algebraischen Gleichungen ausgedrückt (siehe 5.1). Bei der Modellierung eines technischen Systems kann die Dynamik zur Vereinfachung als zeitkontinuierlich und linear approximiert werden. In der Realität unterliegen die Zustandsgrößen aufgrund physischer und technischer Eigenschaften der Aktorik oder den Anforderungen aus dem Lastenheft zusätzlichen Zwangsbedingungen, die ein nichtlineares Systemverhalten hervorrufen. Dieses Verhalten sollte in den Gleichungen mit abgebildet werden, um Funktionen an möglichst wirklichkeitsgetreuen Modellen zu entwerfen.

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (5.1)$$

Die differential algebraischen Gleichungen werden als mechanische Zusammenhänge aus dem Impuls- und Drallsatz abgeleitet. Aus den Gleichungen werden Fahrzeugmodelle nach 3.4.3 abgeleitet, die in linearer und nichtlinearer Form angewendet werden können. Analog zu den Einspurmodellen existieren auch lineare und nichtlineare Reifenmodelle, die eine Auswirkung auf das Gesamtsystemverhalten in den Grenzbereichen haben. Allerdings werden für die komplexeren Reifenmodelle Parametersätze benötigt, die für Mikromobile meist nicht existieren. Dadurch lassen sich dynamische Schlussfolgerungen für Querbewegungen und Wank-/Kippstabilität in den Grenzbereichen bei hohen Reifenseitenkräften und Querschleunigungen nur schwer darstellen. Im Allgemeinen müssen die Parameter der Modellgleichungen entsprechend dem erwarteten Systemverhalten angepasst werden. Die messbaren Parameter wie z.B. Fahrzeugmasse, Radstand, Radradius können anhand der Anforderungen aus dem Lastenheft angepasst werden. Nicht bestimmbare Parameter können mit Hilfe von Vergleichs- oder Erfahrungswerten abgeschätzt werden oder anhand von simulativen Fahrversuchen auf ein menschliches Verständnis für Fahrphysik getrimmt werden. Messwerte realer Sensoren unterliegen einer Varianz und besitzen deshalb einen zeitlichen Verlauf, der hohe Gradienten aufweisen kann. Um die modellierten Messungen einzelner Fahrzustände wirklichkeitsgetreu darzustellen, können diese mit weißem Rauschen und Varianzen aus den Datenblättern kommerzieller Sensoren manipuliert werden. Diese Modellierung ist vor allem für den Entwurf und die Dimensionierung von Filtermodulen von Relevanz.

Die Modellierung der Anwendungsbeispiele erfolgt in 5.10.1 und 5.11.1. Das modellierte Systemverhalten bildet die Grundlage zum Entwurf von Funktionalitäten 4.5 für ein automatisiertes Mikromobil und kann im ersten Ansatz anhand der Anforderungen des Lastenheftes parametrisiert werden. Das Ergebnis der Modellierung ist ein gleichungsbasiertes Modell des Mikromobils, das die Ein- und Ausgangsgrößen aus 5.1 aufweisen muss.

### 5.3 Analyse der Modelle

Nachdem in den vorherigen Schritten des Entwurfs eine Modellierung des Systemverhaltens eines automatisierten Mikromobils vorgenommen wurde, müssen die Modellgleichungen entsprechend parametrisiert werden, um das Fahrverhalten eines Mikromobils abzubilden. Zur Parametrisierung der Modelle können Anforderungen aus dem Lastenheft der Anforderungsanalyse übernommen werden. Die Parameter des Modells sollten bei jeglichen Anpassungen innerhalb der nachfolgenden Prozessschritte aktualisiert werden, um eine Nutzbarkeit der Modelle über den gesamten Entwicklungsprozess und in Iterationsschritten zu gewährleisten. Anhand der parametrisierten Modelle können dann Untersuchungen zur Stabilität oder Beobachtbarkeit durchgeführt werden.

Für die Betrachtungen der Stabilität eines Modells oder der Regelstrecke wird bei Eingrößensystemen die Übertragungsfunktion und bei Mehrgrößensystem das charakteristische Polynom analysiert. Als grundlegende Darstellungsform für Mehrgrößensysteme wird in dieser Arbeit das bekannte Zustandsraummodell mit den bezeichneten Vektoren und Matrizen verwendet [64]. Das charakteristische Polynom des Zustandsraummodells ergibt sich aus den Eigenwerten der Systemmatrix  $\mathbf{A}$ .

$$\det(\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}) \stackrel{!}{=} 0 \quad (5.2)$$

Als Kriterium für die Stabilität des Systemmodells müssen alle Eigenwerte  $\lambda_i$  des charakteristischen Polynoms negativ sein.

$$\operatorname{Re}(\lambda_i) \stackrel{!}{<} 0 \quad (5.3)$$

Bei zeitdiskreten Übertragungsfunktionen müssen alle Polstellen betragsmäßig kleiner 1 sein, um die Stabilität des Systems zu gewährleisten. Anhand des Ergebnisses der Stabilitätsuntersuchungen müssen Stabilisierungsmaßnahmen beim Entwurf von Funktionen getroffen werden. Das kann z.B. mit einer Polstellenverschiebung durch den Entwurf eines Zustandsreglers realisiert werden.

Neben den Stabilitätsbetrachtungen der modellierten Systeme muss für die Implementierung einer Zustandsschätzerfunktionalität auch die Beobachtbarkeit untersucht werden. Kriterien für die Beobachtbarkeit zeitkontinuierlicher und zeitdiskreter linearer Systeme sind in [44] zu finden. Anhand des Kriteriums von Kalman kann die Beobachtbarkeit nachgewiesen werden. Dafür wird die Systemmatrix  $\mathbf{A}$  und die Ausgangsmatrix  $\mathbf{C}$  aus dem Zustandsraummodell benötigt. Mit Hilfe der beiden Matrizen kann dann die Beobachtbarkeitsmatrix  $\mathbf{S}_B$  aufgestellt werden.

$$S_B = \begin{pmatrix} C \\ C \cdot A \\ C \cdot A^2 \\ \dots \\ C \cdot A^{n-1} \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

Ein System ist vollständig beobachtbar, wenn der Rang der Matrix  $S_B$  der Anzahl der Zustände  $n$  entspricht. Eine weitere Möglichkeit zur Feststellung der Beobachtbarkeit von Nichtlinearen Systemen wird durch die strukturelle Beobachtbarkeit mit Hilfe graphentheoretischer Methoden gegeben [44].

In den Abschnitten 5.10.3 und 5.11.3 wird die Analyse der Stabilität für die beiden Anwendungsbeispiele gezeigt. Das Ergebnis der Modellanalyse ist der Nachweis von Stabilität oder Beobachtbarkeit für den nachfolgenden Funktionsentwurf. Kann die Beobachtbarkeit eines Systems nicht nachgewiesen werden, sollten grundlegende Änderungen am System durch zusätzliche Messgrößen durchgeführt werden. Für eine Reglerfunktionalität muss das instabile Systemverhalten im Entwurf der Funktion 5.4 berücksichtigt werden, damit das geregelte System die Stabilitätsanforderung erfüllt.

## 5.4 Entwurf von Funktionen

In den vorherigen Abschnitten des Kapitels wurden Modellgleichungen erstellt und analysiert, die das Fahr- oder Systemverhalten eines Mikromobils abbilden sollen. Anhand dieser Modelle können jetzt Funktionen für die Automatisierung des Mikromobils entworfen werden. Der Umfang der Automatisierungsfunktionen wird durch die Anforderungen aus 4 festgelegt und ist stark an den Automatisierungsgrad des Mikromobils gebunden 4.2. Beim Entwurf der Automatisierung muss zunächst wieder eine Struktur festgelegt werden. Dazu können verkettete Blockschaltbilder wie in 5.1 verwendet werden, die den Signalfluss zwischen Automatisierungsfunktion und Systemmodell darstellen. Die jeweilige Funktion kann dann wieder mathematisch beschrieben werden und in Form von Gleichungen ausgedrückt werden. Auch für die Automatisierungsfunktion kann die mathematische Beschreibung in differential algebraischen Gleichungen, Differenzgleichungen oder Übertragungsfunktionen erfolgen. Stabilitätsuntersuchungen können dann anhand der verketteten Funktion in Kombination mit dem modellierten Systemverhalten durchgeführt werden.

Bei automatisierten Mikromobilen soll die Fahraufgabe durch die Funktionen übernommen werden. Dazu müssen Regler für Antrieb, Bremse und Lenkung des Fahrzeugs entworfen werden. Da eine Reglerfunktionalität an Fahrzustände des Mikromobils gebunden ist,

die in realen Fahrzeugen sensorisch erfasst werden, müssen die Messwerte unter Umständen durch Filter oder Zustandsschätzer geglättet werden. Eine weitere obligatorische Funktionalität ist das Sicherheitsmanagement in Form eines Zustandsautomaten, der das Automatisierungssystem entsprechend der Eingangsgrößen und Transitionsbedingungen in den definierten Zustand mit Ausgangskonfiguration versetzt.

Die Abschnitte 5.10.2 und 5.11.2 illustrieren den Funktionsentwurf beispielhaft. In diesem Prozessschritt sollen als Ergebnisse die Funktionalitäten für Mikromobile 4.5 und deren Struktur in Verbindung zum Modellverhalten aus 5.2 hervorgehen. Die Dimensionierung der Funktionsparameter erfolgt im nächsten Prozessschritt.

## 5.5 Dimensionierung der Funktionsparameter

Eine entworfene Funktionalität für Mikromobile muss zur Erfüllung der automatisierten Fahraufgabe mit Parametern dimensioniert werden, um die gestellten Anforderungen zu erfüllen. Durch Anpassung der Parameter kann das dynamische Verhalten der Fahrfunktion eingestellt und die Stabilisierung des Systems sichergestellt werden. Neben der Stabilität als grundlegende Anforderung, sind die Sollgrößenfolge und die Störgrößenkompensation weitere Kriterien bei der Auswahl der Parameter. Die Dimensionierung der Parameter einer Automatisierungsfunktion kann während der Entwurfsphase anhand der geschätzten Modellparameter und Anforderungen des Lastenheftes erfolgen.

Nach der Implementierung an einem Mikromobil muss das Verhalten der Funktionalität und das Systemverhalten überprüft werden, um zum einen die Modellparameter zu evaluieren und zum anderen die Funktionsparameter entsprechend nachzuführen. Dabei bietet es sich an, die Parameter als mathematische Funktionen in Abhängigkeit der Fahrzeugparameter und des gewünschten Zeitverhaltens aufzustellen 5.5, um Änderungen der Fahrzeugparameter automatisiert in die Berechnung einfließen zu lassen.

$$\mathbf{Funktionsparameter} = f(\mathbf{Fahrzeugparameter}, \mathbf{Dynamik}) \quad (5.5)$$

Die Dimensionierung der Funktionen an den Beispielen erfolgt in 5.10.3 und 5.11.3. Das Ergebnis dieses Prozessschrittes ist eine dimensionierte Funktionalität für automatisierte Mikromobile. Dieser Prozessschritt muss iterativ durchgeführt werden, falls Änderungen oder Abweichungen der Fahrzeugparameter während der Implementierung und Finalisierung festgestellt werden. Nachfolgend können die Funktionalitäten in der Simulation verwendet werden.

## 5.6 Simulation und Mehrkörpersimulation

Die dimensionierten Modelle und Funktionalität können systematisch anhand von Stell- bzw. Eingangsgrößen analysiert werden. Dafür eignen sich rechnerbasierte Simulationsumgebungen, in denen die Modellgleichungen in formulierter oder graphischer Form implementiert werden können. Führend in der graphischen Umsetzung ist die Software Matlab/Simulink, sowohl für die Simulation als auch für die Implementierung von Modulen und Funktionen auf Steuergeräten. Diese graphische Umgebung verfügt über numerische Lösungsverfahren, mit denen die Modellgleichungen zu festgelegten Zeithorizonten gelöst werden. Innerhalb der Simulationsumgebung kann das Lösungsverfahren anhand zahlreicher Parameter (Verfahren, Ordnung, Schrittweite) eingestellt werden, ohne die Differentialgleichungen transformieren zu müssen. Die Simulation ermöglicht eine Analyse aller Zustände und Signale des entworfenen Modells und kann bei Parameteränderungen erneut durchgeführt werden. Dadurch kann die Funktionalität und das Systemverhalten des automatisierten Mikromobils vor der Implementierung auf Prüfständen und Versuchsfahrzeugen anhand der Modelle getestet werden.

Im vorherigen Abschnitt wurden Automatisierungsfunktionen an Modellen mit definierten Modellgleichungen simuliert und analysiert. Im nächsten Schritt können die parametrisierten Funktionen an Mehrkörpersimulationen evaluiert werden, die aufgrund von Zwangsbedingungen und Gelenken eine komplexere Fahrphysik des Mikromobils im dreidimensionalen Raum abbilden können. Simulink besitzt dafür die Bibliothek Simscape Multibody, in der verschiedene Körper, Gelenke, Zwangsbedingungen und äußere Kräfte/Momente konfiguriert werden können. Zur Mehrkörpersimulation wird das Mikromobil in Teilkörper wie z.B. Räder, Fahrwerk und Rahmen zerlegt und über Gelenkbeziehungen miteinander kombiniert. Die Parameter des Mikromobils und dessen Fahrverhalten können dann auf das Mehrkörpersystem übertragen werden. Die komplexen Differentialgleichungssysteme zwischen den Teilkörpern/-systemen werden dabei von der Simulationsumgebung zu jedem Zeitschritt gelöst und die Bewegung des Mikromobils kann graphisch dargestellt und überwacht werden.

Dieser Prozessschritt bindet die Modelle in eine Simulationsumgebung ein, um Funktionalitäten und das Systemverhalten evaluieren zu können, ohne reale Feldversuche durchführen zu müssen. Die Simulation ermöglicht eine schnelle Implementierung und Auswertung der Zustands- und Signalverläufe bei Parameteränderungen und -variationen. Als Grundlage für die Parameter der Simulation können die Anforderungen aus 4.2 bis 4.4 verwendet werden. Als Eingangsdaten der Simulation können dann z.B. Fahrzyklen oder Fahrmanöver mit Geschwindigkeits- und Kursprofilen verwendet werden, die im Anforderungsprofil definiert wurden.

## 5.7 Robustheit und Parameterstudien

In den vorherigen Abschnitten wurden Funktionsbausteine für die Automatisierung der Fahraufgabe von Mikromobilen in Simulationsumgebungen getestet. Mit Hilfe dieser Simulationen können die entworfenen Module anhand definierter Fahrversuche erprobt werden, und der Einfluss von Änderungen an den Funktionen oder am System untersucht werden. Dazu können Modellparameter des Mikromobils geändert werden, um deren Auswirkung auf die dimensionierten Funktionalitäten zu ermitteln. Weiterhin können Störgrößen zum Verhalten der Fahrzeugmodelle simuliert werden, die durch die Funktionalität kompensiert werden müssen. Dadurch soll die Robustheit der Funktionen und deren Parametersatz simulativ nachgewiesen werden.

Als Störung für einen Zustandsschätzer können z.B. die Streuung und Frequenzen der Messsignale im Systemmodell variiert werden, die als feste Funktionsparameter im Filtermodul implementiert wurden. Für eine Regelungsfunktionalität können z.B. die Einflüsse von Umweltveränderungen wie Wind- oder Steigungswiderständen als Störung des Systems untersucht werden. Neben den genannten Störungen kann auch der Einfluss veränderter Fahrzeugmodellparameter die Performance der modellierten Funktionsbausteine stark beeinflussen.

Untersuchungen mit veränderlichen Parametern der Anwendungsbeispiele befinden sich in 5.10.5 und 5.11.5. Das Ergebnis dieses Teilprozesses ist eine simulative Bewertung zur Robustheit der dimensionierten Funktionalität bei Parameterschwankungen des Systemverhaltens. Im Falle einer unzureichenden Robustheit muss eine erneute Dimensionierung der Funktionsparameter erfolgen 5.5.

## 5.8 Schwingungen und Thermik

Ein wichtiger Aspekt zur Sicherheit einer automatisierten Fahrfunktion für Mikromobile sind die mechanischen und thermischen Beanspruchungen der montierten Mechatronik. Mikromobile werden aufgrund ihrer Baugröße mit minimalistischen Rahmen und Chassis ausgestattet. Dadurch fehlen unter anderem gedämpfte Fahrwerkkomponenten, die mechanische Stöße der Fahrbahnoberfläche auf die mechatronischen Komponenten abschwächen oder eliminieren. Des Weiteren ist das verfügbare Platzangebot für Rechentechnik und Leistungselektronik bauartbedingt sehr geringfügig. Aufgrund dessen können aktive, leistungsstarke Kühlsysteme nur bedingt auf einem Mikromobil eingesetzt werden. In den nachfolgenden Abschnitten sollen Besonderheiten bei der Implementierung der mechatronischen Komponenten gezeigt werden. Dieser Prozessschritt soll die besonderen Belastungen

der mechatronischen Komponenten aufzeigen und sollte bei der Implementierung des Automatisierungssystems auf dem Mikromobil berücksichtigt werden.

### 5.8.1 Komponentenbelastungen durch Schwingungen

Das Einsatzgebiet automatisierter Mikromobile ist vorrangig der öffentliche Straßenverkehrsraum. Dazu gehören sowohl Straßen, als auch Fuß- und Radwege, deren Unebenheiten über das Fahrwerk an das gesamte Fahrzeug übertragen werden. Da Mikromobile eine minimalistische Bauform aufweisen, wird darüber hinaus aus Kostengründen auf aufwändige Fahrwerkdämpfertechnik verzichtet. Aufgrund dessen werden die Anregungen der Straße unmittelbar an das gesamte Fahrzeug weitergeleitet. Neben den typischen Anregungsfrequenzen von 1 - 2 Hz durch Unebenheiten können auch Frequenzen bis ca. 70 Hz auf Radwegen erreicht werden (bei einer Geschwindigkeit von 25 km/h und einer Gehwegplattenlänge von 10 cm). Diese Anregungsfrequenzen müssen bei der Implementierung mechatronischer Systeme auf dem Mikromobil berücksichtigt werden, da ein Ausfall des Automatisierungssystems durch Vibrationen zu einem unsicheren Zustand des Fahrzeuges führen kann.

Gegen Vibrationsbelastungen durch die Fahrbahnanregungen können in erster Linie schockresistente Komponenten verwendet werden, die nach geeigneten Prüfverfahren klassifiziert wurden. Nicht-schockresistente Komponenten müssen die Stöße durch entsprechende Lagerung dämpfen. Dafür gibt es eine Vielzahl an kommerziell erhältlichen Schwingungsdämpfern, die auf die Teilsysteme des Mikromobils abgestimmt werden können. Eine weitere Sicherheitsmaßnahme zur Vermeidung vibrationsbedingter Systemausfälle ist die Auswahl der Steckerverbindungen. Dabei sollte sowohl bei der Energieversorgung der Komponenten als auch bei den Kommunikationsleitungen verriegelnde Steckerverbindungen gewählt werden, die sich nicht selbstständig durch Fahrbahnanregungen lösen können. Sämtliche Schraub- und Lötverbindungen der Mechatronik sollten für die vorliegende Vibrationsbelastung ausgelegt werden. Nachfolgend sind die wichtigen Maßnahmen zur Minderung eines Ausfalls durch Vibrationen aufgeführt.

- Schockresistente Komponenten
- Dämpfung/Lagerung einzelner Komponenten
- Sichere Steckerverbindungen
- Sichere Schraub- und Lötverbindungen

### 5.8.2 Wärmeableitung am Mikromobil

Die Verwendung elektromechanischer Komponenten ist insbesondere bei Rechentechnik und leistungselektronischen Stellgliedern mit der Umwandlung elektrischer Energie in Wärme verbunden. Da die fehlerfreie Funktionsweise der Komponenten an bestimmte Umgebungstemperaturen gebunden ist, muss die Wärme über entsprechende Maßnahmen abgeführt werden. Dafür stehen die zwei Arten der Wärmeleitung zur Verfügung - Wärmeleitung und Konvektion. Ziel der Wärmeleitung und Konvektion ist die Abgabe der Wärme an die Umgebung. Zum Transport der Wärme von einem zum anderen Ort wird die Wärmeleitung verwendet. Die Übertragung an die Umgebung erfolgt dann über Konvektion. Die Abführung der Konvektionswärme kann sowohl aktiv als auch passiv erfolgen. Bei der passiven Variante wird eine größtmögliche Oberfläche z.B. in Form von Verrippungen benötigt. Die aktive Variante benötigt einen höheren Luftstrom, der mit Hilfe von Lüftern realisiert werden kann. Als relevante technische Lösungen zur Wärmeleitung in Mikromobilen eignen sich Wasser- und Luftkühlungen.

Aufgrund der minimalistischen Bauweise eines Mikromobils ist das Platzangebot zur Implementierung einer Kühlung eher gering. Zum einen wird auf engstem Raum viel Wärme abgegeben, zum anderen ist der nötige Freiraum zur Luftführung begrenzt. Passive Kühlungen benötigen eine große thermische Masse, die auf Leichtbau-Mikromobilen meist nicht vorhanden ist. Weiterhin begrenzt der On-Board-Energievorrat die Verwendung aktiver Kühlsysteme, hier muss die erzeugbare Kühlleistung im Verhältnis zur aufgenommenen Energie stehen. Dafür muss zunächst ermittelt werden, welche Wärmemenge entsteht und abgeführt werden muss. Anhand dessen können Volumenströme und Wärmekapazitäten berechnet werden, um die nötige Wärmeleitung an die Umgebung zu gewährleisten. Mit Hilfe dieser Kenngrößen kann eine geeignete kommerziell verfügbare Kühlung implementiert werden. Die Randbedingungen bei der Auswahl der Kühlung befinden sich in der nachfolgenden Auflistung.

- Erzeugte Wärmemenge
- Verfügbare Kühlleistung
- Platzangebot des Mikromobils
- Kommerzielle Technologien

## 5.9 Auswahl von Komponenten

Im finalen Prozessschritt der Entwurfsphase werden mechatronische Komponenten für die Automatisierung der Fahraufgabe gewählt. Als Grundlage zur Auswahl dienen die

festgelegten Spezifikationen aus dem Teilprozess Anforderungsanalyse 4. Darin wird unter anderem identifiziert, welche Teilsysteme (Antrieb, Bremse, Lenkung, Umgebungssensorik) für die Fahraufgabe automatisiert werden müssen 4.6. Anhand der Simulationsergebnisse der Entwurfsphase können dann die leistungsspezifischen und dynamischen Eigenschaften an die Sensorik und Aktorik der Teilsysteme bestimmt werden. Anhand der nachfolgend aufgeführten Merkmale können die mechatronischen Komponenten dimensioniert werden.

- Drehmoment/ Kraft
- Fahrweg
- Fahrgeschwindigkeit
- Messgröße
- Messbereich
- Auflösung
- Abstraten

Für die Auswahl eines Steuergerätes wird das Entwurfsverfahren für die Automatisierungsfunktionalität genutzt. Die Echtzeitfähigkeit eines Rechensystems wird durch den zu steuernden Prozess bestimmt. Dafür ist die Kenntnis über die Dynamik und den Stabilitätsbereich des Prozesses obligatorisch, um eine Auswahl der Echtzeithardware zu treffen. Das Systemverhalten wurde für einen Funktionsentwurf modelliert und mit entsprechender Schrittweite für die Funktionalität simuliert. Diese festgelegte Schrittweite der Simulation bzw. Funktionalität muss zeitlich auch durch die Programmierung auf der Hardware eingehalten werden, um z.B. integrale Regleranteile als konsistente Stellgröße in determinierten Zeitintervallen zu verarbeiten und an die Aktorik zu übergeben. Als Richtwert für die Abtastung von Signalen sollte auch das Nyquist-Abtasttheorem angewendet werden, in dem die Abtastung mit mehr als der doppelten Frequenz zur kleinsten Zeit erfolgt. Dadurch können Signalverläufe eindeutig bestimmt werden und Signalverluste durch asynchrone Zeiten vermieden werden. Bei der Auswahl der Hardware müssen auch die Funktionalitäten wie z.B. das Sicherheitsmanagements oder Signalkonvertierungen beachtet werden, da diese die Rechenhardware ebenfalls belasten.

Im Weiteren müssen die Schnittstellen zur Übertragung von Signale und Daten zwischen Steuergeräten und Peripherie gewählt werden, die sowohl mechanisch, elektrisch als auch logisch definiert sind. Die Auswahl der Schnittstellen zwischen der Hardware des Automatisierungssystems und den Sensoren und Stellgliedern eines Mikromobils ist an viele Faktoren gebunden. Das Automatisierungssystem eines Mikromobils beinhaltet im Allgemeinen eine zeitabhängige Regelungskomponente, die aus der Wirkkette Sensor-Rechentechnik-Aktor

besteht. Aufgrund dessen ist der Faktor Datenübertragungsgeschwindigkeit von hoher Bedeutung, um die Echtzeitfähigkeit des Regelsystems nicht zu mindern.

Weiterhin sind die kommerziell verfügbaren Technologien maßgebend für die Auswahl der Schnittstellen des Automatisierungssystems. Dabei muss sowohl die Verfügbarkeit der Schnittstelle beim Steuergerät als auch bei den angebotenen Sensoren und Aktoren überprüft werden und die Anschaffungskosten der jeweiligen Schnittstelle berücksichtigt werden. Ein weiterer Aspekt bei der Wahl der Schnittstellen ist die Robustheit gegenüber Störeinflüssen, um eine Inkonsistenz der Daten zu vermeiden. Dazu müssen kabelgebundene Schnittstellen mechanisch solide bei Steckverbindungen und der Kabelstärke ausgeführt sein. Für die Robustheit ist auch die Wahl einer drahtgebundenen oder drahtlosen Schnittstelle von Bedeutung. Drahtlose Schnittstellen sind umgebungsbedingt stör anfälliger durch die Vielzahl vorhandener Funktechnologien im öffentlichen Raum.

Bei der Auswahl der Schnittstelle spielt die Entfernung zwischen Steuergerät und Peripherie eine untergeordnete Rolle, da ein Mikromobil von relativ geringer Baugröße ist (sollte aber dennoch berücksichtigt werden). Die Entfernung sollte besonders bei analogen Schnittstellen berücksichtigt werden, da hier die Signalqualität an die Leitungslänge gebunden ist. Um einen Systemausfall aufgrund defekter Leitungen und damit verbundenen Gefährdungen zu vermeiden können Schnittstellen redundant ausgelegt werden. Damit lässt sich zwar die Robustheit der Datenübertragung steigern und Signale plausibilisieren, jedoch steigen dadurch auch die Kosten. Damit eine redundante Auslegung vermieden werden kann, müssen Mechanismen zur Fehlerdetektion der Schnittstellen implementiert werden, die bei Ausfall einer Schnittstelle einen sicheren Zustand der Aktorik erzwingen.

Weiterhin ist die Anzahl der Peripherie des Steuergerätes maßgebend für die Wahl der Schnittstellen. Die Ein- und Ausgangskanäle des Steuergerätes können bei redundanten Leitungsverbindungen an ihre Belegungsgrenze reichen. Zur Vermeidung von unzähligen Leitungsverbindungen können bei vielzähligen Sensoren und Aktoren Busnetzwerke zur Übertragung von Daten genutzt werden. Diese bieten den Vorteil einer minimalen Schnittstellenanzahl bei hoher Peripheriedichte. Nachteilig ist jedoch der Ausfall des Gesamtsystems bei Leitungsunterbrechung des Bussystems. Dieser Nachteil kann jedoch durch Redundanz abgefangen werden.

Eine Auswahl kommerzieller Schnittstellen befindet sich in der nachfolgenden Aufzählung.

- Digitale In-/Outputs
- Analoge In-/Outputs
- Busnetzwerke wie z.B. CAN
- Serielle Schnittstellen
- Drahtlose Schnittstellen
- TCP/IP oder UDP

In der nachfolgenden Liste sind die Auswahlkriterien der Schnittstellendefinition nochmals zusammengefasst.

- Datenübertragungsgeschwindigkeit
- kommerziell verfügbare Technologien
- Robustheit der Datenübertragung
- Entfernung zur Peripherie
- Redundanz von Schnittstellen
- Anzahl Sensoren/Aktoren im Netzwerk
- Kosten

In 5.10.8 und 5.11.7 wird die Auswahl von Komponenten an Beispielen gezeigt. Das Ergebnis dieses Prozessschrittes sind spezifisch festgelegte Sensoren, Aktoren und Rechentechnik, die anhand des Entwurfs und der Simulationsergebnisse zur Dynamik des Systemverhaltens ausgewählt werden. Zur Einbettung sämtlicher Hardware in das Mikromobil muss der mechanische und elektrische Konstruktionsprozess erfolgen, für den eine Vielzahl an CAD-Software kommerziell verfügbar ist. Sichere mechanische Konstruktionen und das Gestalten elektrischer Anlagen sind ein umfangreicher Abschnitt des Entwurfsprozesses. Im Kontext dieser Arbeit wird dafür jedoch auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen. zusätzlich zur mechanischen und elektrischen Konzeption müssen die Schnittstellen zwischen den Komponenten definiert werden. Mit diesem Prozessschritt wird der Entwurfsprozess abgeschlossen und die Implementierung der Automatisierung eines Mikromobils kann beginnen.

## 5.10 Entwurf von Funktionen des E-Trailers

Dieses Unterkapitel zeigt den Entwurfsprozess der Funktionalitäten zum Automatisieren des elektrischen unterstützten Anhängers 4.1.1. Der Entwurf wird anhand der Prozessschritte 5.1 bis 5.9 für die Zugkraftregelung exemplarisch durchgeführt. Neben der Reglerfunktionalität wird auch der Entwurf eines Zustandsschätzers gezeigt, der in Parameterstudien simulativ evaluiert wird.

### 5.10.1 Modellbildung des E-Trailers

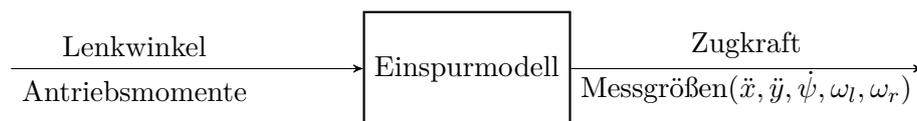


Abbildung 5.3: Funktionsorientiertes Blockschaltbild des E-Trailers

Für den zugkraftkompensierenden Anhänger sind die beiden Module Regler und Beobachter von Bedeutung für die Aufstellung der Systemmodelle. Für die Auslegung eines einfachen Zugkraftreglers würde eine längsdynamische Betrachtung von den Antriebsmomenten zur Zugkraft ausreichen. Da der Trailer ein Mehrspurvehikel ist, besitzt er an einer Achse zwei angetriebene Räder, die aufgrund der Fahrzeuggeometrie in einer Kurvenfahrt unterschiedliche Raddrehzahlen erreichen. Die Antriebsmomente an den beiden Rädern müssen in einer Kurvenfahrt durch einen Differenzregler entsprechend ausgeglichen werden. Deshalb wird neben einem Modell für die Längsdynamik auch die Querdynamik inklusive der Gierrate benötigt. Das funktionsorientierte Blockschaltbild 5.3 zeigt die dafür nötigen Eingangs- und Ausgangsgrößen des Systemverhaltens. Als Grundlage zur Aufstellung der differential algebraischen Gleichungen wird der Trailer von oben betrachtet (siehe Abbildung 5.4). Für die mathematische Beschreibung der Längs- und Querdynamik werden die beiden Räder der Hinterachse zu einem Rad auf der Fahrzeuglängsachse zusammengefasst und die Gleichungen entsprechend des linearen Einspurmodells aus 3.4.3 angewendet.

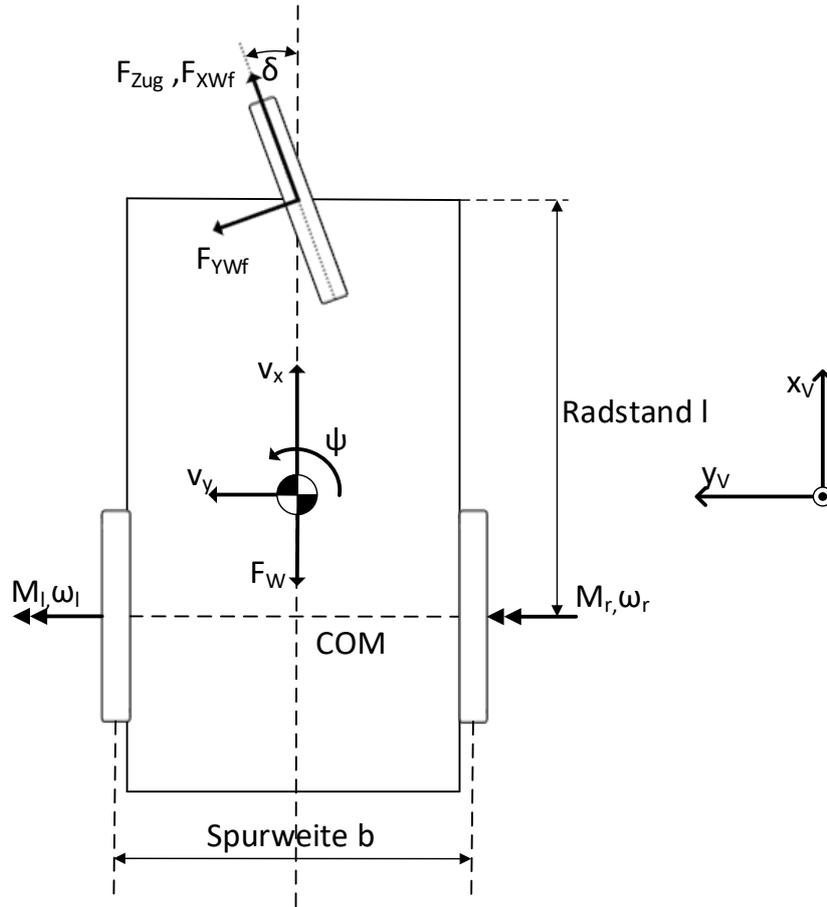


Abbildung 5.4: Modellierungsgrundlage des E-Trailers als Draufsicht von oben

Neben den Gleichungen für Schwimmwinkel  $\beta$ , Gierrate  $\dot{\psi}$  und Längsgeschwindigkeit  $v$  (Gleichungen B.21 bis B.23) wird bei der Modellbildung des Anhängers zusätzlich die Quergeschwindigkeit  $v_y$ , die globalen Positionen  $x_E, y_E$  und die Raddrehzahlen  $\omega_l, \omega_r$  mit berechnet.

$$\dot{v}_y \approx \dot{v}_N = \frac{1}{m} \cdot \Sigma F_N \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_E &= v \cdot \cos(\psi + \beta) \\ \dot{y}_E &= v \cdot \sin(\psi + \beta) \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_l &= \frac{1}{J_{Rad}} \cdot \left( M_l - \left( J_Z \cdot \ddot{\psi} + \frac{1}{2} \cdot (F_W - F_D \cdot \cos \delta) \right) \cdot r_{Rad} \right) \\ \dot{\omega}_r &= \frac{1}{J_{Rad}} \cdot \left( M_r - \left( -J_Z \cdot \ddot{\psi} + \frac{1}{2} \cdot (F_W - F_D \cdot \cos \delta) \right) \cdot r_{Rad} \right) \end{aligned} \quad (5.8)$$

Die Modellierung der Fahrzeugbeschleunigungen erfolgt aufgrund der Installation einer inertialen Messeinheit auf dem Trailer, die alle Beschleunigungen und Drehraten erfassen soll, um eine modellbasierte Zustandsschätzung mit den Messwerten zu realisieren. Gleiches gilt für die Raddrehzahlen, da diese aufgrund der Einzelradantriebe ebenfalls sensorisch erfasst werden sollen. Zur Vereinfachung wird auf einen modellierten Schlupf verzichtet, stattdessen werden zur Beschreibung der Raddynamik Fahrwiderstände und äußere Kräfte einbezogen. Die Antriebsmomente der Motoren wirken über die Hebelarme der Räder und Fahrzeuggeometrie direkt auf den Schwerpunkt. Die Fahrzeugposition im globalen Koordinatensystem wird beim Anhänger nicht mit Onboard-Messsystemen erfasst, aber für Auswertungen und zum besseren Verständnis der simulativen Fahrversuche mit entsprechenden Gleichungen beschrieben.

Das Einspurmodell bildet die Kräfte und Momente in einer horizontalen Ebene zur Fahrbahnoberfläche ab. Aufgrund der modellierten Radkräfte und der Schwerpunkthöhe über dem Boden mit resultierenden Beschleunigungen müssen zusätzliche Nick- und Wankdynamiken modelliert werden. Eine separate Nickbewegung ohne simultane Wankbewegung des E-Trailer kann entsprechend des Abschnittes 3.4.5 modelliert werden. Die beiden Hinterräder und deren Feder- und Dämpfercharakteristik werden dafür analog zum Einspurmodell zu einem Radaufstandspunkt zusammengefasst. Als zusätzlich wirkende Kraft zur Nickdynamik muss die Zugkraft an der Deichsel in den Modellgleichungen berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich das zusätzliche Moment  $N_{Zug}$  um den Nickpol  $N$ .

$$N_{Zug} = F_{Zug} \cdot \cos \delta \cdot h_{Deichsel} \quad (5.9)$$

Die Wankdynamik des E-Trailers kann dem Abschnitt 3.4.4 entsprechend modelliert werden. Vorder- und Hinterachse werden in der YZ-Ebene des Fahrzeuges entlang der Fahrzeuglängsachse zusammengefasst und der Winkel  $\phi$  zwischen Fahrzeughochachse und Z-Achse des Inertialsystems wird mathematisch beschrieben. Neben den Fahrwerk- und Beschleunigungskräften am Schwerpunkt muss die der Zugkraft in Abhängigkeit vom Lenkwinkel mit entsprechendem Hebelarm als Eingangsgröße des Modells berücksichtigt werden. Als zusätzliches Moment  $W_{Zug}$  um den Wankpol  $W$  ergibt sich.

$$W_{Zug} = F_{Zug} \cdot \sin \delta \cdot h_{Deichsel} \cdot \cos \phi \quad (5.10)$$

Da es sich bei dem Anhänger um ein dreirädriges Fahrzeug handelt, muss die Kippachse gesondert identifiziert werden. Dafür ist die Lage des Schwerpunktes entlang der Fahrzeuglängsachse und die Achsgeometrie ausschlaggebend. Wie auf Abbildung 5.5 zu sehen,

verringert sich aufgrund des Aufstandsdreiecks die Kippbreite in Relation zur Lage des Schwerpunktes.

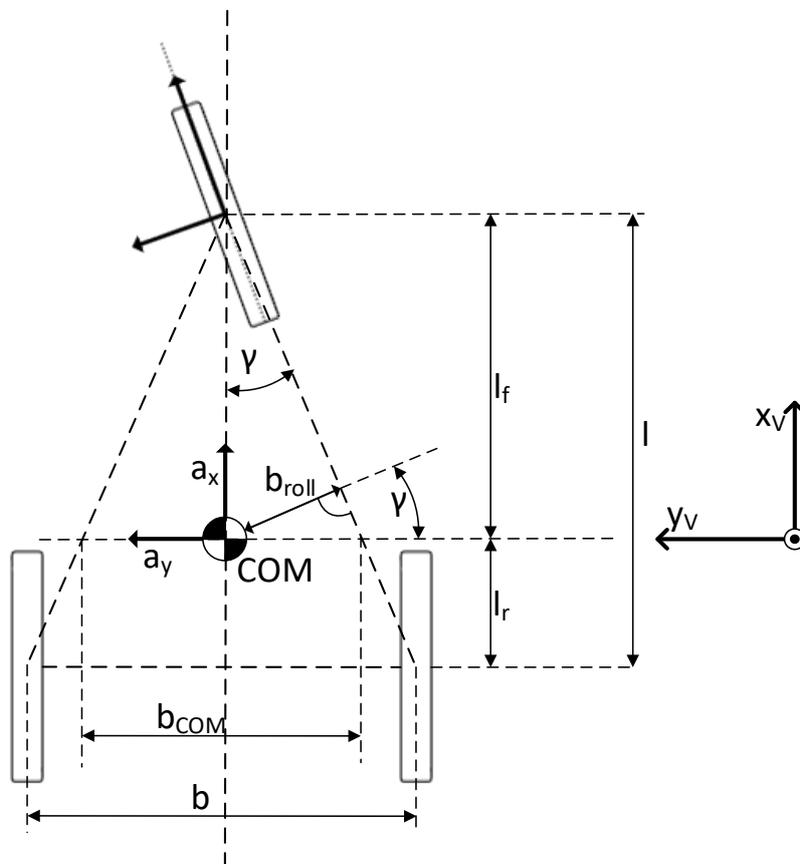


Abbildung 5.5: Draufsicht auf das Aufstandsdreieck des E-Trailers

$b_{COM}$  - Breite des Aufstandsdreieckes auf Höhe des Schwerpunktes

$b_{roll}$  - Abstand des Schwerpunktes zur Kippachse

$\gamma$  - spitzer Winkel des Aufstandsdreieckes

Die Breite des Aufstandsdreiecks  $b_{COM}$  kann aus den geometrischen Parametern und den Strahlensätzen berechnet werden.

$$b_{COM} = b \cdot \frac{l_f}{l} \quad (5.11)$$

Die kürzeste Entfernung des Schwerpunktes  $COM$  zur Kippachse ist das senkrechte Lot  $b_{roll}$  auf diese. Der Winkel  $\gamma$  lässt sich aus den trigonometrischen Beziehungen und den Fahrzeugparametern bestimmen.

$$b_{roll} = b_{COM} \cdot \cos \gamma = b_{COM} \cdot \frac{l}{\sqrt{l^2 + \frac{b^2}{4}}} \quad (5.12)$$

Entlang des berechneten Hebelarms zur Kippachse wirken dann auch die Komponenten der Fahrzeugbeschleunigungen in X und Y-Richtung.

$$a_{roll} = a_y \cdot \cos \gamma - a_x \cdot \sin \gamma \quad (5.13)$$

Mit der Beschleunigung  $a_{roll}$  entlang der Kippbreite  $b_{roll}$  kann ein Momentengleichgewicht um den Punkt  $K$  für den statischen Fall gebildet werden, wie in der folgenden Abbildung 5.6 gezeigt wird.

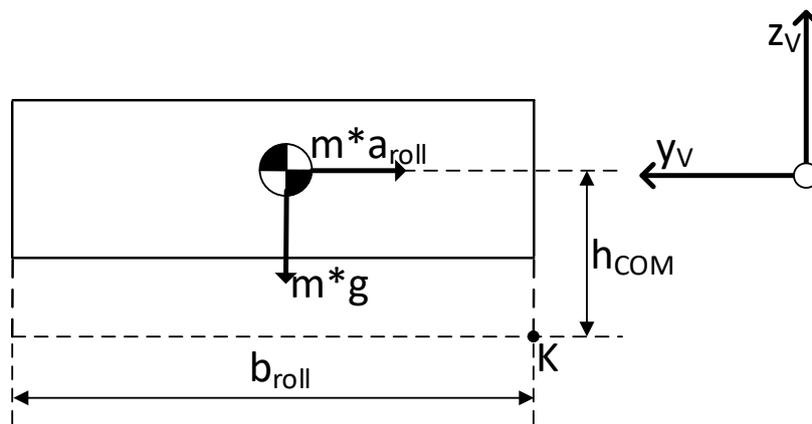


Abbildung 5.6: Statische Kräfte am Fahrzeugquerschnitt zur Ermittlung der Kippstabilität

$$a_{roll} \cdot h_{COM} \stackrel{!}{<} g \cdot \frac{b_{roll}}{2} \quad (5.14)$$

Die Querbewegung  $a_{roll}$  wird dabei hauptsächlich durch die Fahrgeschwindigkeit und dem Kurvenradius bzw. dem Lenkwinkel gebildet. Mit diesen Teilmodellierungen des Fahrzeuges lassen sich einzelne Steuerungskomponenten der für die Automatisierungen simulativ erproben.

### 5.10.2 Entwurf der Funktionen des E-Trailers

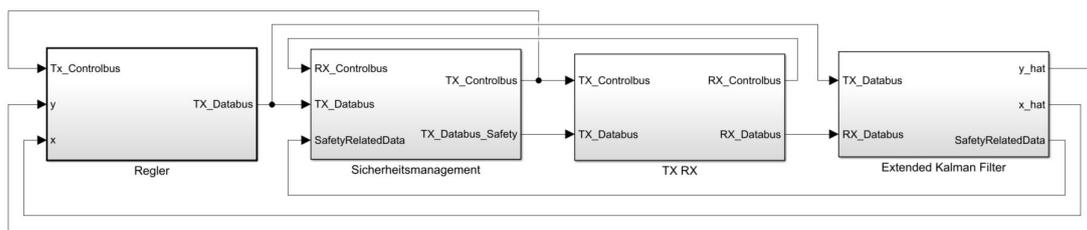


Abbildung 5.7: Struktur der E-Trailer Funktionalitäten

Eines der wichtigsten Funktionsbausteine einer Automatisierung ist das Sicherheitsmanagement (Vergleich Abb. 4.6 und 5.7). Es spiegelt die einzelnen Betriebszustände des Mikromobils als Zustände mit Transitionen wider und stellt die zugehörigen Konfigurationen der Ausgänge. Die Transitionsbedingungen sollten dabei immer eindeutig sein oder mit festgelegten Prioritäten versehen werden, um den entsprechenden Zustand einzunehmen. Im Anhang A.2 befindet sich ein Schema des E-Trailer Sicherheitsmanagements, das im Wesentlichen mit den Betriebszuständen aus Abb. 4.5 übereinstimmt. Mit Hilfe der programmierten Zustandsmaschine kann das Transitionsverhalten der Betriebszustände aufgrund vorgegebener Eingangssignale überprüft werden. Dazu können sowohl die erwarteten als auch durch Fehlanwendung hervorgerufene Eingangssignal-Kombinationen und daraus resultierende Zustände vor der Implementierung simulativ evaluiert werden.

Ein weiteres Beispiel für die Umsetzung der Anforderungen und Sicherheitsmechanismen im Zustandsautomaten ist die Kodierung binärer Eingangssignale. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass ein abgerissenes Kabel als offener Eingang (logische Null) immer den sichereren Systemzustand verursacht. Beim E-Trailer wird der Zustand „Drive“ nur eingenommen, wenn unter anderem das Signal für „Angekuppelt“ geöffnet ist und eine logische Null im Zustandsautomaten ergibt. Sollte in der Praxis am Vehikel die Signalleitung des Kupplungsschalters abreißen bleibt eine logische Null am Zustandsautomat, um den sichereren Zustand "Drive" beizubehalten. In diesem Fall soll der Fahrer des Zugfahrzeuges nicht durch ein abruptes Bremsen des mechanisch angekuppelten Anhängers gefährdet werden. Bei intakten Signalleitungen und einem Abreißen der Kupplung liegt der logische Pegel 1 an und der Zustand „Stop“ eingenommen, der den abgekuppelten Anhänger zum Schutz anderer Verkehrsteilnehmer zum Stillstand bringt.

Das Sicherheitsmanagement erhält die Eingangssignale von der Mensch-Maschine-Schnittstelle in Form des TX-RX-Blockes (Vergleich Abb. 5.7). Dieser leitet die Signale als RX-Controlbus an das Sicherheitsmanagement, welches anhand der Informationen den zugehörigen Betriebszustand einnimmt. An den Zustand gekoppelt ist die Sollwertvorgabe für den Regler, die Bestandteil des TX-Controlbus ist. Die ermittelten Stellgrößen des Reglers (TX-Databus) werden durch das Sicherheitsmanagement geleitet und bei Notfällen entsprechend überschrieben, bevor sie als Anforderung über den TX-RX-Block an die Aktorik übertragen werden. Das Sicherheitsmanagement überwacht die Eingaben der HMI, steuert die Sollwertvorgabe der Regelung und überschreibt bei entsprechendem Zustand die Stellgröße der Aktoren.

Mit dem Sicherheitsmanagement als grundlegenden Funktionsbaustein können weitere Fahrfunktionen wie z.B. der Regler entworfen werden. Im Projekt E-Trailer soll die Regelung die auftretenden Zugkräfte an der Deichsel kompensieren. Als Stellgröße dienen dafür die Antriebe des Anhängers. Die Basis für den Reglerentwurf des Summenreglers bildet dabei die Übertragungsfunktion vom Antriebsmoment zur Zug-/Druckkraft. Zur Bestimmung

dieser Übertragungsfunktion werden die auftretenden Kräfte am Zugfahrzeug, an der gekoppelten Deichsel und am Anhänger betrachtet (siehe nachfolgende Abbildung).

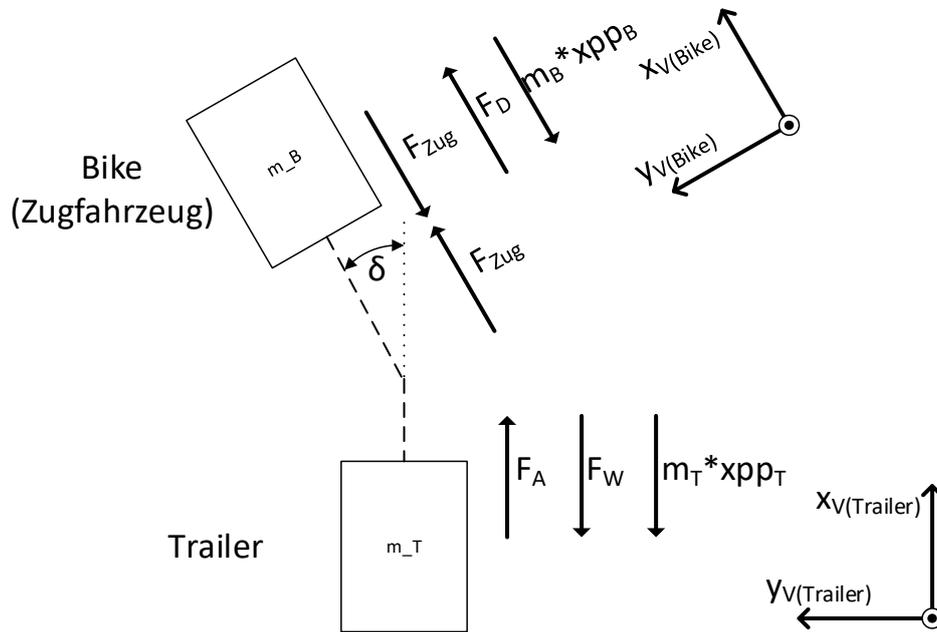


Abbildung 5.8: Kräfte am Zugfahrzeug und Anhänger

Bildet man einen Schnitt zwischen Zugfahrzeug und Anhänger ergibt sich als Schnittkraft die Zugkraft in der Deichsel. Es ergibt sich ein Kräftegleichgewicht für das Zugfahrzeug und ein weiteres für den Trailer.

$$m_T \cdot \ddot{x}_T = F_{Zug} \cdot \cos \delta + F_A - F_W \quad (5.15)$$

$$m_B \cdot \ddot{x}_B = F_D - F_{Zug} \quad (5.16)$$

Als Zwangsbedingung zur Kopplung der beiden Bewegungsgleichungen wird bei kleinen Lenkwinkeln angenommen, dass die Beschleunigungen annähernd gleich sind.

$$\ddot{x}_T \approx \ddot{x}_B \quad (5.17)$$

Die Gleichungen 5.15 und 5.16 können umgestellt werden und in die Zwangsbedingung 5.17 eingesetzt werden.

$$\frac{F_{Zug} \cdot \cos \delta + F_A - F_W}{m_T} = \frac{F_D - F_{Zug}}{m_B} \quad (5.18)$$

Die Antriebskraft  $F_A$  kann durch den Term  $\frac{M_\Sigma}{r_T}$  ersetzt werden und die Gleichung 5.18 nach  $F_{Zug}$  umgestellt werden. So ergeben sich proportionale Übertragungsverhalten aller Eingangs- bzw. Störgrößen zur Zugkraft.

$$F_{Zug} = \begin{bmatrix} -\frac{m_B}{(m_B \cdot \cos \delta + m_T) \cdot r_T} & \frac{m_T}{m_B \cdot \cos \delta + m_T} & \frac{m_B}{m_B \cdot \cos \delta + m_T} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_\Sigma \\ F_D \\ F_W \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

Zur Gleichung 5.19 ist anzumerken, dass das reale Übertragungsverhalten aufgrund von Schlupf- und Fahrwerkeinflüssen auch einen dynamischen Anteil besitzt. Da die Parameter der Dynamik in dieser Phase des Entwurfs nicht abgeschätzt werden können, wird die Strecke als proportionales Verhalten approximiert.

In der nachfolgenden Abbildung ist die Regelstrecke nochmal als Blockschaltbild aufgeführt.

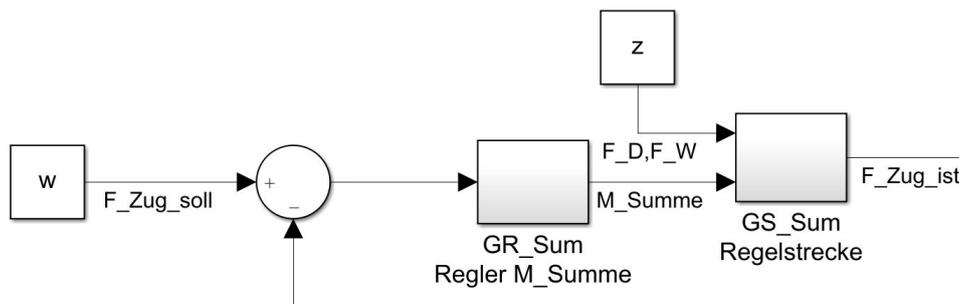


Abbildung 5.9: Blockschaltbild des Summenreglers mit Strecke

Das Regelungsziel liegt in diesem Anwendungsfall in der guten Sollgrößenfolge. Die Dimensionierung der Reglerparameter erfolgt anhand der Übertragungsfunktion  $\frac{F_{Zug}}{M_\Sigma}$ .

$$G_{S,Sum}(i\omega) = \frac{F_{Zug}}{M_\Sigma} = -\frac{m_B}{(m_B \cdot \cos \delta + m_T) \cdot r_T} \quad (5.20)$$

Für die Reglerstruktur des Summenreglers der Antriebsmomente wird ein PI-Regler gewählt, um stationäre Genauigkeit der Regelgröße zu erzielen.

$$G_{R,Sum}(i\omega) = K_{P,Sum} + K_{I,Sum} \cdot \frac{1}{i\omega} \quad (5.21)$$

Die Übertragungsfunktion der offenen Kette des Summenreglers lautet dann wie folgt.

$$\begin{aligned}
 G_{0,Sum}(i\omega) &= G_{R,Sum}(i\omega) \cdot G_{S,Sum}(i\omega) \\
 &= \left( K_{P,Sum} + K_{I,Sum} \cdot \frac{1}{i\omega} \right) \cdot \left( -\frac{m_B}{(m_B \cdot \cos \delta + m_T) \cdot r_T} \right)
 \end{aligned}
 \tag{5.22}$$

Zusätzlich zum Summenregler zur Zugkraftkompensation an der Anhängerdeichsel muss ein Differenzregler entworfen werden, der das Antriebsmoment auf das kurveninnere und das kurvenäußere Rad aufteilt. Zur Auslegung der Reglerparameter wird dafür die Übertragungsfunktion von der Sollgierrate zur Istgierrate betrachtet. Zunächst wird die Sollgierrate aus dem aktuellen Lenkwinkel und der Fahrzeuggeschwindigkeit ermittelt. Dazu werden die Geschwindigkeiten am Vorderrad des Lenkwinkels betrachtet (siehe folgende Abbildung 5.11)

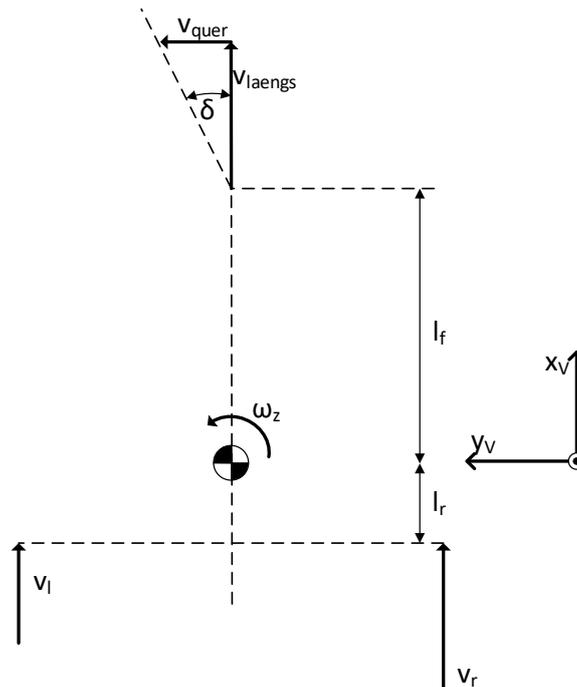


Abbildung 5.10: Geschwindigkeiten der Radaufstandspunkte des E-Trailers

Der Lenkwinkel  $\delta$  verursacht eine Längs- und Quergeschwindigkeit am vorderen Radaufstandspunkt.

$$\tan \delta = \frac{v_{quer}}{v_{laengs}}
 \tag{5.23}$$

Die Längsgeschwindigkeit wird mit dem Mittel der beiden Radgeschwindigkeiten angenähert, die Quergeschwindigkeit ergibt sich aus der Gierrate und dem Abstand vom Schwerpunkt zur Vorderachse.

$$v_{quer} = \omega_Z \cdot l_f \quad (5.24)$$

Mit der Kleinwinkelnäherung  $\tan \delta \approx \sin \delta \approx \delta$  und 5.24 eingesetzt in 5.24 ergibt sich nach Umstellung.

$$G_V(i\omega) = \frac{\omega_Z}{\delta} = \frac{(\omega_l + \omega_r) \cdot r_T}{2 \cdot l_f} \quad (5.25)$$

Gleichung 5.25 bildet aus dem Lenkwinkel der Deichsel die Sollwertvorgabe für die Gierrate des Anhängers. Im nächsten Schritt wird die Übertragungsfunktion vom Differenzmoment zur aktuellen Gierrate benötigt. Zunächst wird dafür der Zusammenhang zwischen Differenzmoment und Differenzraddrehzahl  $\omega_{Diff}$  benötigt.

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_{Diff} &= \dot{\omega}_l - \dot{\omega}_r \\ M_{Diff} &= M_l - M_r \end{aligned} \quad (5.26)$$

Die Gleichungen der Raddynamiken  $\dot{\omega}_l, \dot{\omega}_r$  werden approximiert.

$$\dot{\omega}_i \approx \frac{1}{m_T \cdot r_T^2} \cdot M_i + \Sigma F_{längs} \cdot r_T \quad , \quad i \in \{l, r\} \quad (5.27)$$

Aus 5.26 und 5.27 ergibt sich.

$$G_{S1}(i\omega) = \frac{\omega_{Diff}}{M_{Diff}} \approx \frac{1}{i\omega} \cdot \frac{1}{m_T \cdot r_T^2} \quad (5.28)$$

In Gleichung 5.28 werden die konstanten Längskräfte  $F_{längs}$  der einzelnen Antriebsräder vernachlässigt, da sie annähernd gleich sind. Die Übertragungsfunktion von Differenzmoment zu Differenzdrehzahl wird durch ein integrales Verhalten beschrieben.

Die Modellierung der aktuellen Gierrate kann mit Hilfe der Radgeschwindigkeiten erfolgen. Dazu wird der Strahlensatz zum Momentanpol angewendet (siehe Abbildung 5.11). Da sich Mikromobile mit relativ langsamen Geschwindigkeiten fortbewegen, wird hier ein einfaches kinematisches Modell verwendet.

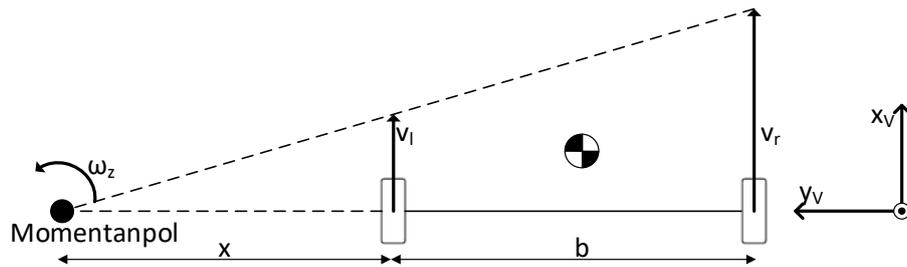


Abbildung 5.11: Ermittlung der Gierrate aus den Radgeschwindigkeiten

Die Anwendung des Strahlensatzes ergibt.

$$\frac{x}{v_l} = \frac{x + b}{v_r} \quad (5.29)$$

Die Gierrate ergibt sich dann aus den jeweiligen Geschwindigkeiten.

$$\omega_Z = \frac{v_l}{x} \quad (5.30)$$

Gleichung 5.29 wird nach  $x$  umgestellt und in 5.30 eingesetzt. Dadurch erhält man eine Übertragungsfunktion von der Differenzraddrehzahl zur Gierrate.

$$\omega_Z = \frac{(\omega_r - \omega_l) \cdot r_T}{b} \quad (5.31)$$

$$G_{S2}(i\omega) = \frac{\omega_Z}{\omega_r - \omega_l} = \frac{r_T}{b}$$

Der gesamte modellierte Regelkreis für das Differenzmoment sieht dann folgendermaßen aus.

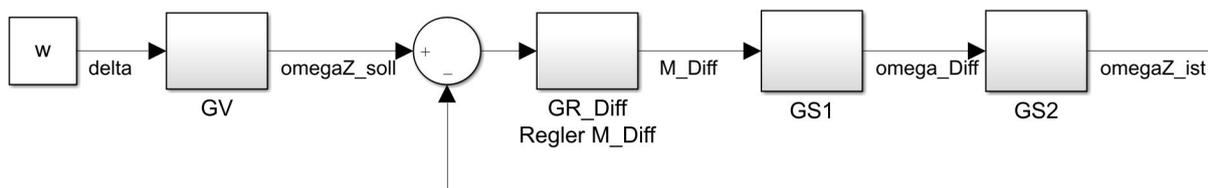


Abbildung 5.12: Blockschaltbild des Differenzreglers mit Strecke

Die modellierte Regelstrecke setzt sich aus den beiden Teilstrecken zusammen.

$$G_{S,Diff}(i\omega) = G_{S1}(i\omega) \cdot G_{S2}(i\omega) = \frac{1}{i\omega \cdot m_T \cdot r_t \cdot b} \quad (5.32)$$

Als Reglerstruktur wird wieder die Struktur aus 5.21 gewählt, dadurch ergibt sich eine offene Kette.

$$G_{0,Diff}(i\omega) = K_{P,Diff} \cdot \frac{1}{i\omega \cdot m_T \cdot r_t \cdot b} + K_{I,Diff} \cdot \frac{1}{(i\omega)^2 \cdot m_T \cdot r_t \cdot b} \quad (5.33)$$

Es gibt zwei parallele Regelkreise, die ein Summenmoment und ein Differenzmoment als Reglerausgang berechnen. Die Reglerausgänge müssen sich in ihrer Struktur ergänzen und dürfen nicht konkurrierend auf die beiden realen Stellgrößen  $M_l$  und  $M_r$  wirken. Daher erfolgt eine Aufteilung von Summen- und Differenzmoment zu linkem und rechten Antriebsmoment.

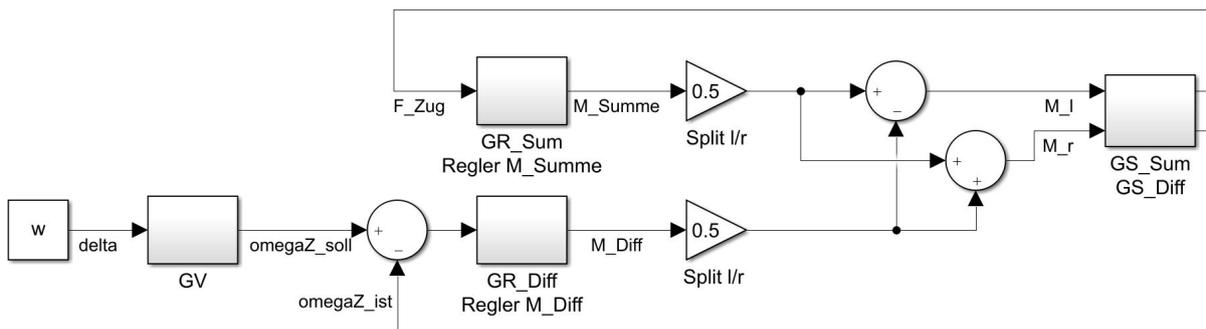


Abbildung 5.13: Blockschaltbild des Gesamtreglers für Zugkraft und Gierrate

Die Abbildung 5.13 zeigt das Zusammenwirken der beiden Regelkreise auf die gleichen Stellgrößen. Die zentrale Funktionalität der Zugkraftkompensation wird mit der Stellgröße  $M_{Summe}$  erzeugt. Die beiden Regler konkurrieren nicht miteinander, da das berechnete Differenzmoment auf einer Antriebsseite addiert und auf der anderen Seite subtrahiert wird. Durch diese Überlagerung des Differenzmomentes auf den beiden Stellgrößen  $M_l, M_r$  bleibt das berechnete Summenmoment in Summe gleich. Die Dimensionierung der Reglerparameter erfolgt in 5.10.3.

Ein weiterer essentieller Funktionsbaustein eines Automatisierungssystems für Mikromobile ist das Beobachtermodul bzw. Filter. Dieser Baustein ist für die Regelung essentiell, da systematische und zufällige Messfehler verrauschte Signalverläufe verursachen. Eine Regelung mit ungefilterten Ist-Signalen hat dann Stellgrößen mit starken Gradienten zur Folge. Ein Ansatz der Signalfilterung ist die Verwendung von Filtern mit notwendiger Eckfrequenz oder höherer Ordnung. Die klassische Signalfilterung hat jedoch den Nachteil,

dass die Dynamik des Regelkreises stark beeinflusst wird und die Sollgrößenfolge unter einer zusätzlichen zeitlichen Verzögerung erfolgt. Um die Nachteile der klassischen Filterung zu umgehen, können modellbasierte Zustandsschätzer verwendet werden. Im Projekt E-Trailer sollen neben allen Messgrößen auch der Parameter Fahrzeuggesamtmasse durch ein Kalman-Filter Online geschätzt werden. Als Basis für den Filter dienen die Modellgleichungen aus Abschnitt 5.10.1.

Die Eingangsgrößen bestehen aus den Antriebsmomenten und dem Lenkwinkel.

$$u = [M_l, M_r, \delta]^T \quad (5.34)$$

Der Zustandsvektor besteht aus folgenden Elementen.

$$x = [\beta, v_x, \dot{v}_x, v_y, \dot{v}_y, \psi, \dot{\psi}, \omega_l, \omega_r, F_{Zug}]^T \quad (5.35)$$

Der Messgrößenvektor umfasst die Elemente.

$$y = [\dot{v}_x, \dot{v}_y, \dot{\psi}, \omega_l, \omega_r, F_{Zug}]^T \quad (5.36)$$

Das Differentialgleichungssystem des Anhängers wird folgendermaßen beschrieben.

$$\begin{aligned}
 \dot{\beta} &= -\dot{\psi} + \frac{1}{m \cdot v} \cdot \left( \left( -\frac{M_l + M_r}{r} - F_{Zug} \cdot \cos \delta + F_W \right) \cdot \sin \beta \right. \\
 &\quad \left. + (S_f \cdot \cos \delta + S_r + F_{Zug} \cdot \sin \delta) \cdot \cos \beta \right) + w_1 \\
 \dot{v}_x &= \frac{1}{m} \cdot \left( F_{Zug} \cdot \cos \delta + \frac{M_l + M_r}{r} - F_W \right) + w_2 \\
 \ddot{v}_x &= \frac{1}{T_{ax}} \cdot (\dot{v}_x - \dot{v}_{xf}) + w_3 \\
 \dot{v}_y &= -\frac{1}{m} \cdot \left( \left( -\frac{M_l + M_r}{r} - F_{Zug} \cdot \cos \delta + F_W \right) \cdot \sin \beta \right. \\
 &\quad \left. + (S_f \cdot \cos \delta + S_r + F_{Zug} \cdot \sin \delta) \cdot \cos \beta \right) + v \cdot \dot{\psi} + w_4 \\
 \ddot{v}_y &= \frac{1}{T_{ay}} \cdot (\dot{v}_y - \dot{v}_{yf}) + w_5 \\
 \dot{\psi} &= \int \ddot{\psi} dt + w_6 \\
 \ddot{\psi} &= \frac{1}{J_Z} \cdot \left( \frac{b}{2 \cdot r} \cdot (M_r - M_l) + (S_f \cdot \cos \delta + F_{Zug} \cdot \sin \delta) \cdot l_f - S_r \cdot l_r \right) + w_7 \\
 \dot{\omega}_l &= \frac{1}{J_r} \cdot \left( -J_Z \cdot \ddot{\psi} \cdot \frac{2 \cdot r}{b} + F_{Zug} \cdot \cos \delta + \frac{M_l}{r} - F_W \right) + w_8 \\
 \dot{\omega}_r &= \frac{1}{J_r} \cdot \left( J_Z \cdot \ddot{\psi} \cdot \frac{2 \cdot r}{b} + F_{Zug} \cdot \cos \delta + \frac{M_r}{r} - F_W \right) + w_9 \\
 \dot{F}_{Zug} &= 0 + w_{10} \\
 \dot{m} &= 0 + w_{11}
 \end{aligned} \tag{5.37}$$

Nach der Aufstellung der Gleichungen des Einspurmodells für den spezifischen Anwendungsfall des Anhängers müssen die nichtlinearen Zusammenhänge zur Implementierung eines Extended Kalman Filters am Arbeitspunkt linearisiert werden (siehe Gleichung 3.55 in Abschnitt 3.5.1). Zur Bildung der Jacobi-Matrix muss nach der Linearisierung um den Arbeitspunkt eine Diskretisierung der Dynamik-Matrix erfolgen. In diesem Fall wird das explizite Eulerverfahren verwendet.

$$\mathbf{J}(k) = \mathbf{A}(k) \cdot \Delta T + \mathbf{I} \tag{5.38}$$

Das Filter wird dann gemäß den Gleichungen 3.56 und 3.57 angewendet. Der Umfang der Fahrzustände aus 5.37 kann den Anforderungen entsprechend angepasst werden, indem z.B. die Online-Parameterschätzung der Fahrzeugmasse nicht mitberücksichtigt wird. Einfachere Fahrzeugmodelle für Zustandsschätzer mit einer reduzierten Gleichungsanzahl

und -komplexität können ebenfalls aus dem Gesamtmodell extrahiert werden. Der Entwurf eines Kalman-Filters wird zur Zustandsschätzung angewendet. Dadurch können die verrauschten Messsignale der günstigen Sensoren des Anhängers modellbasiert geglättet werden. Die gefilterten Zustände aus einem Schätzer können dann als Regelgröße verwendet werden. Insbesondere beim Trailer wird die Messgröße des Zugkraftsensors als Zustand des Schätzers geführt und kann über die Kovarianzen geglättet werden. Weiterhin sollen die gefilterten Längs- bzw. Querbeschleunigungen die Grundlage für die Nickstabilität bei starkem Beschleunigen und die Kippstabilität in Kurvenfahrten bilden.

### 5.10.3 Stabilität und Dimensionierung der Regler des E-Trailers

Der Zugkraftregelung des automatisierten Lastenanhängers wurde anhand von zwei Übertragungsfunktionen ( 5.20 & 5.32) modelliert, für die zwei separate Regler entworfen wurden. Die Antriebsmomente als Stellgrößen werden dabei vom Summen- und Differenzregler in nicht konkurrierender Parallelstruktur beeinflusst (Vergleich Abbildung 5.13). Vor dem Tunen der Parameter auf zeitliches Verhalten wird zunächst die Stabilität untersucht. Anhand der offenen Kette  $G_0(i\omega)$  kann die Stabilitätsbedingung nachgewiesen werden, indem überprüft wird, ob der Betrag der Funktion kleiner 1 ist. [64].

$$|G_0(i\omega)| \stackrel{!}{<} 1 \quad (5.39)$$

Der Betrag der Übertragungsfunktion der offenen Regelstrecke 5.22 lautet.

$$|G_0(i\omega)| = \sqrt{K_p^2 - \omega^2 \cdot K_I^2} \cdot \frac{m_B}{(m_B \cdot \cos \delta + m_T) \cdot r} \stackrel{!}{<} 1 \quad (5.40)$$

Zur Einhaltung des Stabilitätskriteriums muss die Ungleichung 5.40 über den gesamten Frequenzbereich erfüllt werden. Mit steigender Frequenz wird der Term unter der Wurzel negativ und der Betrag der offenen Kette besteht nur noch aus einem Imaginärteil. Dadurch wird die Ungleichungsbedingung mit steigender Frequenz unabhängig von den Massen erfüllt. Bei der Wahl von  $K_P$  und  $K_I$  muss im niedrigen Frequenzbereich die Masse von Zugfahrzeug und Anhänger als Zwangsbedingung berücksichtigt werden.

Im nächsten Schritt können die Parameter für ein dynamisches Verhalten anhand des geschlossenen Regelkreises dimensioniert werden. Dazu wird die Übertragungsfunktion gemäß Abbildung 5.9 von den Führungs- und Störgrößen zum Ausgang gebildet.

Zuerst wird die Übertragungsfunktion für die Sollgröße aufgestellt und analysiert.

$$\frac{F_{Zug}(i\omega)}{F_{Zugsoll}(i\omega)} = \frac{G_R(i\omega) \cdot G_S(i\omega)}{1 + G_R(i\omega) \cdot G_S(i\omega)} \approx \frac{1}{\frac{K_P \cdot G_S + 1}{K_I \cdot G_S} \cdot (i\omega) + 1} \quad (5.41)$$

Im charakteristischen Polynom aus 5.41 lässt sich die Zeitkonstante  $T$  anhand der Strecken und Reglerparameter beschreiben.

$$T = \frac{K_P \cdot G_S + 1}{K_I \cdot G_S} = \frac{K_P - \frac{(m_B \cdot \cos \delta + m_T) \cdot r_T}{m_B}}{K_I} \quad (5.42)$$

Da negative Zeitkonstanten physikalisch unplausibel sind, folgt aus dem Nenner der Gleichung 5.42 eine weitere Zwangsbedingung für die Reglerparameter.

$$K_P > \frac{(m_B \cdot \cos \delta + m_T) \cdot r_T}{m_B} \quad (5.43)$$

Anhand der Gleichung 5.41 sind die Zusammenhänge des dynamischen Verhaltens und der Reglerparameter erkennbar. Es empfiehlt sich, den Proportionalanteil  $K_P$  physikalisch plausibel einzustellen. Dafür wird der stationäre Zustand von der Zugkraft zur Stellgröße Antriebsmoment betrachtet und alle Zwangsbedingungen aus den Stabilitätsuntersuchungen beachtet. Nachdem der proportionale Regleranteil festgelegt wurde, kann  $K_I$  entsprechend dem gewünschten Zeitverhalten eingestellt werden.

Bei der Dimensionierung der Parameter des Differenzreglers werden zunächst die gleichen Stabilitätsbetrachtungen an der offenen Kette durchgeführt.

$$|G_0(i\omega)| = \frac{\sqrt{K_I^2 - K_P \cdot \omega^2}}{\omega^2 \cdot m_T \cdot r \cdot b} \stackrel{!}{<} 1 \quad (5.44)$$

$$\sqrt{K_I^2 - K_P^2 \cdot \omega^2} \stackrel{!}{<} \omega^2 \cdot m_T \cdot r \cdot b$$

Zur Erfüllung des Stabilitätskriteriums müssen die Reglerparameter  $K_I$ ,  $K_P$  entsprechend der Fahrzeugparameter Masse  $m_T$ , Radradius  $r$  und Achsstand  $b$  gewählt werden. Im oberen Frequenzbereich ist die Stabilität aufgrund des quadratischen Einflusses der Frequenz und dem imaginären Anteil des Wurzelterms gewährleistet. Für  $\omega = 1$  folgt:

$$\sqrt{K_I^2 - K_P^2} \stackrel{!}{<} m_T \cdot r \cdot b \quad (5.45)$$

Eine Zwangsbedingung der Reglerparameter in Abhängigkeit der Fahrzeugparameter ist entstanden.

Die Dimensionierung der Reglerparameter erfolgt anhand der Übertragungsfunktion vom Soll- zum Istzustand der Gierrate (Vergleich Abbildung 5.12).

$$\frac{\omega_{Z_{ist}}(i\omega)}{\omega_{Z_{soll}}(i\omega)} = \frac{\frac{K_P}{K_I} \cdot (i\omega) + 1}{\frac{m \cdot r \cdot b}{K_I} \cdot (i\omega)^2 + \frac{K_P}{K_I} \cdot (i\omega) + 1} \quad (5.46)$$

Das Übertragungsverhalten der Gleichung 5.46 weist eine DT2-Charakteristik auf. Der Einfluss des Vorhaltegliedes  $\frac{K_P}{K_I}$  muss anhand der gewählten Reglerparametrierung berücksichtigt und untersucht werden. Dabei ist die Lage der Polstelle im Frequenzgang von Bedeutung und es muss überprüft werden, ob sie kleiner oder größer als die Resonanzfrequenz des charakteristischen Polynoms ist. Im Falle der vorliegenden Übertragungsfunktion und der gewählten Dynamikparameter hat das Vorhalteglied keinen Einfluss auf den Frequenzgang und kann für die Reglerauslegung vernachlässigt werden. Das charakteristische Polynom weist hier die Dynamik eines Verzögerungssystems zweiter Ordnung auf, dadurch können die Reglerparameter anhand der Lehrbücher dimensioniert werden.

$$\begin{aligned} T &= \sqrt{\frac{m \cdot r \cdot b}{K_I}} \\ 2 \cdot D \cdot T &= \frac{K_P}{K_I} \end{aligned} \quad (5.47)$$

Mit der Festlegung einer wählbaren Zeitkonstante  $T$  und dem Dämpfungsgrad  $D$  können die zwei Reglerfaktoren  $K_P, K_I$  mit Hilfe der Fahrzeugparameter bestimmt werden.

#### 5.10.4 Simulation der Regler des E-Trailers

Unter Anwendung der Modellgleichungen 5.20, 5.32 für das Verhalten des Anhängers wurde ein Simulationsmodell (Vergleich Abbildung 5.13) zur Evaluierung der Reglerparameter erstellt. Für beide Dynamiken wurde ein Übertragungsverhalten anhand der Zeitkonstante  $T$  und Dämpfung  $D$  festgelegt. Die Reglerparameter der Summen- und Differenzregler wurden aufgrund der gewählten Dynamikparameter entsprechend den Gleichung 5.42 bzw. 5.47 ermittelt. Nach der Dimensionierung der Reglerparameter konnte die Simulation des geschlossenen Regelkreises durchgeführt werden, um die Sprungantworten auszuwerten.

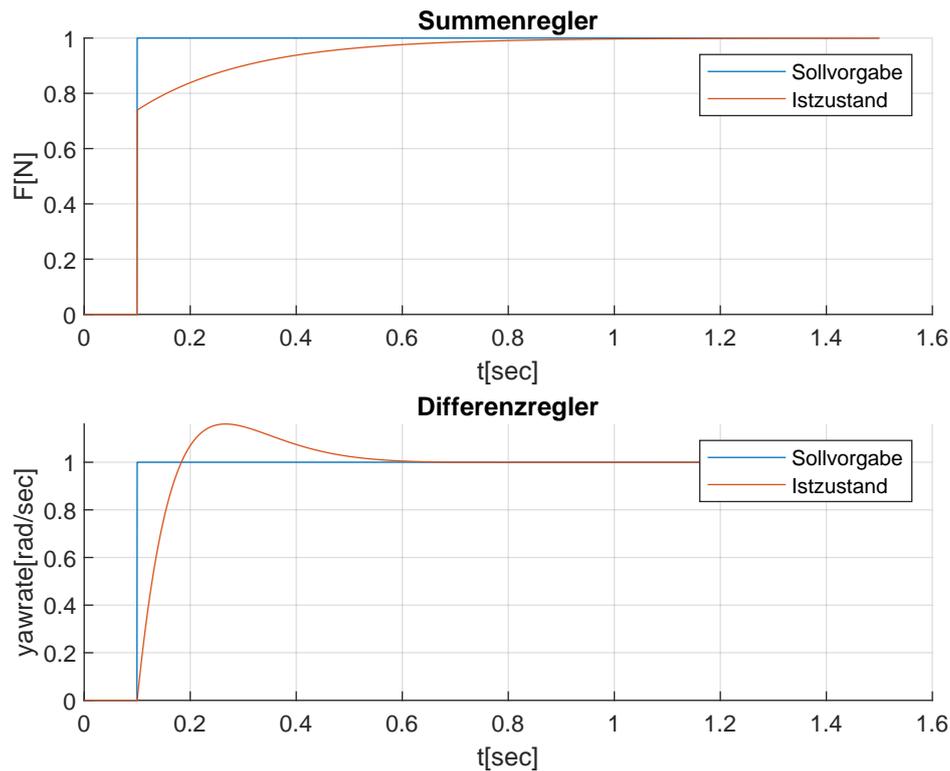


Abbildung 5.14: Simulierte Sprungantwort der Regelstrecken des E-Trailers

Auf Abbildung 5.14 werden die Sprungantworten (rot) der beiden separaten Regler dargestellt. In beiden Fällen kann der Sollwert innerhalb einer determinierten Zeit erreicht werden.

### 5.10.5 Variation der Fahrzeugmodellparameter für den Beobachter des E-Trailers

Für den automatisierten Lastenanhängers wurde der Entwurfsprozess auch für einen Fahrzustandsbeobachter durchlaufen, der zur Filterung von Messdaten angewendet werden soll. Im Simulationsmodell des automatisierten Lastenanhängers mit Fahrzustandsschätzer werden die Modellgleichungen aus 5.37 jeweils in zwei Teilsystemen verwendet. Zum einen werden sie zur Simulation der Fahrzeuglängs- und Querdynamik angewendet und zum anderen im Zustandsschätzer zur Filterung simulativ verrauschter Messdaten. Um die Auswirkungen von Parameteränderungen zu untersuchen werden nur die Modellparameter der Längs- und Querdynamikmodelle geändert, da diese den realen Versuchsträger widerspiegeln. Die Implementierung des Zustandsschätzers basiert auf Modellgleichungen, deren Dynamik an Fahrzeugparameter gebunden ist. Diese festen Parameter werden bei der Programmierung eines Steuergerätes einmalig angelegt und bestimmen dadurch die Performance des modellbasierten Filters. Änderungen der Fahrzeugparameter müssen

dann entweder permanent in der Steuerung nachgeführt werden oder durch eine robuste Auslegung des Beobachters gefiltert werden.

Bei näherer Betrachtung der Modellgleichungen des Anhängers gibt es einen Parameter, der einen gesonderten Einfluss auf die gesamte Dynamik hat. Die Fahrzeugmasse ist in allen Gleichungen direkt oder indirekt enthalten und kann beim Lastenanhänger bauartbedingt großen Änderungen während der Benutzung unterlegen. Nachdem der Zustandsschätzer in Abschnitt 5.10.2 entworfen und in 5.10.3 für den spezifischen Fall mit determinierter Fahrzeugmasse dimensioniert wurde, wird die Masse des Fahrzeugmodells der Längs- und Querdynamik variiert, um die Performance des Zustandsschätzers unter Parameterunsicherheiten zu analysieren. Dafür wird ein Fehlermaß  $Z$  der nachfolgenden Form angewendet.

$$Z = \int (\mathbf{x}_{opt}(t) - \mathbf{x}_{beo}(t))^2 dt \quad (5.48)$$

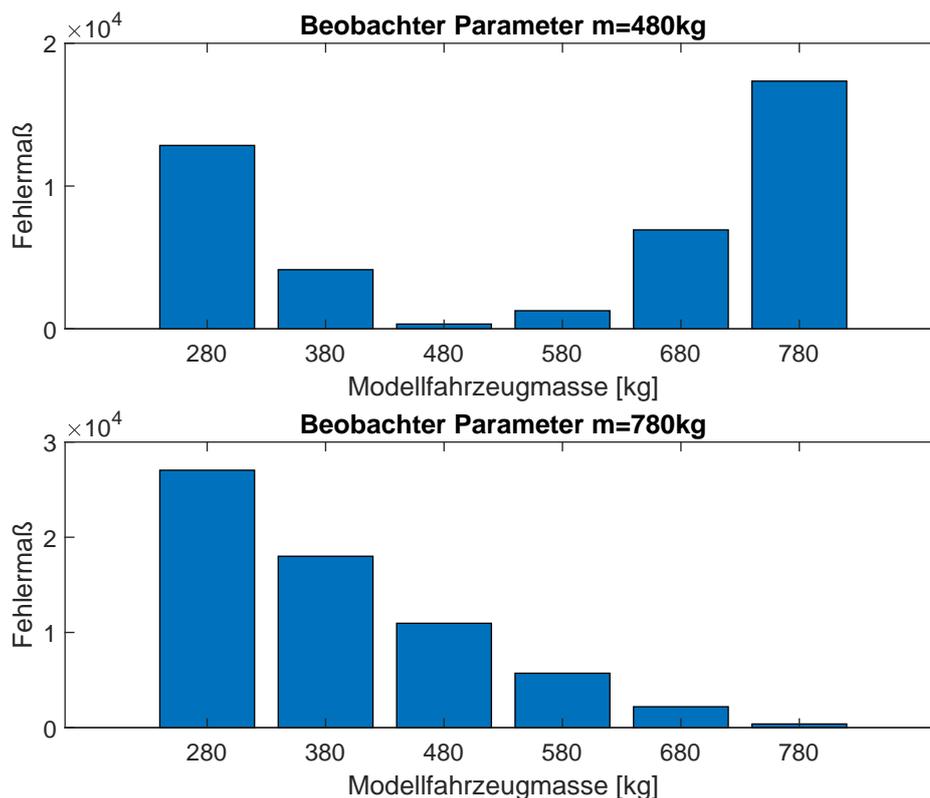


Abbildung 5.15: Fehlermaß des Beobachters bei unterschiedlichen Modellparametern

Abbildung 5.15 zeigt den Gesamtfehler aller Fahrzustände nach 5.48, die bei Änderung der Fahrzeugmasse des Anhänger-Einspurmodells entstehen, ohne den Parameter Masse in den Modellgleichungen des Beobachters anzupassen. Das geringste Fehlermaß tritt auf, wenn die Fahrzeugmasse des Anhängers dem Wert entspricht, mit der auch der Beobachter

parametriert wurde. In den einzelnen Zustandsverläufen und Zustandsschätzungen ist die Konvergenz bzw. Divergenz aufgrund einer Abweichung zwischen Fahrzeugmasse und Beobachterparameter deutlich sichtbar. Bei einer hohen Differenz zwischen Beobachterparameter und Fahrzeugmasse ist zu erkennen, dass nur die mit Messsignalen unterstützten Zustände aufgrund ihrer Rückführung konvergieren und die geschätzten Fahrzustände des Beobachters divergieren. Lediglich bei kleinen Abweichungen zwischen Fahrzeugmasse und Modellparameter ist der Beobachter in der Lage, die Fahrzustände mit geringfügigen Abweichungen zu schätzen. Der Einfluss des Parameters Fahrzeugmasse auf die Modelldynamik des Filters ist sehr hoch und sollte im Zustandsschätzer während des Live-Fahrbetriebs mit der tatsächlichen Masse permanent aktualisiert werden.

### 5.10.6 Mehrkörpersimulation des E-Trailers

Für den Entwurfsprozess des automatisierten Anhängers wurde die Software Matlab mit der Simulink Toolbox Simscape Multibody verwendet, um die entwickelten Funktionen in einem komplexeren Mehrkörpersystem simulativ zu evaluieren. Dafür wird ein Zugfahrzeug modelliert, welches mit dem Anhänger gekoppelt ist, damit die Fahrphysik des Gespanns analysiert werden kann. Dem Anwender der Software stehen neben den massebehafteten Körpern auch jegliche Form von Gelenken zur Verfügung, um die Bewegung zwischen Zugfahrzeug, Deichsel, Anhänger und Fahrbahn abzubilden. Mit Hilfe der Mehrkörpersimulation können alle Fahrzustände der modellierten Teilsysteme plausibilisiert werden und die Körperbewegungen zusätzlich graphisch dargestellt werden. Aufgrund der Darstellung in Form eines Videorenderings kann die Bewegung der simulierten Fahrmechanik mit den Erwartungen an ein reales Fahrzeugverhalten verglichen und beurteilt werden.

### 5.10.7 Reduzierung der Schwingungen auf die Rechentechnik am E-Trailer

Für das Projekt E-Trailer wurde zusätzlich zum gedämpften Fahrwerk eine Lagerung der Rechentechnik und Energieverteilung mit Hilfe von Metallgummipuffern gewählt. Diese Komponenten wurden alle auf einer DIN-Schiene montiert, während die DIN-Schiene selbst gedämpft am Chassis angebracht wurde. Dadurch werden Vibrationen auf alle Komponenten der Schiene unterbunden. Es gibt jedoch auch Komponenten, die aufgrund ihrer Spezifikationen nicht gedämpft gelagert werden können. Dazu gehört zum Beispiel die inertielle Messeinheit, deren Messergebnisse durch eine gedämpfte Lagerung beeinträchtigt werden. Weiterhin sind relativ schwere Komponenten wie z.B. die Akkus des Anhängers nicht zusätzlich schwingend gelagert, um Kollisionen zwischen dem beweglichen Akku und dem Fahrzeugchassis zu vermeiden. Bei Komponenten mit starker Wärmeentwicklung wird ebenfalls auf eine gedämpfte Lagerung verzichtet. Dazu gehören die Motorcontroller

des Antriebs, die ihre Wärme über eine Flächenverbindung an eine große thermische Masse leiten sollen. Generell muss bei der gedämpften Lagerung der elektromechanischen Komponenten auf deren beabsichtigte Funktion, Masse und thermischen Eigenschaften geachtet werden.

### 5.10.8 Auswahl der Rechentechnik des E-Trailers

Für die Auswahl der echtzeitfähigen Rechentechnik des automatisierten Anhängers muss die maximale Schrittweite anhand der Regler bestimmt werden. Da hier die Stabilität der gesamten Übertragungsfunktion untersucht werden muss, wird die geschlossene Regelkette betrachtet.

$$\begin{aligned}
 G(i\omega) &= \frac{F_{Zug}(i\omega)}{F_{ZugSoll}(i\omega)} = \frac{G_R(i\omega) \cdot G_S(i\omega)}{1 + G_R(i\omega) \cdot G_S(i\omega)} \\
 &= \frac{K_P \cdot \frac{m_B}{(m_B \cos \delta + m_T) \cdot r_T} + \frac{K_I}{i\omega} \cdot \frac{m_B}{(m_B \cos \delta + m_T) \cdot r_T}}{1 + K_P \cdot \frac{m_B}{(m_B \cos \delta + m_T) \cdot r_T} + \frac{K_I}{i\omega} \cdot \frac{m_B}{(m_B \cos \delta + m_T) \cdot r_T}} \\
 &= \frac{K_{Pm} + \frac{K_{Im}}{i\omega}}{1 + K_{Pm} + \frac{K_{Im}}{i\omega}} = \frac{K_{Pm} \cdot i\omega + K_{Im}}{i\omega + K_{Pm} \cdot i\omega + K_{Im}}
 \end{aligned} \tag{5.49}$$

Im folgenden Schritt wird das System aus dem Frequenzbereich wieder in den Zeitbereich transformiert.

$$(1 + K_{Pm}) \cdot \dot{F}_{Zug} + K_{Im} \cdot F_{Zug} = K_{Pm} \cdot \dot{F}_{ZugSoll} + K_{Im} \cdot F_{ZugSoll} \tag{5.50}$$

Zur Umwandlung der Differentialgleichung in eine Differenzgleichung wird z.B. das explizite Eulerverfahren angewendet. Mit Hilfe dieser Transformation kann die diskrete Übertragungsfunktion gebildet werden.

$$\frac{F_{Zugk}(z)}{F_{ZugSollk}(z)} = \frac{\frac{K_{Pm}}{\Delta T} \cdot z - \frac{K_{Pm}}{\Delta T} + K_{Im}}{\frac{1 + K_{Pm}}{\Delta T} \cdot z - \frac{K_{Pm}}{\Delta T} + K_{Im}} \tag{5.51}$$

Für die weiteren Stabilitätsbetrachtungen müssen die Polstellen der Übertragungsfunktion ermittelt werden.

$$0 = \frac{1 + K_{Pm}}{\Delta T} \cdot z - \frac{K_{Pm}}{\Delta T} + K_{Im} = z - \frac{K_{Pm}}{1 + K_{Pm}} + \frac{K_{Im} \cdot \Delta T}{1 + K_{Pm}} \tag{5.52}$$

5.52 umgestellt nach  $z$  ergibt.

$$z = \frac{K_{Pm}}{1 + K_{Pm}} - \frac{K_{Im} \cdot \Delta T}{1 + K_{Pm}} \quad (5.53)$$

Aus der Stabilitätsbedingung ergibt sich mit  $|z| < 1$ .

$$\begin{aligned} 1 &> \left| \frac{K_{Pm}}{1 + K_{Pm}} - \frac{K_{Im} \cdot \Delta T}{1 + K_{Pm}} \right| \\ 1 + K_{Pm} &> |K_{Pm} - K_{Im} \cdot \Delta T| \\ 1 &> K_{Im} \cdot \Delta T \end{aligned} \quad (5.54)$$

Anhand der Gleichung 5.54 ist die Zwangsbedingung der Parameter für die Stabilität ablesbar. Je größer der integrale Verstärkungsfaktor werden soll, desto kleiner muss die Schrittweite gewählt werden. Anhand des Beispiels konnte die Abhängigkeit der Reglerparameter zum Stabilitätskriterium nachgewiesen werden. Die Stabilität ist jedoch auch an das gewählte Diskretisierungsverfahren und Entwurfsverfahren gebunden und muss bei einer Änderung des Verfahrens erneut nachgewiesen werden.

## 5.11 Entwurf von Funktionen im Projekt Aura

Dieses Unterkapitel zeigt einen Entwurfsprozess des automatisierten Lastenrades 4.1.2. Der Entwurf wird anhand der Prozessschritte 5.1 bis 5.9 für den Querregler exemplarisch durchgeführt. Die Reglerfunktionalität wird anhand von Parameterstudien auf ihre Robustheit überprüft.

### 5.11.1 Modellbildung des automatisierten Lastenrades

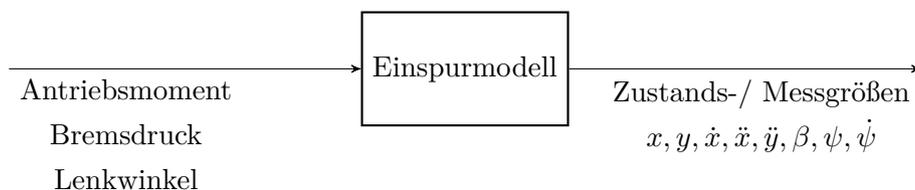


Abbildung 5.16: Funktionsorientiertes Blockschaltbild des Autonomen Lastenrades

Analog zum Anwendungsbeispiel E-Trailer werden für eine hochautomatisierte Fahrfunktion im Projekt Aura ebenfalls Modelle zur Abbildung des Systemverhaltens in Form von

Fahrzuständen benötigt. Das funktionsorientierte Blockschaltbild für das Systemverhalten zeigt die benötigten Ein- und Ausgangsgrößen 5.16. Für die Längs- und Querdynamik ist das klassische Einspurmodell prädestiniert, welches im Abschnitt 3.4.3 vorgestellt wird. Die beiden Räder der Vorderachse des Lastenrades Aura werden zur Vereinfachung zu einem Einspurmodell zusammengefasst. Da die automatisierte Fahrfunktion unter anderem auf Bahnführungsebene erfolgt, müssen zusätzlich die Positionen  $x, y$  im Referenzsystem gemäß 5.7 und auch der Gierwinkel  $\psi$  modelliert werden.

$$\psi = \int \dot{\psi} dt \quad (5.55)$$

Neben dem dynamischen Modell für die Entwicklung der Funktionsbausteine des Reglers und Fahrzustandsbeobachters müssen einfache längsdynamische Betrachtungen für den Energiebedarf des automatisierten Vehikels getätigt werden, um auch die logistischen Aspekte des Einsatzszenarios abzudecken. Die Grundlage bildet ein Längsdynamikmodell, welches nur einen Freiheitsgrad besitzt.

$$\dot{v} = \frac{1}{m} \cdot \left( \frac{M_{Motor}}{r_{Rad}} - F_{roll} - F_{steig} - F_{wind} \right) \quad (5.56)$$

Die modellierte Ist-Geschwindigkeit wird einem Geschwindigkeitsregler zugeführt, der von einem Fahrprofil die Sollvorgabe erhält und die Stellgröße Motormoment für die Differentialgleichung 5.56 berechnet. Der Gesamtfahrwiderstand  $F_{res}$  ergibt sich dann aus dem Beschleunigungswiderstand, dem Rollwiderstand  $F_{roll}$ , dem Steigungswiderstand  $F_{steig}$  und dem Luftwiderstand  $F_{wind}$  (siehe Gleichung 3.2).

$$F_{res} = m \cdot \dot{v} + F_{roll} + F_{steig} + F_{wind} \quad (5.57)$$

Da hier keine separate Betrachtung des Rollwiderstandes einzelner Räder vorgenommen wird, wird hier ein Gesamtrollwiderstand modelliert, der neben der Fahrzeugmasse  $m$  von einem spezifischen Rollwiderstandsbeiwert  $k_{roll}$  und dem Steigungswinkel  $\alpha$  abhängig ist. Der Term  $\frac{2}{\pi} \cdot \arctan(k_f \cdot v)$  ist dafür verantwortlich, dass der Rollwiderstand nur bei fahrendem Fahrzeug wirkt. Der Faktor  $\frac{2}{\pi}$  normiert hierbei die Arkustangensfunktion und der Formfaktor  $k_f$  beeinflusst das Argumentenintervall mit dem der Wert konvergiert.

$$F_{roll} = k_{roll} \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \arctan(k_f \cdot v) \quad (5.58)$$

Aus dem Gesamtfahrwiderstand  $F_{res}$  und der Fahrgeschwindigkeit wird die mechanische Leistung  $P_{mech}$  bestimmt. Damit kann über den Wirkungsgrad des Motors  $\eta_M$  die elektrische Leistung  $P_{el}$  des Fahrantriebes simuliert werden.

$$P_{el} = F_{res} \cdot v \cdot \frac{1}{\eta_M} \quad (5.59)$$

Zusammen mit der elektrischen Dauerleistung  $P_{Per}$  aller Verbraucher auf dem Lastenrad (z.B. Steuergeräte, Rechentechnik, Router, Sensoren) lässt sich mit Hilfe von Geschwindigkeitsprofilen (z.B. aus Fahrzyklen) die Gesamtleistung  $P_{Ges}$  bestimmen und über der Zeit die benötigte Energiemenge  $E_{el}$ .

$$E_{el} = \int P_{Ges} dt \quad (5.60)$$

Mit der berechneten Energiemenge kann jetzt entweder der Energiespeicher dimensioniert werden, oder bei bekannten Parametern der Batterie die Einsatzdauer des automatisierten Mikromobils abgeschätzt werden.

### 5.11.2 Funktionen des automatisierten Lastenrades

Im Projekt Aura werden die gleichen Funktionsbausteine wie beim automatisierten Anhänger, jedoch in komplexerer Ausfertigung, benötigt. Das Sicherheitsmanagement des Steuergerätes ist grundsätzlich ähnlich und entscheidet entsprechend der Eingangsbelegungen über die Stellgrößen zum Fahrzeug. Ein gravierender Unterschied beim Sicherheitsmanagement ist die Verteilung auf zwei Geräte, die in einem Fehlerfall unabhängig voneinander auf die gleichen Stellgrößen wirken können (Vergleich Abschnitt 4.4). Durch diese Redundanz wird das SIL der Funktionalität dekomponiert und für die zwei Hardware-Geräte herabgestuft. Dabei ist darauf zu achten, dass jeweils nur eines der Sicherheitssteuergeräte auf den Kommunikationsschnittstellen Anforderungen an die Aktorik sendet.

Der Beobachter des automatisierten Lastenrades verwendet ebenfalls ein Einspurmodell als Grundlage zur Filterung von Messwerten. Zusätzlich zu den Fahrzuständen des Einspurmodells werden die Fahrzeugpositionen in einem Referenzkoordinatensystem mit geschätzt, da das Level 4 Automatisierungssystem eine Bahnführung beinhaltet. Die ergänzenden Zustände werden gemäß 5.7 geschätzt und durch Messung von GPS-Koordinaten gestützt. Mit Hilfe der gemessenen Positionskoordinaten kann ein Abgleich zwischen der Sollposition und der Istposition erfolgen (siehe Abbildung 5.17).

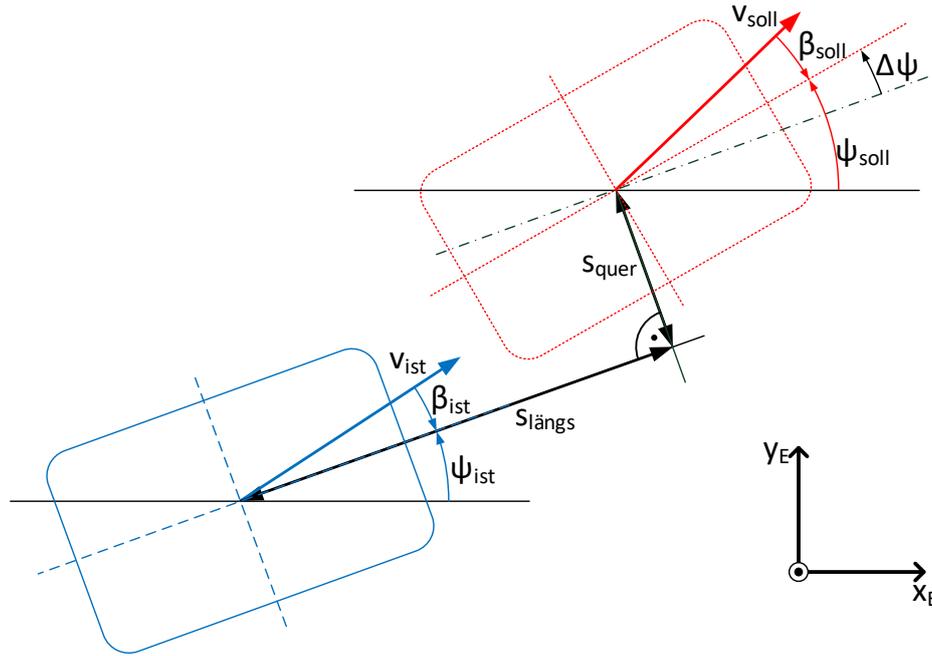


Abbildung 5.17: Längs- ( $s_{laengs}$ ) und Querabstand ( $s_{quer}$ ) von der Istposition (blau) zur Sollposition (rot) [65]

Die Berechnung des Längs- und Querabstandes erfolgt analog zur Koordinatentransformation 3.48.

$$\begin{bmatrix} s_{laengs} \\ s_{quer} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Delta\psi & \sin \Delta\psi \\ -\sin \Delta\psi & \cos \Delta\psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{soll} - x_{ist} \\ y_{soll} - y_{ist} \end{bmatrix} \quad (5.61)$$

Anhand der berechneten Abstände zwischen Zielposition und aktueller Position können Regelkreise für die Längs- und Querführung auf der Bahn des automatisierten Lastenrades entworfen werden. In [65] werden für den Entwurf der Regler Übertragungsfunktionen vom Antrieb zum Längsabstand bzw. vom Lenkwinkel zur Querablage aufgestellt.

$$\frac{s_{laengs}(i\omega)}{F_A(i\omega)} = \frac{1}{i\omega} \cdot \frac{1}{m \cdot i\omega + d} \quad (5.62)$$

$$\frac{s_{quer}(i\omega)}{\delta(i\omega)} = \frac{1}{(i\omega)^2} \cdot \frac{c_f \cdot l_f \cdot v_i^2}{J_Z \cdot v_i \cdot i\omega + c_f \cdot l_f^2 + c_r \cdot l_r^2} \quad (5.63)$$

Bei der Auswahl der Regler und Reglerstruktur müssen die jeweiligen Eigenschaften der Regelstrecken beachtet werden. Für die Längsregelung 5.62 wird ein kaskadierter Regler verwendet, der einen unterlagerten Geschwindigkeitsregelkreis beinhaltet und einen Längsregler, der den Positionsfehler in Längsrichtung  $s_{laengs}$  eliminieren soll. Abbildung 2.9 zeigt

eine kaskadierte Reglerstruktur. Für den Längsregelkreis des automatisierten Lastenrades ist der Zustand  $x_2$  die Geschwindigkeit, die vom Regler  $GR_2$  geführt wird. Die Längsabweichung  $s_{laeengs}$  wird in der Abbildung durch den Zustand  $x_1$  dargestellt und mit  $GR_1$  geregelt.

Die Regelstrecke des Querabstandes 5.63 besitzt einen doppelten I-Anteil, wodurch Pole des charakteristischen Polynoms auf der Imaginären Achse liegen und das System nur grenzstabil ist [64]. Zum Erreichen der Stabilität der Strecke wird eine parallele Reglerstruktur aus Querablage, Gierwinkel und Gierrate gewählt, um ein Entwurfsverfahren mit Polvorgabe anzuwenden.

$$\begin{aligned} \dot{s}_{quer} &= \Delta\psi \\ \Delta\dot{\psi} &= \Delta\omega_Z \\ \Delta\dot{\omega}_Z &= \frac{-c_f \cdot l_f^2 - c_r \cdot l_r^2}{J_Z \cdot v_B} \cdot \Delta\omega_Z + \frac{c_f \cdot l_f}{J_Z} \cdot \Delta\delta \end{aligned} \quad (5.64)$$

Ausgangssituation für die Polvorgabe ist das Zustandsraummodell der Form:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}' \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} \end{aligned} \quad (5.65)$$

Mit  $\mathbf{u}' = \mathbf{u} - \mathbf{K} \cdot \mathbf{x}$  ändert sich das System aus 5.65 zu.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= (\mathbf{A} - \mathbf{B} \cdot \mathbf{K}) \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} \end{aligned} \quad (5.66)$$

Mit den Faktoren der Rückführung  $\mathbf{K}$  kann das Systemverhalten durch Polvorgabe als asymptotisch stabil manipuliert werden. Abbildung 5.18 zeigt die Gleichungen aus 5.66 in grafischer Form.

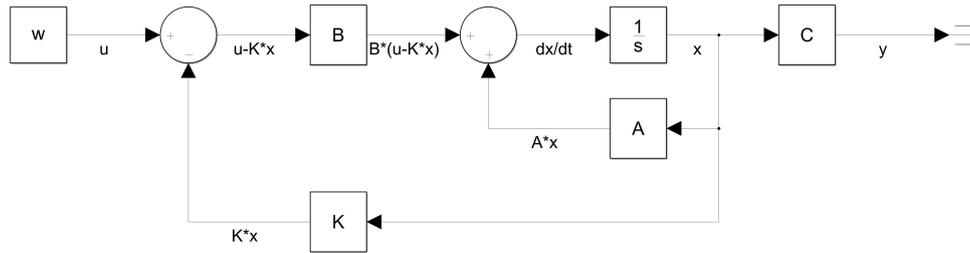


Abbildung 5.18: System in Zustandsraumdarstellung mit Polvorgabe durch Zustandsrückführung

Für die Reglerstruktur des Querregler ergibt aus 5.66 und der Abbildung 5.18 die parallele Struktur für Querablage, Gierwinkel und Gierrate.

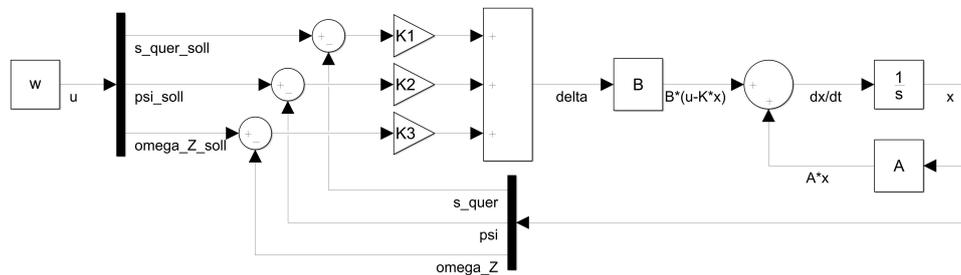


Abbildung 5.19: Zustandsrückführung des Querreglers im Projekt Aura

Abbildung 5.19 zeigt die Rückführung der Zustände Querablage  $s_{quer}$ , Gierwinkel  $\psi$  und Gierrate  $\dot{\psi}$ . Nach der Bildung der jeweiligen Regelfehler wird die Stellgröße Lenkwinkel mit den Verstärkungsfaktoren  $K_1, K_2$  und  $K_3$  erzeugt. Im nächsten Schritt müssen die entworfenen Reglerparameter dimensioniert werden, um die Stabilität des Systems zu gewährleisten.

### 5.11.3 Stabilität und Dimensionierung des Querreglers im Projekt Aura

Die Bahnregelung des automatisierten Lastenrades besteht aus einem Längsregler für den Ausgleich des Positions- und Geschwindigkeitsfehlers in Längsrichtung und einem Querregler für den Querversatzausgleich. Die Dimensionierung der Parameter des Längsreglers erfolgt anhand des gewünschten zeitlichen Verhaltens eines Längsdynamikmodells. Der Querregler muss aufgrund des doppelten I-Anteils in der Übertragungsfunktion vom Lenkwinkel zum Querversatz mit Hilfe der Polvorgabe stabilisiert werden.

Entsprechend den Gleichungen 5.64 und 5.65 sieht das Zustandsraummodell der Querdy-  
namik folgendermaßen aus.

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u}' \quad \text{mit} \quad A_{33} = \frac{-c_f \cdot l_f^2 - d_r \cdot l_r^2}{J_Z \cdot v_B} \quad (5.67)$$

Zunächst wird das charakteristische Polynom  $p(\lambda)$  der Dynamikmatrix  $\mathbf{A}$  bestimmt.

$$p(\lambda) = \det(\lambda \cdot \mathbf{I} - \mathbf{A}) = \det \begin{bmatrix} \lambda & -1 & 0 \\ 0 & \lambda & -1 \\ 0 & 0 & \lambda - A_{33} \end{bmatrix} \quad (5.68)$$

Für die asymptotische Stabilität des Polynoms müssen alle Eigenwerte einen negativen Realteil haben. Dafür wird eine Zieldynamik aufgestellt, die alle Eigenwerte mit den Konstanten  $c_1$  bis  $c_3$  in negativer Richtung auf der Zahlenachse verschieben soll. Da im letzten Matrixelement ein negatives Vorzeichen vor dem Term  $A_{33}$  steht, wird dieser bei der Verschiebung zusätzlich als positiver Wert verarbeitet.

$$\begin{aligned} p_{Ziel}(\lambda) &= \det \begin{bmatrix} \lambda + c_1 & -1 & 0 \\ 0 & \lambda + c_2 & -1 \\ 0 & 0 & \lambda - A_{33} + A_{33} + c_3 \end{bmatrix} \\ &= \lambda^3 + (c_1 + c_2 + c_3) \cdot \lambda^2 + (c_1 \cdot c_2 + c_1 \cdot c_3 + c_2 \cdot c_3) \cdot \lambda + c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \end{aligned} \quad (5.69)$$

Das charakteristische Zielpolynom  $p_{Ziel}$  wurde aufgestellt, um einen Koeffizientenvergleich mit dem Polplatzierungs-System inklusive Rückführung aus 5.66 vorzunehmen.

$$\begin{aligned} p_{cl} &= \det(\mathbf{A} - \mathbf{B} \cdot \mathbf{K}) = \det \begin{bmatrix} \lambda & -1 & 0 \\ 0 & \lambda & -1 \\ k_1 & k_2 & \lambda - A_{33} + k_3 \end{bmatrix} \\ &= \lambda^3 + (k_3 - A_{33}) \cdot \lambda^2 + k_2 \cdot \lambda + k_1 \end{aligned} \quad (5.70)$$

Aus dem Koeffizientenvergleich von  $p_{Ziel}$  und  $p_{cl}$  ergeben sich Lösungen zur Berechnung der Verstärkung  $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & k_3 \end{bmatrix}$ .

$$\begin{aligned}k_1 &= c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \\k_2 &= c_1 \cdot c_2 + c_1 \cdot c_3 + c_2 \cdot c_3 \\k_3 &= c_1 + c_2 + c_3 + A_{33}\end{aligned}\tag{5.71}$$

Für die Konstanten  $c_1$  und  $c_2$  müssen positive Werte gewählt werden, da sie die negativen Eigenwerte widerspiegeln (siehe Gleichung 5.69). Zusätzlich sollten die Werte für eine hohe Dynamik des Systems entsprechend hoch gewählt werden, da sie auch das Reziproke der Systemzeitkonstanten repräsentieren.

#### 5.11.4 Simulation des automatisierten Lastenrades

Für die Simulation wurden die Gleichungen für das Einspurmodell des automatisierten Rades 5.11.1 in Matlab/Simulink umgesetzt. Die Regelung des Längsversatzes erfolgt anhand der Position und Geschwindigkeit mit Hilfe eines kaskadierten Reglers, der als Stellgröße die Antriebskraft für den Eingang des Einspurmodells berechnet. Für die Regelung des Querversatzes wird die Zustandsrückführung gemäß 5.19 implementiert. Ausgangsgröße des Reglers ist der Lenkwinkel, der ein weiterer Eingang des Einspurmodells ist. Als Vorgabe für das gesamte Simulationsmodell wird eine Bahntrajektorie in Form eines Ovals mit zwei Gegengeraden verwendet. Eine weitere Eingangsgröße ist die Fahrgeschwindigkeit, mit der die Bahnfolge simuliert werden soll. In der Simulation können jetzt die Reglerparameter des Querversatzes in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit und Störgrößen evaluiert werden.

#### 5.11.5 Robustheit der Querregelung des automatisierten Lastenrades

Für die Untersuchungen zur Robustheit der Querregelung wird das Simulationsmodell aus 5.11.4 verwendet. Die Reglerparameter sind nach der Linearisierung des Fahrzeugmodells von spezifischen Fahrzeugparametern abhängig (siehe Gleichung 5.67). Geometrische Parameter wie zum Beispiel die Achsabstände zum Schwerpunkt oder andere Faktoren, z.B. die Fahrzeugmasse, können beim Anwendungsfall automatisiertes Lastenrad aufgrund des Einsatzszenarios 4.1.2 einmalig ermittelt und bei der Implementierung auf einem Steuergerät als feste Konstanten behandelt werden. Eine wichtige Größe bei der Dimensionierung der Reglerparameter ist die aktuelle Geschwindigkeit, mit der sich das automatisierte Vehikel fortbewegt.

Bei der Aufstellung der Gleichungen für die Reglerparameter 5.71 sind die Verstärkungsfaktoren des Zustandsraummodells 5.19 neben den Stabilitätsbedingungen und dem gewünschten hochdynamischen Verhalten insbesondere von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig. Da sich das automatisierte Mikromobil mit einem relativ kleinen und niedrigen Geschwindigkeitsbereich fortbewegt, kann im ersten Ansatz eine feste Basisgeschwindigkeit für die Dimensionierung der Reglerverstärkungen gewählt werden. Nachdem der Regler mit den eingestellten Verstärkungen am Fahrzeugmodell getestet wurde, sollte die Performance unter dem Einfluss von Störungen wie zum Beispiel abweichende Fahrzeugparameter oder Umweltveränderungen untersucht werden. Dafür werden Fahrsimulationen unter Beibehaltung der Reglereinstellungen mit separat variierenden Störungen durchgeführt. Die signifikanten Störgrößen der Querregelung sind die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit und Seitenwind. In Simulationen wird der der jeweilige Einfluss der Störungen auf die Fahrzustände unter Verwendung eines fest-parametrierten Querreglers separat voneinander betrachtet. Zur Beurteilung der Güte kann ein Fehlermaß  $Z$  der nachfolgenden Form angewendet werden.

$$Z = \int (s_{quer}(t)^2 + \Delta\dot{\psi}(t)^2 + \Delta\psi(t)^2) dt \quad (5.72)$$

Das Fehlermaß 5.72 wurde in Abhängigkeit variierender Reglerparameter genutzt, um deren Einfluss bei einer gleichbleibenden Fahrgeschwindigkeit zu untersuchen. Die Reglerparameter des Querreglers resultieren aus der analysierten Regelstrecke (siehe Gleichung 5.67), die einem eindeutigen Einfluss der aktuellen Fahrgeschwindigkeit unterliegt. Die Fahrgeschwindigkeit hat demzufolge während der Bahnregelung auch einen Einfluss auf die Dynamik des Querversatzes. Das geringste Fehlermaß wurde bei den Reglerparametern erwartet, die passend zur simulierten Geschwindigkeit sind. Aufgrund der Größenordnung und geringen Differenzen zwischen den Fehlern  $Z$  kann in der Simulation kein eindeutiger Nachweis zwischen Fehlermaß und korrelierenden Reglerparametern zur Geschwindigkeit erbracht werden. Zusätzlich wurde der Querversatz bei unterschiedlichen Reglerparametern für gleichbleibende Geschwindigkeiten analysiert, um die Robustheit der Reglerparameter zu ermitteln. Die simulierten Querabweichungen liegen dabei alle innerhalb eines tolerierbaren Maßes. In den durchgeführten Simulationen konnte keine Abhängigkeit der Reglerparameter von der Fahrgeschwindigkeit festgestellt werden. Dieser Zusammenhang ist vor allem durch die geringen Fahrgeschwindigkeiten und einem geringen Einfluss auf die Querdynamik des automatisierten Lastenrades zu begründen. Als Konsequenz kann auf den adaptiven Regler für die Querdynamik verzichtet werden. Bei höheren Fahrgeschwindigkeiten eines Mikromobils sollte deren Einfluss auf die Querregelung jedoch nochmals analysiert werden.

### 5.11.6 Wärmemanagement des automatisierten Lastenrades

Beim Kühlungskonzept des Projektes Aura wurden mehrere Ansätze zur Wärmeleitung verfolgt. Der Motorcontroller des Antriebes leitet seine Wärme über eine Gehäusefläche an den Fahrzeugrahmen weiter. Die montierte Rechentechnik besteht aus passiven Einzelsystemen, die ihre Wärme per Konvektion über die Kühlrippen an die umgebende Luft abgeben. Da die Rechentechnik in einem geschlossenen Gehäuse untergebracht wird, muss die erwärmte Luft nach außen geführt werden. Dafür ist ein aktives Lüftersystem notwendig, damit die Wärme der passiven Rechentechnik-Kühlung durch einen zusätzlichen Luftstrom an die Umgebung abgeführt werden kann. Für Mikromobile muss im spezifischen Fall eine Entscheidung getroffen werden, welche Kühlung der mechatronischen Systeme in Frage kommt. Ausschlaggebend ist immer der Temperaturbereich, bei dem die Komponenten noch innerhalb ihrer Parameter fehlerfrei funktionieren. Diese Temperaturgrenzen werden vor allem bei rechenintensiver Technik und leistungselektronischer Stellglieder schnell erreicht, wenn diese durch zusätzliche Gehäuse gekapselt werden.

### 5.11.7 Auswahl der Schnittstellen des automatisierten Lastenrades

Im Projekt Aura werden diverse Schnittstellen zur Automatisierung der Fahraufgabe benötigt. Die Schnittstellen werden im Projekt auf Low-Level-Ebene und High-Level-Ebene unterschieden. Auf der Low-Level-Ebene befinden sich die zeitkritischen Steuerungen und Sensoren/Aktoren für Antrieb, Bremse und Lenkung. Aufgrund der Vielzahl der Sensoren, Aktoren und Steuergeräte der Low-Level-Ebene wurde eine Bus-Topologie zum Datenaustausch gewählt, da Informationen mit geringem Verdrahtungsaufwand von mehreren Netzwerkteilnehmern empfangen werden können. Bei der Wahl der Bus-Topologie spielt die Entfernung zu den einzelnen Peripheriegeräten aufgrund der Baugröße des Lastenrades eine sehr untergeordnete Rolle. Der Ausfall von Komponenten kann im Netzwerk von mehreren Steuergeräten detektiert werden. Als Kommunikationsprotokoll wurde CANopen gewählt, weil damit eine große Auswahl an Produkten aus der Automatisierungstechnik kommerziell verfügbar sind. Weiterhin kann die Übertragungsrate auf dem Bus entsprechend der nötigen Zykluszeit der Regelkreise konfiguriert werden. Weitere Schnittstellen auf Low-Level-Ebene sind digitale Signale von zustandssteuernden Schaltern wie z.B. dem Notaus, die aufgrund des Sicherheitsmanagements parallel zum Datenbus als separate Leitungen und Signale zu den Steuergeräten geführt und von deren digitalen Ein-/Ausgängen ausgewertet werden. Die Schaltsignale sollen eine Redundanz zum Datenbus bilden, um bei einem Ausfall des Bus-Systems dennoch einen sicheren Zustand erreichen zu können.

Auf der High-Level-Ebene werden Bahn- und Routenplanungen durchgeführt, deshalb ist die Datenübertragung weniger zeitkritisch als auf der Low-Level-Ebene. Es werden jedoch sehr große Datenmengen auch aufgrund der Umfeldsensorik zwischen den Rechensystemen ausgetauscht. Zum Transfer der hohen Datenmengen auf der High-Level-Ebene ist daher das Internetprotokoll am geeignetsten. Dieses ist On-Board kabelgebunden ausgeführt und als Verbindung zum Leitrechner Over-The-Air per WLAN oder LTE.

In der Entwurfsphase wurde das Gesamtsystem automatisiertes Mikromobil anhand der Anforderungen des Lastenheftes modelliert, um damit die Funktionalitäten des Automatisierungssystems zu entwickeln. Die dadurch entstandene Wirkkette bildet die Grundlage zur Auswahl von Hardwarekomponenten und kann bei späteren Parameteränderungen iterativ durchlaufen werden, um Funktionsparameter der Automatisierung anzupassen.

## 6 Implementierung eines automatisierten Mikromobils

Im vorherigen Kapitel wurden Funktionen für automatisierte Mikromobile entworfen, die im nächsten Schritt in einem Gesamtsystem integriert und in Betrieb genommen werden sollen. Dafür müssen zuerst vorbereitende Maßnahmen getroffen werden, indem die Hardware integriert und an die Energieversorgung angeschlossen wird. Im Anschluss müssen Schnittstellen zur Signalübertragung zwischen Sensorik, Aktorik und Rechentechnik eingerichtet werden, damit die entworfenen Funktionalitäten implementiert und getestet werden können. Nach der Inbetriebnahme einzelner Teilsysteme können Störeinflüsse unter realen Systembedingungen ermittelt werden. Im weiteren Verlauf können sowohl Fahrzeugparameter als auch Modellparameter ermittelt werden, um eine vollständige Inbetriebnahme des Gesamtsystems zu ermöglichen.

Abbildung 6.1 zeigt die Prozessschritte des Implementierungsprozesses für automatisierte Mikromobile in einer sequentiellen Darstellungsweise. Dabei soll die Pfeilrichtung eine logische Reihenfolge der Schritte aufzeigen. Zwischen den Prozessschritten können Rücksprünge und iterative Schleifen durchlaufen werden, falls die jeweiligen Ergebnisse nicht für eine Fortführung des Prozessmodells geeignet sind.

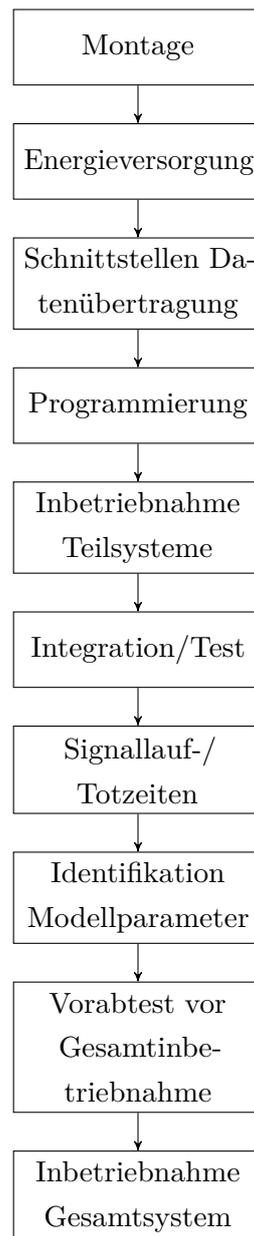


Abbildung 6.1: Prozessschritte der Implementierung

## 6.1 Montage, Energieversorgung und Schnittstellen der Komponenten

Die Voraussetzung für diesen Prozessschritt ist eine abgeschlossene Auswahl der Komponenten in der Entwurfsphase 5.9, in der alle Eigenschaften für Sensorik, Aktorik und Rechentechnik identifiziert wurden. Die gesamte Hardware muss in diesem Prozessschritt mechanisch und elektrisch am Mikromobil integriert werden. In dieser Arbeit wird vorrangig die Implementierung der automatisierten Funktionalität betrachtet. Für die Umsetzung der mechanischen und elektrischen Konstruktionspläne wird an dieser Stelle auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen. Ein Bestandteil der elektrischen Installation ist die Herstellung der physischen Stecker- und Leitungsverbindungen als Schnittstellen zwischen

den mechatronischen Komponenten, damit die Automatisierungsfunktionalitäten in den nächsten Schritten implementiert werden können.

Als Beispiel zur Umsetzung einer automatisierten Bremsfunktion des Mikromobils kann die Anbindung eines elektrohydraulischen Bremssystems aufgeführt werden. Neben der mechanischen Lagerung zur Übertragung von Kräften müssen die Schnittstellen entsprechend angebunden werden. Dafür muss die Energieversorgung zum Motorcontroller mit den festgelegten Kabelquerschnitten und sicheren Steckerverbindungen hergestellt werden. Der Controller wandelt die bereitgestellte Energie in Form von Gleichspannung dann in die nötigen Phasenströme des Bremsmotors. Damit der Motorcontroller die Phasenströme bzw. Bewegung des Bremsmotors stellen kann, wird neben der Energieversorgung noch eine Leitung zur Signalübertragung benötigt. Auf dieser Kommunikationsleitung werden die Bremsanforderungen und Zustände der Bremse zwischen Bremscontroller und zentraler Steuerung übertragen.

Das Ergebnis dieses Prozessschrittes ist die mechanische und elektrische Integration der gesamten mechatronischen Komponenten am Mikromobil. Mit diesem Schritt wurde die Automatisierungstechnik montiert und über Schnittstellen miteinander verbunden, welche die Ein- und Ausgangssignale für die Automatisierungsfunktionalität liefern. Damit der Austausch von Daten erfolgen kann, müssen Schnittstellen zwischen den Komponenten eingerichtet werden.

## 6.2 Programmierung der Hardware

Die Automatisierungsfunktionalität wurde im Entwurfsprozess 5 anhand von Modellen simulativ umgesetzt. Die Modelle bildeten dabei mit ihren Ein- und Ausgängen die Schnittstellen zu Aktorik und Sensorik des Mikromobils ab. Zur Implementierung auf der Steuerungstechnik des Mikromobils muss die Automatisierungsfunktionalität extrahiert werden und die Schnittstellen zur Hardware angebunden bzw. angesprochen werden (Vergleich Abbildung 6.2). Für die Programmierung der Zielplattform existieren entsprechende Bibliotheken oder Templates zum Einrichten der Schnittstellen. Im einfachsten Fall liefert der Hersteller der Zielplattform eine Entwicklungsumgebung und die gesamte Toolchain zur Programmierung der Automatisierungsfunktion auf der echtzeitfähigen Steuerungshardware.

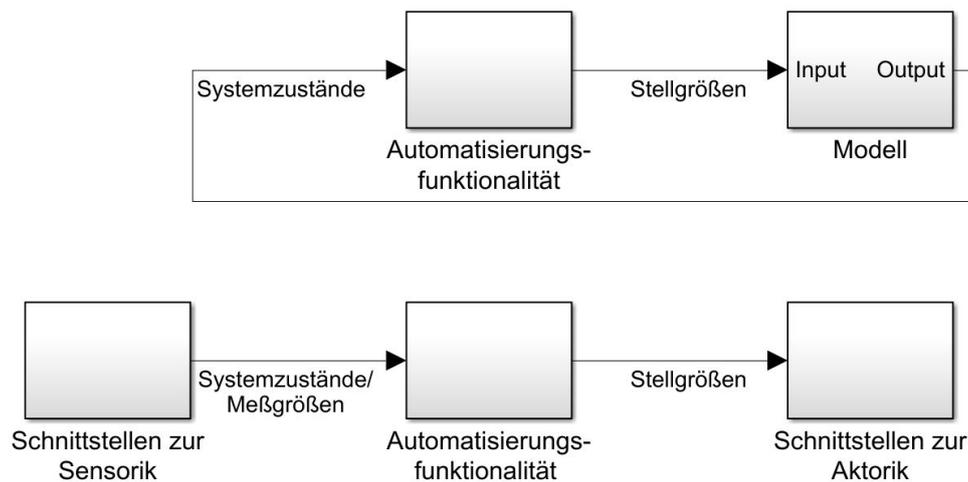


Abbildung 6.2: Substitution des Modells durch Schnittstellen für die Programmierung der Automatisierungsfunktion  
 oben: Simulation der Automatisierung mit Modell  
 unten: Programmierung der Automatisierung mit Schnittstellen

Beim Anwendungsbeispiel E-Trailer 4.1.1 wurden die Funktionalitäten 5.10.2 unter Nutzung von Matlab/Simulink entworfen. Für die Programmierung der Funktionalität auf einer echtzeitfähigen Prototypenplattform der Firma dSPACE konnte ebenfalls Matlab genutzt werden, da alle Schnittstellen vom Hersteller für Matlab bereitgestellt werden. Dadurch konnten die Funktionalitäten aus den Simulink-Modellen direkt aus der Entwicklungsumgebung Simulink als Programmierung auf die Zielplattform implementiert werden. Bei der Auswahl einer Mikrocontrollerplattform als Substitution für das Prototypensteuergerät wurde ebenfalls auf Kompatibilität und verfügbaren Bibliotheken zur Entwicklungsumgebung geachtet. Dadurch werden der Aufwand und Umsetzungsfehler minimiert, die bei der manuellen Übersetzung der Funktionalität in eine andere Programmiersprache entstehen (Um diese Fehler zu vermeiden kann Matlab auch einen automatischen C-Code aus den Simulink-Programmen generieren). Die Programmierung direkt aus den Simulationsmodellen vorzunehmen bietet den Vorteil der besseren Wartung der Funktionalitäten. Bei Parameteränderungen 6.5 können dadurch die Prozessschritte des Entwurfs 5.5, 5.6 in einer weiteren Iteration durchlaufen werden, um die Programmierung der Hardware mit neu dimensionierter Funktionalität zu aktualisieren.

Das Ergebnis dieses Prozessschrittes ist die Implementierung der Automatisierungsfunktionalität auf echtzeitfähiger Steuerungstechnik. Im nächsten Schritt können Komponenten und Teilsysteme des Mikromobils im Zusammenwirken mit der Steuerung in Betrieb genommen werden.

## 6.3 Inbetriebnahme und Integration von Komponenten und Teilsystemen

Grundvoraussetzung für die Inbetriebnahme von Komponenten und Teilsystemen des automatisierten Mikromobils auf einem Prüfstand und an Versuchsfahrzeugen ist die sichere Verwendung von Komponenten - speziell von Aktoren. Neben der mechanischen Befestigung und Lagerung muss auch eine gefahrlose Bereitstellung von Hilfsenergie erfolgen. Bei Mikromobilen wird vorwiegend elektrische Hilfsenergie verwendet, die durch Absicherungsmaßnahmen den Anwender vor Gefahren durch Ströme schützen soll. Zum Datenaustausch innerhalb eines Teilsystems bzw. zwischen Komponente und Steuergerät müssen die Schnittstellen entsprechend der Standards oder der entworfenen Definition verdrahtet werden. Zur Vermeidung zeitintensiver Fehlersuchen sollten zuerst alle Komponenten konfiguriert und separat in Betrieb genommen werden, bevor im nächsten Schritt das Zusammenwirken zwischen Teilsystemen getestet wird.

Voraussetzungen für die Inbetriebnahme mechatronischer Komponenten:

- Mechanische Lagerung
- Elektrische/pneumatische/hydraulische Hilfsenergie angeschlossen
- Schnittstellen eingerichtet
- Herstellung einer Notabschaltvorrichtung

Als beispielhafte Umsetzung der Teilinbetriebnahme wird hier die Lenkung im Projekt Aura 4.1.2 angeführt. Im Wesentlichen wird bei diesem Teilsystem der Lenkwinkelregelkreis durch die Kombination der Komponenten Lenkwinkelsensor und Lenkmotor mit integrierter Programmierung umgesetzt 6.3. Alle Komponenten verfügen über eine CAN-Schnittstelle und werden darüber konfiguriert oder nutzen diese zum Datentransfer.

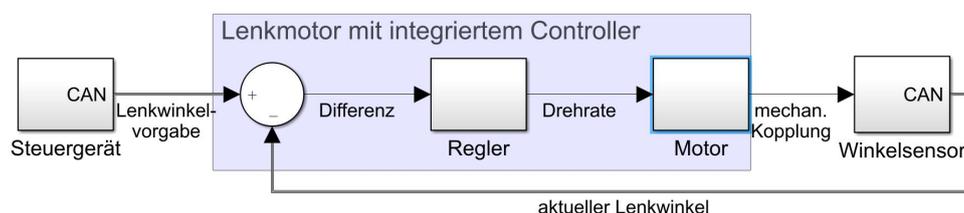


Abbildung 6.3: Schema der Wirkkette des Teilsystems Lenkung

Zuerst wird der Sensor als eigenständige Komponente betrieben und mit einer zur Schnittstelle passenden Gegenstelle konfiguriert und Messwerte ausgelesen. Als Gegenstelle dient ein USB-zu-CAN-Umsetzer inklusive Software am PC, womit CAN-Botschaften ausgelesen

und manuell gesendet werden können. Mit Hilfe des Umsetzers können die Messwerte des konfigurierten Sensors analysiert werden. Als nächste Komponente wird der Motor konfiguriert und mit Sollwertvorgaben per Umsetzer manuell betrieben. Zur Steigerung der Komplexität der Tests wird der Lenkwinkelregelkreis auf dem integrierten Controller des Motorsteuergerätes durchgeführt. Dafür muss zunächst die mechanische Kopplung zwischen Lenkmotor und Winkelsensor erfolgen. Die Sollwerte werden weiter händisch per Umsetzer vorgegeben. Die Istposition erhält die Motorsteuerung direkt als CAN-Botschaft vom Sensor und verarbeitet die Differenz zu einer Drehbewegung des Motors bis der Sollwinkel erreicht wird. Als finaler Test der Inbetriebnahme als Teilsystem kann die Sollwertvorgabe automatisiert als Trajektorie vom Echtzeitsteuergerät vorgegeben werden.

Aus diesem Prozessschritt gehen separat in Betrieb genommene Komponenten und Teilsysteme des Mikromobils hervor, die für sich genommen eine Struktureinheit ergeben (z.B. Antrieb, Bremse, Lenkung, Steuerung). Weiterhin kann in diesem Schritt auch das Zusammenwirken dieser Struktureinheiten untereinander erfolgen. Insbesondere kann der Datenaustausch über die Schnittstellen durchgeführt und getestet werden, der im späteren Prozessschritt auf Laufzeiten und der Einfluss untersucht werden kann.

### 6.4 Signallauf- und Totzeiten

Nachdem im vorherigen Abschnitt Teilsysteme mit mechatronischen Komponenten in Betrieb genommen wurden, die Bestandteil von Regelkreisen sind, muss die gesamte Wirkkette von Führungsgröße zur Regelgröße auf ihr reales zeitliches Verhalten analysiert werden. Die entworfenen Regelkreise wurden anhand der bekannten Fahrzeugparameter dimensioniert und simuliert. In der Simulation werden Systemzustände modellbasiert erzeugt und bilden ein idealisiertes Systemverhalten ab. In der Praxis unterliegen die Regelgrößen nicht nur einem Messrauschen, sondern sind aufgrund der Kommunikationsarchitektur der Schnittstellen mit Signallaufzeiten verbunden. Es entstehen Totzeiten, die mit den simulativ entworfenen Regelkreisparametern eventuell nicht kompensiert werden können. Diese Totzeiten könnten ermittelt und im Modell integriert werden, um dann einen totzeitbehafteten Entwurf durchführen zu können.

Totzeiten summieren sich aus der Gesamtheit aller Signalverarbeitungszeiten der beteiligten Steuergeräte und Peripherie. Der Regler wird auf einem Steuergerät ausgeführt. Die Berechnungszeit des Reglerausgangs ist dabei vernachlässigbar, jedoch wird die Regelung mit festgelegten Zykluszeiten durchgeführt und die Sollwerte erst beim Erreichen des nächsten Zyklus' über die Schnittstelle weitergeleitet. Die Ausgabe über die Schnittstelle ist dann ebenfalls noch an eine Verarbeitungszeit gebunden. Der Empfang und die Verarbeitung der Stellgröße beim Aktor benötigt dann wieder Zeit bis zur Umsetzung als

elektrische Stellgröße oder mechanische Bewegung. Ein Sensor muss dann die Messgröße aufnehmen, umwandeln und wieder über eine Schnittstelle an das Steuergerät senden, welches im nächsten Zyklusschritt aus Regelgröße und Führungsgröße erneut den Reglerausgang ermittelt. Die Gesamtheit aller Verarbeitungszeiten ergibt die Totzeit, die mit den Reglerparametern zu einem stabilen Systemverhalten geführt werden müssen.

In der nachfolgenden Liste sind die zeitintensiven Prozessschritte der Wirkkette Steuergerät-Aktor-Sensor-Steuergerät aufgelistet.

- Zykluszeit Echtzeitrechner
- Verarbeitungszeit Schnittstellen Rechner zu Aktor
- Verarbeitungszeit Aktor
- Stellgröße erzeugen
- Verarbeitungszeit Sensor
- Verarbeitungszeit Schnittstelle Sensor zu Rechner

Die Summierung der Totzeiten wird beispielhaft für die Stellung des Antriebsmomentes im Projekt Aura 4.1.2 aufgeschlüsselt. Der kaskadierte Regler des Antriebsmomentes erzeugt aus einer Längsabweichung zwischen Soll- und Istposition das Drehmoment des Antriebsmotors. Die Berechnung der Stellgröße erfolgt dabei in 1 ms-Intervallen auf dem Steuergerät. Zur Datenübertragung zwischen Steuergerät und Antriebscontroller ist ein CAN-Bus vorhanden, das Senden der Stellgrößen erfolgt alle 10 ms. Die Umsetzung der Drehmomentanforderung im Motorcontroller des Antriebes benötigt ungefähr 7 ms. Das Fahrzeug setzt sich in Bewegung und die neue Istposition wird alle 20 ms von einem differentiellen GPS-System erfasst. Diese Position wird im 20 ms-Takt über den Bus an das Steuergerät gesendet, um die nächste Iteration des Längsreglers auszuführen. In der folgenden Abbildung 6.4 werden die Totzeiten innerhalb der Wirkkette der Bahnregelung dargestellt.

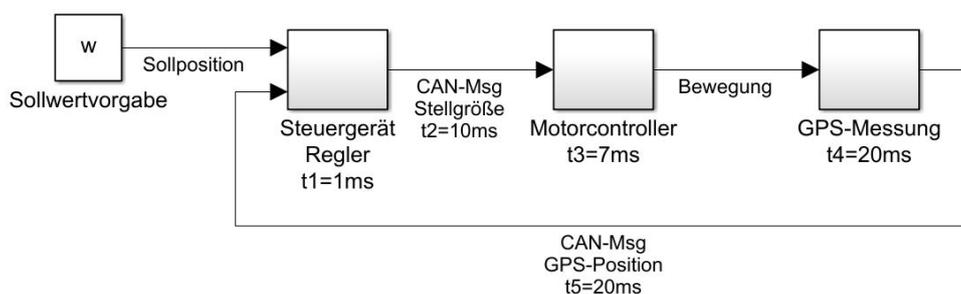


Abbildung 6.4: Schema der Totzeiten in der Signalverarbeitungskette der Bahnregelung im Projekt Aura

Je nach Anwendung können die Totzeiten gegenüber den Systemzeiten dominieren. Dadurch kann die Regelung das geforderte Systemverhalten nicht erzielen und schwingungsfähige Systeme gelangen mitunter in ein Resonanzverhalten. Zur Kompensation der beschriebenen Totzeitproblematik können den Lehrbüchern Lösungsalgorithmen entnommen werden. Ein Algorithmus ist der Smith Predictor (siehe Abbildung 6.5), der zu den modellbasierten prädiktiven Reglern zählt [66]. Der Prädiktor trennt die identifizierte Systemdynamik von der Totzeit und der Regler kann anhand der modellbasierten korrigierten Regelgröße arbeiten.

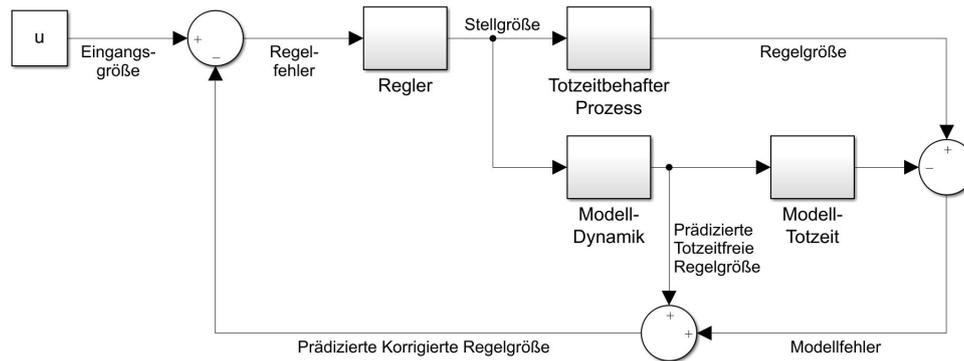


Abbildung 6.5: Blockschaltbild eines Smith-Predictors

In diesem Prozessschritt werden die Signallaufzeiten zwischen den mechatronischen Komponenten des Mikromobils erfasst. Diese Zeiten haben je nach Größenordnung einen Einfluss auf die Regelkreise der Automatisierungsfunktionen. Werden sehr hohe Signallaufzeiten identifiziert, muss ein erneuter Funktionsentwurf 5.4 und die darauf folgenden Prozessschritte durchgeführt werden. Bei vernachlässigbaren Laufzeiten kann mit dem nächsten Implementierungsschritt fortgefahren werden.

## 6.5 Identifikation der Modellparameter

Die Parameter der Modellgleichungen und der damit verbundenen Funktionalitäten wie z.B. Regler oder Beobachter sind im Wesentlichen von Fahrzeugmerkmalen abhängig. In der Entwurfsphase wurden Fahrzeugparameter aus den Anforderungen des Lastenheftes entnommen oder durch Heuristiken festgelegt. Nach der Implementierung der Funktionalitäten am Mikromobil können die Fahrzeugparameter den realen Gegebenheiten entnommen werden. Dabei gibt es direkt und indirekt bestimmbare Parameter mit verschiedenen Methoden zur Ermittlung. Die essentiellen Modellparameter für automatisierte Mikromobile sind die Parameter des Einspurmodells. Diese Parameter können durch geeignete Fahrversuche ermittelt werden, um das Modellverhalten möglichst wirklichkeitsgetreu abzubilden. Mit Hilfe der Fahrmanöver können auch die relevanten Koeffizienten der Fahrwiderstände

identifiziert werden, die ebenfalls als Modellparameter für das Einspurmodell benötigt werden.

Ausgangspunkt für die Durchführung dieses Prozessschrittes ist ein komplett montiertes Mikromobil mit allen Komponenten für die Automatisierung einer Fahrfunktion. Ziel dieses Prozessschrittes ist die Bestimmung der Modellparameter anhand von geeigneten Messdaten und Fahrversuchen. Das Resultat dieses Prozessschrittes sind ermittelte Modellparameter eines realen Mikromobils, insbesondere der Fahrzeugmasse, die einen wesentlichen Einfluss auf das dynamische Verhalten der Modelle und Funktionen hat. Im Anschluss können die Modellparameter für eine iterative Dimensionierung der Funktionsparameter 5.5 verwendet werden. Die Fahrzeugparameter lassen sich in direkt und indirekt bestimmbare Parameter einteilen.

### 6.5.1 Direkt bestimmbare Parameter

Mit Hilfe von bekannten Messverfahren können einige Fahrzeugparameter direkt ermittelt werden. Zu den direkt messbaren Parametern gehören zum Beispiel die Fahrzeugmasse oder Fahrzeugabmaße. Diese können mit reproduzierbaren Messmethoden und geeigneten Messmitteln bestimmt werden. Bei der Messprozedur sollte eine korrekte Kalibrierung der Messmittel und Skalierung der Messwerte beachtet werden, um systematische Messfehler zu vermeiden. Die Genauigkeiten der Messmittel sollten zur Größenordnung der zu messenden Größe angepasst sein.

Bei beiden Anwendungsbeispielen 4.1 sind als Fahrzeugparameter die Gesamtmassen, Achsabstände und Achsbreiten erforderlich. Die Längen können dabei entweder dem CAD-Modell entnommen werden oder durch Messungen am Versuchsfahrzeug bestimmt werden. Letzteres sollte zusätzlich als Kontrolle der CAD-Messung erfolgen um Abweichungen aufgrund der Montage des Mikromobils auszuschließen. Die Bestimmung der Fahrzeuggesamtmasse erfolgt grundsätzlich mit einer Waage als Messmittel. Dabei sollten für die Bestimmung weiterer indirekter Parameter die einzelnen Radaufstandsgewichte aller Räder gemessen werden.

### 6.5.2 Indirekt bestimmbare Parameter

Im Gegenteil zu den direkt bestimmbaren Parametern, werden indirekte durch die Messung von Hilfsgrößen mathematisch bestimmt. Die Hilfsgrößen können dabei direkt mit den entsprechenden Messmitteln bestimmt werden. Im vorherigen Abschnitt 6.5.1 wird die direkte Ermittlung der Parameter Radaufstandsgewichte und Achsstand bzw. Achsbreite genannt. Aus diesen Messgrößen kann die Schwerpunktlage des Mikromobils ohne weitere

Messungen indirekt bestimmt werden. Zur Ermittlung der Schwerpunkthöhe über dem Boden müssen die Radaufstandskräfte bei geneigter Fahrzeuglängsachse gemessen werden. Aus Neigungswinkel und den veränderten Radaufstandskräften wird dann die Höhe bestimmt.

Als Beispiel zur Modellparameter-Identifizierung wird die Ermittlung der Fahrwiderstände des E-Trailers 4.1.1 beschrieben. Aufgrund der Funktionalität Zugkraftkompensation verfügt der Trailer einen On-Board-Sensor, der die Kraft an der Zugdeichsel aufnimmt. Dieser Sensor kann zur Bestimmung der Fahrwiderstandskräfte verwendet werden, indem die motorische Unterstützung deaktiviert wird. Somit können der masseabhängige Rollwiderstand und der geschwindigkeitsabhängige Luftwiderstand gemessen und die Koeffizienten als Modellparameter bestimmt werden. Zur Ermittlung des Rollwiderstandsbeiwertes wird eine geringe gleichmäßige Geschwindigkeit gewählt und Geradeaus gefahren, um die Rollwiderstandskraft zu isolieren. Bei diesem Fahrversuch wird der Anhänger mit variierendem Gewicht gezogen, um den linearen Zusammenhang zu erfassen. Analog dazu wird zur Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwertes die Geschwindigkeit schrittweise gesteigert und der Fahrwiderstand bei konstanter Geradeausfahrt gemessen. Die Zuladung wird dabei nicht variiert. Mit Hilfe aller Messwerte und den Modellgleichungen für Roll- bzw. Luftwiderstand können die Koeffizienten mit einer linearen Optimierung identifiziert werden. Abbildung 6.6 zeigt beispielhaft die graphische Auswertung der Koeffizientenermittlung für den Rollwiderstand. Der Anstieg der Regressionsgeraden bildet den Fahrzeugparameter Rollwiderstandskoeffizient ab.

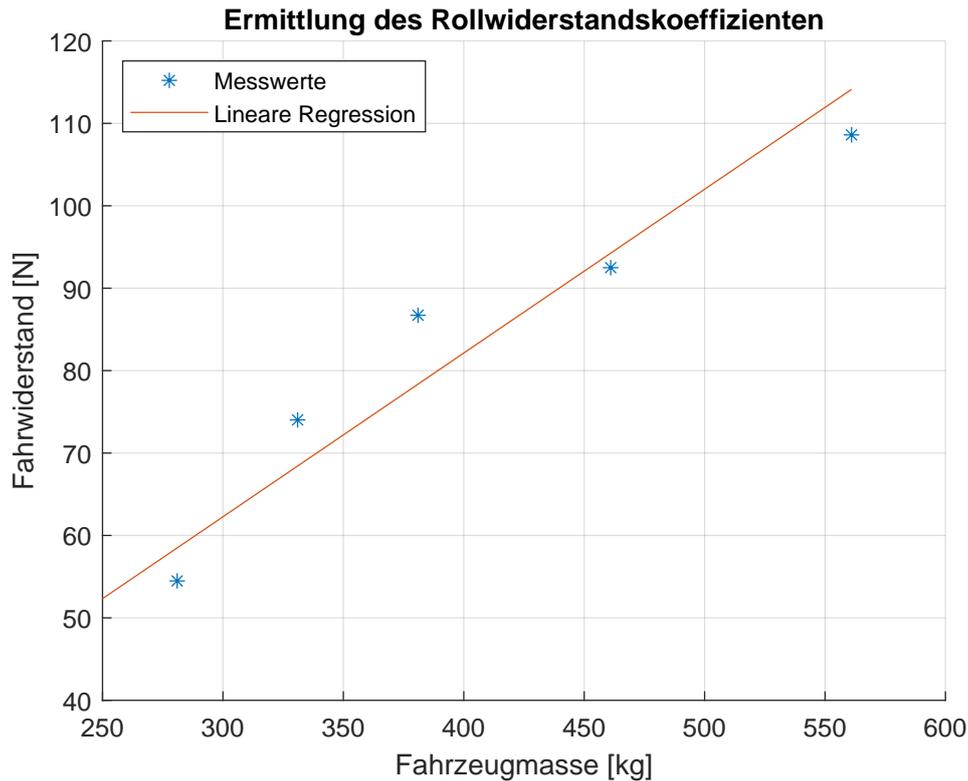


Abbildung 6.6: Gemessener Rollwiderstand und zugehörige Regressionsgerade

Die indirekte Bestimmung von Modellparametern ist an messbare Größen z.B. aus Fahrversuchen gebunden. Damit eine Optimierung von Modellparametern erfolgen kann, muss zunächst eine Referenz ermittelt werden.

### 6.5.3 Referenzmesstechnik

Bei der Automatisierung von Mikromobilen sollen aus wirtschaftlichen Gründen kostengünstige Sensoren eingesetzt werden. Aus diesem Grund ist die Genauigkeit und Streubreite der Messwerte im Vergleich zu hochpräzisen Sensoren eher gering. Um die Sensorwerte günstiger Sensoren dennoch optimal für Regelungsprozesse zu nutzen, werden diese mit Hilfe von modellbasierten Filtern unterstützt. Eine Herausforderung ist dabei die Dimensionierung des Filters mit den Filterparametern. Dafür müssen hochpräzise Fahrzustandsverläufe des Mikromobils durch Referenzmesstechnik erfasst werden. Anhand der Referenzmesswerte als tatsächlichen Zustandsverlauf können die Parameter des modellbasierten Filters der On-Board-Sensorik optimiert werden, um die Fahrzustände zu rekonstruieren.

Die Auswahl der benötigten Referenzmesstechnik und Referenzmessgrößen sind von der Funktion und vom Automatisierungsgrad des Mikromobils abhängig. Da die automatisierten Fahrfunktionen eines Mikromobils im Wesentlichen auf den Fahrzuständen des Einspurmodells basieren, müssen die Referenzmessgrößen diese abdecken. Die Auswahl

der Referenzmessgröße sollte anhand der zu regelnden Zustandsgröße erfolgen, um den Filter mit Hilfe der Parameter entsprechend anzupassen. Bei der Positionierung der Referenzmesstechnik auf dem Mikromobil müssen die Distanzen zu den POIs wie z.B. zum Massenschwerpunkt berücksichtigt und darauf transformiert werden.

Das Projekt Aura 4.1.2 beinhaltet eine Positionsregelung auf Bahnführungsebene. Dafür müssen Fahrzustände wie Beschleunigung, Geschwindigkeit und Position in X sowie Y-Richtung unverrauscht prädiziert werden, um die Längs- und Querregelung des Mikromobils zu einer Solltrajektorie durchzuführen. Es wird ein modellbasierter Zustandsschätzer angewendet (EKF), der aus einem Einspurmodell und der Onboard-Sensorik (GPS, IMU, Raddrehzahlen) die benötigten Fahrzustände des Mikromobils schätzt. Damit die Modellparameter des EKF eingestellt werden können und mit der Sensorik des Mikromobils korrelieren, müssen Fahrversuche mit entsprechender Referenzmesstechnik durchgeführt werden. Im Projekt wurde dafür unter anderem ein differentielles GPS System verwendet, das die Position, Beschleunigungen, Geschwindigkeiten, die Gierrate und den Kurswinkel mit Hilfe von Korrekturdaten mit hoher Genauigkeit misst. Als weitere Referenzmesswerte wurden die lateralen und transversalen Geschwindigkeiten mit einem berührungslosen optischen Sensor erfasst. Die verwendeten Mess- und Referenzmesswerte zur Optimierung des Zustandsschätzers sind in der Abbildung 6.7 dargestellt. Im Projekt sind die exakten Positionsdaten und die Gierrate bzw. der Gierwinkel von Bedeutung, da aus diesen Messwerten der für die Bahnregelung nötige Längs- und Querversatz berechnet wird. Für die unterlagerten Regelkreise wird zusätzlich noch eine gefilterte Fahrgeschwindigkeit und die Beschleunigung benötigt.

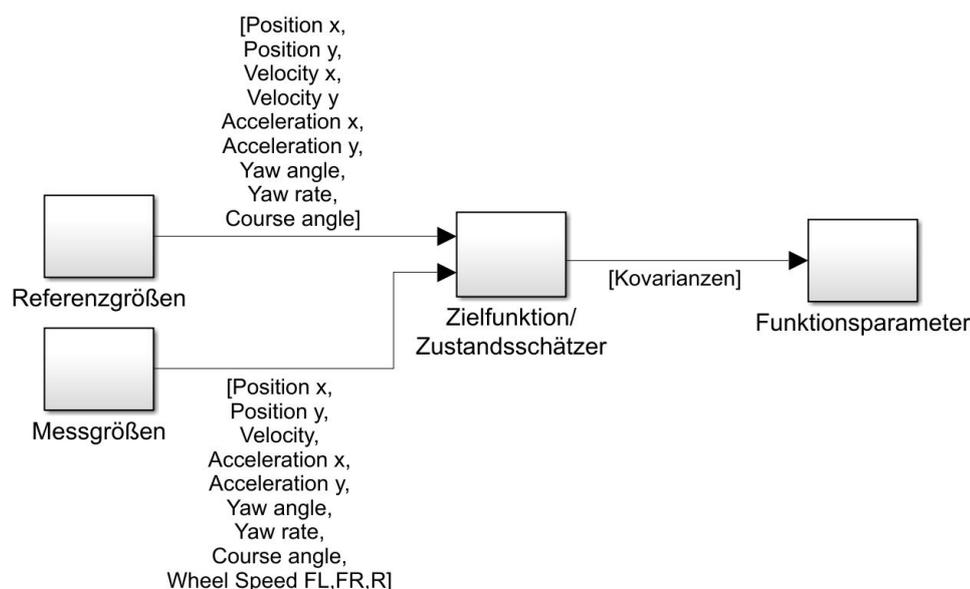


Abbildung 6.7: Messwerte und Referenzmesswerte des automatisierten Lastenrades

Da anhand der Referenzmesswerte die Parameter einer modellbasierten Filterung getuned werden sollen, muss die Auswahl der Messtechnik anhand der für die Regelung nötigen Zustände erfolgen (sofern der zu regelnde Zustand messbar ist).

#### 6.5.4 Optimierung der Modellparameter

Nachdem im vorherigen Schritt geeignete Referenzmesswerte ermittelt wurden, können die Messwertverläufe zur Optimierung von Parametern des Automatisierungssystems verwendet werden. Je nach Komplexität der Automatisierung können dafür die bekannten Verfahren zur Minimierung einer Kostenfunktion angewendet werden [59]. Eine Herausforderung stellt dabei das Aufstellen einer geeigneten Kostenfunktion dar. Als mathematische Beschreibung des Optimierungsproblems wird dazu meist die Minimierung zwischen Referenz- und gemessenen Zustandsverläufen definiert. Zur Lösung des Minimierungsproblems werden die Parameter als Optimierungsvariable behandelt, bis die geringste Differenz zwischen Referenz und gemessenen Zuständen gefunden wird. Die Suche nach den optimalen Parametern kann dabei analytisch (falls möglich) oder rechnergestützt durch numerische Verfahren erfolgen.

Die Parameteridentifizierung kann sowohl Offline anhand von aufgezeichneten Messdaten als auch Online zur Ermittlung veränderlicher Parameter während des Livebetriebes erfolgen. Bei der Offline-Optimierung werden vor allem invariante Modellparameter ermittelt, die für die Dimensionierung der Automatisierungsfunktionen essentiell sind. Unveränderliche Modellparameter können z.B. die Schräglauftiefigkeiten der Räder oder Prozesskovarianzen eines Zustandsschätzers sein. Bei der Online Parameteroptimierung werden die Modelle den aktuellen Eigenschaften während des Betriebes angepasst. Ein veränderlicher Parameter kann z.B. die Fahrzeugmasse aufgrund unterschiedlicher Beladung sein. Die Masse eines Mikromobils hat einen direkten Einfluss auf das Zeitverhalten in dynamischen Bewegungen und ist ein wesentlicher Bestandteil der Modellgleichungen. Abweichungen des Parameters zur realen Masse kann daher eine fehlerhafte Performance von Regler, Filter und Zustandsschätzer verursachen. Deshalb können Parameter auch Online während der Durchführung der Automatisierungsfunktion ermittelt werden.

Die Online- und Offline-Parameteridentifizierung wird auch im Forschungsprojekt E-Trailer 4.1.1 angewendet. Auf dem Echtzeit-Steuergerät werden die Fahrzustände mit Hilfe der Messwerte und einem EKF geschätzt. Das Filter besteht aus den Modellgleichungen des Anhängers und Kovarianzmatrizen, deren Parameter signifikant für die Konvergenz der Modellzustände sind und eine Glättung der verrauschten Messwerte erzeugen. Die Parameter der Kovarianzen werden offline mit Hilfe von Messdaten aus Versuchsfahrten bestimmt. Nach der Offline-Dimensionierung der Filterparameter können essentielle Zustände wie z.B. die Fahrzeuglängsbeschleunigung geschätzt werden.

Da der Anhänger während des Fahrbetriebes variierende Beladungszustände haben kann, ist der Parameter Fahrzeugmasse nicht konstant. Die Masse ist jedoch ein essentieller Parameter der Modellgleichungen und maßgeblich für das Zeitverhalten verantwortlich. Davon sind unter anderem auch die Reglerparameter der Zugkraftkompensation abhängig. Da die Fahrzeuggesamtmasse in Relation zum Leergewicht dominieren kann, muss der Parameter Fahrzeugmasse während des Live-Betriebes ermittelt werden. Deshalb wird auf dem Steuergerät eine Online-Parameteridentifizierung für die Masse mit Hilfe eines EKF durchgeführt (Vergleich 3.5.1), um die Reglerparameter über Gain-Scheduling anzupassen. Die Online-Parameterschätzung wurde simulativ durchgeführt, die zugehörigen Zustandsverläufe befinden sich im Anhang A.3.

Ziel der Parameteroptimierung ist immer die Nachführung der Modelle und berechneten Zustände an das reale Verhalten eines Mikromobils. Dafür ist die exakte Kenntnis der Modellparameter obligatorisch, sie können mit Hilfe von Optimierungsverfahren an die Realität angepasst werden.

### 6.6 Vorabtests zur Inbetriebnahme des Gesamtsystems

Da ein Automatisierungssystem die Bewegung eines Mikromobils durch Aktoren steuert, bilden Vorabtests eine wichtige letzte Überprüfungsmaßnahme vor der Inbetriebnahme als Gesamtsystem. Dabei soll die Funktionsweise und das Zusammenspiel zwischen Sensorik und Stellgliedern ohne eine Gefährdung von Personen analysiert werden. Dazu kann die Kraftübertragung der Aktorik des Fahrzeuges durch Sicherheitsmaßnahmen unterbunden werden. Das Versuchsfahrzeug bildet somit einen Prüfstand, an dem die Funktionen der Teilsysteme und Notfallstrategien getestet werden können. Auf dem Versuchsstand können die simulativ entworfenen Regelungsparameter der Hardware auf plausibles Verhalten überprüft werden. Für alle messbaren Fahrzeugzustände und Parameter sollte ein geeignetes Monitoring und Datenlogging zur Evaluation gewählt werden.

Um das Automatisierungssystem des E-Trailers 4.1.1 in einer Prüfstandsumgebung zu erproben, wurde der Fahrzeugrahmen des Anhängers angehoben. Dadurch haben die angetriebenen Hinterräder keinen Kontakt mehr zur Fahrbahn und die Kraftübertragung zwischen Reifen und Untergrund wird unterbunden. Das Automatisierungssystem des Anhängers besteht im Wesentlichen aus der Zugkraftmessung in der Deichsel und dem Stellen der Antriebsdrehmomente. Während der Vorabtests kann eine Zug- oder Druckkraft auf die Deichsel gegeben werden, die vom Sensor erfasst und vom Steuergerät zu einem Antriebsmoment der Räder verarbeitet wird. Als visuelles Ergebnis kann das Drehen der Räder durch das Aufbringen der Deichselkräfte beobachtet werden. In Abhängigkeit vom Vorzeichen der Deichselkraft sollte sich auch die Drehrichtung der Antriebe ändern. Im

Verlauf der Prüfverfahren werden auch die Sicherheitsmechanismen und das Verhalten des Anhängers getestet. Es existieren diverse Schalter und Nothaltvorrichtungen, die den Trailer in einen dedizierten Zustand überführen sollen. Dafür existiert zum Beispiel ein Notausschalter, der die Antriebe des Trailers abschaltet und die Bremse aktiviert, um einen sicheren Stillstand des automatisierten Mikromobils zu gewährleisten. Das gewünschte Verhalten im Notfall kann zum einen optisch und manuell am Versuchsträger überprüft werden und zum anderen anhand des Datenflusses auf dem implementierten Busnetzwerk. Zum Monitoring und Datenlogging der Fahrzeugzustände wird die Software des montierten Prototypensteuergerätes verwendet. Die Auswertung des Datenflusses fundiert die Sichtprüfung des Fahrzeugverhaltens.

Für automatisierte Mikromobile müssen geeignete Prüfverfahren zur konzipierten Funktionalität durchgeführt werden. Der Umfang der Verfahren ist vom Automatisierungsgrad abhängig und den damit verbundenen Funktionen und Sicherheitsmechanismen.

Dieser Prozessschritt wird unmittelbar vor der Gesamtinbetriebnahme des Mikromobils durchgeführt und soll die korrekte Funktionsweise als Gesamtsystem nachweisen. Sollten die Funktionalitäten der Automatisierung nicht den Erwartungen entsprechen, muss je nach Fehlerbild bis zum Prozessschritt 5.5 und Folgende zurückgesprungen werden.

## 6.7 Inbetriebnahme des Gesamtsystems

Der finale Schritt der Inbetriebnahme ist die Nutzung des Automatisierungssystems am Versuchsfahrzeug ohne Prüfstands Umgebung. Vor diesem Schritt sollten alle Vorabtests erfolgreich abgeschlossen werden und Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden, um eine Gefährdung von Personen auszuschließen. In der nachfolgenden Liste sind die wichtigen Vorkehrungen bei der Erstinbetriebnahme aufgeführt.

Sicherheitsvorkehrungen:

- Sicherheitszone um das Fahrzeug herum eingerichtet
- Zugangsbeschränktes Testgelände
- Sicherheitseinrichtungen des Fahrzeugs erreichbar
- Unterwiesenes Personal
- Abgeschwächte Reglerparametersätze für Antrieb und Lenkung (jedoch nicht Bremse)
- Gesamte Mechatronik funktioniert innerhalb ihrer Parameter
- Datenmonitoring/ -logging

Je nach Automatisierungsgrad und Geschwindigkeitsbereich muss ein ausreichend großer Bereich um das Mikromobil herum abgesichert werden, da ein unkontrolliertes Verhalten aufgrund leistungsstarker Antriebsmotoren zu Gefährdungen führen kann. In der unmittelbaren Nähe zum automatisierten Mobil dürfen sich dann nur noch unterwiesene Personen aufhalten, die durch Schulungen in die Lage versetzt werden, den sicheren Zustand des Fahrzeuges herstellen können. Dafür müssen die Sicherheitseinrichtungen für das Fahrzeug funktional und erreichbar sein. Es empfiehlt sich für die Erstinbetriebnahme reduzierte Parameter für die Regelkreise zu verwenden. Insbesondere ein Fahrantrieb sollte in den Parametern Beschleunigung und maximaler Geschwindigkeit stark begrenzt werden. Davon ausgenommen sind die Parameter für die Bremse und den damit verbundenen sicheren Stillstand des Fahrzeuges. Eine weitere Voraussetzung für die Inbetriebnahme ist das Funktionieren aller Sensoren, Aktoren und Steuergeräte, die zur Automatisierung der Fahraufgabe erforderlich sind. Hier sollte allerdings bereits ein Mechanismus im Steuergerät existieren, der die Freigabe nur bei voller Funktionalität der Mechatronik erteilt. Zur Nachvollziehbarkeit des Systemverhaltens auch bei Fehlverhalten sollten alle verfügbaren Daten aller mechatronischen Komponenten aufgezeichnet und live überwacht werden.

Erst wenn alle Voraussetzungen in Form der Sicherheitsvorkehrungen erfüllt werden, kann die Inbetriebnahme und der Testbetrieb erfolgen. Bei Abweichungen vom erwarteten Systemverhalten durch Überwachen des Datenmonitorings und bei Eintritt von Gefährdungen muss der Testbetrieb unterbrochen werden. Dazu sollte ein sicherer Stillstand des Mikromobils gewährleistet werden. Eine Weiterführung des Testbetriebs kann erst nach Datenanalyse und Fehlerbehebung erfolgen.

Bei der Gesamtinbetriebnahme des Versuchsfahrzeuges im Projekt Aura 4.1.2 kommt ein Level 4 Automatisierungssystem 2.2 zum Einsatz, bei dem Antrieb, Lenkung und Bremse aktuiert werden. Der Sicherheitsbereich wird relativ groß nach vorn gerichtet und auf einem abgesperrten Gelände definiert, da es keine mechanische Verbindung zwischen dem Menschen als überwachende Sicherung und automatisierten Gefährt gibt. Dadurch kann eine Gefährdung unbeteiligter Personen ausgeschlossen werden. Zum Erreichen der Notabschaltung bzw. sicheren Stillstand existieren zwei separate Funkverbindungen, die auf unabhängige Weisen auf zwei unterschiedliche Bremsen wirken können. Diese Funknotaueinrichtungen werden von zwei Sicherheitsbegleitern des Testbetriebs betätigt und können das Mikromobil in den sicheren Zustand versetzen. Die Reglerparameter des Antriebs wurden für den Testbetrieb auf eine sehr geringe Beschleunigung begrenzt und regeln nur bis zum Erreichen der Schrittgeschwindigkeit als Maximum. Ein wichtiges Freigabekriterium der Inbetriebnahme ist das Funktionieren aller Low-Level-Hardware innerhalb ihrer Normparameter. Dies kann unter anderem durch die vorhandenen Heartbeats und Zustände aller Komponenten auf dem CAN-Bus überprüft werden. Alle relevanten Zustände und Messwerte werden von einem Prototypensteuergerät und der zugehörigen Konfigu-

rationssoftware für die Auswertung mitgeschrieben. Da es sich bei der Automatisierung des Lastenrades um ein Level 4 System handelt, muss die Bahnregelung mit Vorgabe und Folge gesondert bei der Inbetriebnahme beachtet werden. Bei zu hohen Abweichungen müssen Anpassungen an den betroffenen Funktionsparametern vorgenommen werden.

Das Ergebnis dieses Prozessschrittes und des Teilprozesses Implementierung ist ein vollständig in Betrieb genommenes Mikromobil mit automatisierten Fahrfunktionen. Eine erneute Inbetriebnahme des Automatisierungssystems muss bei jeglichen Änderungen oder Austausch von Hardware und der Programmierung der Automatisierungssoftware erfolgen. Dazu müssen die entsprechenden Prozessschritte des Entwicklungsmodells in einer weiteren Iteration durchlaufen werden. Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme des Gesamtsystems kann im nächsten Teilprozess die Finalisierung erfolgen.

## 7 Finalisierung des automatisierten Mikromobils

Der finale Teilprozess in der Entwicklung eines Gesamtsystems gemäß V-Modell der Mechatronik 3.2 ist die Verifikation und Validierung. In diesem Teilprozess werden die implementierten Funktionen mit den Anforderungen des Lastenheftes abgeglichen und dokumentiert. Im Falle von Diskrepanzen zwischen den Anforderungen und den Charakteristika des automatisierten Mikromobils müssen Optimierungen angewendet werden, um die Soll-Ist-Differenzen zu beseitigen. Die nachfolgende Abbildung 7.1 zeigt die einzelnen Prozessschritte der Finalisierung. Gestrichelte Linien symbolisieren die Rücksprünge zwischen einzelnen Prozessschritten.

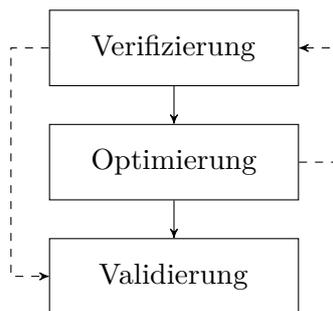


Abbildung 7.1: Prozessschritte der Finalisierung

### 7.1 Verifizierung

Zu Beginn der Entwicklung wurden Anforderungen an das automatisierte Mikromobil festgelegt und dokumentiert 4. Ob das entwickelte Mikromobil diese Anforderungen erfüllt soll in diesem Prozessschritt evaluiert werden. Dazu müssen geeignete Methoden angewendet werden, die den Nachweis zur Erfüllung der Anforderungen erbringen sollen.

Die qualitativ gestellten Anforderungen können anhand eines Vergleichs mit den Eigenschaften des automatisierten Mikromobils verglichen werden. Als beispielhafte qualitative Anforderung kann die Querführung des Mikromobils aufgrund des angestrebten Automatisierungsgrades angeführt werden. Innerhalb der Verifizierung wird dann die entsprechende Aktorik und die zugehörige Funktionalität zur Querführung festgestellt.

Im Gegensatz zu den qualitativen Anforderungen können quantitative durch messbare Methoden evaluiert werden. Für Anforderungen statischer Eigenschaften an das Mikromobil können die ermittelten Fahrzeugparameter zur Verifizierung genutzt werden. Die Anforderungen an die Dynamik müssen anhand von Prüfstands- oder Fahrversuchen nachgewiesen werden. Dafür müssen Messdaten und Signalverläufe während der Tests aufgezeichnet und im Anschluss ausgewertet werden. Anhand der Auswertung können die Anforderung an das dynamische Verhalten des automatisierten Mikromobils verifiziert oder falsifiziert werden. Sollten Anforderungen durch das automatisierte Mikromobil nicht verifiziert werden können, müssen Überarbeitungen in den entsprechenden Schritten des Entwicklungsprozesses durchgeführt werden. Dazu müssen Rücksprünge in die entsprechenden Teilprozesse erfolgen, die gegebenenfalls iterativ durchlaufen werden, bis die Anforderungen erfüllt worden sind.

Am Beispiel des E-Trailers 4.1.1 wurde als Anforderung ein Transportanhänger mit Unterstützung definiert. Diese qualitative Anforderung wird durch die konstruktive Entwicklung eines Anhängergestells und durch die Verwendung von Antriebsmotoren verifiziert (Vergleich Lastenheft im Anhang C.1 Nr.1.1.1). Als Beispiel für quantitative Anforderungen können die Abmessungen der zu befördernden Fracht genannt werden. Diese Anforderung wird ebenfalls durch die Konstruktion des Anhängerrahmens erbracht, kann aber durch messbare Größen verifiziert werden. Eine quantitativ erfassbare Anforderung an die Dynamik des automatisierten Lastenanhängers ist die Verzögerungsfähigkeit, die mit den montierten Bremsen erreicht werden soll (Vergleich Anhang C.1 Nr.2.1.7). Die Verifizierung kann anhand von Fahrversuchen und Aufzeichnung der Fahrzustände durchgeführt werden. Ein geeigneter Fahrversuch ist die Vollbremsung bei Geradeausfahrt aus unterschiedlichen Startgeschwindigkeiten. Die erzielte Verzögerungsfähigkeit wird anhand der Beschleunigung in Abbildung 7.2 unteres Diagramm dargestellt und dient als Verifizierung der Anforderung des Lastenheftes C.1). Zur Verifizierung der Notstopp-Fähigkeit des Anhängers wurde ein Zugversuch durchgeführt, bei dem der Notaus in der rollenden Bewegung betätigt wurde. Die zugehörigen Zustände des Notaus-Schalters, der Zustandsmaschine, dem Bremsdruck und der Fahrgeschwindigkeit sind in Abbildung 7.2 dargestellt. Die Fahrgeschwindigkeit wird nach der Notaus-Betätigung bis zum Stillstand durch die automatisierte Bremse reduziert.

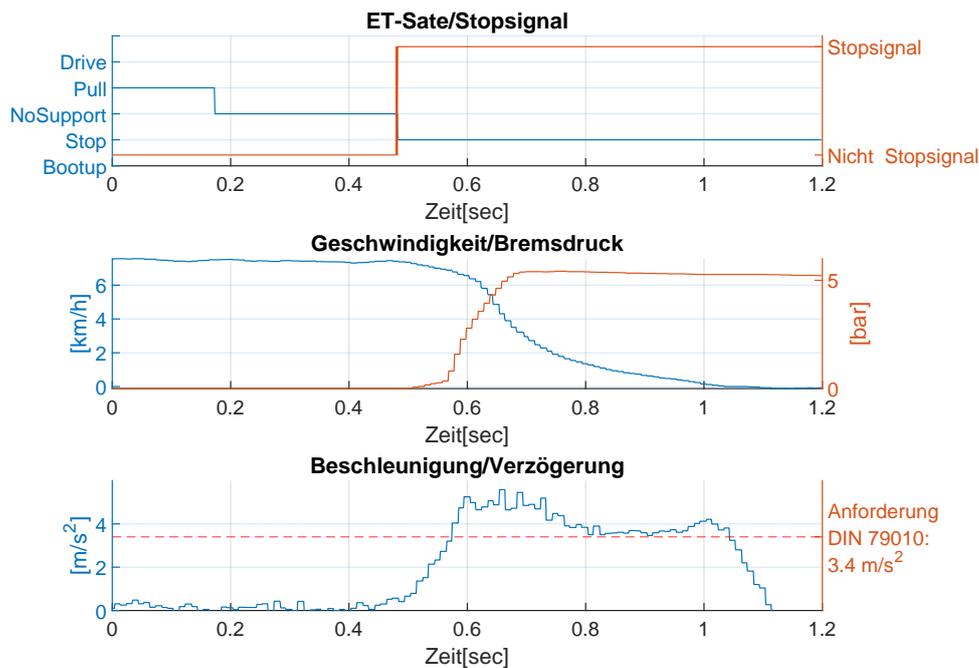


Abbildung 7.2: Verifizierung der Verzögerung und des Notstopps

Das Resultat dieses Prozessschrittes ist die Verifizierung oder Falsifikation der Anforderungen an das entwickelte automatisierte Mikromobil. Werden die Anforderungen erfüllt, kann im nächsten Schritt die Validierung erfolgen. Im Falle von Abweichungen zum Lastenheft müssen im nächsten Prozessschritt Anpassungen am automatisierten Vehikel oder den Funktionalitäten vorgenommen werden.

## 7.2 Anpassungen an Anforderungen und Optimierung des Mikromobils

Dieser Prozessschritt symbolisiert die Maßnahmen, die durchgeführt werden müssen, um ein automatisiertes Mikromobil erfolgreich zu verifizieren. Er dient dazu, die Differenzen zwischen Anforderungen und erreichtem Entwicklungsstand des Mikromobils zu beseitigen. Dafür muss zuerst die Ursache für die Diskrepanz identifiziert werden, um einen Rücksprung zu einem adäquaten Prozessschritt vornehmen zu können. In Folge sollen Korrekturmaßnahmen und Optimierungen gezielt angewendet werden, ohne den gesamten Entwicklungsprozess erneut durchlaufen zu müssen.

Für die Automatisierungsfunktionen eines Mikromobils sind hier die Prozessschritte Funktionsentwurf 5.4 und Dimensionierung 5.5 von Bedeutung, um die Anforderungen an die Fahrzeugdynamik durch eine Optimierung zu verifizieren. Als Beispiel für eine Parameteroptimierung wird die Querregelung des automatisierten Lastenrades angeführt. Während der Verifizierung wurde in Fahrversuchen die Querabweichung des Fahrzeuges zur Solltrajektorie analysiert. Aufgrund eines zu hohen Querversatzes wurden die

Reglerparameter des Querreglers erneut dimensioniert. Durch diese Optimierung wurde die zulässige Querabweichung zur Solltrajektorie minimiert und in Folge dessen die Anforderung verifiziert.

Nachdem in diesem Prozessschritt Anpassungen am automatisierten Mikromobil vorgenommen wurden, muss eine erneute Verifizierung durchgeführt werden.

## 7.3 Validierung

Im Gegensatz zur Verifikation, welche die Erfüllung der Anforderungen nachweisen soll, liefert die Validierung den Nachweis, dass das entwickelte Mikromobil die automatisierte Fahrfunktion reproduzierbar ausführen kann. Für ein automatisiertes Mikromobil bedeutet das, dass die festgelegten Funktionalitäten aus den Anforderungen auf Richtigkeit nachgewiesen werden. Die nachfolgenden obligatorischen Funktionalitäten für automatisierte Mikromobilen sollten validiert werden.

- Sicherheitsmanagement für das automatisierte Mikromobil
- Planung von Sollwerten für die automatisierte Fahraufgabe
- Regelung von Fahrzuständen
- Filterung von Messgrößen

Da sich die Anforderungen zur Sicherheit des automatisierten Vehikels unter anderem aus gesetzlichen Vorschriften ergeben, ist die Validierung des Sicherheitsmanagements fundamental. Ein Beispiel für eine sicherheitsrelevante Anforderung ist der Notstopp des Mikromobils bei Gefährdungen und Fehlfunktionen. Damit das Sicherheitsmanagement für den Zustand Notstopp validiert werden kann, muss eine beabsichtigte Fehlfunktion herbeigeführt werden, die das Sicherheitsmanagement zu dedizierten Maßnahmen zwingt. Ähnliche Szenarien für das Zielverhalten müssen auch für alle anderen Funktionalitäten durchgeführt werden. Die Validierung soll dabei das reproduzierbare Ausgabeverhalten der Funktionalität bzw. Fahrverhalten des Mikromobils bei gleichen Eingabewerten aufzeigen. Als Beispiel kann die Geschwindigkeitsregelung eines Mikromobils genannt werden. Zur Validierung eines Planers muss die Erzeugung der Sollwerte für die beabsichtigte Fahrgeschwindigkeit nachgewiesen werden. Die Funktionalität des Reglers kann daraufhin anhand der Einhaltung der geforderten Zielgeschwindigkeit validiert werden. Die Funktionalität des Filters muss anhand der Fahrgeschwindigkeit evaluiert werden. Alle aufgeführten Funktionalitäten stehen in unmittelbarem Zusammenhang und bilden ein Gesamtsystem. Anhand des genannten Beispiels können die Funktionalitäten validiert werden, indem das Mikromobil die angeforderte Geschwindigkeit einhält.

Am Ende dieses Prozessschrittes sind die automatisierten Fahrfunktionen eines Mikromobils validiert und die Ergebnisse dokumentiert. Dieser finale Prozessschritt bildet den Abschluss des durchlaufenen Entwicklungsprozesses, dessen Resultat ein Mikromobil ist, das automatisierte Fahrfunktionen aufgrund der mechatronischen Komponenten und den implementierten Funktionalitäten durchführen kann.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war die Anwendung etablierter Prozesse auf die Entwicklung automatisierter Mikromobile. Dazu wurden zuerst die Begrifflichkeiten für Mikromobile und Automatisierungsgrade diskutiert, um daran rechtliche Rahmenbedingungen und Systemkomponenten abzuleiten. Danach wurden Methoden zum Entwicklungsprozess vorgestellt und die mathematischen Grundlagen der Fahrdynamik eines Mikromobils gezeigt. Im Anschluss wurde der Entwicklungsprozess auf Grundlage des V-Modells der Mechatronik mit allen Prozessschritten adaptiert und anhand von zwei Fallbeispielen erläutert.

Der Entwicklungsprozess beginnt mit einer Anforderungsanalyse, in der die Randbedingungen für Hard- und Software des automatisierten Mikromobils festgelegt wurden. In der darauffolgenden Entwurfsphase wurden essentielle Modelle für Mikromobile erstellt, indem die Modellgleichungen der Fahrzeugmodelle adaptiert wurden. Anhand der Gleichungen konnten die Funktionen der Automatisierung entworfen und mit bekannten Parametern aus den Anforderungen dimensioniert werden. Auf Grundlage der Fahrzeugmodelle und der dimensionierten Funktionalitäten wurden Simulationen erstellt, die für Analysen genutzt werden können. Die Simulationsergebnisse bilden dann eine fundierte Grundlage zur Auswahl geeigneter mechatronischer Komponenten zur Automatisierung der Mikromobile.

Mit der Integration der ausgewählten Hardware am Mikromobil beginnt die Implementierungsphase des Entwicklungsprozesses. Darauf folgend kann die Hardware mit den nötigen Automatisierungsfunktionen programmiert werden und danach als Teilsystem in Betrieb genommen werden. Durch die Implementierung der Komponenten am Fahrzeug können im nächsten Schritt die Fahrzeug- und Modellparameter des Gesamtsystems ermittelt werden, um die Parameter der Funktionalitäten anzupassen. Durch die Integration der Automatisierungsfunktionen am Mikromobil wird die Inbetriebnahme des Mikromobils als Gesamtsystem abgeschlossen. In der Finalisierungsphase des Entwicklungsprozesses werden die entwickelten Funktionalitäten des automatisierten Mikromobils verifiziert und validiert.

Die Kernfrage der Arbeit war die Übertragbarkeit etablierter Entwicklungsprozesse auf Kleinserienentwicklung für automatisierte Mikromobile. Besonders in Bezug auf die Automatisierung eines Mikromobils werden mit steigendem Grad umfangreiche Anforderungen an die Sicherheit gestellt und müssen durch entsprechende Dokumentation der Entwicklung

nachgewiesen werden. Dies zieht einen enormen Aufwand in der Entwicklungsleistung nach sich, der für Kleinserien unter Umständen zu hoch ist. Dies kann zumindest für Teilkomponenten vermieden werden, indem kommerziell verfügbare Lösungen verwendet werden (z.B. ein zertifizierter Antrieb).

Ausschlaggebend für den Umfang der durchzuführenden Maßnahmen zur Automatisierung von Mikromobilen sind die erforderlichen Funktionalitäten. Mit steigendem Automatisierungsgrad müssen repräsentative Vorschriften und Verordnungen angewendet werden, die unter anderem umfangreiche Maßnahmen einer Risikobeurteilung erfordern. Der rechtliche Rahmen zur Einordnung automatisierter Mikromobile als Kraftfahrzeug nach StVG ist zwar nicht explizit abgesteckt, jedoch nehmen diese überwiegend am öffentlichen Straßenverkehr teil. Dadurch werden auch die Normen und Gesetze für Kraftfahrzeuge relevant für Mikromobile und müssen bei der Entwicklung berücksichtigt werden.

Der Entwicklungsprozess des V-Modells kann für automatisierte Mikromobile angewendet werden. Jedoch sollte der Umfang des Arbeitsaufwandes in Relation zum Automatisierungsgrad stehen und die Prozessschritte entsprechend zugeschnitten werden. Eine Reduzierung des Arbeitsumfanges sollte nur dann erfolgen, wenn dieser nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Gefährdung von Personen steht. Die Risikobeurteilung der Anforderungsanalyse stellt einen obligatorischen Prozessschritt dar, der gewissenhaft durchgeführt werden sollte, um ein sicheres automatisiertes Mikromobil zu entwickeln.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist ein konkretisierter Ablaufplan, der aus dem V-Modell der Mechatronik abgeleitet wurde und alle notwendigen Prozessschritte zur Entwicklung automatisierter Mikromobile enthält. Die aufgeführte Reihenfolge der Prozessschritte soll dabei nur eine Empfehlung darstellen, die eine logisch aufeinander aufbauende Entwicklung ermöglicht. Der Ablaufplan sollte aber keinesfalls als strikte Reihenfolge interpretiert werden, sondern muss auf den individuellen Entwicklungsprozess eines Projektes zugeschnitten werden (Tailoring). Prozessschritte können dazu durchaus übersprungen werden, falls sie nicht für die beabsichtigte Automatisierungsfunktionalität benötigt werden. Rücksprünge zu vorhergehenden Prozessschritten können ebenfalls durchgeführt werden, wenn im fortlaufenden Prozess Anforderungen nicht erfüllt werden können. Dadurch entstehen Iterationen der Teilprozesse, die aufgrund der Komplexität eines mechatronischen Gesamtsystems systematisch in mehreren Durchläufen erfolgen können (Mechanik, Elektronik, Informatik). Am Ende des Entwicklungsprozesses entsteht ein Mikromobil, das eine Fahraufgabe automatisiert anhand von Sensordaten, Aktoren und den entwickelten Funktionalitäten erfüllen soll.

Der Entwicklungsprozess wurde in dieser Arbeit an zwei Fallbeispielen mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden erläutert. Ein Anwendungsbeispiel besitzt den Automatisierungsgrad Level 1 „Assistiert“, das andere Beispiel ist ein Level 4 System „Hoch Automatisiert“.

---

Für alle anderen Automatisierungsgrade nach [11] sollte die Gültigkeit der hier vorgestellten Entwicklungsmethodik noch in zukünftigen Arbeiten untersucht werden. Des Weiteren wurde der Entwicklungsprozess für Mikromobile vorgestellt, die als Nicht-Kraftfahrzeug klassifiziert wurden. Die Anwendbarkeit des Prozesses auf Kraftfahrzeug-Mikromobile aufgrund dafür spezifisch geltender Regularien muss ebenfalls gesondert betrachtet werden, da dadurch zulassungskonforme Anforderungen an das Mikromobil eingehalten und nachgewiesen werden müssen.

Ein anschließendes Thema zu dieser Arbeit ist der Entwicklungsprozess einer Mensch-Maschine-Schnittstelle für automatisierte Mikromobile. Der hier gezeigte Prozess zeigt die Entwicklung von Funktionalitäten zur Automatisierung der Fahrfunktion. Alle nötigen Informationen zum Zustand des Mikromobils und der Funktionalitäten müssen auch für den Fahrzeugführer bzw. Insassen erkenntlich sein. Dafür kann der hier vorgestellte Prozess angepasst werden, um eine adäquate HMI für automatisierte Mikromobile zu entwickeln. Das HMI ist insbesondere für Fahrzeuge der Automatisierungsgrade 2 und 3 eine sicherheitsrelevante Komponente und deren Entwicklung damit nicht trivial.

Einhergehend mit der Implementierung automatisierter Fahrfunktionen als Programmierung auf Steuergeräten des Mikromobils müssen auch Testverfahren auf die entwickelte Software angewendet werden. Ähnlich zu den Inbetriebnahmetests des vorgestellten Entwicklungsprozesses für die mechatronischen Komponenten und Funktionalitäten am realen Fahrzeugen muss auch die Software in Betrieb genommen werden. Im Gegensatz zur Hardware kann die Programmierung aber durch entsprechende Softwaretest überprüft werden, indem das Ausgabeverhalten bei definierten Eingaben mit den gestellten Anforderungen verglichen wird. Die Programmierung unterliegt häufigen Änderungen und die Entwicklung inklusive Softwaretest stellt eine weitere Iteration des V-Modells der Mechatronik dar, die als Unterprozess gesondert betrachtet werden sollte.

Das vorgestellte Prozessmodell bildet eine Basis für automatisierte Mikromobile und deren Fahrfunktionen auf Low-Level-Ebene, die den Trend der Mikromobilität durch zukünftige Entwicklungen unterstützen soll.

## Literaturverzeichnis

- [1] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR REFERAT G 13 – PROGNOSEN, STATISTIK UND SONDERERHEBUNGEN: *Mobilität in Deutschland MiD - Ergebnisbericht*. [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/mid-ergebnisbericht.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/mid-ergebnisbericht.pdf?__blob=publicationFile). Version: 2018
- [2] CYCLELOGISTICS: *A set of updated IEE Common performance indicators including their baseline and assumptions for extrapolation*. [https://www.cargobike.jetzt/wp-content/uploads/2021/03/2013\\_cyclelogistics\\_baseline\\_study.pdf](https://www.cargobike.jetzt/wp-content/uploads/2021/03/2013_cyclelogistics_baseline_study.pdf). Version: 2013
- [3] BROST, Mascha ; EHRENBERGER, Simone ; DASGUPTA, Isheeka ; HAHN, Robert ; GEBHARDT, Laura: *The Potential of Light Electric Vehicles for Climate Protection through Substitution for Passenger Car Trips - Germany as a Case Study*. [https://www.dlr.de/content/de/downloads/2022/lev-studie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.dlr.de/content/de/downloads/2022/lev-studie.pdf?__blob=publicationFile&v=2). Version: 2022
- [4] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR REFERAT G 13 – PROGNOSEN, STATISTIK UND SONDERERHEBUNGEN: *Mobilität in Deutschland Kurzreport - Verkehrsaufkommen – Struktur – Trends*. [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/mid-2017-kurzreport.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/mid-2017-kurzreport.pdf?__blob=publicationFile). Version: 2019
- [5] DÍAZ, A. V., WAGNER, N., LIETZ, S. MÜHLHANS, H.: *Zukunftsfeld Mikromobile: E-Tretroller Co*. Fraunhofer IML, 2019. [https://www.ivm-rheinmain.de/wp-content/uploads/2019/06/20190619\\_Zukunftsfeld\\_Mikromobile\\_Infobroschuere-2019\\_final\\_aktualisiert-web.pdf](https://www.ivm-rheinmain.de/wp-content/uploads/2019/06/20190619_Zukunftsfeld_Mikromobile_Infobroschuere-2019_final_aktualisiert-web.pdf)
- [6] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR: *Verordnung über die Teilnahme von Elektrokleinstfahrzeugen am Straßenverkehr*. 06.06.2019. Bundesrepublik Deutschland, Juni 2019. <https://www.gesetze-im-internet.de/ekfv/BJNR075610019.html>
- [7] SAE INTERNATIONAL: *TAXONOMY CLASSIFICATION OF POWERED MICROMOBILITY VEHICLES*. j3194\_201911. SAE International, 2019. <https://www.sae.org/binaries/content/assets/cm/content/topics/micromobility/sae-j3194-summary---2019-11.pdf>

- [8] INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM: *Safe Micromobility*. Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD), Februar 2020. [https://www.oecd-ilibrary.org/transport/safe-micromobility\\_0b98fac1-en](https://www.oecd-ilibrary.org/transport/safe-micromobility_0b98fac1-en)
- [9] EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT: *VERORDNUNG (EU) Nr. 168/2013 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über die Genehmigung und Marktüberwachung von zwei- oder dreirädrigen und vierrädrigen Fahrzeugen*. Straßburg: Europäische Union, Januar 2013
- [10] BRAKEFORCEONE GMBH: *Funktionsprototyp LKF (Lastkraftflitzer)*. <https://www.brakeforceone.de/>. Version: Juli 2021
- [11] SAE INTERNATIONAL: *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*. j3016 APR2021. SAE International, 2021. <https://www.sae.org/>
- [12] VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE VDA: *Automatisierung. Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren*. Berlin: VDA, 2015
- [13] BUNDESTAG UND BUNDES RAT: *Straßenverkehrsgesetz (StVG)*. Bundesrepublik Deutschland, 2003. <https://www.gesetze-im-internet.de/stvg/StVG.pdf>
- [14] BUNDES MINISTERIUM FÜR DIGITALE UND VERKEHR: *Verordnung zur Regelung des Betriebs von Kraftfahrzeugen mit automatisierter und autonomer Fahrfunktion und zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften*. Bundesrepublik Deutschland, 2022. [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/presse/008-verordnung-automatisierte-autonome-fahrfunktion.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/presse/008-verordnung-automatisierte-autonome-fahrfunktion.pdf?__blob=publicationFile)
- [15] MERCEDES-BENZ AG: *Mercedes-Benz DRIVE PILOT*. <https://www.mercedes-benz.de/passengercars/technology-innovation/mercedes-benz-drive-pilot/stage.module.html>. Version: Juli 2022
- [16] BUNDESTAG UND BUNDES RAT: *Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO)*. Bundesrepublik Deutschland, 2012. [https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo\\_2012/StVZO.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/StVZO.pdf)
- [17] BUNDESTAG UND BUNDES RAT: *Straßenverkehrs-Ordnung (StVO)*. Bundesrepublik Deutschland, 2013. [https://www.gesetze-im-internet.de/stvo\\_2013/StVO.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/StVO.pdf)
- [18] BUNDESTAG UND BUNDES RAT: *Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO)*. Bundesrepublik Deutschland, 2001. [https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund\\_26012001\\_S3236420014.htm](https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_26012001_S3236420014.htm)

- [19] DEUTSCHE NORM: *Fahrräder – Transport- und Lastenfahrrad – Anforderungen und Prüfverfahren für ein- und mehrspurige Fahrräder*. DIN 79010:2020-02. Deutsches Institut für Normung, 2020
- [20] DEUTSCHE NORM: *Mechanische Schwingungen – Prüfverfahren für bewegliche Maschinen zum Zwecke der Bestimmung des Schwingungsemissionswertes*. DIN EN 1032:2009-02. Deutsches Institut für Normung, 2009
- [21] INTERNATIONAL STANDARD: *Road Vehicles - Functional safety*. ISO 26262:2018-12. Internationale Organisation für Normung, 2018
- [22] DEUTSCHE NORM: *Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme*. DIN EN 61508:2010. Deutsches Institut für Normung, 2010
- [23] INTERNATIONAL STANDARD: *Road Vehicles - Safety of the intended functionality*. ISO 21448:2022. Internationale Organisation für Normung, 2022
- [24] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Zahl der Haushalte mit E-Bikes hat sich seit 2015 fast verdreifacht*. [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/09/PD20\\_375\\_639.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/09/PD20_375_639.html). Version: September 2020
- [25] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Zahl der E-Bikes in Privathaushalten 2021 um 1,2 Millionen gestiegen*. [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2021/PD21\\_38\\_p002.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2021/PD21_38_p002.html). Version: September 2021
- [26] HEINZMANN: *CargoPower E-Bike Motor*. <https://www.heinzmann-electric-motors.com/produkte/fahrrad-radnabenmotoren/cargopower>. Version: August 2021
- [27] BREUER, Bert ; BILL, Karlheinz H.: *Bremsenhandbuch*. 5. Wiesbaden : Springer-Verlag, 2017. – 791 S. – ISBN 978-3-658-15488-2
- [28] MAIER, Oliver: *Modellbasierte Entwicklung eines aktiven Sicherheitssystems für elektrifizierte Fahrräder*. Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2018. – 272 S. – ISBN 978-3-7315-0778-9
- [29] BOSCH: *Bosch eBike ABS*. <https://www.bosch-ebike.com/de/produkte/abs>. Version: Juli 2022
- [30] BLUBRAKE: *ABS für E-Bikes*. <https://blubrake.com/de/>. Version: Juli 2022
- [31] DEUTSCHES PATENT- UND MARKENAMT: *DEPATISnet*. <https://depatisnet.dpma.de>. Version: Juli 2022

- [32] SHIMANO INC: *Patent: BREMSBETÄTIGUNGSAPPARAT UND BREMSSYSTEM*. Sakai, JP, November 2019. – Patent Nr.: DE 10 2019 113 019 A1
- [33] ROBERT BOSCH GMBH: *Patent: BREMSEINRICHTUNG MIT AKTIVER BREMSKRAFTEINSTELLUNG*. Stuttgart, September 2019. – Patent Nr.: EP 3 628 556 A1
- [34] JUNGE, L. ; SCHMIDT, M. ; ZUG, S. ; SCHMIDT, S.: *Entwicklung eines Lenk- und Bremssystems für automatisierte Lastenräder*[Konferenzbeitrag]. Magdeburg: 14. Magdeburger Maschinenbautage 2019 - MAGDEBURGER INGENIEURTAGE, September 2019
- [35] KONRADT, R. ; JUNGE, L. ; SASS, S. ; SCHMIDT, S.: *Design of a spring-loaded brake for automated bikes*[Konferenzbeitrag]. Barcelona: ICMECE, Oktober 2022
- [36] WIKIPEDIA, THE FREE ENCYCLOPEDIA: *Servolenkung*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Servolenkung>. Version: Oktober 2021
- [37] WIKIPEDIA, THE FREE ENCYCLOPEDIA: *Hydrostatische Lenkung*. [https://de.wikipedia.org/wiki/Hydrostatische\\_Lenkung](https://de.wikipedia.org/wiki/Hydrostatische_Lenkung). Version: Januar 2018
- [38] ROBERT BOSCH GMBH: *Patent: Fahrrad mit elektrischem Lenkeingriff sowie Verfahren zur Stabilisierung des Fahrrads sowie Verfahren zur taktilen Informationsübermittlung an den Fahrer*. Stuttgart, Januar 2015. – Patent Nr.: DE 10 2013 214 517 A1
- [39] GILLETT, Carla: *Patent: Vehicle comprising autonomous steering column system*. Sacramento, Juli 2017. – Patent Nr.: US 2017/0190335 A1
- [40] ZHANG, W. ; MOORE, S. ; BUSH, J. ; MABEY, M. ; DENG, W.: *Patent: Robotic steering mechanism for autonomous bicycle*. Scottsdale, April 2020. – Patent Nr.: US 2020/0102043 A1
- [41] DYAR, R. ; DYAR, D.: *Patent: Motorcycle power steering*. Guntersville, Juli 2020. – Patent Nr.: US 2020/0207409 A1
- [42] INC., Weel A.: *Patent: Integrated head tube steering motor for autonomous electronic bicycle*. Seattle, März 2022. – Patent Nr.: US 2022/0063758 A1
- [43] WINNER, Herrmann ; HAKULI, Stephan ; LOTZ, Felix ; SINGER, Christina: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden : Springer-Verlag, 2015. – 1216 S. – ISBN 978-3-658-05734-3
- [44] LUNZE, Jan: *Regelungstechnik 2*. Bochum : Springer-Verlag, 2014. – 682 S. – ISBN 978-3-642-53943-5

- [45] LINDEMANN, Udo: *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. Berlin : Springer-Verlag, 2009. – 341 S. – ISBN 978-3-642-01422-2
- [46] FACHBEREICH PRODUKTENTWICKLUNG UND PROJEKTMANAGEMENT: *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung*. VDI2221:2019-11. VDI, 2019
- [47] MESS- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK: *Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme*. VDI/VDE 2206:2021-11. VDI/VDE, 2021
- [48] DEUTSCHE NORM: *Sicherheit von Maschinen — Allgemeine Gestaltungsleitsätze — Risikobeurteilung und Risikominderung (ISO 12100:2010)*. DIN EN ISO 12100:2011-03. Deutsches Institut für Normung, 2010
- [49] DEUTSCHE NORM: *Sicherheit von Maschinen – Risikobeurteilung – Teil 2: Praktischer Leitfaden und Verfahrensbeispiele ((ISO/TR 14121-2:2012)*. DIN ISO/TR 14121-2 (DIN SPEC 33885):2013-02. Deutsches Institut für Normung, 2012
- [50] DEUTSCHE NORM: *Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code)*. DIN EN 60529:2014-09. Deutsches Institut für Normung, 2014
- [51] INTERNATIONAL STANDARD: *Fault tree analysis (FTA)*. IEC 61025:2006. International Electrotechnical Commission, 2006
- [52] INTERNATIONAL STANDARD: *Failure modes And effects analysis (FMEA and FMECA)*. IEC 60812:2018. International Electrotechnical Commission, 2018
- [53] KÖLLN, Greta C.: *Eignung und Anwendung der Gefahrenanalyse STPA zur Erarbeitung eines umfassenden Sicherheitsnachweises für automatisierte Fahrzeuge SAE Level vier und fünf*. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2023. – Dissertation
- [54] DEUTSCHE NORM: *Straßenfahrzeuge – Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten – Begriffe (ISO 8855:2011)*. ISO 8855:2011. Deutsches Institut für Normung, 2011
- [55] KÜÇÜKAY, Ferit: *Grundlagen der Fahrzeugtechnik*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2022. – 1478 S. – ISBN 978-3-658-36727-5
- [56] RIEKERT, P. ; SCHUNCK, T.E.: *Zur Fahrmechanik des gummibereiften Kraftfahrzeugs*. Stuttgart: Ingenieur-Archiv, 1940
- [57] EINSLE, S.: *Analyse und Modellierung des Reifenübertragungsverhaltens bei transienten und extremen Fahrmanövern*. Dresden: Technische Universität Dresden, 2010. – Dissertation

- [58] SCHRAMM, Dieter ; HILLER, Manfred ; BARDINIR, Roberto: *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2010. – 465 S. – ISBN 978-3-540-89313-4
- [59] PAPAGEORGIOU, Markos ; LEIBOLD, Marion ; BUSS, Martin: *Optimierung*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2012. – 519 S. – ISBN 978-3-540-34012-6
- [60] SCHMIDT, S. ; ASSMANN, T. ; JUNGE, L. ; ET AL.: *Shared autonomous cargo bike fleets – Approaches for a novel sustainable urban mobility solution*. Prag: Fisita World Congress, 2021
- [61] DEUTSCHE NORM: *Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 5: Begriffe*. DIN 69901-5:2009-01. Deutsches Institut für Normung, 2009
- [62] INTERNATIONAL STANDARD: *Systems and software engineering - Life cycle processes - Requirements engineering*. ISO/IEC/IEEE 29148:2018(E). Internationale Organisation für Normung, 2018
- [63] JANSCHKE, Klaus: *Systementwurf mechatronischer Systeme*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2010. – 842 S. – ISBN 978-3-540-78876-8
- [64] LUNZE, Jan: *Regelungstechnik 1*. Bochum : Springer-Verlag, 2016. – 742 S. – ISBN 978-3-662-52677-4
- [65] SCHMIDT, Prof. Dr.-Ing. S.: *Ein optimales Steuerungs- und Regelungskonzept für autonome Elektrofahrzeuge*. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2013. – Dissertation
- [66] ZACHER, Serge ; REUTER, Manfred: *Regelungstechnik für Ingenieure*. Bochum : Springer-Verlag, 2017. – 515 S. – ISBN 978-3-658-17632-7

# A Diagramme

## A.1 Mikromobile

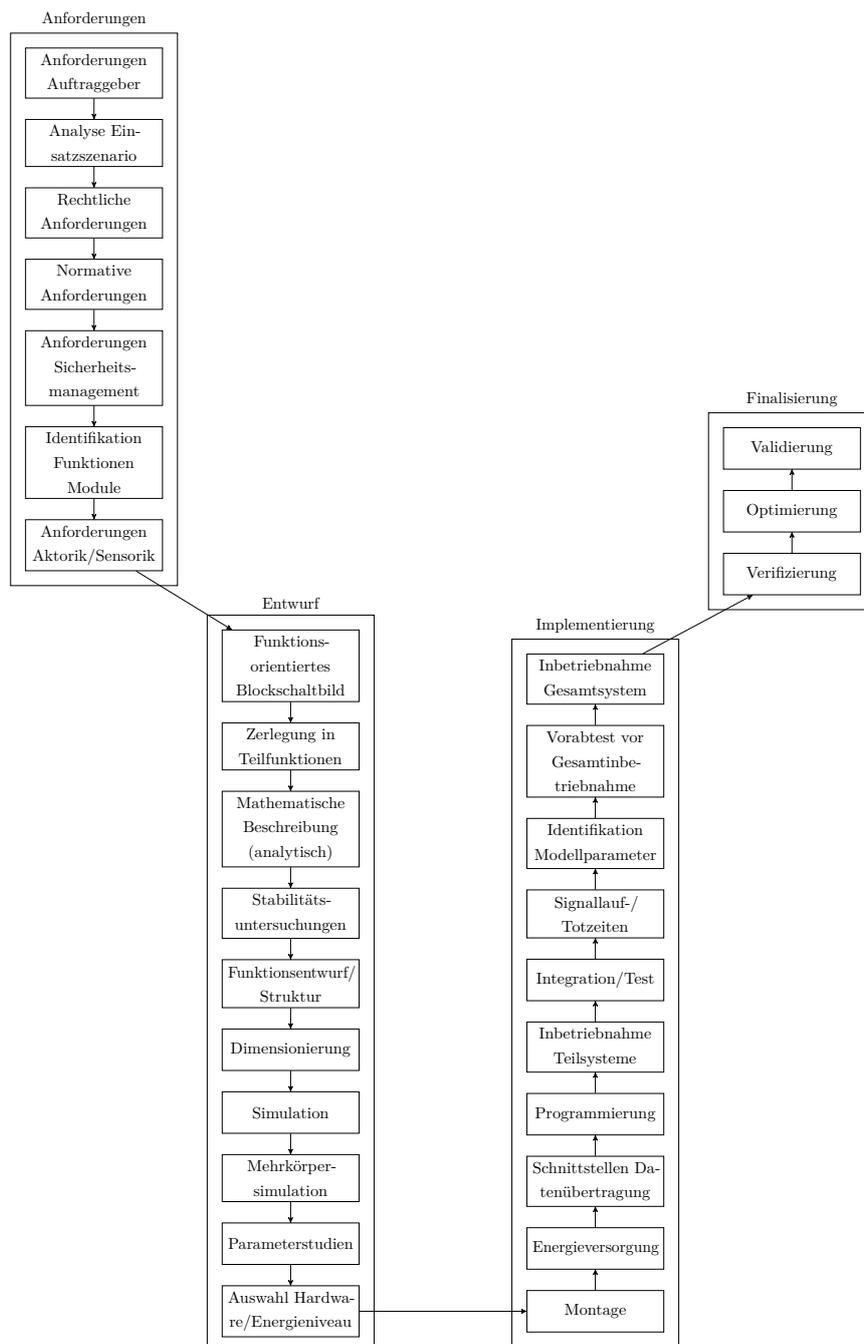


Abbildung A.1: Entwicklungsprozess eines automatisierten Mikromobils

## A.2 E-Trailer

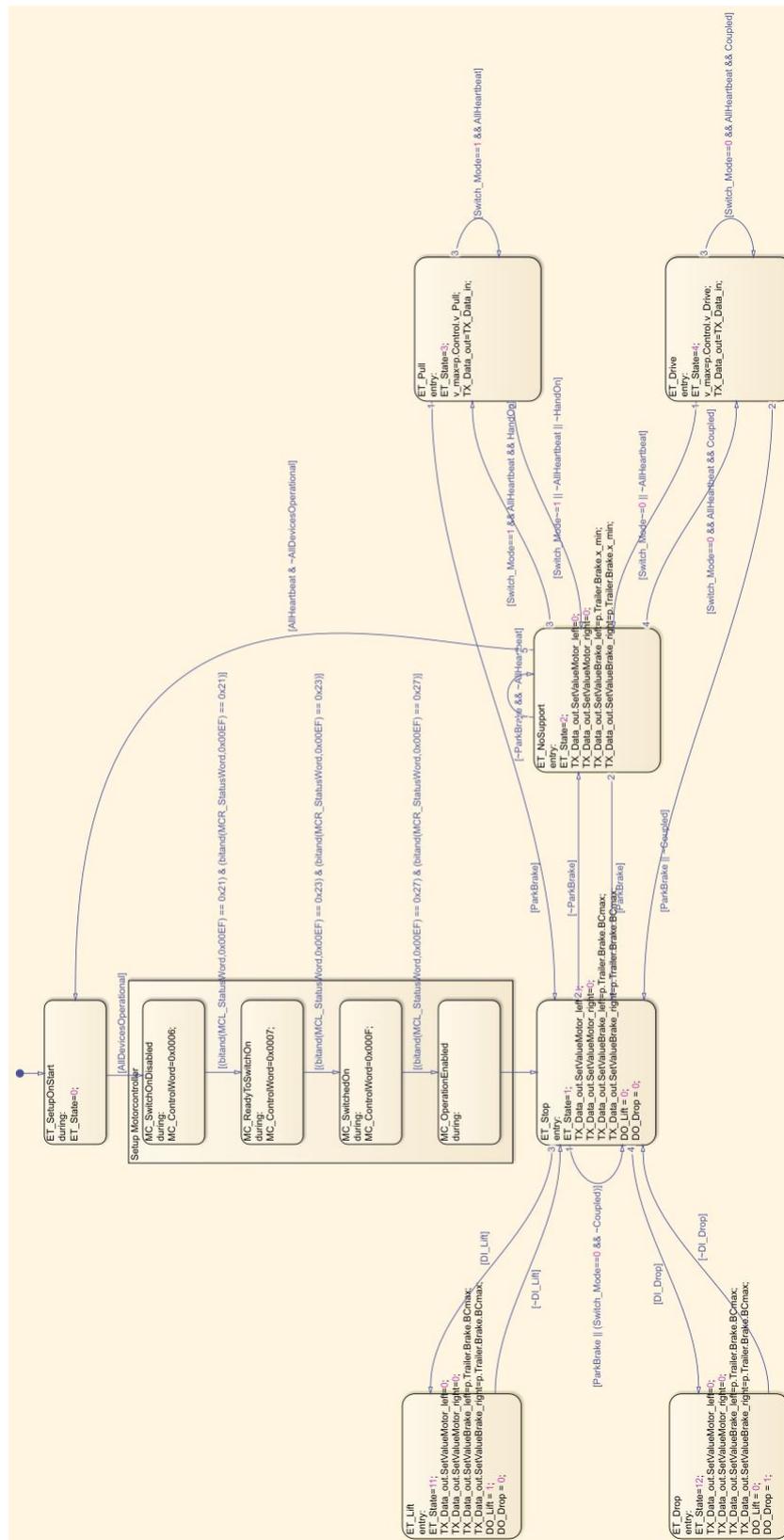


Abbildung A.2: Sicherheitsmanagement Modul des Steuergerätes auf dem E-Trailer

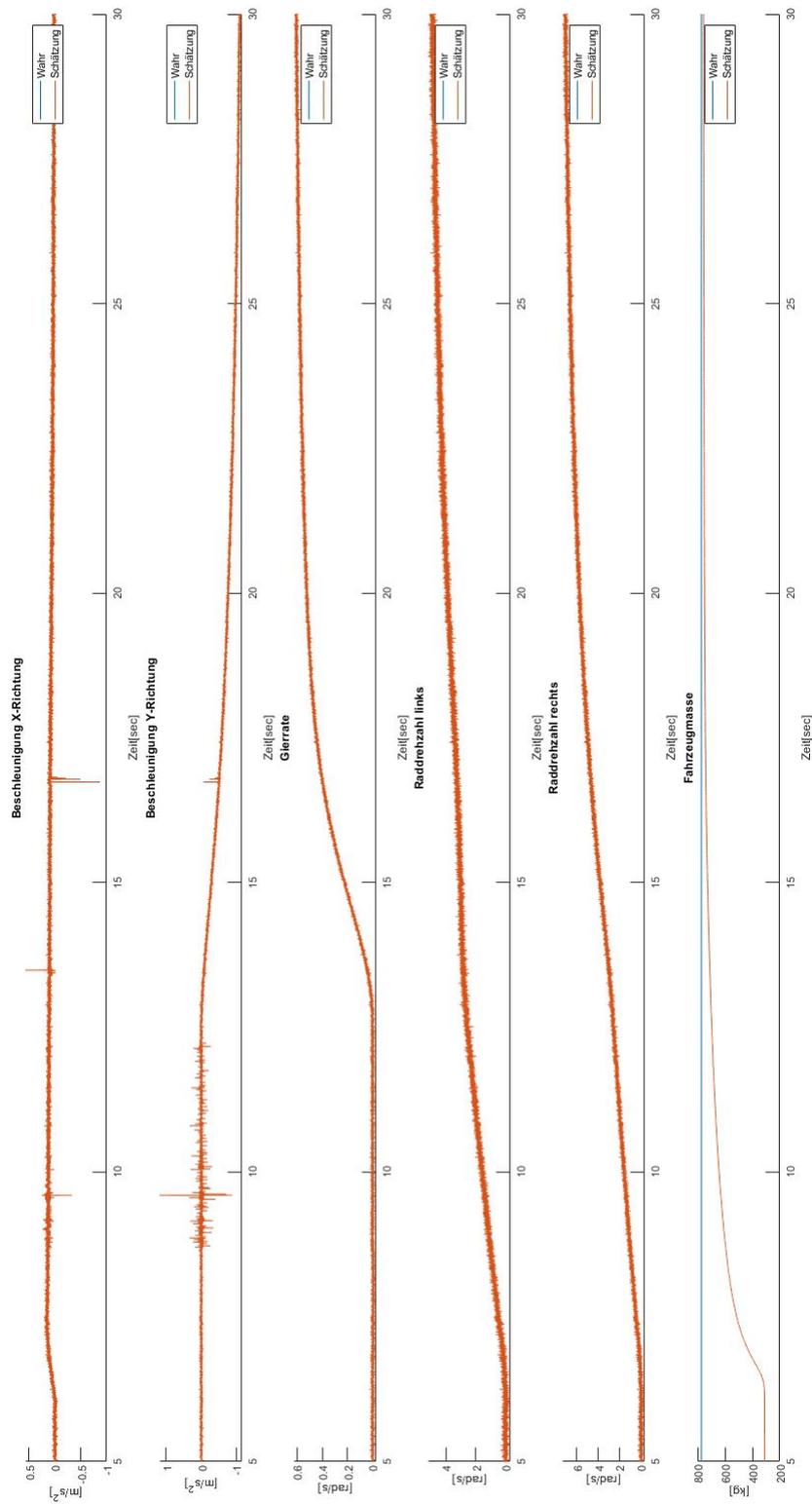


Abbildung A.3: Zustandsverläufe und Filter-Schätzungen des Trailers bei Kreisfahrt links

# A.3 Automatisiertes Lastenrad

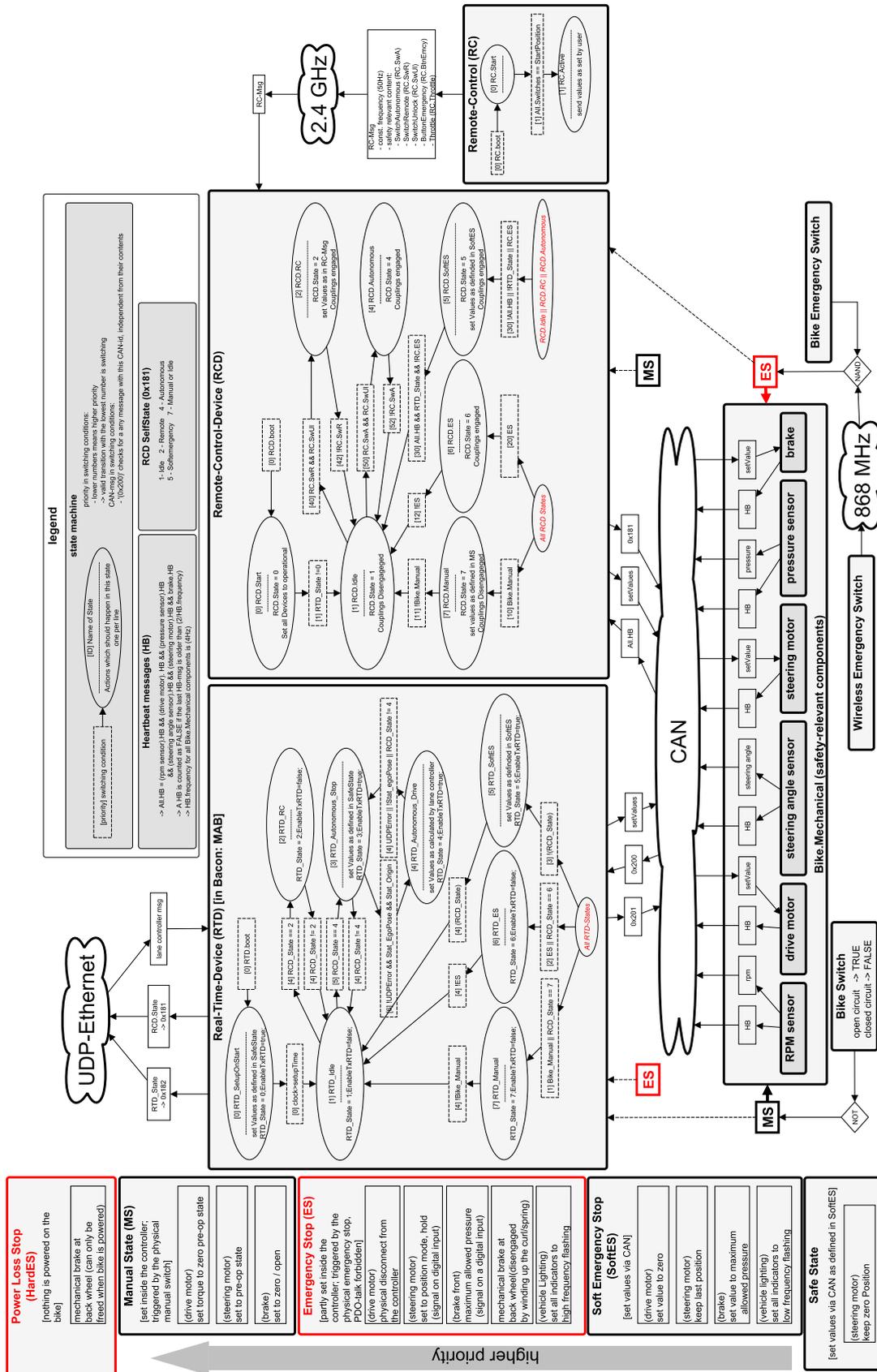


Abbildung A.4: Sicherheitsmanagement Graph im Projekt Aura

## B Berechnungen / Herleitungen

### B.1 Herleitung des Einspurmodells

Zur Herleitung des Differentialgleichungssystems des Einspurmodells wird die Bewegung einer Punktmasse auf einer Kreisbahn mit dem Radius  $r$  betrachtet.

$$a_n = \frac{v^2}{r} = \frac{v \cdot v}{r} \quad (\text{B.1})$$

Die Bahngeschwindigkeit lässt sich mit der Kreisgeschwindigkeit und dem Bahnradius berechnen.

$$v = \omega \cdot r \quad (\text{B.2})$$

Die Kreisgeschwindigkeit ist die Ableitung des Winkel nach der Zeit.

$$\omega = \frac{d\nu}{dt} \quad (\text{B.3})$$

Mit der Gleichung B.3 in B.2 und in B.1 ergibt sich:

$$a_N = v \cdot \frac{d\nu}{dt} \quad (\text{B.4})$$

Ausgehend von der Gleichung B.4 ergibt sich mit der Fahrzeugmasse  $m$  und der Beschleunigung  $a_n$  die Summe aller Kräfte in Normalrichtung zur Bahnkurve.

$$m \cdot a_N = \Sigma F_N = m \cdot v \cdot \frac{d\nu}{dt} \quad (\text{B.5})$$

Aus der tangentialen Beschleunigung  $\frac{dv}{dt}$  und der Masse errechnet sich mit der Kräftebilanz die Summe aller Kräfte in tangentialer Richtung:

$$\Sigma F_T = m \cdot \frac{dv}{dt} \quad (\text{B.6})$$

Weiterhin erhält man aus der Momentenbilanz mit der Fahrzeugrotationsträgheit  $J_{ZZ}$ :

$$\Sigma J_{ZZ} \cdot \ddot{\psi} = \Sigma M \quad (\text{B.7})$$

Der Kurswinkel ist die Summe aus Gierwinkel und Schwimmwinkel(siehe Abbildung 3.8)

$$\nu = \psi + \beta \quad (\text{B.8})$$

Das Differentialgleichungssystem ergibt sich dann mit der Ableitung von Gleichung B.8 in B.5 und Umstellung der Gleichungen B.6, B.7.

$$\dot{\beta} = -\dot{\psi} + \frac{1}{m \cdot v} \cdot \Sigma F_N \quad (\text{B.9})$$

$$\ddot{\psi} = \frac{1}{J_{ZZ}} \cdot \Sigma M \quad (\text{B.10})$$

$$\dot{v} = \frac{1}{m} \cdot \Sigma F_T \quad (\text{B.11})$$

Die Summen der Kräfte und Momente ergeben sich durch Aufstellung der Kräftegleichgewichte.

$$\Sigma F_N = F_{XW_r} \cdot \sin \beta + F_{YW_r} \cdot \cos \beta + F_{XW_f} \cdot \sin (\delta + \beta) + F_{YW_f} \cdot \cos (\delta + \beta) \quad (\text{B.12})$$

$$\Sigma M = F_{YW_r} \cdot l_r - F_{YW_f} \cdot l_f \cdot \cos \delta \quad (\text{B.13})$$

$$\Sigma F_T = F_{XW_r} \cdot \cos \beta + F_{YW_r} \cdot \sin \beta + F_{XW_f} \cdot \cos (\delta + \beta) + F_{YW_f} \cdot \sin (\delta + \beta) \quad (\text{B.14})$$

Zur Berechnung der Reifenquerkräfte können verschiedene Modelle betrachtet werden. Für alle wird jedoch der Schräglaufwinkel am jeweiligen Rad benötigt. Beide Schräglaufwinkel lassen sich aus den geometrischen Beziehungen mit der Fahrzeuggeschwindigkeit und dem Schwimmwinkel herleiten.

$$\tan \alpha_r = \frac{v_{YW_r}}{v_{XW_r}} = \frac{l_r \cdot \dot{\psi} - v \cdot \sin \beta}{v \cdot \cos \beta} \quad (\text{B.15})$$

$$\tan (\delta - \alpha_f) = \frac{v_{YW_f}}{v_{XW_f}} = \frac{l_f \cdot \dot{\psi} + v \cdot \sin \beta}{v \cdot \cos \beta} \quad (\text{B.16})$$

Die Reifenmodelle können mit unterschiedlicher Komplexität der Realität angenähert werden. Eine Übersicht dazu befindet sich in [?]

Das vorgestellte nichtlineare Einspurmodell in den Gleichungen B.9 bis B.14 lässt sich für durch Linearisieren zum linearen Einspurmodell vereinfachen. Ausgehend von kleinen Winkeländerungen bei jedem Zeitschritt wird eine Kleinwinkelnäherung festgelegt. Als Beispiel wird der Winkel  $\beta$  gewählt. Wenn  $\Delta\beta \ll 1$  dann gilt:

$$\sin \beta \approx \beta, \cos \beta \approx 1, \tan \beta \approx \sin \beta \quad (\text{B.17})$$

Mit den getroffenen Annäherungen aus B.17 sehen die Modellgleichungen für das lineare Einspurmodell wie folgt aus.

$$\Sigma F_N = F_{XW_r} \cdot \beta + F_{YW_r} + F_{XW_f} \cdot (\delta + \beta) + F_{YW_f} \quad (\text{B.18})$$

$$\Sigma M = F_{YW_r} \cdot l_r - F_{YW_f} \cdot l_f \quad (\text{B.19})$$

$$\Sigma F_T = F_{XW_r} + F_{YW_r} \cdot \beta + F_{XW_f} + F_{YW_f} \cdot (\delta + \beta) \quad (\text{B.20})$$

Mit dem Einsetzen der Gleichungen B.18 bis B.20 in B.9 bis B.11 ergibt sich ein lineares Differentialgleichungssystem erster Ordnung.

$$\dot{\beta} = -\dot{\psi} + \frac{1}{m \cdot v} \cdot ((F_{XW_r} + F_{XW_f}) \cdot \beta + F_{YW_r} + F_{YW_f}) \quad (\text{B.21})$$

$$\ddot{\psi} = \frac{1}{J_{ZZ}} \cdot (F_{YW_r} \cdot l_r - F_{YW_f} \cdot l_f) \quad (\text{B.22})$$

$$\dot{v} = \frac{1}{m} \cdot (F_{XW_r} + F_{XW_f}) \quad (\text{B.23})$$

## **C Dokumente zu den Projekten**

### **C.1 E-Trailer Lastenheft**

Tabelle C.1: Auszug aus dem Lastenheft Teil 1

Nr.	Kategorie	Gruppe	Bezeichnung	Beschreibung	Anforderung	Kriterium	Bemerkung	Verweis	Quelle	Hauptmerkmal	Teilaufgabe (TA)	geändert durch	geändert am
1.1.1	Einsatzzweck	Anwendung	Anhängerbetrieb	Einsatz als Transportanhänger mit Unterstützung	Anhänger hinter einen handelsüblichen Fahrrad	muss	-			Ergonomie		Konradt	07.05.2021
1.1.2	Einsatzzweck	Anwendung	Handwagenbetrieb	Einsatz als Handwagen mit Unterstützung	Schieben oder Ziehen per Hand	muss	-			Ergonomie		Konradt	07.05.2021
1.1.5	Einsatzzweck	Anwendung	Mitgänger-Flurförderfahrzeug	Begrenzung der Geschwindigkeit	max. 16 km/h, alternativ Pedelec Schiebehilfe 6 km/h	muss			Beschaffenheitsanforderung gemäß §2 der Maschinenverordnung für Mitgänger-Flurförderfahrzeuge			OBu	14.05.2021
1.2.1	Einsatzzweck	Transportgut	Zuladung	Gesamtgewicht der zu transportierenden Fracht	mindestens 500 kg	muss	gemäß Anforderungsprofil des Kunden	1.2.4		Kräfte		Konradt	07.05.21
1.2.4	Einsatzzweck	Transportgut	Abmessungen	Grundfläche der zu transportierenden Fracht	Länge x Breite genau 1200 mm x 800 mm	muss	Größe Euro-paletten EN 13698-1	1.2.2	EN 13698-1			Konradt	07.05.21
1.4.2	Einsatzzweck	Geometrie	Breite		maximal 1200 mm	muss	StVO: höchstzulässige Breite über alles, allg. max. 2,55 m / Poller; Breite Ladung + 2x Breite Reifen		§ 32 (1) Nr. 1 StVZO - Abmessungen von Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen	Geometrie	TA 1.2	PW	
1.4.3	Einsatzzweck	Geometrie	Länge		maximal 1400 mm	muss			§ 32 (1) Nr. 1 StVZO - Abmessungen von Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen	Geometrie	TA 1.2	PW	

Tabelle C.2: Auszug aus dem Lastenheft Teil 2

Nr.	Kategorie	Gruppe	Bezeichnung	Beschreibung	Anforderung	Kriterium	Bemerkung	Verweis	Quelle	Hauptmerkmal	Teilaufgabe (TA)	geändert durch	geändert am
1.5.1	Einsatzzweck	Masse	Gesamtgewicht	Maximalgewicht des Anhängers mit Ladung	maximal 800 kg	muss				Kräfte		PP	
2.1.5	Fahreigenschaften	Anhängerbetrieb	Beschleunigung	maximale vorgegebene Beschleunigung, die das Gefährt in der Lage sein soll zu folgen	1 m/s <sup>2</sup>	kann	Basierend auf Referenz-Nutzungsprofil Pedelec+210kg-Anhänger. deckt 99% der aufgenommenen Beschleunigung ab					Schmidt	14.07.2021
2.1.7	Fahreigenschaften	Anhängerbetrieb	Verzögerung	maximale vorgegebene Verzögerung, der das Gefährt in der Lage sein soll zu folgen	-4 m/s <sup>2</sup>	kann	Basierend auf Referenz-Nutzungsprofil Pedelec+210kg-Anhänger mit Auflaufbremse. StVO und StZVO prüfen!					Schmidt	23.07.2021
6.1.1	Elektronik	Allgemein	Absicherung, Strom	die Stromkreise und elektronischen Komponenten des Fahrzeuges sind abzusichern	Stromkreise der Baugruppen sind einzeln abzusichern.	muss	Absicherung der Stromkreise ggü. Kurzschluss			Energie	TA 1.6	OBu	14.05.2021
7.1.7	Energie	Energieversorgung	Batteriespannung	Die Batteriespannung ist so zu wählen, dass das System im Bereich Sicherheitskleinspannung liegt.	Batteriespannung kann SELV < 60 VDC	kann	Ist die Nennspannung bei Wechselspannung kleiner als 25 V beziehungsweise bei Gleichspannung kleiner als 60 V, so erübrigt sich bei Sicherheitskleinspannung ein Schutz gegen direktes Berühren		DIN 61140	EN	TA 1.6	OBu	44344
8.2.1	Sicherheit	Sicherheitseinrichtung	Notausschalter	Sicherheitseinrichtung zur sofortigen Außerbetriebsetzung des gesamten Fahrzeuges	Notausschalter	muss		3.4.7	PP	Sicherheit	TA 1.6	OBu	28.05.2021

## **C.2 E-Trailer Risikobeurteilung**

### **C.2.1 Grenzen der Maschine**

#### **C.2.1.1 Verwendungsgrenzen**

##### **C.2.1.1.1 Betriebsarten:**

###### **Handgeführt mit elektrischer Unterstützung**

- Durch Ziehen am Handgriff der Deichsel und Drücken des Sicherheitstasters
- Elektrische Unterstützung(Antrieb) bis 6km/h vorwärts/rückwärts
- Elektrisch und hydraulisch gebremst
- Zusätzliche Handbremse Vorderrad mit gleichzeitiger Betätigung der hydraulischen Zusatzbremsen mit voller Bremswirkung

###### **Anhängerbetrieb hinter Fahrrad mit elektrischer Unterstützung**

- Durch Ankuppeln mit der mechanischen Kupplung am Fahrrad und der Anlegen der Abreißsicherung
- Elektrische Unterstützung(Antrieb) bis 25km/h vorwärts
- Elektrisch und hydraulisch gebremst

###### **Ohne Unterstützung mitgeführt Hand/Fahrrad**

- Durch Ziehen an der Deichsel, Handgriff oder angekuppelt am Fahrrad
- Keine elektrische Unterstützung durch Antrieb
- Keine elektrische und hydraulische Bremse
- Mechanische Bremse am Vorderrad über Handhebel nutzbar

### **Stillstand/Notstopp**

- Hydraulische Bremsen des Anhängers sind aktiviert bei maximalem Bremsdruck
- Aktivierung durch Handbremshebel im handgeführten Betrieb oder im Betrieb ohne Unterstützung
- Durch Abreißen des Anhängers von der Kupplung im Anhängerbetrieb
- Beenden nur bei Ladefläche in Nullposition(gehoben)

### **Heben/Senken der Ladefläche**

- Nur im Stillstand/Notstop
- Heben und Senken über Schalter am Handgriff der Deichsel

#### **C.2.1.1.2 Einsatzbereich:**

- Im öffentlichen Straßenverkehr
- Auf Privat-/Firmengelände
- Im Anhängerbetrieb auf Radwegen und Straßen
- Im handgeführten Betrieb auf Fußwegen
- Durch Gewerbetreibende

#### **C.2.1.1.3 Vorausgesetztes Niveau:**

- Bedienpersonen haben Benutzerinformation gelesen, Grundkenntnisse in Straßenverkehrsordnung

#### **C.2.1.1.4 Weitere Personen, die mit dem Anhänger in zusammenhang stehen:**

- Alle Personen im öffentlichen Straßenverkehr

### **C.2.1.2 Räumliche Grenzen**

#### **C.2.1.2.1 Bewegungsraum:**

- Im öffentlichen Straßenverkehr
- Auf Privat-/Firmengelände
- Straßen, Radwege, Fußwege

#### **C.2.1.2.2 Platzbedarf:**

- Anhänger + Person + Transportgut + Rangierareal

#### **C.2.1.2.3 Wechselwirkung Mensch Maschine:**

- Anhänger ist durch Bediener von allen Seiten zugänglich
- Beim Fahren/Rangieren Abstand von mind. 50cm zwischen Passanten und Anhänger

### **C.2.1.3 Zeitliche Grenzen**

#### **C.2.1.3.1 Lebensdauer:**

- Gesamtlebensdauer:10 Jahre
- Verschleißteile: Reifen, Schläuche, Bremsbeläge, Hydraulikschläuche

#### **C.2.1.3.2 Wartungsintervalle:**

- Ein Mal jährlich

### **C.2.1.4 Weitere Grenzen**

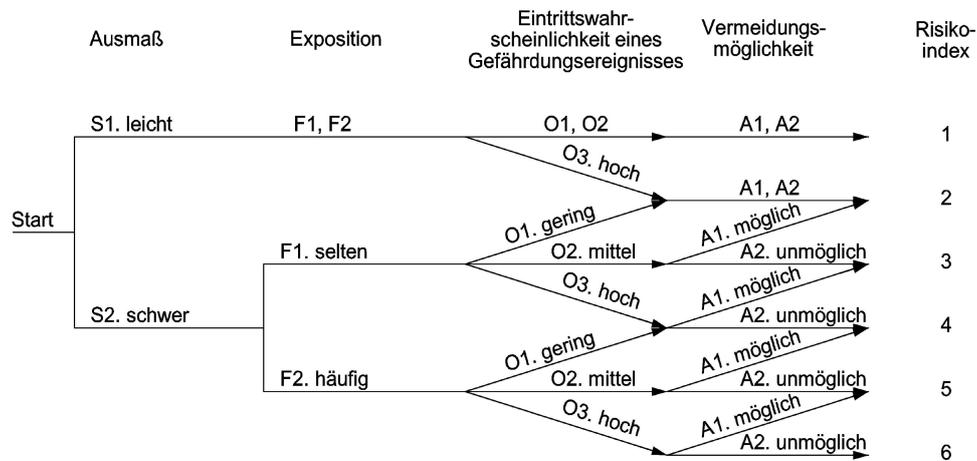
#### **C.2.1.4.1 Umgebungstemperaturen:**

- -10°C bis 40°C

### C.2.2 Identifizierung von Gefährdungen

- Eingreifen von Personen während der gesamten Lebensdauer
- Mögliche Betriebszustände(Normalbetrieb - Störung)
- Unbeabsichtigte Fehlbedienung
- Siehe Tabelle C.3, C.4

### C.2.3 Risikoeinschätzung



- Siehe Tabelle C.3, C.4

### C.2.4 Risikobewertung

- Siehe Tabelle C.3, C.4

### C.2.5 Risikominderung

- Siehe Tabelle C.3, C.4

Tabelle C.3: Risikobeurteilung E-Trailer Teil 1

lfd. Nr	Betriebszustand	Gefährdung	Folgen	Verletzungen
1	Handgeführt	Motoren beschleunigen unerwartet	Kollision mit ner/Passanten	Quetschen/Überrollen
2		Motoren fallen aus	Kollision mit ner/Passanten	erhöhter Zug am Arm/ Handgelenk
3		Anhänger brems unerwartet	Kollision mit ner/Passanten	erhöhter Zug am Arm/ Handgelenk
4		Deichsel wird losgelassen	Kollision mit ner/Passanten	Quetschen/Überrollen
5				
6		Herunterfallen von Ladung	Kollision mit ner/Passanten	Quetschen/Überrollen
7	Anhängerbetrieb	Motoren beschleunigen unerwartet	Kollision mit Bediener/Passanten	Quetschen/Überrollen
8		Motoren fallen aus	Kollision mit ner/Passanten	Fahrer fällt vom Rad durch
9		Anhänger brems unerwartet	Kollision mit ner/Passanten	unerwartetes Bremsen Fahrer fällt vom Rad durch
10		Reifen platzt/ Verlust der Fahrstabilität	Kollision mit ner/Passanten	unerwartetes Bremsen Quetschen/Überrollen
11		Herunterfallen von Ladung	Kollision mit ner/Passanten	Quetschen/Überrollen
12		Anhänger löst sich vom Zugfahrzeug	Kollision mit ner/Passanten	Quetschen/Überrollen
13	Ohne Unterstützung	Motoren beschleunigen unerwartet	Kollision mit Bediener/Passanten	Quetschen/Überrollen
14		Herunterfallen von Ladung	Kollision mit ner/Passanten	Quetschen/Überrollen
15	Stillstand	Bremsen lösen sich Herunterfallen von Ladung	Kollision mit Bediener/Passanten	Quetschen/Überrollen
16			Kollision mit ner/Passanten	Quetschen/Überrollen
17	Heben/Senken	Bremsen lösen sich Herunterfallen von Ladung	Kollision mit Bediener/Passanten	Quetschen/Überrollen
18			Kollision mit ner/Passanten	Quetschen/Überrollen
19	alle Betriebszustände	Unterbrechung von elektrischen Leitungen	Unkontrollierte Bewegung des Trailers	Quetschen/Überrollen
20		Ausfall des Steuergerätes	Unkontrollierte Bewegung des Trailers	Quetschen/Überrollen
21		Ausfall der Bremsen	Unkontrollierte Bewegung des Trailers	Quetschen/Überrollen
22		Ausfall der Energieversorgung	Unkontrollierte Bewegung des Trailers	Quetschen/Überrollen

Tabelle C.4: Risikobeurteilung E-Trailer Teil 2

lfd. Nr	aktuelle Maßnahme	Ausmaß S1- leicht S2- schwer	Exposition F1- selten F2- häufig	Eintrittswahrscheinlichkeit O1-gering O2-mittel O3-hoch	Vermeidungsmöglichkeit A1-möglich A2-unmöglich	Risikoindex	Risikominderung/Maßnahme
1	Not-Aus trennt Phasenströme, Begrenzung 6km/h	S2	F2	O1	A1	3	Sicherheitsmanagement auf Software-Ebene
2	Trailer verzögert durch den Fahrwiderstand, Einnahme des Betriebszustandes	S1	F2	O1	A2	1	Sicherheitsmanagement auf Software-Ebene
3	keine	S1	F2	O1	A2	1	
4	Totmanschalter bremst Fahrzeug	S1	F2	O3	A2	2	
5							
6	Ladungssicherungsmaßnahmen	S2	F2	O2	A1	4	Benutzerinformation
7	Not-Aus trennt Phasenströme	S2	F2	O1	A1	3	
8	Einnahme des Betriebszustandes	S1	F2	O2	A2	1	Sicherheitsmanagement auf Software-Ebene
9	keine	S2	F2	O1	A2	4	Überwachung der Fahrzustände
10	keine	S2	F2	O2	A1	4	Benutzerinformation
11	Ladungssicherungsmaßnahmen	S2	F2	O2	A1	4	Sicherheitsmanagement auf Software-Ebene
12	elektrische Abreissleine	S2	F2	O2	A1	4	
13	Not-Aus trennt Phasenströme	S2	F2	O1	A1	3	
14	Ladungssicherungsmaßnahmen	S2	F2	O2	A1	4	Benutzerinformation
15	Feststellbremse am Vorderrad	S1	F1	O2	A1	1	
16	Ladungssicherungsmaßnahmen	S2	F1	O1	A1	2	
17	Feststellbremse am Vorderrad	S1	F2	O2	A1	1	
18	Ladungssicherungsmaßnahmen	S2	F2	O2	A1	1	
19	sichererer Zustand wird durch Open-wire-Logik eingenommen	S2	F2	O1	A1	3	Not-Aus
20	Reaktion des Bedieners	S2	F2	O1	A1	3	Harte Verdrahtung der Sicherheitseinrichtungen
21	getrennte Bremskreisläufe links/rechts	S2	F2	O1	A1	3	Redundanz durch unabhängige Vorder- und Hinterradbremsen
22	Trailer verzögert durch den Fahrwiderstand, Bremsung durch den Bediener	S2	F2	O1	A1	3	