

Schlussbericht

SmartLoad

**Neue Methoden zur Zuverlässigkeitssteigerung von
hochautomatisierten elektrischen Fahrzeugen**

***Verfahren zur Fehlertoleranz und Redundanzmanagement auf
Aktor- und Systemebene***

Projektlaufzeit: Oktober 2018 bis Oktober 2021

Projektleiter: Dr.-Ing. Johannes Kolb, Philipp Kautzmann

Mitwirkende: Sven-Erik Asmussen, Dr.-Ing. Miriam Axtmann, Matthias Brodatzki, Daniel Haake,
Alexander Seiffer, Bernhard Zeifang

Januar 2022

SCHAEFFLER

Schaeffler Technologies AG & Co. KG

SHARE am KIT

Rintheimer Querallee 2, Geb. 70.03

76131 Karlsruhe

Inhalt

I.	Kurzdarstellung	1
I.1	Aufgabenstellung	1
I.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	2
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	3
I.4	Bisheriger Stand der Wissenschaft und Technik	5
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	8
II.	Eingehende Darstellung	9
II.1	Ergebnisse	9
II.1.1	AP1: Anforderungsanalyse und Spezifikation	9
II.1.2	AP3: Testmethodik, Testverfahren und Testkonzeption	22
II.1.3	AP4: Schadensmechanismen	23
II.1.4	AP5: Zuverlässige Software- und Systemplattform	29
II.1.5	AP6: Demonstrator und Referenzanwendungen	32
II.1.6	AP7: Validierung	47
II.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	54
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	54
II.4	Voraussichtlicher Nutzen	54
II.5	Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	55
II.6	Veröffentlichungen	56
II.6.1	Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Zeitschriften und bei Konferenzen	56
II.6.2	Veröffentlichungen im Kontext von Öffentlichkeitsarbeit	56

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektplan mit hervorgehobener Beteiligung von Schaeffler (STAG)	3
Abbildung 2: Zusammenarbeit im Gesamtvorhaben.....	4
Abbildung 3: Leitbeispiel für sicheres System zur Längs- und Querführung eines automatisierten Fahrzeuges	9
Abbildung 4: Modifikationen am Demonstratorfahrzeug im Projekt SmartLoad	10
Abbildung 5: Hauptmodule des Demonstratorfahrzeugs und der User-Schnittstelle	11
Abbildung 6: Frontmodul im Demonstratorfahrzeug	11
Abbildung 7: Energie- und Kontroll-Modul im Demonstratorfahrzeug	12
Abbildung 8: Kommunikations-Schnittstellen im Demonstratorfahrzeug	13
Abbildung 9: Use-Cases im Projekt SmartLoad (Quelle: Schaeffler)	16
Abbildung 10: FMEA für die Systemkomponente Lenkaktor (Leistungselektronik)	18
Abbildung 11: Gesamtstruktur zur Absicherung der Zuverlässigkeit	19
Abbildung 12: Interaktion verschiedener Simulationsmodule	20
Abbildung 13: Schaeffler Kleinantriebsprüfstand mit Leitstand	21
Abbildung 14: Dynamikfläche am KIT-Campus Ost.....	22
Abbildung 15: Lokales Koordinatensystem und Fahrbahnbegrenzungsmarkierungen auf der Dynamikfläche	22
Abbildung 16: Leitstand bereitgestellt vom Projektpartner RAC mit Schnittstelle über Telemetrie auf Steuergeräte des Demonstratorfahrzeug	23
Abbildung 17: Aufbau des Lenkaktorsystems inklusive auftretender Fehler	24
Abbildung 18: a) Fehler im Motor, b) Fehler in der Leistungselektronik	25
Abbildung 19: a) Schematischer Aufbau einer Phase inklusive Unterbrechungen (Fehler erzeugen kein Bremsmoment) b) Nachbildung der Fehler in der Simulation.....	27
Abbildung 20: a) Schematischer Aufbau einer Phase inklusive Kurzschlüsse (Fehler erzeugen ein Bremsmoment) b) Nachbildung der Fehler in der Simulation.....	28
Abbildung 21: Demonstratorfahrzeug auf dem VEL-Prüfstand.....	31
Abbildung 22: Systemarchitektur zur Validierung der Fahrfunktionen am VEL-Prüfstand (KIT-FAST).....	31
Abbildung 23: Fehlertoleranter Aktorik-Motor mit Spezifikationen.....	32
Abbildung 24: Gesamtkonzept Aktorik-Motor mit Leistungselektronik.....	33
Abbildung 25: Topologie einer Vollbrücken-Leistungselektronik-Karte mit zusätzlichen MOSFETs zur dynamischen Fehlereinprägung.....	33
Abbildung 26: Foto des gesamten Gesamtaufbaus der Leistungselektronik und 3D-Ausleitung einer Platinkarte aus dem CAE-Programm Altium-Designer	34
Abbildung 27: Gesamtüberblick Simulation Aktoriksystem.....	35
Abbildung 28: Detailansicht Simulation – Unterbrechung Phase 1 bei 0,4 s.....	35
Abbildung 29: Detailansicht Simulation – Kompensation Phase 1 bei 0,5 s	36
Abbildung 30: Mechanische und elektrische Erweiterungen am Demonstratorfahrzeug	37
Abbildung 31: Fertiggestelltes Demonstratorfahrzeug	38
Abbildung 32: Nutzung homogener und diversitärer Redundanz durch den "SmartLoad Reliability Control" – Ansatz (Lenkaktoren in grün, Antriebsmotoren in gelb dargestellt).....	38
Abbildung 33: Kaskadierte Regelungsarchitektur mit „SmartLoad Reliability Control“ – Ansatz.....	39
Abbildung 34: Knicklenker-Modellfahrzeug für Voruntersuchungen zum „SmartLoad Reliability Control“ - Ansatz	40

Abbildung 35: Verlauf von Geschwindigkeit und Knickwinkel bei Ausfall eines Antriebs mit und ohne „SmartLoad Reliability Control“	41
Abbildung 36: Trajektorienfolgeregler	41
Abbildung 37: Prinzip des Lenkens mittels Lenkaktor und mittels Torque Steer	42
Abbildung 38: Fahrdynamikregelung mit kaskadierter Stellgrößenzuweisung (Control Allocation)	43
Abbildung 39: Benutzerfreundliches Control Panel zur Verwendung des komplexen Gesamtsimulationsmodells	44
Abbildung 40: Erprobung des Trajektorienfolgereglers in der Simulationsumgebung.....	44
Abbildung 41: Querdynamikregelung mittels Lenkaktor und mittels Torque Steer (Ausschnitt aus Rundkurs)	45
Abbildung 42: Simulativer Nachweis der „SmartLoad Reliability Control“ Funktionalität.....	45
Abbildung 43: Erprobung der Kompensation des Lenkaktorausfalls auf dem Demonstratorfahrzeug	46
Abbildung 44: Erprobung des Trajektorienfolgereglers auf dem Demonstratorfahrzeug	47
Abbildung 45: Simulationsergebnisse Validierung fehlertolerantes Aktoriksystem	48
Abbildung 46: Validierung und Messung am Kleinantriebsprüfstand des fehlertoleranten Aktoriksystems mit a) fehlerfreier Betrieb und b) Fehlerfall (Phasenausfall) und c) Kompensation	49
Abbildung 47: Validierungsfahrt ohne "SmartLoad Reliability Control"-Funktion	51
Abbildung 48: Validierungsfahrt mit "SmartLoad Reliability Control"-Funktion.....	52
Abbildung 49: Vogelperspektive der Validierungsfahrt ohne (links) und mit (rechts) "SmartLoad Reliability Control"-Funktion	53
Abbildung 50: Vergleich simulativer und gemessener Werte für Lenkmoment, Antriebsmomente und Lenkwinkel bei Aktorausfall mit aktiver "SmartLoad Reliability Control"-Funktion	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Relevante Forschungsprojekte	6
Tabelle 2: Relevante Patente	7
Tabelle 3: Relevante Veröffentlichungen	7
Tabelle 4: Module des Demonstratorfahrzeugs und Modifikationsbedarf	13
Tabelle 5: Charakteristische Kenngrößen der Use-Cases	17
Tabelle 6: Maximale technische Daten des Kleinantriebsprüfstand	21
Tabelle 7: Von Schaeffler bereitgestellte ROS-Topics.....	30
Tabelle 8: Relevante Forschungsprojekte	55
Tabelle 9: Relevante Veröffentlichungen	55

I. Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung für Schaeffler ergibt sich aus den Zielen des Gesamtvorhabens SmartLoad:

„Hochautomatisierte Funktionen zur Fahrzeugführung definieren und bedingen bei zukünftigen Antriebskonzepten die Belastungen der hochintegrierten elektrischen und elektronischen Fahrzeugkomponenten. Es steigen die Anforderungen an die nachzuweisende Sicherheit und Zuverlässigkeit sowohl der Einzelkomponenten als auch an die des hochautomatisierten und mit der Umgebung interagierenden Gesamtfahrzeugsystems.

Für den Nachweis der Zuverlässigkeit sind diese vielfältigen und in ihrer Komplexität neuartigen Wechselwirkungen der elektrischen und elektronischen Komponenten deshalb in höherem Maße zu berücksichtigen. Zusätzlich ist die bei späterem Serienanlauf der Fahrzeugproduktion nachgewiesene Zuverlässigkeit auch bei Updates von Hardwarekomponenten bzw. Onboard-Funktionen auch während der Lebenszeit des Fahrzeuges sicherzustellen.

Daraus leiten sich die folgenden drei globalen Ziele des Projekts SmartLoad ab:

- *Erforschung neuer **Konzepte zur funktional sicheren Auslegung** von hochautomatisierten elektrischen Fahrzeugen mit hochintegrierter Längs- und Querführung durch optimalen Einsatz redundanter Komponenten oder Funktionen mit gleichzeitig intelligenter Onboard-Überwachung und Prädiktion der Zuverlässigkeit von Komponenten und Gesamtsystem.*
- *Erforschung **robuster Software- und System-Architekturen**, um die Zuverlässigkeit der Steuergeräte-Funktionen bei hochautomatisierten und hochbelasteten elektrischen Komponenten während der Betriebsdauer sicherzustellen.*
- *Erforschung neuer **modularer und standardisierbarer Entwicklungsmethoden**, um die Auswirkung der Wechselwirkung zwischen Steuergeräteapplikation und Schadensmechanismen auf die Betriebsfestigkeit des Gesamtfahrzeugs im hochautomatisierten Betrieb verlässlich nachzuweisen.“ (Aus Gesamtvorhabensbeschreibung SmartLoad)*

Schaeffler hat sich innerhalb dieses Rahmens im Teilprojekt „Verfahren zur Fehlertoleranz und Redundanzmanagement auf Aktor- und Systemebene“ auf die Aufrechterhaltung der sicherheitsrelevanten Funktionen der Längs- und Querführung hochautomatisierter Elektrofahrzeuge im Fehlerfall fokussiert. Ziel war hierbei die Erforschung und Bewertung von Konzepten zur funktionalen Redundanz auf Gesamtfahrzeugebene, wodurch ein Hardwaremehraufwand vermieden werden soll. Für Fehlerfälle, in denen Funktionsredundanz auf Gesamtfahrzeugebene nicht erreicht werden kann und Hardwarere-

dundanz unumgänglich ist, wurden neue Konzepte für fehlertolerante Aktoriksysteme benötigt, welche den Hardwaremehraufwand möglichst geringhalten und somit Bauraum, Gewicht und Kosten sparen. Durch diese ganzheitliche Betrachtung wurde eine optimale Lösung über System- und Teilsystemebenen hinweg angestrebt.

Fokus der Aktivitäten von Schaeffler lag neben der simulativen Betrachtung auch auf der Umsetzung in die Praxis anhand von Komponenten- bzw. Systemdemonstratoren. Hierbei hat Schaeffler ein bestehendes Demonstratorfahrzeug (aus dem Förderprojekt e²-Lenk, FKZ 16EMO0073K, 16EMO0074) als Basis zur Weiterentwicklung innerhalb von SmartLoad bereitgestellt. Durch die Definition von geeigneten Schnittstellen zum Demonstratorfahrzeug gemeinsam mit den Konsortialpartnern sollte sichergestellt werden, dass deren Ergebnisse in das Demonstratorfahrzeug einfließen und so direkt angewendet werden können.

Folgende zwei Teilprojektziele für das Projekt SmartLoad wurden definiert

- Teilprojektziel 1: Fehlertolerante Aktorik

Erarbeitung, Bewertung und Umsetzung (simulativ, experimentell) eines fehlertoleranten Aktorikkonzepts zur Anwendung in hochautomatisierten Elektrofahrzeugen. Hierbei soll der benötigte Hardwaremehraufwand minimiert werden.

- Teilprojektziel 2: Fahrzeugsystem

Erarbeitung und Umsetzung von Methoden für Redundanz- und Zuverlässigkeits-Management. Gezielte Nutzung von funktioneller Redundanz bei Systemen mit hochintegrierter Längs- und Querführung

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Verbundprojekt „Neue Methoden zur Zuverlässigkeitssteigerung von hochautomatisierten elektrischen Fahrzeugen (SmartLoad)“ wurde durch die AVL Deutschland GmbH, das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), das FZI Forschungszentrum Informatik, die Universität Stuttgart, die RA Consulting GmbH und die Schaeffler Technologies AG&Co.KG gemeinsam im Zeitraum vom 01.10.2018 bis zum 31.10.2021 bearbeitet. Das Vorhaben hat ein Fördersumme von 3.038.815 €, wovon 552.555 € auf Schaeffler entfallen.

Schaeffler hat Ende 2012 nach dem „Company on Campus“ Modell eine langfristig angelegte Kooperation mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) ins Leben gerufen. Diese hat zum Ziel, gemeinsam Lösungen für die Mobilität der Zukunft zu entwickeln. Durch die Präsenz auf dem KIT Cam-

pus Ost werden Forschungsthemen frühzeitig im Kontext der Industrialisierung behandelt. Der Name SHARE am KIT (Schaeffler Hub for Advanced Research am Karlsruher Institut für Technologie) reflektiert dabei, dass das Kooperationsbüro als „hub“ das Verbindungsglied zwischen Schaeffler und dem KIT ist. Eng vernetzt zwischen KIT und Schaeffler wird geforscht, mit dem Ziel Produktentwicklungen daraus abzuleiten. Die Arbeitsgebiete des SHARE am KIT sind inhaltlich auf drei Arbeitsgruppen „Automatisierte Mobilität“, „Elektrische Antriebe“ und „Energiespeicher“ aufgeteilt. Ferner hat das SHARE am KIT eine koordinierende Funktion für alle Projekte, welche Schaeffler und KIT gemeinsam durchführen.

Aus der Kooperation zwischen Schaeffler und dem KIT-FAST im Rahmen des BMBF geförderten Projektes e²-lenk ist das Demonstratorfahrzeug hervorgegangen, welches im Projekt SmartLoad weiterverwendet und weiterentwickelt wurde.

Aus den Forschungsvorhaben im Bereich „elektrische Kleinantriebe“, wie sie in Aktoriksystemen zum Einsatz kommen, ist ein Prüfstand entstanden, welcher als flexible Entwicklungsumgebung zum Benchmarking und Test elektrischer Antriebsysteme kleiner Leistung auch für SmartLoad zur Anwendung gekommen ist.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde in 8 Arbeitspakete eingeteilt, welche von unterschiedlichen Projektpartnern geleitet wurden. Eine Übersicht der Arbeitspakete und des ursprünglichen Zeitplans ist in Abbildung 1 dargestellt. Arbeitspakete mit Beteiligung von Schaeffler sind grün markiert.

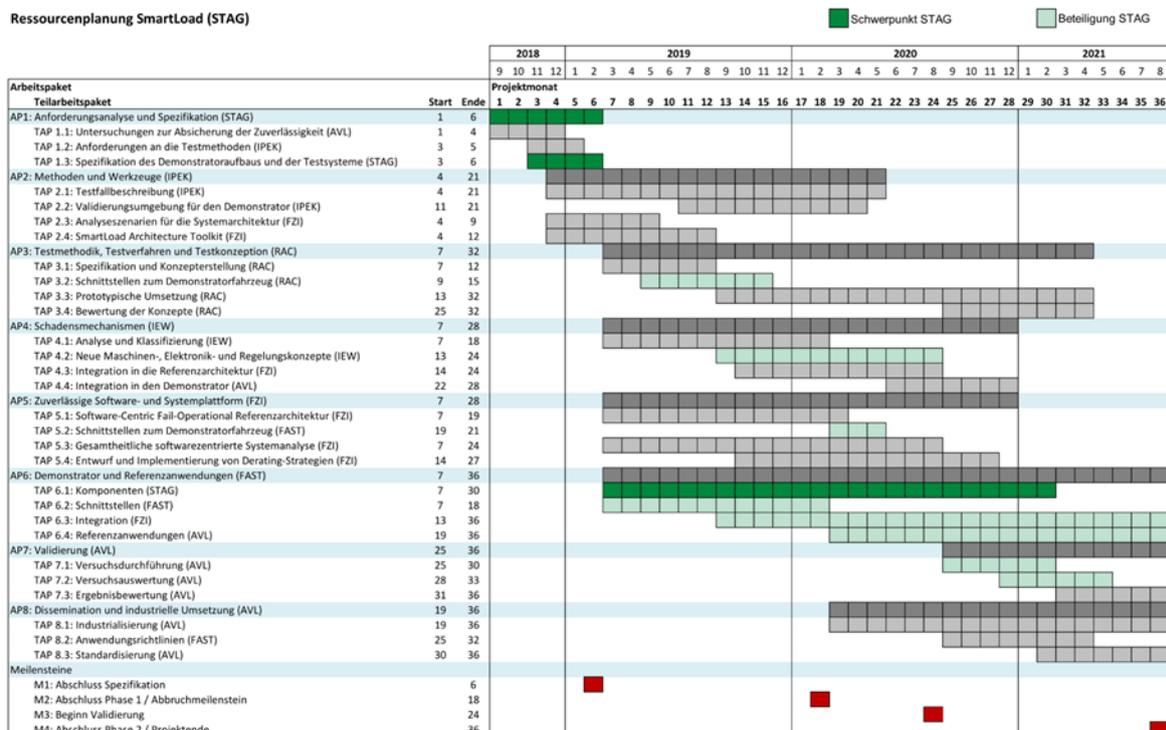


Abbildung 1: Projektplan mit hervorgehobener Beteiligung von Schaeffler (STAG)

Gegenüber der ursprünglichen Zeitplanung konnte das Projekt erst mit einer Monat Verzögerung im Oktober 2018 starten. Aufgrund der pandemischen Situation ab Frühjahr 2020 konnten praktische Tätigkeiten in den Laboren und am Demonstratorfahrzeug gar nicht oder nur unter erschwerten Bedingungen stattfinden. Durch vorgezogene und intensivere simulative Untersuchungen und Vorbereitungen gab es allerdings keine größeren Verzögerungen im Projektfortschritt, sodass die praktischen Tätigkeiten im Sommer 2021 intensiviert und das Projekt letztendlich mit einer Verlängerung von nur einem Monat (bis Ende Oktober 2021) erfolgreich abgeschlossen werden konnte.

Aufgrund der engen Vernetzung der Arbeitsinhalte zwischen den Projektpartnern und dem Ziel einer Integration der Inhalte auf dem von Schaeffler bereitgestellten Demonstratorfahrzeug war ein kontinuierlicher Austausch und enge Abstimmung zwischen den Partnern erforderlich. Zudem wurden im Projekt jeweils zwei Partner mit besonders hohem Kooperationspotential identifiziert (siehe Abbildung 2). Für Schaeffler ergab sich daraus die enge Zusammenarbeit mit dem KIT-FAST beim Themenfeld Gesamtfahrzeug (Planung, Simulation, technische Erweiterung/Integration, Betrieb).

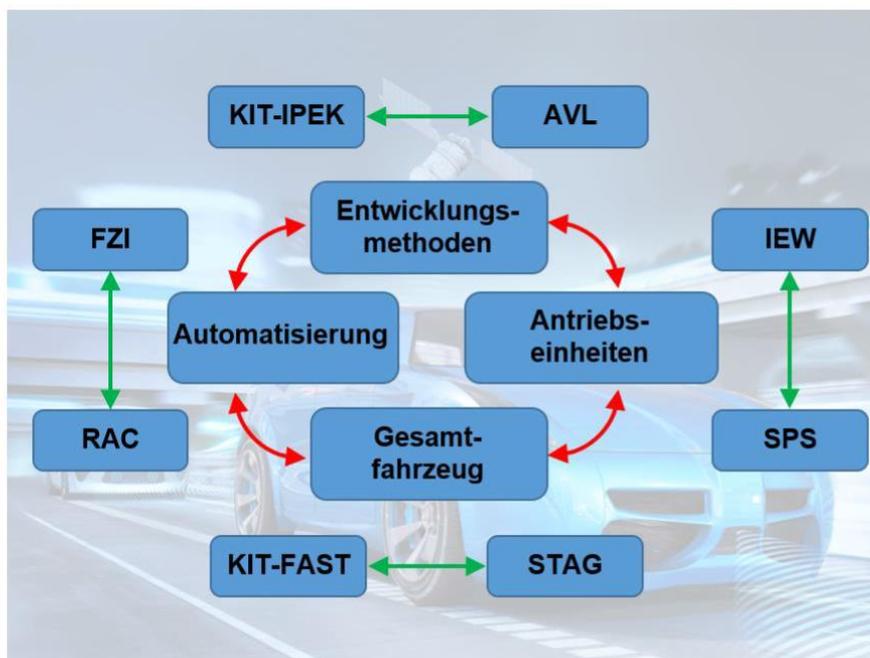


Abbildung 2: Zusammenarbeit im Gesamtvorhaben

Die seitens Schaeffler bearbeiteten Projektinhalte wurden wiederum, gegliedert nach den beiden Teilprojektzielen, auf die SHARE am KIT Arbeitsgruppen „Elektrische Antriebe“ und „Automatisierte Mobilität“ aufgeteilt.

I.4 Bisheriger Stand der Wissenschaft und Technik

In der Automobilindustrie gilt für sicherheitsrelevante E/E-Systeme die ISO 26262. Sie definiert die funktionale Sicherheit für Bestandteile eines Fahrzeugs über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg für alle sicherheitsrelevanten E/E-Systeme. Für die Einhaltung der funktionalen Sicherheit sind einige Methoden in der Norm beschrieben, wie Redundanz, Selbstdiagnose, Signalüberwachung oder Spannungsversorgungsüberwachung. Die Verwendung von Redundanzen ist der übliche Weg, um die Anforderungen einzuhalten. Eine kurze Übersicht über den Stand der Technik wird im Folgenden gegeben.

Übergeordnet kann zwischen M-aus-N Systemkonzept (MooN), Hardware-, Software-, Informations- und Zeitredundanzen unterschieden werden. Beim MooN-Konzept ist die Herangehensweise, dass das System aus N identischen Komponenten besteht und mindestens M dieser Komponenten korrekt funktionieren müssen, damit das System als fehlerfrei eingestuft wird. Das Prinzip kommt sowohl bei der Hardware als auch in der Software zum Einsatz. Bei der Hardware werden kritische Komponenten mehrfach eingebaut und nach dem Mehrheitsprinzip die Entscheidung getroffen. Bei der Software werden Aufgaben mehrfach berechnet und die Ergebnisse verglichen. Die Entscheidung wird wieder nach dem Mehrheitsprinzip getroffen.

Die beschriebenen Methoden zielen bisher hauptsächlich darauf ab, einen Fail-Safe Status anzusteuern, wenn Fehler auftreten. Das ist damit begründet, dass traditionelle Assistenzsysteme im Fehlerfall ein Fail-Safe-Verhalten aufweisen müssen, d.h. eine ausfallende Komponente oder Teilsystem darf die fahrzeugführende Person in der Ausübung seiner sicherheitsrelevanten Aufgaben nicht wesentlich behindern. Der sichere Betrieb hochautomatisierter Fahrzeuge setzt dagegen die Fähigkeit des Gesamtsystems voraus, im Fehlerfall weiterhin funktional zu agieren und die Betriebssicherheit durch entsprechende Selbstwahrnehmung und -anpassung zu gewährleisten (Fail-operational).

Aus diesem Grund haben in den letzten Jahren die Bemühungen zugenommen, Systeme zu entwickeln, die sich Fail-operational verhalten. Der Ansatz, der hierbei verfolgt wird, ist bisher größtenteils pragmatischer Natur, d.h. es wird eine Hardwareredundanz verwendet, um im Falle des Ausfalls eines Systems die Tätigkeiten mit einem anderen System aufzunehmen. Langfristig gesehen ist dieser ineffiziente Ansatz sowohl aus Kostensicht als auch aus energetischer Sicht nicht zu empfehlen. Die Bemühungen effizientere Lösungen für ein Fail-operational-Verhalten zu entwickeln, rücken daher immer mehr in den Fokus; befinden sich aber noch am Anfang. In den folgenden Tabellen wird eine Übersicht über relevante bestehende Projekte, Schutzrechte und Veröffentlichungen, die in diese Richtung gehen, gegeben.

Tabelle 1: Relevante Forschungsprojekte

Akronym	Projekttitle	Link
e²-Lenk	Energieoptimale, intelligente Lenkkraftunterstützung für elektrische Fahrzeuge	http://www.share.kit.edu/e2lenk/
-	Untersuchung eines Fail Operational System für ein Fahrzeug mit individuell gelenkten und angetriebenen Rädern	https://www.fast.kit.edu/lff/Automatisierung_11227.php
OmniSteer	Elektronisches Längs- und Querführungssystem für automatisierte Fahrmanöver	http://www.share.kit.edu/omniSteer/
SafeAdapt	Safe Adaptive Software for Fully Electric Vehicles	https://www.safeadapt.eu/
Osborne	Future Automotive E/E Architectures for Autonomous Cars	https://www6.in.tum.de/research/cartum/osborne/
ECSEL Autodrive	ECSEL Autodrive	https://autodrive-project.eu/
RABBIT	Radnabenantrieb ohne Bremse / Bremswiderstand integriert in Thermomanagement	English (projekt-rabbit.de)
AutoKonf	Automatisch rekonfigurierbare Aktoriksteuerungen für ausfallsichere automatisierte Fahrfunktionen	https://www.elektronikforschung.de/projekte/autokonf
3F	Fahrerlose und Fehlertolerante Fahrzeugsysteme für den Niedergeschwindigkeitsbereich	https://www.3f-projekt.de/
MEHREN	Multimotor Elektrofahrzeug mit höchster Raum- und Energieeffizienz und kompromissloser Fahrsicherheit	https://www.ika.rwth-aachen.de/projekt-mehren/

Tabelle 2: Relevante Patente

Nummer	Titel	Firma
US3675422A	Full Power Braking System with Skid Control and Redundant Power Steering	TRW Inc
DE102015214521 A1	Aktuatorsystem für selbstfahrende Fahrzeuge	Robert Bosch GmbH
DE102016211342 A1	Lenkvorrichtung für ein Kraftfahrzeug	Friedrichshafen AG
DE102013202253 A1	Schaltung zur Steuerung eines Beschleunigungs-, Brems- und Lenksystems eines Fahrzeugs	Paravan GmbH
DE102013222007 A1	Prozessor, Vorrichtung, Verfahren und Computerprogramm zum Steuern eines Notfallbetriebs einer mehrphasigen Drehfeldmaschine bei Unterbrechung eines ersten Phasenstroms einer ersten Phase der Drehfeldmaschine	ZF Friedrichshafen AG
DE102016223360B4	Antriebsanordnung für ein Fahrzeug sowie Fahrzeug mit der Antriebsanordnung	Schaeffler Technologies AG und Co KG
DE102018120161A1	Fahrzeug mit radselektiver Antriebsmomentanordnung und Knickgelenk sowie Verfahren zum Steuern des Fahrzeugs	Schaeffler Technologies AG und Co KG

Tabelle 3: Relevante Veröffentlichungen

Autor	Art	Titel
Baudart, Francois	Dissertation	Design and control of fault-tolerant permanent magnet drives
Dai Prè, Michele	Dissertation	Analysis and design of Fault-Tolerant drives
Krautstrunk, Alexander	Dissertation	Fehlertolerantes Aktorkonzept für sicherheitsrelevante Anwendungen
Parsa, Leila	Dissertation	Performance Improvement of Permanent Magnet AC Motors
Bergmiller, Peter Johannes	Dissertation	Towards Functional Safety in Drive-by-Wire Vehicles
Moseberg, Jan-Erik	Dissertation	Regelung der Horizontalbewegung eines überaktuierten Fahrzeugs unter Berücksichtigung von Realisierungsanforderungen
Polmans, Kristof	Symposiumsbeitrag	Torque vectoring as redundant steering for automated driving or steer-by-wire

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der Zusammenarbeit mit beteiligten Mitarbeitenden der Projektpartner fand zusätzlich ein Austausch mit Fachleuten auf dem bearbeiteten Gebiet statt. Innerhalb des Schaeffler Konzerns wurden für Fragestellungen des Projektkontextes Mitarbeitende aus den Fachgebieten, sowohl der Vorentwicklung als auch der Serienentwicklung, einbezogen. Hierzu zählen Abteilungen aus dem Bereich Fahrwerksmechanik, Lenksysteme, People-Mover (Schaeffler Paravan) und Aktorsysteme. Dieser Austausch führte zu dem, dass die neuen Ansätze, die im Projekt verfolgt wurden, bereits frühzeitig in den Abteilungen bekannt geworden sind, die diese zukünftig anwenden können. Andererseits konnten die Projektbearbeitenden durch den Austausch die Sichtweise der zukünftigen Anwendungsabteilungen und damit auch die Bedürfnisse in der Forschungsarbeit des Projektes SmartLoad berücksichtigen.

Durch die Einbindung zahlreicher Studierenden am KIT und der Hochschule Karlsruhe, konnte im Projekt auch der wissenschaftliche Nachwuchs gefördert werden. Darüber hinaus wurden einzelne Themenstellungen durch interdisziplinäre Studierendenteams in dem vom Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) angebotenen „Projekt Workshop – Automotive Engineering“ bearbeitet. Diese Teams werden dabei parallel von Wissenschaft und Industrie vor Ort begleitend betreut.

Da einige der Studierenden auch im Formula Student-Team „KA-Racing“ aktiv waren, konnte auch hier ein Austausch und Erfahrungstransfer stattfinden. Somit konnten beispielsweise auch die Teststrecken, deren Markierungen auf der Dynamikfläche von KA-Racing mit exakter GPS-Position vermessen wurden, im Projekt SmartLoad verwendet werden.

Durch die enge Vernetzung mit KIT-Studierenden konnten besondere Talente als Mitarbeiter sowohl am KIT-FAST als auch bei Schaeffler gewonnen werden.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten wird das Vorgehen und die wesentlichen Projektergebnisse beschrieben. Die Abschnitte sind nach den Arbeitspaketen des Projektplans gegliedert (siehe Abbildung 1).

II.1.1 AP1: Anforderungsanalyse und Spezifikation

Für Schaeffler standen innerhalb des Projektes die mechatronischen Teilsysteme für die Fahrzeuglängs- und querführung im Vordergrund. Als Leitbeispiel, welches die Notwendigkeit für Sicherheit und Verfügbarkeit dieser Systeme darstellt, wurde eine Kurvenfahrt gewählt, bei der es zu einem Defekt innerhalb des Lenkaktors eines automatisierten Fahrzeuges kommt und dieser entweder auf der Aktorikebene oder auf der Fahrzeugebene durch Funktionsredundanz kompensiert wird (Abbildung 3).

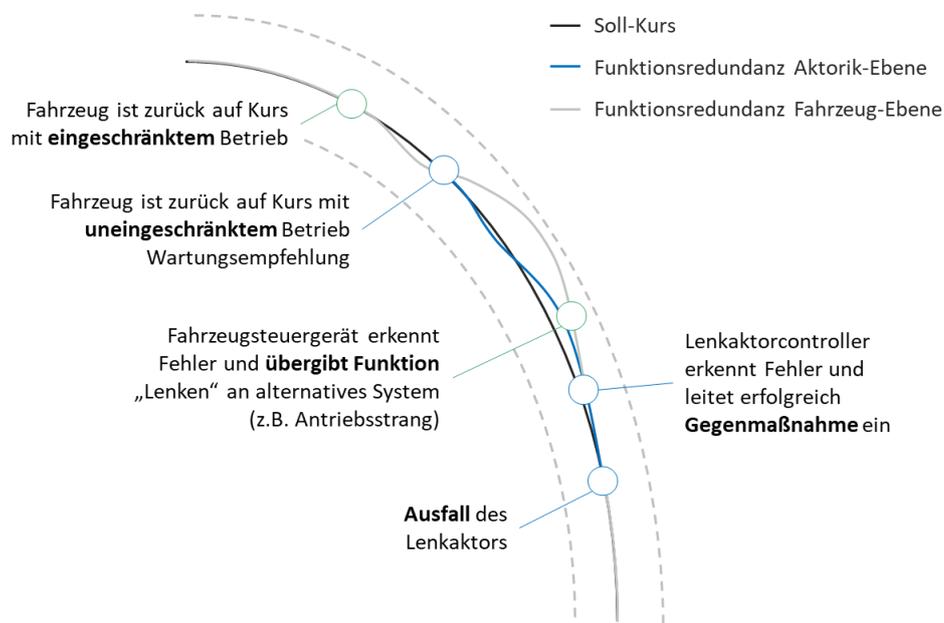


Abbildung 3: Leitbeispiel für sicheres System zur Längs- und Querführung eines automatisierten Fahrzeuges

II.1.1.1 Demonstratoren

Zur Erprobung der im Projekt erarbeiteten Ansätze kommen zwei Demonstratoren zum Einsatz, die im Folgenden beschrieben werden. Dabei handelt es sich um ein Demonstratorfahrzeug und einen Aktorikdemonstrator.

II.1.1.1.1 Demonstratorfahrzeug

Zur Umsetzung und Erprobung der im Projekt erarbeiteten Ansätze und Lösungen konnte auf ein existierendes Demonstratorfahrzeug aufgebaut werden. Dieses basiert auf dem im Förderprojekt e²-Lenk¹

¹ Energieoptimale, intelligente Lenkkraftunterstützung für elektrische Fahrzeuge, www.share.kit.edu/e2lenk

von Schaeffler in Betrieb genommenen Fahrzeug, welches für den Einsatz in SmartLoad modifiziert werden musste. Es handelt sich dabei um ein Fahrzeug im Maßstab 1:1,5 mit Ackermann-Lenkung und radselektiven elektrischen Antrieben an der gelenkten Achse. Das Fahrzeug kann mit einer Geschwindigkeit von max. 30 km/h betrieben werden und hat einen Wendekreis von ca. 10 m. Das Fahrzeug sollte automatisiert fahren können und in das Netzwerk der vernetzten Prüfstände aufgenommen werden. Über eine Kommunikationsschnittstelle sollte eine Verbindung zu einem Leitstand ermöglicht werden. Im Folgenden werden die analysierten Anforderungen an dieses Fahrzeug und der Modifikations-Bedarf am Fahrzeug beschrieben.

Die notwendigen Modifikationen betrafen im Wesentlichen die Aufrüstung des Fahrzeuges hinsichtlich automatisierter Fahrfunktionen. Hierzu zählen Sensoren (Kamera und Lidar, Bewegung und Lokalisierung) sowie leistungsfähige Hardware zur Umfelderkennung und Trajektorienplanung. In Abbildung 4 sind die für die Automatisierung notwendig gewordenen Modifikationen dargestellt.

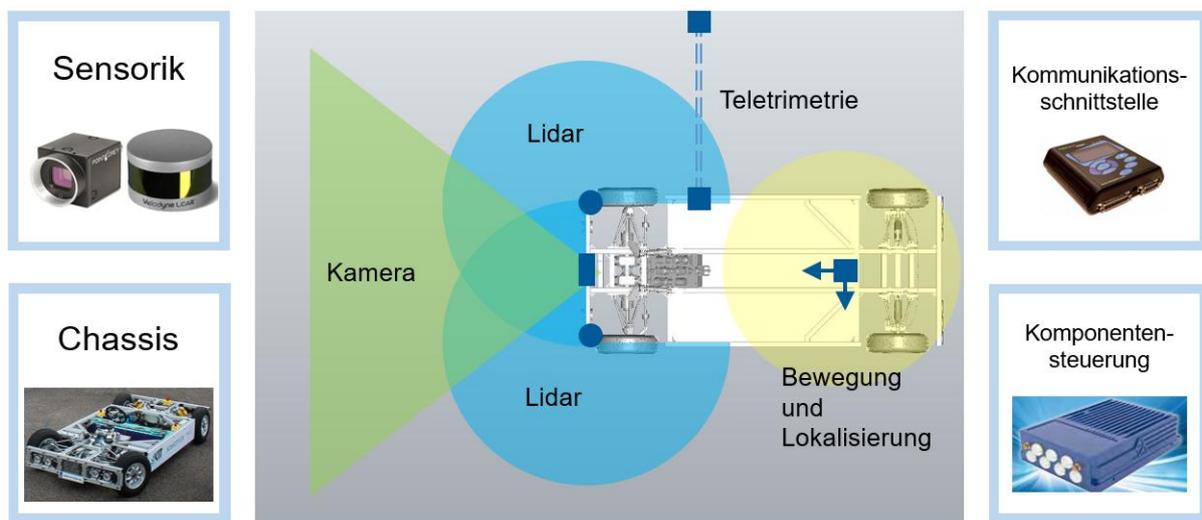


Abbildung 4: Modifikationen am Demonstratorfahrzeug im Projekt SmartLoad

Gemeinsam mit den Projektpartnern wurde der Aufbau des Zielsystems definiert. Im Folgenden werden die einzelnen Module des Fahrzeuges und der User-Schnittstelle näher betrachtet.

Wie in Abbildung 5 zu sehen ist, wurde für das Fahrzeug (links) eine Datenverbindung mittels Mobilfunk zu einem Gateway-Modul (Server) vorgesehen, welches vom Projektpartner RAC bereitgestellt wurde. Das sogenannte Backend-Modul ist ein Computer, der über Internet mit dem Gateway-Modul in Verbindung steht und Zugriff auf Daten der Module des Fahrzeuges ermöglicht. Am Backend-Modul ist das Teleoperator-Modul angebunden, welches die Userschnittstelle umfasst (Ein- und Ausgabegeräte).

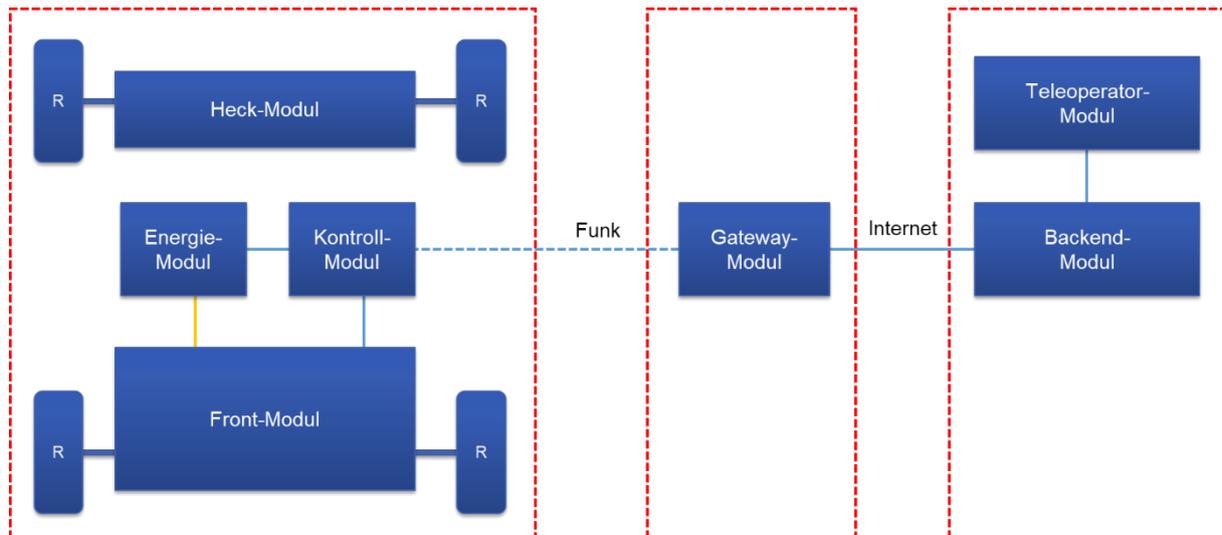


Abbildung 5: Hauptmodule des Demonstratorfahrzeugs und der User-Schnittstelle

Der mechanische Fahrzeugaufbau setzt sich aus dem Front- und Heck-Modul, Energie-Modul und dem Kontroll-Modul zusammen. Das Heck-Modul ist die Hinterachse des Fahrzeuges, welche in der geplanten Ausbauf orm als nicht-angetriebene Achse ausgeführt ist. Der Aufbau des Front-Moduls ist in Abbildung 6 dargestellt.

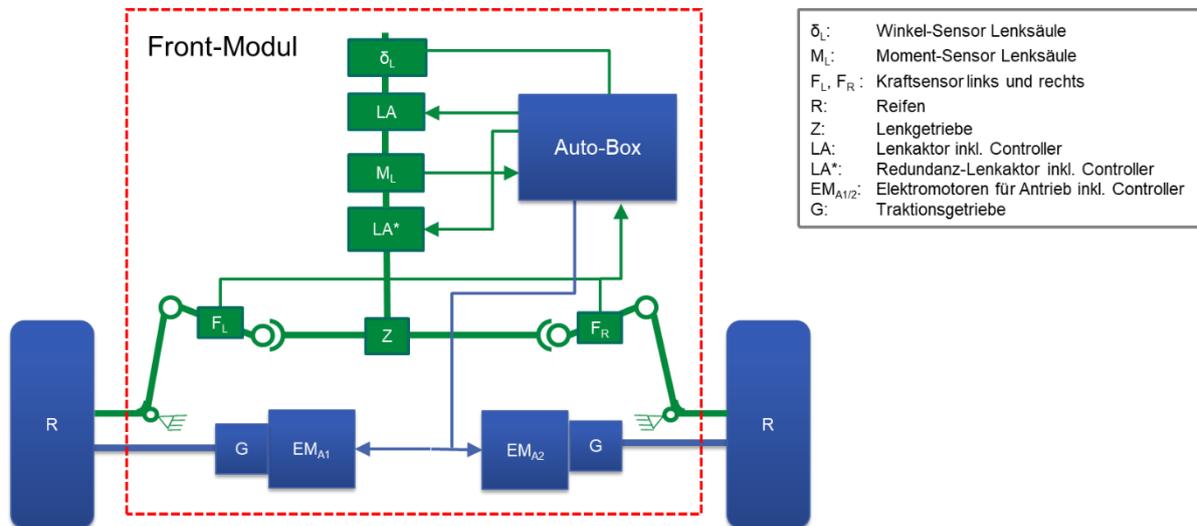


Abbildung 6: Frontmodul im Demonstratorfahrzeug

Die beiden Räder der gelenkten Vorderachse sind einzeln angetrieben (EM_{A1} und EM_{A2}). Das Lenksystem setzt sich aus einer Lenksäule, einem Lenkgetriebe (Z) mit Zahnstange und den Spurstangen (inkl. Kraftsensoren $F_{L/R}$) zusammen. Zum Steuern des Lenkwinkels sollten zwei Lenkaktoren zur Verfügung stehen, welche auf der Lenksäule platziert sind. Am ersten Lenkaktor (LA) befindet sich der Winkel-Sensor der Lenksäule (δ_L). Der Momentensensor (M_L) ist auf der Lenksäule zwischen dem Lenkaktor (LA) und dem redundanten Lenkaktor (LA*) verbaut.

Über die Verteilung der Antriebsmomente auf die beiden Räder kann ein Lenkmoment erzeugt werden, welches zur Regelung eines Lenkwinkels verwendet werden kann (siehe Kapitel II.1.5.2.2.1).

Zusammen mit den zwei verbauten Lenkaktoren ergibt sich damit eine dreifach redundante Lenk-Aktuierung. Um ein ausreichend großes Lenkmoment (Lenken im Stand) auch bei Ausfall von zwei Systemen zu ermöglichen, wurde eine Anpassung der Übersetzung des Lenkgetriebes und der Traktionsgetriebe vorgesehen.

Die Ansteuerung der Aktoren und Motoren erfolgt über die jeweiligen Motorsteuergeräte. Für die Regelung der Antriebe und Auswertung der Sensordaten sollte die bereits verbaute Autobox genutzt werden. Die Autobox setzt die von der Drive-Box übermittelte Trajektorie um. Dies machte einen Trajektorienfolgeregler erforderlich, der als weitere Eingangsgröße die aktuelle Fahrzeugposition von der Motion-Box erhält. Für den Fall, dass bei der Übertragung der Daten über das Netzwerk zwischen Autobox und Motion-Box zu große Verzögerungen auftreten, wurde zusätzlich die Bereitstellung einer direkte CAN-Verbindung zwischen den beiden Geräten festgelegt.

Ebenso wurde der Autobox die Funktion der Verwaltung der Redundanzen des Front-Moduls zugewiesen. Wird ein Ausfall eines Aktors erkannt, ist es die Aufgabe der Algorithmen der Autobox, die Fahrzeugbewegung mittels eines alternativen redundanten Systems umzusetzen. Zudem wurde festgelegt, dass eine Aktoreinschränkung an die Drive-Box kommuniziert werden kann, sodass die Trajektorienplanung in Abhängigkeit der aktuell funktionsfähigen Aktoren erfolgen kann. Die in der Autobox erfassten Sensordaten sollten ebenfalls über das Netzwerk den anderen Komponenten zur Verfügung gestellt werden.

Das Energie-Modul (Abbildung 7) setzt sich aus der LV-Batterie (12V) zur Versorgung der Steuergeräte und Sensoren und der MV-Batterie (48V) zur Versorgung der Lenkaktoren und Fahrtriebe zusammen. Da im Projekt weitere Komponenten mittels 12V versorgt werden sollten, war ein zusätzlicher DC/DC-Wandler erforderlich, der die 12V-Batterie aus der 48V-Batterie nachlädt.

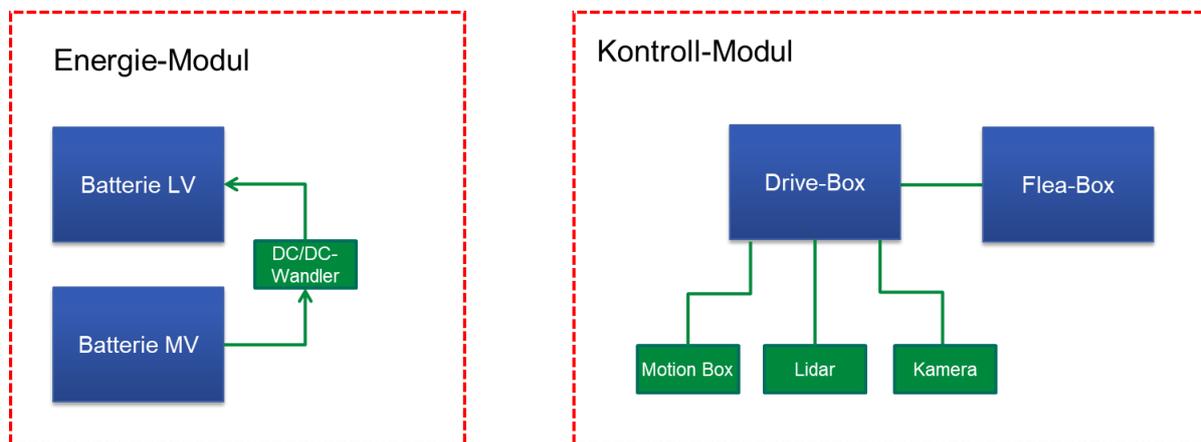


Abbildung 7: Energie- und Kontroll-Modul im Demonstratorfahrzeug

Im Kontroll-Modul wurde die Drive-Box vorgesehen, welche alle Aufgaben zur Umfelderkennung und Automatisierung übernimmt. Die dafür erforderlichen Sensoren sollten an die Drive-Box angebunden werden. Neben einer Kamera, ein oder zwei Lidar-Sensoren wurde eine Motion-Box eingeplant, die von AVL konzipiert wurde. Ebenfalls wurde die Schnittstelle zur FLEA-Box (RAC) definiert, welche die Kommunikation zum Fahrzeug mittels Funkstrecke ermöglicht.

Der Austausch der Informationen innerhalb des Fahrzeuges sollte zentral von der Drive-Box koordiniert werden. Diese steht mit den Umfeld- und Lokalisierungs-Sensoren, der Autobox und der Flea-Box mittels Ethernet in Verbindung. Die Anbindung der Aktoren und Sensoren des Front-Moduls an die Autobox sollte über CAN erfolgen. In Abbildung 8 sind die geplanten Schnittstellen der Module und die dafür zuständigen Partner ersichtlich.

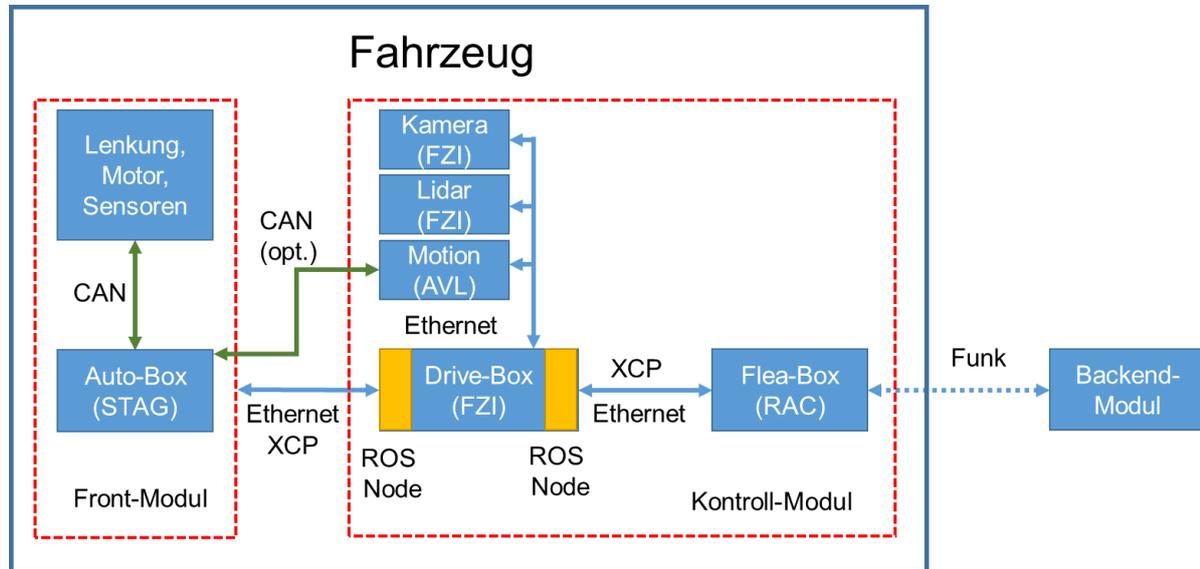


Abbildung 8: Kommunikations-Schnittstellen im Demonstratorfahrzeug

Die folgende Tabelle führt die Komponenten der einzelnen Module des Demonstratorfahrzeugs auf. Geplante Ergänzungen und Anpassungen sind in grün hervorgehoben:

Tabelle 4: Module des Demonstratorfahrzeugs und Modifikationsbedarf

System	Verbaute Komponente (Anpassungen/Ergänzungen in grün)
Energie-Modul	<ul style="list-style-type: none"> • Batterie MV (48V) <ul style="list-style-type: none"> ○ 16x InnoPOWER-LFMP100AH Zellen (LiFeMnPo4) + BMS <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nennkapazität: 100Ah ▪ Nominalspannung: 16*3,2V = 51,2V ▪ Max. Entladungsdauerstrom: 300A (<=3C) ○ Versorgung für Antriebs- und Lenkaktoren ○ Eigener Ladeanschluss (internes und externes Laden möglich) • Batterie LV (12V) <ul style="list-style-type: none"> ○ EXIDE EK1050 (AGM VRLA) <ul style="list-style-type: none"> ▪ 105Ah (C20) ○ Versorgung für: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Steuergeräte (MicroAutobox II, 2x Arduino) ▪ Sensorik (Lenkwinkelsensor, Kraftsensoren, Drehratensensor, RC-Empfänger, Signalleuchte) ▪ Kompressor

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Licht <ul style="list-style-type: none"> ○ Laden über Polklemmen (internes und externes Laden möglich) • DC/DC-Wandler zur Versorgung der 12V-Batterie durch die 48V-Batterie
Front-Modul (Antrieb)	<ul style="list-style-type: none"> • Radselektive Antriebe an Vorderachse <ul style="list-style-type: none"> ○ 2x Motorcontroller: Sevcon Gen4 Size 2 <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nenndauerstrom: 110A (ohne Zwangskühlung) ▪ Kurzzeitstrom (2 min): 275A (ohne Zwangskühlung) ▪ Temperaturgesteuerte Zwangskühlung ○ 2x Motor Heinzmann PMS 100 Betriebsart S1 (Maximal) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nennspannung: 48 VDC ▪ Nenndrehzahl: 4500 rpm (6000 rpm) ▪ Nennmoment: 5,52 Nm (20 Nm) ▪ Nennleistung: 2,6 kW (7,1 kW) ▪ Wirkungsgrad: 88,8% ○ Getriebe: Neugart PLFN 90, i = 7 (Umbau zu i = 16) ○ Jeweils 1x sin/cos Encoder ○ Ansteuerung über CANopen von MicroAutobox II
Front-Modul (Bremsystem)	<ul style="list-style-type: none"> • Notbremssystem (Pneumatisch) <ul style="list-style-type: none"> ○ 1 Kompressor ○ 1 Druckspeicher ○ 1 Drucksensor ○ 1 Magnetventil (aktiv geschlossen) ○ 1 Druckluftzylinder ○ 1 Entlüftungshahn
Front-Modul (Lenksystem)	<ul style="list-style-type: none"> • 2x Lenkaktoren Vorderachse <ul style="list-style-type: none"> ○ Motorcontroller: Nanotec N5-1-2 <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nenndauer- / Maximalstrom: 10A ○ Nanotec BLDC DB59M024035-B Betriebsart S1 (Maximal) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nennspannung: 24 VDC ▪ Nenndrehzahl: 3500 rpm (5000) ▪ Nennmoment: 0,37 Nm (1,11 Nm) ▪ Nennleistung: 135 W ○ Getriebe: Nanotec GPLE40 ○ 1 Drehmomentsensor: NCTE 2300 <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nennmoment: +/- 10 Nm ○ 1 Lenkwinkelsensor: Bosch LWS5.3.6 ○ Ansteuerung über CANopen von MicroAutobox II
Front-Modul (Steuerung)	<ul style="list-style-type: none"> • dSPACE MicroAutoBox II 1401/1513/1514 <ul style="list-style-type: none"> ○ Manueller Modus für RC-Fernbedienung -> CAN ○ Trajektorienfolgeregelung auf Basis der Soll-Trajektorie (von Drive-Box) und Ist-Position (von Motion Box, ggf. mittels CAN) ○ Regler für Antriebs/Bremsmoment/Lenkmoment -> CAN an Aktoren ○ Überwachung und Ansteuerung Notbremssystem -> Drucksensor, Relais ○ 1 x CAN frei ○ 3 x RS232 frei
Kontroll-Modul	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Flea-Box (RAC) <ul style="list-style-type: none"> ○ 5 x CAN Frei ○ 1 x Ethernet

	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1 x Mobile Datenverbindung an Flea-Gateway mit Antenne ● 1 Drive-Box (FZI) <ul style="list-style-type: none"> ○ 1 x Ethernet an Autobox ○ 1 x Ethernet an Flea-Box ○ 1 x Ethernet an Motion-Box ○ 2 x Ethernet an Lidar ○ 1 x Ethernet an Kamera ● 1 Motion Box (AVL) <ul style="list-style-type: none"> ○ Fahrzeugposition durch Fusion von GPS-, IMU- und Odometrie- Daten ○ 1 x Ethernet an Drive-Box ○ 1 x CAN an Autobox
--	---

II.1.1.1.2 Fehlertoleranter Aktorik-Demonstrator

Das mit dem Demonstratorfahrzeug realisierte Fahrzeugkonzept beinhaltet die Lenkaktorik als sicherheitsrelevante Komponente. Konventionelle Aktoriksysteme für diese Aufgabe werden in der Regel als dreiphasige permanenterregte Synchronmaschine mit entsprechender Leistungselektronik ausgeführt. Um die Anforderungen an den sicheren Betrieb bei hochautomatisierten Fahrzeugen zu erfüllen, müssen Aktoriksysteme dieser Form vollständig redundant ausgeführt werden (z.B. zwei Motoren auf einer gemeinsamen Welle, welche jeweils über eine eigene Leistungselektronik angesteuert werden). Hierdurch entsteht ein erheblicher Mehraufwand bezüglich Bauraum, Gewicht und Kosten.

Innerhalb des Projekts SmartLoad sollte ein Aktoriksystem erarbeitet werden, welches die Sicherheitsanforderungen bzgl. der Fehlertoleranz erfüllt, jedoch gleichzeitig den Hardwaremehraufwand deutlich geringer erhöht als die komplett redundante konventionelle Ausführung. Hierbei wird der Fokus auf die leistungsübertragenden elektrischen Teilsysteme der Aktorik gelegt (E-Maschine und Leistungselektronik sowie deren Regelung). Konzepte für sichere und fehlertolerante Signalverarbeitungselektronik und Sensorik werden nicht untersucht.

Die angestrebte Fehlertoleranz beinhaltet die Kompensation eines Fehlers in der E-Maschine oder der Leistungselektronik, sodass ein uneingeschränkter Betrieb des Aktoriksystems möglich ist. Beim Auftreten eines zweiten Fehlers soll ein eingeschränkter Notbetrieb mit reduziertem Drehmoment möglich sein. Das in diesem Fall stellbare Drehmoment ist abhängig von der Art des Fehlers.

Der praktische Nachweis zur Erreichung dieser Ziele soll sowohl in der Simulation als auch durch den Aufbau eines entsprechenden Aktorik-Demonstrators erbracht werden.

Als Grundlage für die mechanischen Anforderungen an ein fehlertolerantes Aktoriksystem sollen die Belastungen für die im Demonstratorfahrzeug verbaute Lenkung dienen. Durch Messungen bei Testfahrten wurde als maximale Belastung an der Lenksäule des Demonstratorfahrzeugs ein Drehmoment von 18 Nm bei einer Winkeländerungsrate von 880 °/s identifiziert.

Durch eine Übersetzung von z.B. 20 lässt sich dieses im beschriebenen Fall auf ein Motormoment von 0,9 Nm bei einer Drehzahl von ca. 3.000 min⁻¹ übertragen.

II.1.1.2 Use Cases

Für ein gemeinsames Verständnis und als Basis für die Analysen zur Absicherung der Zuverlässigkeit des Systems wurden gemeinsam mit den Projektpartnern beispielhaft drei Use Cases entworfen und beschrieben.

Alle Use Cases basieren auf derselben autonomen elektrischen Fahrzeugplattform, die beispielhaft für zukünftige Fahrzeugplattformen angenommen werden kann (Abbildung 9). Darunter fällt ein Use-Case für automatisierten Personentransport, ein weiterer für den Transport von kleineren Gütern und einer für größere Lasten, die in einem Trailer transportiert werden sollen.

Die einzelnen Use-Cases werden im Folgenden beschrieben und abschließend in Tabelle 5 die charakteristischen Kenngrößen der Use-Cases wie Momente und Beschleunigungen gegenübergestellt.



Abbildung 9: Use-Cases im Projekt SmartLoad (Quelle: Schaeffler)

II.1.1.2.1 UC1 - People Transport

Dieser Use-Case ist die Anwendung der Fahrzeugplattform als Personentransportfahrzeug für bis zu 8 Personen. Für diesen Anwendungsfall kommen verschiedene Szenarien in Frage, wie z.B. autonome Kleinbusse, die einem vorgegebenen Fahrplan folgen und einzelne Haltestellen anfahren oder Robotaxis, bei denen eine oder mehrere Personen ein autonomes Fahrzeug anfordern können, welches die Personen dann direkt zum Zielort manövriert.

Je nach Szenario können diese Fahrzeuge auf privatem oder öffentlichem Gelände zum Einsatz kommen, wodurch sich aufgrund der jeweils geltenden Vorschriften unterschiedliche Anforderungen an den Fahrzeugbetrieb ergeben.

Unabhängig von den verschiedenen Szenarien, in denen sich ein autonomes Personentransportfahrzeug befindet, gibt es Anforderungen, die ein solches Fahrzeug erfüllen muss. Mit dem Personentransport geht einher, dass gewisse Sicherheits- und Komfortbedürfnisse berücksichtigt werden müssen.

Aus den Anforderungen des Personentransports folgt zudem, dass die Beschleunigung verhältnismäßig gering und die Endgeschwindigkeit hoch sein soll. Generell sollten dabei die Bewegungen des

Fahrzeugs für die Personen im Innenraum angenehm und vorhersehbar sein, um eine komfortable Fahrt zu gewährleisten. Die Leistungsanforderungen befinden sich im mittleren Bereich.

II.1.1.2.2 UC2 - Parcel Transport

Im zweiten Use-Case wird der Transport von kleineren und mittelgroßen Paketen bis zu 30kg betrachtet. Anwendungsfälle auf privatem Gelände sind beispielsweise der Transport von Paketen innerhalb eines Logistikzentrums oder auf einem Firmengelände. Im öffentlichen Raum kann dieses Konzept zur Auslieferung von Paketen zum Endkunden dienen. Da in diesem Anwendungsfall keine hohen Anforderungen an Komfort vorhanden sind, können hohe Beschleunigungen, Lenkwinkel und Geschwindigkeiten zugelassen werden. Das Fahrzeug soll die Ladung möglichst schnell aber unbeschädigt von A nach B bringen.

II.1.1.2.3 UC3 - Trailer Transport

Im dritten Use-Case soll das autonome Fahrzeug mit einem Auflieger ausgerüstet werden, um große Lasten bzw. große Güter zu transportieren. Beispielsweise rangiert das autonome Fahrzeug einen Trailer über das Gelände eines Logistikunternehmens. In diesem Szenario hat das Fahrzeug zumeist einen Start- und Zielpunkt, an dem der Trailer an- und abgekuppelt wird. Für diesen Anwendungsfall muss das Fahrzeug mit einer Kupplung zum Ankoppeln des Trailers ausgestattet sein und muss über genaue Sensorik verfügen, die ein schnelles, unkompliziertes Kopplungsmanöver ermöglicht. Zum Ankoppeln und Rangieren des Trailers wird eine hohe Manövrierbarkeit von dem autonomen Fahrzeug gefordert. Außerdem muss das Fahrzeug hohe Momente zur Verfügung stellen, um die großen Lasten bewegen zu können. Die geforderten Beschleunigungen und Geschwindigkeiten sind dabei verhältnismäßig niedrig.

Tabelle 5: Charakteristische Kenngrößen der Use-Cases

Use-Case	Geschwindigkeit	Beschleunigung	Momente	Lenkwinkel	Zuladung
UC1 - People Transport	hoch	mittel	mittel	niedrig	niedrig
UC2 - Parcel Transport	mittel	hoch	mittel	mittel	mittel
UC3 - Trailer Transport	niedrig	niedrig	hoch	hoch	hoch

II.1.1.3 Absicherung der Zuverlässigkeit

In Projektworkshops wurden Fehleranalysen (FMEA) durchgeführt. Für das Teilsystem von Schaeffler war unter anderem der Fehlerfall „Ausfall Lenkaktor“ relevant, der beispielhaft in Abbildung 10 dargestellt ist.

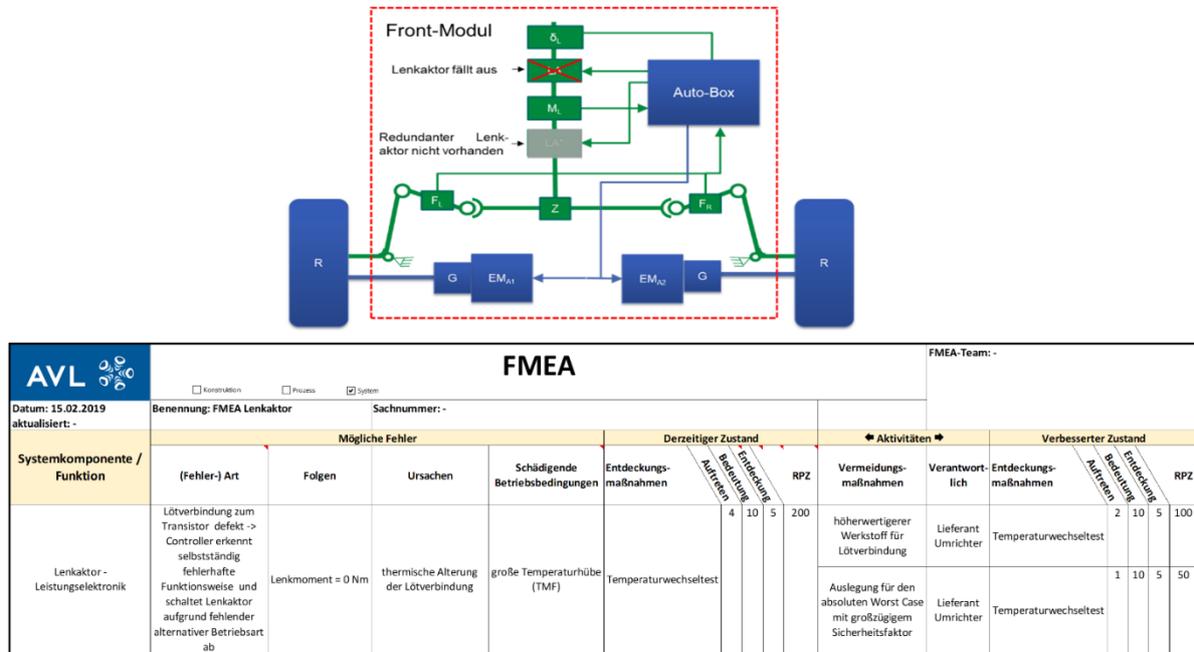


Abbildung 10: FMEA für die Systemkomponente Lenkaktor (Leistungselektronik)

Die Absicherung der als kritisch eingestuften Komponente Lenkaktor soll im Projekt durch neuartige Konzepte erfolgen. Dazu wurden zwei Varianten untersucht. Im ersten Ansatz werden Maßnahmen innerhalb der Komponenten Lenkaktor und Leistungselektronik erforscht und anhand des fehlertoleranten Aktorik-Demonstrators untersucht. Der zweite Ansatz betrachtet das Gesamtfahrzeug und kompensiert den Aktorausfall durch andere Komponenten des Fahrzeugs und angepasste Regelungs- und Betriebsführungsstrategien.

Für den zweiten Ansatz ist neben dem Ersatzreaktionskonzept, welches von Schaeffler erarbeitet wird, auch ein Fehlerprädiktionskonzept erforderlich, welches Teil der Forschungsarbeiten beim Projektpartner KIT-FAST ist.

Zusammenfassend lassen sich diese Maßnahmen in das projektpartnerübergreifende Konzept des „SmartLoad Reliability Algorithmus“ einordnen (siehe Abbildung 11).

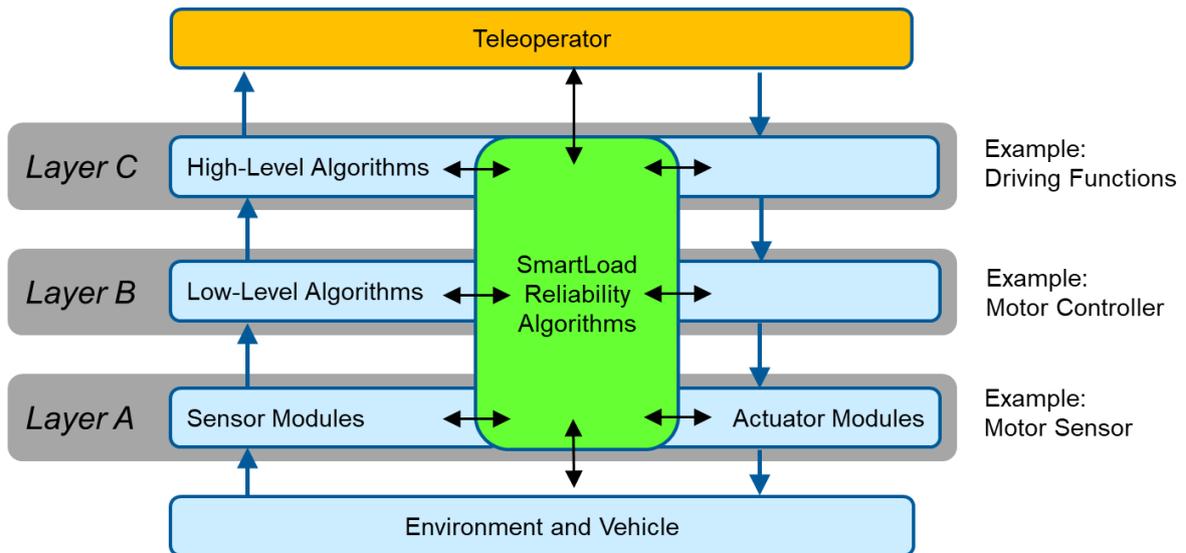


Abbildung 11: Gesamtstruktur zur Absicherung der Zuverlässigkeit

II.1.1.4 Testumgebungen

Im Folgenden werden die Testumgebungen beschrieben, die für die Untersuchungen des Aktorsystems und des Demonstratorfahrzeugs definiert wurden

II.1.1.4.1 Simulationsumgebung

Abbildung 12 stellt die Struktur der Simulationsumgebung aller Projektpartner dar. Das Teilsystem von Schaeffler beginnt mit dem Trajektorienfolgeregler welcher die Fahrzeugführung vorgibt. Die Fahrzeugregelungen berechnen anschließend die Sollwerte für die Aktoren. Das Fahrzeugmodell wurde vom Projektpartner KIT-FAST bereitgestellt und ist in CarMaker und Simulink abgebildet. Es berechnet die Ist-Fahrzustände (Position und Ausrichtung), welche an die Umfeldsimulation weitergeleitet werden. Die virtuellen Umfeldsensoren erfassen die geänderte Umfeldinformation und geben diese der hochautomatisierten Fahrzeugfunktion weiter, welche die Soll-Trajektorie berechnet, womit eine neue Schleife der Simulation beginnt.

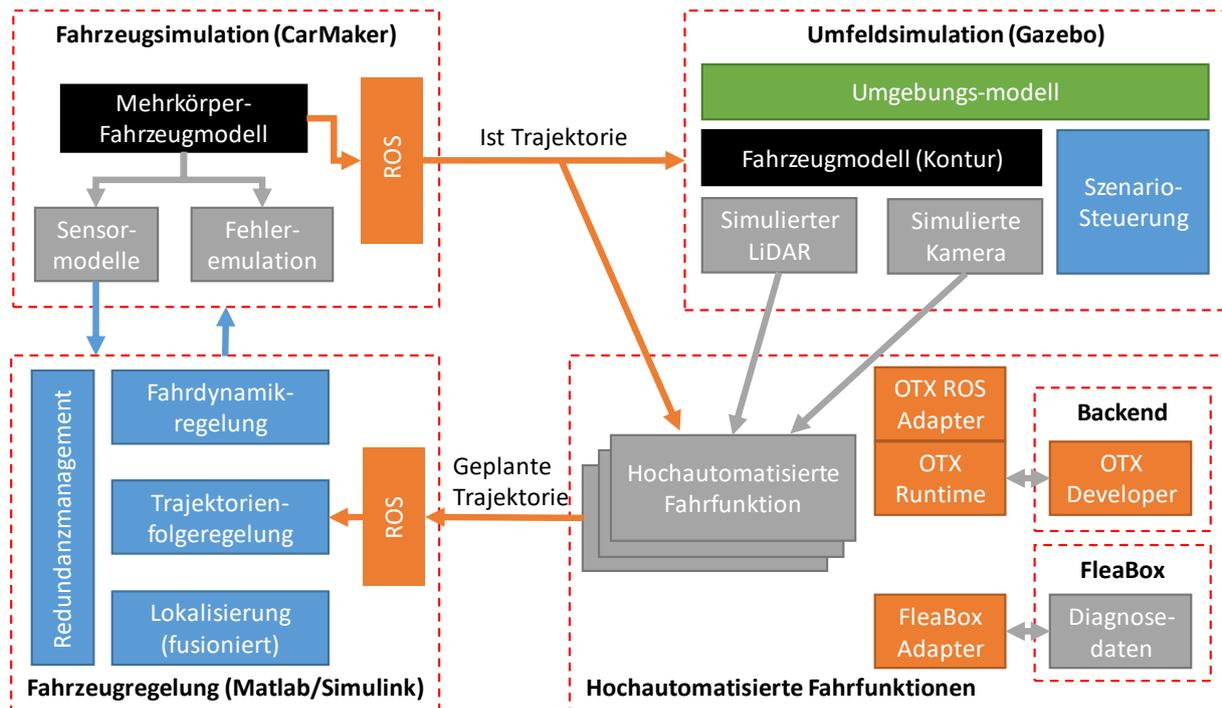


Abbildung 12: Interaktion verschiedener Simulationsmodule

Von diesem gesamten Simulationsloop ist für die Untersuchung und die Erarbeitung der fehlertolerante Gesamtfahrzeugregelung die Verwendung der Module Fahrzeugsimulation und Fahrzeugregelung ausreichend, da mit den anderen Modulen keine Interaktion vorgesehen ist.

Für das fehlertolerante Aktoriksystem sind weitere Simulationsmodelle vorgesehen, welche eine detailliertere Betrachtung der elektrischen und magnetischen Effekte im Aktor ermöglicht.

II.1.1.4.2 Kleinantriebsprüfstand

Für die Inbetriebnahme und Validierung des fehlertoleranten Aktoriksystems und dessen Regelung kann der Kleinantriebsprüfstand von Schaeffler (Abbildung 13) genutzt werden. Dieser ist bereits mit einer Lastmaschine ausgerüstet. Über einen gut ausgestatteten Leitstand und der Schaefflereigenen Prüfstandssoftware SARA wird dieser gesteuert.



Abbildung 13: Schaeffler Kleinantriebsprüfstand mit Leitstand

Das Prüfbett ist mit einem Schlittensystem auf Schienen ausgerüstet, welches ein schnelles Umrüsten der Prüflinge und der Drehmomentmesswelle ermöglicht. Die maximalen technischen Daten des Prüfstandes sind **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu entnehmen.

Tabelle 6: Maximale technische Daten des Kleinantriebsprüfstand

Technische Daten	
Max. Leistung	3,3 kW
Max. Spannung	60 V DC
Max. Strom	40 A / 100 A (kurzzeitig)
Max. Drehzahl	9000 1/min
Drehmomentbereich	± 5 Nm oder ± 20 Nm

II.1.1.4.3 Dynamikfläche am KIT-Campus Ost

Für die Fahrversuche mit dem Demonstratorfahrzeug wurde die ca. 1 ha große Dynamikfläche des KIT-Campus Ost gewählt (Abbildung 14). Für die darauf befindlichen Positionsmarkierungen verschiedener Rundkurse standen exakt eingemessene GPS-Koordinaten zur Verfügung, sodass diese Positionen auch als Referenz für ein lokales Koordinatensystem genutzt werden konnten. Aus den Positionsmarkierungen wurde der in Abbildung 15 gezeigte Rundkurs mit verschiedenen charakteristischen Streckenabschnitten gewählt und auch für die Simulationsumgebungen bereitgestellt.



Abbildung 14: Dynamikfläche am KIT-Campus Ost

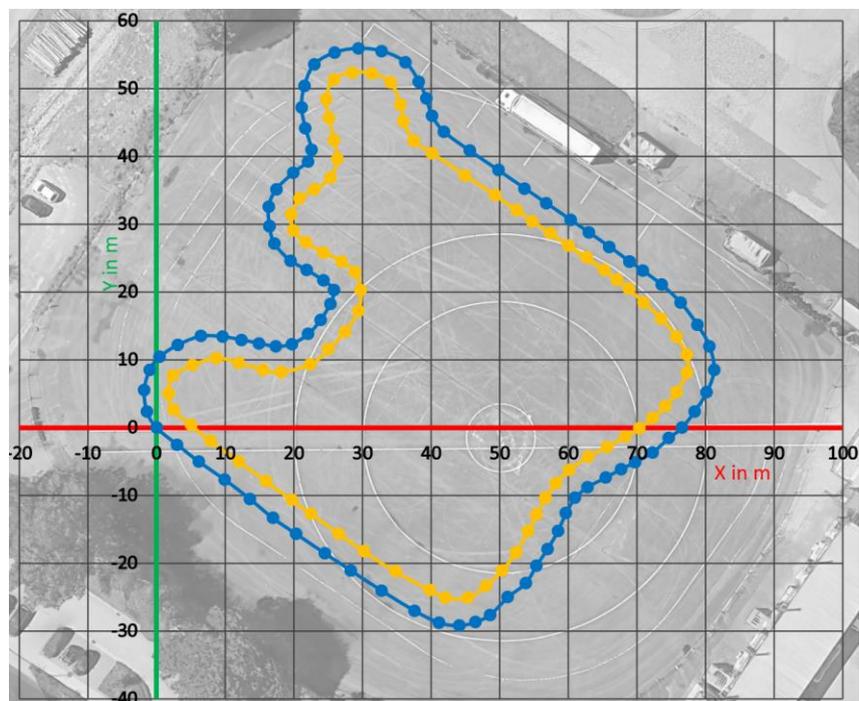


Abbildung 15: Lokales Koordinatensystem und Fahrbahnbegrenzungsmarkierungen auf der Dynamikfläche

II.1.2 AP3: Testmethodik, Testverfahren und Testkonzeption

II.1.2.1 Testverfahren mit dem Demonstratorfahrzeug

Für den Zugriff über die vom Projektpartner RAC erarbeitete Remote-Verbindung (Telemetry) auf die von Schaeffler verantwortete Autobox (Fahrzeugsteuergerät) wurde in Absprache mit den Projektpartnern eine geeignete Schnittstelle entsprechend der in AP1 definierten Spezifikationen (siehe Abbildung 8) erarbeitet. Die Steuergeräte werden dazu in ein gemeinsames ROS-Netzwerk integriert. Dies ermöglicht sowohl die Darstellung aktueller Fahrzeugmessgrößen an einem Leitstand als auch

das Ansteuern des Fahrzeugs vom Leitstand (siehe Abbildung 16). Weitere Angaben zur Realisierung der Schnittstellen zwischen den Fahrzeugmodulen ist in Kapitel II.1.4.1 beschrieben.



Abbildung 16: Leitstand bereitgestellt vom Projektpartner RAC mit Schnittstelle über Telemetrie auf Steuergeräte des Demonstratorfahrzeug

II.1.3 AP4: Schadensmechanismen

II.1.3.1 Neue Maschinen-, Elektronik- und Regelungskonzepte

Unter einem Lenkaktorsystem wird in diesem Projekt der Verbund aus ansteuernder Lenkaktor-Leistungselektronik am Gleichspannungszwischenkreis und elektrischer Maschine inklusive Regelung verstanden. Fehler können in jeder Komponente des Systems auftreten. Das Aktorsystem ist in Abbildung 17 inklusive auftretender Fehler dargestellt.

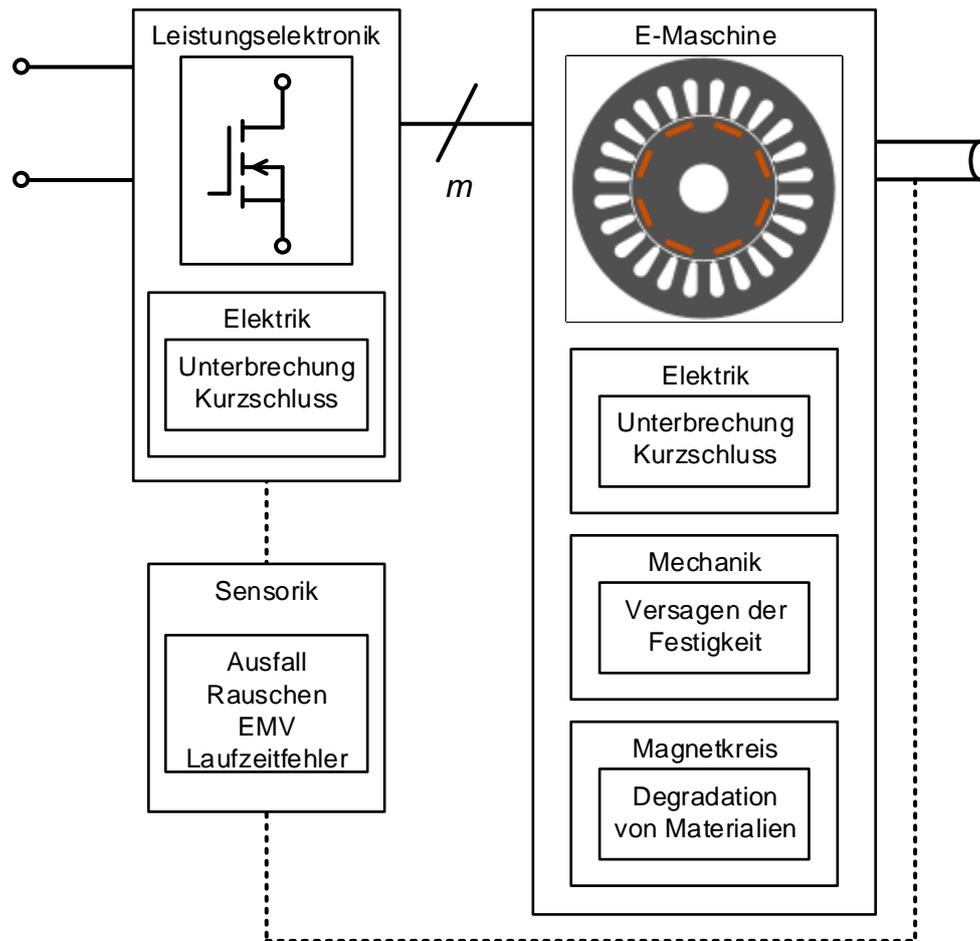


Abbildung 17: Aufbau des Lenkaktorsystems inklusive auftretender Fehler

Eine genauere Betrachtung der Fehler konzentriert sich im Folgenden auf den elektrischen Teil des Aktorsystems.

Bauteile des elektrischen Kreises können durch Degradation, die beispielsweise durch Alterung oder thermische Überlastung hervorgerufen wird, ausfallen. Dabei entstehen entweder Unterbrechungen oder Kurzschlüsse (s. Abbildung 17)

Diese können folgendermaßen genauer spezifiziert werden:

- Fehler in der E-Maschine:
 - o Unterbrechung innerhalb eines Maschinenstrangs
 - o Windungsschluss: Kurzschluss einer oder mehrerer Windungen innerhalb einer Spule eines Strangs
 - o Wicklungsschluss: Kurzschluss einer oder mehrerer Spulen eines Strangs
 - o Strangkurzschluss: Kurzschluss eines kompletten Strangs
 - o Phasenschluss: Kurzschluss zwischen zwei verschiedenen Strängen
 - o Erdschluss/Masseschluss: Kurzschluss eines Strangs gegen Erde bzw. Masse
- Fehler in der Leistungselektronik
 - o Kurzschluss eines Leistungshalbleiters

- Unterbrechung eines Leistungshalbleiters
- Teilweise Unterbrechung eines Brückenweiges
- Kurzschluss des Zwischenkreiskondensators
- Unterbrechung des Zwischenkreiskondensators

In Abbildung 18 sind diese Fehler schematisch veranschaulicht. In Rot sind Kurzschlüsse und in Blau Unterbrechungen dargestellt. Die Auswirkungen der Kurzschlüsse auf die Maschine wachsen mit steigender Ausdehnung des Fehlers. Aber bereits Kurzschlüsse einzelner Windungen können durch das Fließen des Kurzschlussstroms und die damit einhergehende erhöhte thermische Belastung zu einer Fehlerausbreitung führen, in deren Zuge ein Ausfall des Aktoriksystems entsteht. Insgesamt erzeugen die Fälle also ohne zusätzliche Gegenmaßnahmen oder Designabänderungen den Ausfall. Die benötigten Designrichtlinien für einen fehlertolerantes Aktoriksystem werden im nachfolgenden Kapitel behandelt.

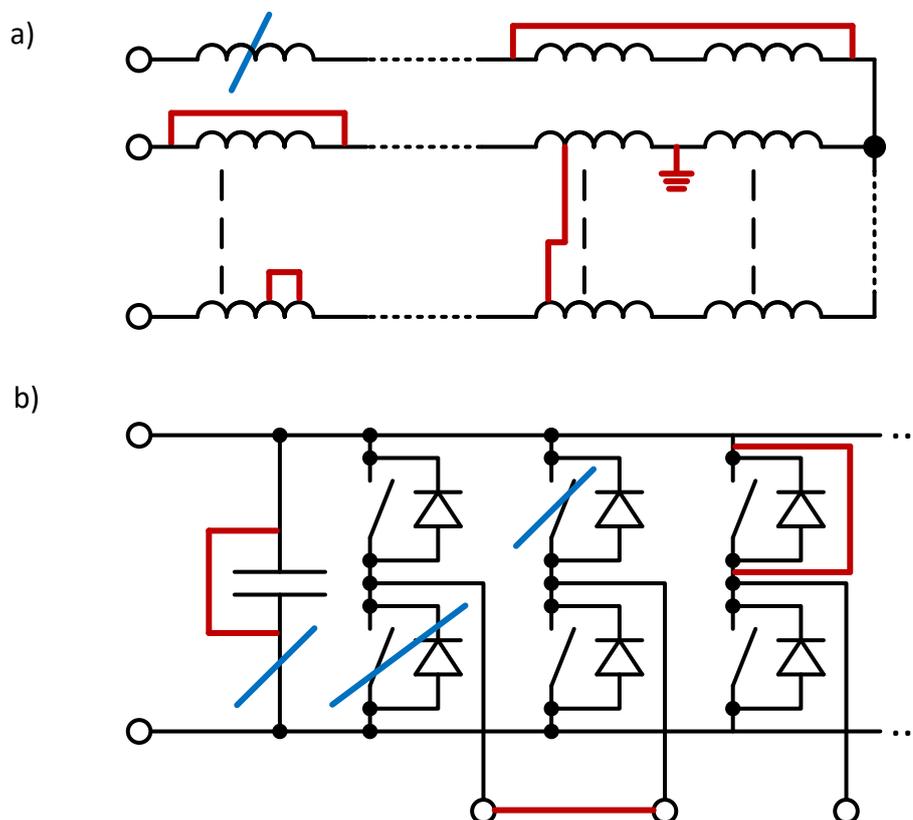


Abbildung 18: a) Fehler im Motor, b) Fehler in der Leistungselektronik

Der günstigste Fall der Fehlertoleranz tritt dann ein, wenn Fehler direkt konstruktiv unterbunden werden können. Dadurch muss keine Kompensation für diesen Fehlerfall getroffen bzw. eingeregelt werden. Dies ist allerdings nicht immer möglich, sodass die Verringerung der Kopplung verschiedener Systeme auf physikalischer Ebene im Vordergrund steht. Eine Kopplungsreduktion bedeutet, dass sich auftretende Fehler in einem System oder Teilsystem der Aktorik nur in geringem Maße auf die

gesunden Anteile auswirken und so einerseits Fehlerfortpflanzungen verhindern und andererseits die Kompensation des Fehlers vereinfachen, da die Rückwirkung beschränkt ist.

Die physikalischen Ebenen zur Kopplungsreduktion sind Thermik, Elektromagnetik und Elektrik.² Für die Thermik bedeutet eine Kopplungsreduktion, dass die Wicklungen der einzelnen Stränge möglichst voneinander separiert sind und Entwärmungspfade in gut leitfähigem Material vorhanden sind. Elektromagnetisch muss die Kopplung zwischen den Strängen unterbunden werden, so dass die Kopplungsinduktivität Null oder nahe Null ist. Dies bedeutet, dass das Verhalten eines gesunden Strangs – beschrieben durch den verketteten Fluss des Strangs in Abhängigkeit des Stroms durch den Strang – nicht durch den fehlerhaften Strang abgeändert wird. Die Bedingung für eine Kopplung, die unter Vernachlässigung der Sättigung Null ist, lautet für eine Einschichtwicklung

$$\frac{N}{2t} = 2k \text{ mit } k \in \mathbb{N} \setminus \{0\} \quad \text{II-1}$$

und für die Zweischichtwicklung

$$\frac{N}{t} = 2k \text{ mit } k \in \mathbb{N} \setminus \{0\} \quad \text{II-2}$$

mit $t = \text{ggT}(N, p)$ ²

Die Nutzahl ist in den Gleichungen mit N und die Polpaarzahl mit p bezeichnet.

Eine Verringerung der elektrischen Kopplung kann durch Auflösen einer Sternpunkt- oder Dreieckverbindung, Separation der Stränge, dass durch Fehler keine elektrische Verbindung entstehen kann, oder durch mehrere Zwischenkreise bzw. galvanisch getrennte Energiequellen realisiert werden.

Nach AP1 soll ein auftretender Fehler komplett kompensierbar sein und ein zweiter möglichst teilweise. Dies bedeutet, dass in die Designrichtlinien zusätzlich eine Überauslegung des Aktorsystems integriert werden muss. Zur einfachen Abschätzung der Überauslegung F kann die folgende Formel, wobei m die Phasenzahl darstellt, herangezogen werden.²

$$F = \frac{m}{m-1} \quad \text{II-3}$$

Eine Überauslegung bedeutet aber auch eine Reduktion der Belastung der einzelnen Teilsysteme im gleichen Betriebspunkt und damit eine Ausfallwahrscheinlichkeitsverringern.

Insgesamt ergeben sich damit die folgenden **Designrichtlinien**:

- Mechanische und elektrische Trennung der Stränge:
 - o Einschichtwicklung
 - o Ansteuerung der Stränge mit einer Vollbrücke
 - o Eigene Zwischenkreise und ggf. galvanisch getrennte Energiequellen
- Durchgehende Isolation der Wicklung zum Blechpaket der Maschine

² Dai Prè, Michele, "Analysis and design of Fault-Tolerant drives", Dissertation, Universität Padua, 2008

- Berücksichtigung der Kopplungsbedingung (vgl. II-1)
- Einhaltung der Spannungs- und Stromgrenzen im Fehlerfall
- Überauslegung zur Kompensation eines Fehlers nach II-3

Mit diesen Designrichtlinien können Kurzschlüsse zwischen Phasen oder zur Masse vollständig ausgeschlossen werden.

Wie schon beschrieben, können allein im elektrischen Teil des Aktorsystems viele Fehlerfälle auftreten. Nicht alle Fehlerfälle sind im Demonstrator-Aktorsystem sinnvoll abbildbar. Trotzdem soll durch den Demonstrator mit den Prüfscenarien ein breiter Bereich abgedeckt werden. Durch eine andere Klassifizierung der Fehler, die Anwendung der Designrichtlinien und den damit verbundenen Ausschluss bestimmter Fehler, reduziert sich die Anzahl der möglichen Szenarien. Durch eine geschickte Auswahl, die auf Worst-Case-Abschätzungen basiert, kann dieses Ziel mit nur drei verschiedenen Prüfscenarien erreicht werden.

Der Demonstrator besteht aus sechs MOSFET-Vollbrücken, die je einen Strang des sechsphasigen Motors bestromen und einzeln angesteuert werden. Die Fehlerfälle können in bremsmomenterzeugende und nicht bremsmomenterzeugende Fehler unterteilt werden. Damit fällt die Aufteilung in Leistungselektronik und Motor weg. Bremsmomenterzeugend wirken alle Kurzschlüsse, während eine Unterbrechung kein zusätzliches Bremsmoment erzeugt. Von den dort beschriebenen Fehlern sind ein Phasenschluss und ein Masseschluss konstruktiv ausgeschlossen. Damit verbleiben Kurzschlüsse innerhalb eines Strangs. Im Demonstrator besteht ein Strang aus einer Spule, womit Strangkurzschluss und Wicklungschluss zusammenfallen.

Für nicht bremsmomenterzeugende Fehler bedeutet dies, dass die Fehler in Abbildung 19 a) auftreten können.

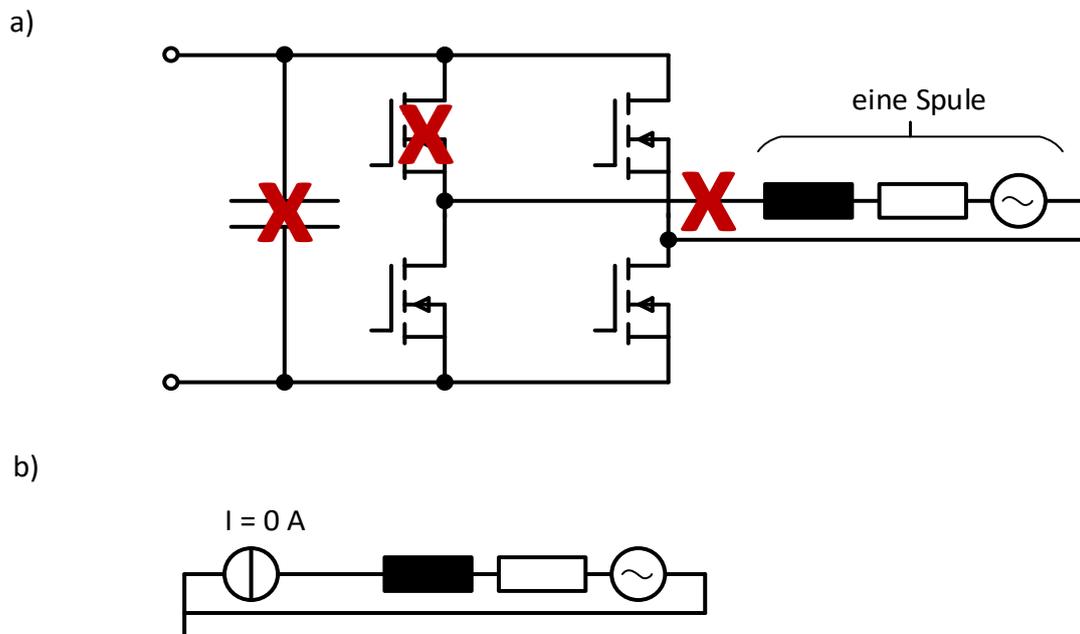


Abbildung 19: a) Schematischer Aufbau einer Phase inklusive Unterbrechungen (Fehler erzeugen kein Bremsmoment) b) Nachbildung der Fehler in der Simulation

Eine Unterbrechung innerhalb des Motorstrangs ist immer durch Abbildung 19 b) in der Simulation nachbildbar. Betrifft die Unterbrechung einen Leistungshalbleiter, im Falle des Demonstrators einen MOSFET, so sind die Unterbrechungen an Drain oder Source oder an der Gateverbindung denkbar. Auch diese Unterbrechungen sind durch Abbildung 19 b) simulierbar. Als Einschränkung muss getroffen werden, dass auch die anderen MOSFETs einer Vollbrücke nicht mehr getaktet werden. Betrifft die Unterbrechung den Kondensator, so kann im ersten Fall von einem Normalbetrieb ausgegangen werden. Da durch den Ausfall des Kondensators keine Spannungsspitzen mehr gedämpft werden, ist von einer Fehlerfortpflanzung in andere Bauteile auszugehen, so dass die Auswirkung der Unterbrechung erst durch den Folgefehler detektierbar ist und auch nachgebildet werden muss. Damit sind alle vollständigen Unterbrechungen, die eine Änderung des Betriebsverhaltens zeigen, durch eine einzige Nachbildung in der Simulation abdeckbar (Abbildung 19 b)).

Nach den obigen Erläuterungen können bremsmomenterzeugende Fehler nach Abbildung 20 a) auftreten.

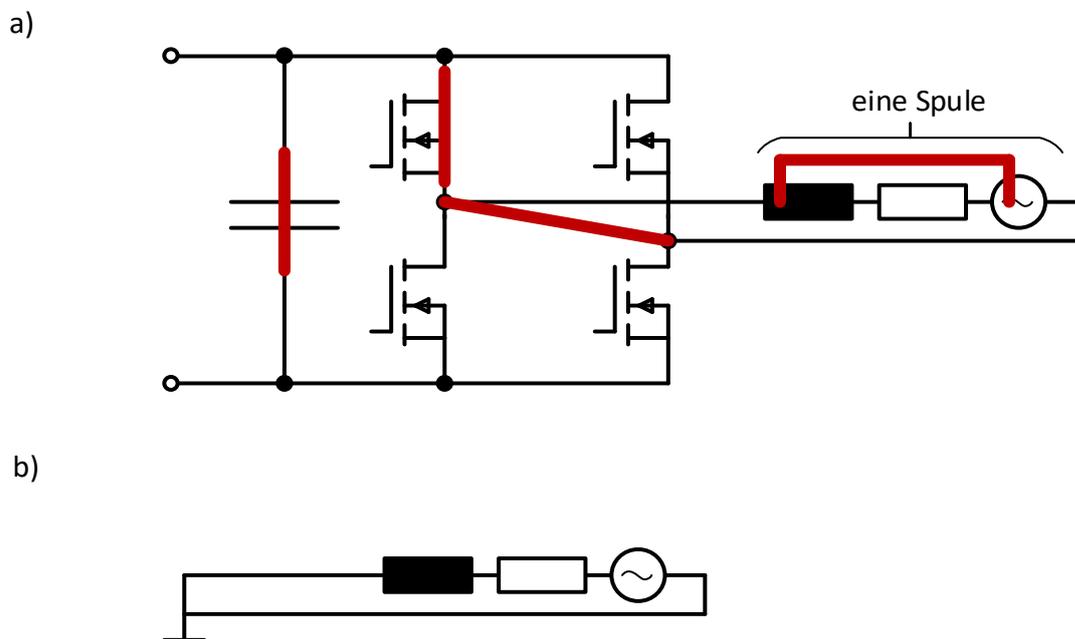


Abbildung 20: a) Schematischer Aufbau einer Phase inklusive Kurzschlüsse (Fehler erzeugen ein Bremsmoment)
b) Nachbildung der Fehler in der Simulation

Ein Kurzschluss an den Spulenden oder an den Maschinenklemme ist immer durch Abbildung 20 b) in der Simulation nachbildbar. Werden beide Fälle mit derselben Simulation nach Abbildung 20 b) abgedeckt, so sind einzig der Widerstand und die Induktivität des Leiterstücks zwischen Spulenden und Klemme vernachlässigt.

Windungsschlüsse in der Spule sind prinzipiell alle in einer Simulation nachbildbar. Die Auswirkungen im Vergleich zum Strangkurzschluss sind allerdings geringer. Wie bereits beschrieben, ist die Fehlerausbreitung innerhalb einer Spule sehr wahrscheinlich, so dass ein Kurzschluss weniger Windungen zu einem Kurzschluss vieler oder sogar aller Windungen führt. Auch eine Detektion des Fehlers wird mit Ansteigen an betroffenen Windungen deutlich größer. Außerdem ähnelt das Verhalten der fehler-

haften Wicklung immer mehr dem des Wicklungsschlusses, der praktisch den Worst Case eines Windungsschlusses beschreibt. Im Demonstrator-Motor ist es darüber hinaus nicht praktikabel, Windungsschlüsse einzubauen.

Ein Kurzschluss eines MOSFETs führt bei aktivem Kurzschließen des Halbleiters an gleichem Zwischenkreispotential der anderen Halbbrücke (hier oberer rechter Brückenthalbleiter) zur Möglichkeit der Nachbildung nach Abbildung 20 b). Auch hierbei gilt, dass dazu dieselbe Simulation wie für den Strangkurzschluss genutzt werden kann – ebenfalls unter Vernachlässigung von Anschlusswiderstand und -induktivität.

Der Kondensatorkurzschluss führt, sofern der fehlerhafte Strang abgetrennt werden kann, ebenfalls zur Nachbildung nach Abbildung 20 b), insbesondere wenn die Schalter zusätzlich aktiv kurzgeschlossen werden.

Daraus folgt, dass der größte Teil aller Fehler, die noch im Demonstrator-Aktoriksystem auftreten können, durch zwei Simulationsszenarien abgebildet werden können. Diese sind zusätzlich die Fehler, die die größten Auswirkungen auf das System haben. Für die Prüfzenarien ergibt sich deshalb, dass stationär ein Kurzschluss und eine Unterbrechung eines Maschinenstranges im Nennbetriebspunkt (entsprechend der Slalomfahrt) sowohl simulativ als auch in der Messung untersucht werden soll. Das Ziel ist es, die Fehlerauswirkung so auszuregulieren, dass das Drehmoment im fehlerfreien Fall in gleicher oder annähernder Qualität erreicht wird. Für den Fall, dass zwei Fehler auftreten, wird der Ausfall zweier Phasen in Form der Unterbrechung untersucht.

II.1.4 **AP5: Zuverlässige Software- und Systemplattform**

II.1.4.1 Schnittstellen zwischen Modulen des Demonstratorfahrzeugs

Basierend auf der in AP1 definierten Systemarchitektur (Abbildung 8) für das Demonstratorfahrzeug wurde die Schnittstelle von der „Drive-Box“ (Projektpartner FZI) zur von Schaeffler verantworteten Autobox (Fahrzeugsteuergerät) umgesetzt. Die beiden Steuergeräte wurden dazu in ein gemeinsames ROS-Netzwerk integriert und die auszutauschenden Signale definiert. Eine Übersicht der von Schaeffler bereitgestellten Signale ist in Tabelle 7 dargestellt.

Für eine performante Fahrzeugfolgeregelung ist es erforderlich geworden, diese auf der Autobox umzusetzen, wodurch sich eine Anpassung der Schnittstellen (Fahrzeugtrajektorie anstatt Lenkwinkel- und Geschwindigkeitsvorgabe) ergab und ein Fahrzeugfolgeregler von Schaeffler erarbeitet wurde (siehe Abschnitt II.1.5.2.2.3.)

Die Einbindung der Motion-Box (Projektpartner AVL) in das ROS-Netzwerk wurde ebenfalls von Schaeffler umgesetzt, da sich die Autobox als Schnittstelle zwischen der CAN-Kommunikation der Motion-Box und dem ROS-Netzwerk die bevorzugte Lösung darstellt. Die Aufbereitung der GPS-Signale wurde mit einem von AVL bereitgestellten Algorithmus in die Softwarestruktur der Autobox integriert.

Tabelle 7: Von Schaeffler bereitgestellte ROS-Topics

Signal	topic	Msg type
v_x ist	/stag/elf_pp/v_x_mps	std_msgs.Float32
Drehmoment Antrieb links	/stag/elf_pp/drive_motor_fl_torque_actual_nm	std_msgs.Float32
Drehmoment Antrieb rechts	/stag/elf_pp/drive_motor_fr_torque_actual_nm	std_msgs.Float32
Aktueller Lenkwinkel	/stag/elf_pp/delta_steering_angle_rad	std_msgs.Float32
Fehlerauslösung Indikator	/stag/elf_pp/error_trigger_indicator	std_msgs.Float32
Smartload Indikator	/stag/elf_pp/smartload_indicator	std_msgs.Float32
Fehlerzustand Antrieb links	/stag/elf_pp/fault_condition_drive_motor_fl	std_msgs.Float32
Fehlerzustand Antrieb rechts	/stag/elf_pp/fault_condition_drive_motor_fr	std_msgs.Float32
Fehlerzustand Lenkaktor 1	/stag/elf_pp/fault_condition_steering_motor_1	std_msgs.Float32
Fehlerzustand Lenkaktor 2	/stag/elf_pp/fault_condition_steering_motor_2	std_msgs.Float32
Fehlerkompensations Visualisierung	/stag/elf_pp/error_compansation_indicator	std_msgs.Float32

II.1.4.2 Schnittstelle zur Einbindung auf dem Vehicle-in-the-Loop Prüfstand

Um erster Versionen der Softwarefunktionen in der frühen Phase sicher erproben zu können, wurde das Demonstratorfahrzeug auf dem VEL-Prüfstand des Projektpartners KIT-FAST betrieben.

Dazu waren Anpassungen der Systemarchitektur erforderlich und damit verbunden die Definition weiterer Schnittstellen.

Abbildung 22 zeigt die angepasste Architektur. Wird das Fahrzeug auf dem Prüfstand betrieben, müssen sämtliche Effekte, die aus der Fahrdynamik oder durch Interaktion mit der Umgebung entstehen, durch ein Simulationsmodell abgebildet werden. Dies betrifft aus Sicht des Steuergerätes (Autobox) die Sensorsiglane für die Fahrzeugbewegung (Beschleunigungssensor) und die Fahrzeugposition. Statt der echten Sensorsignale dienten als Quelle die entsprechenden Werte aus der Simulation des Prüfstands, die per CAN auf das Fahrzeug übertragen wurden.

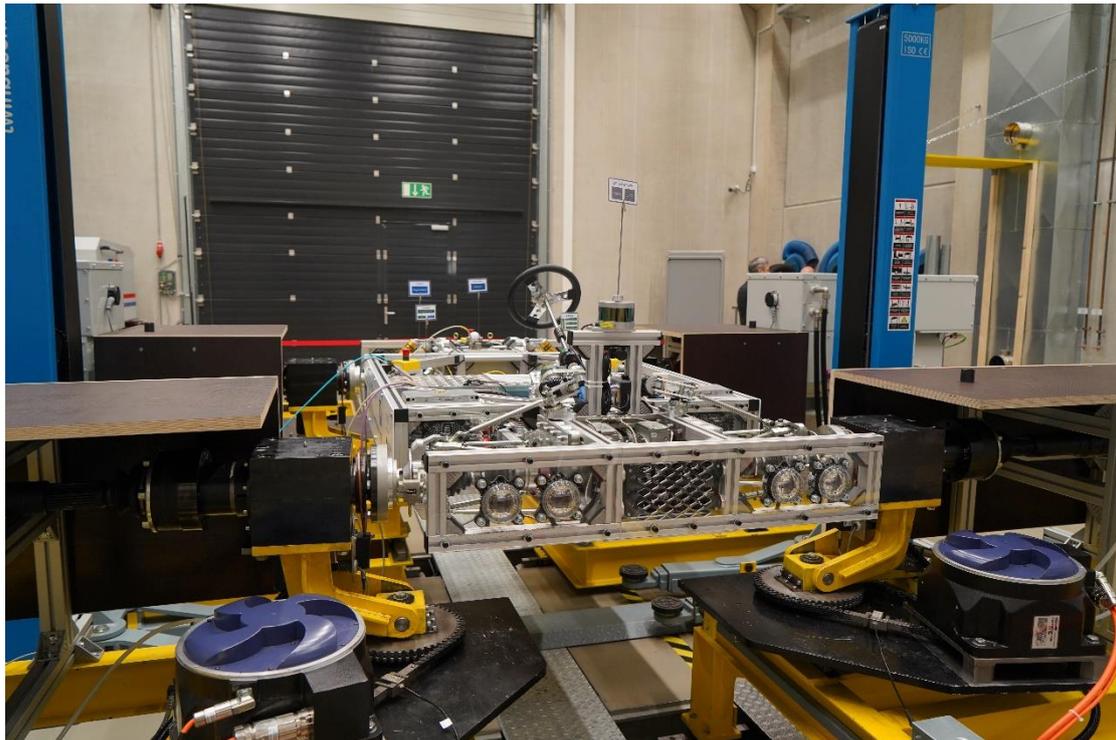


Abbildung 21: Demonstratorfahrzeug auf dem VEL-Prüfstand

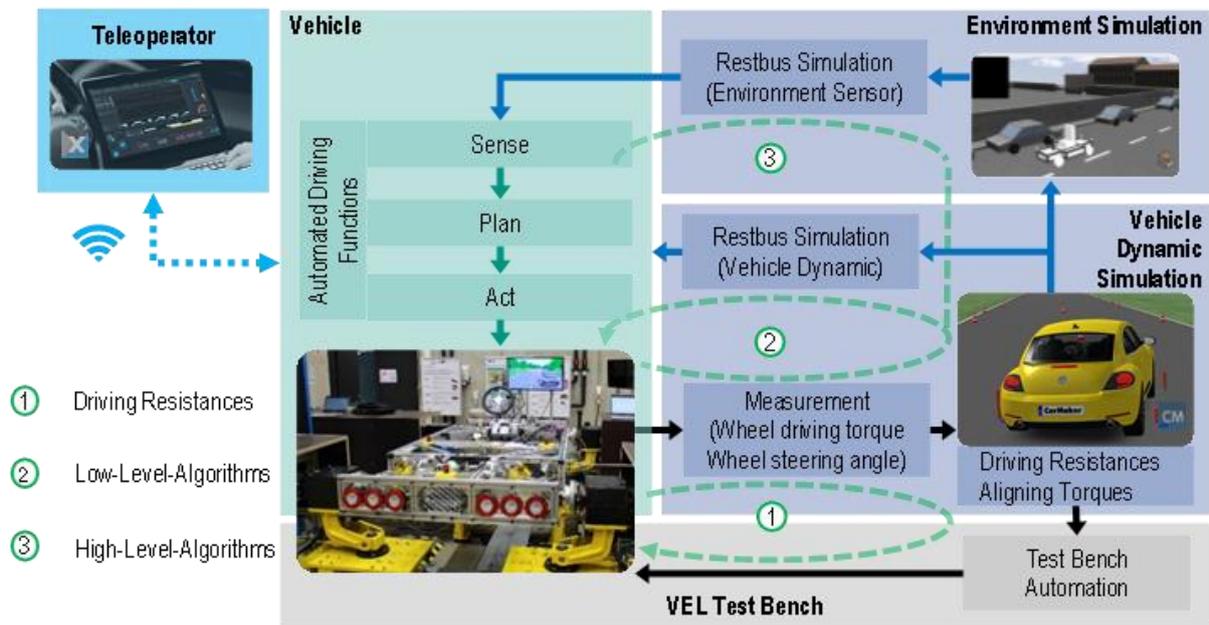


Abbildung 22: Systemarchitektur zur Validierung der Fahrfunktionen am VEL-Prüfstand (KIT-FAST)

II.1.5 AP6: Demonstrator und Referenzanwendungen

II.1.5.1 Fehlertolerantes Aktoriksystem

II.1.5.1.1 Fehlertoleranter Aktorik-Motor

Mit den Erkenntnissen und der erarbeiteten Designrichtlinie aus AP4 wurde ein Demonstrator eines fehlertoleranten Lenkaktors ausgelegt und aufgebaut. Dieser ist in Abbildung 23 inklusive seiner Spezifikationen gezeigt. Hierbei wurde auf eine Phasenzahl von sechs gesetzt, um einen Fehler komplett zu



Spezifikation	Formelzeichen	Wert
Phasenzahl	m	6
Nennspannung	U_{norm}	12 V
Drehmoment maximal	M_{max}	1 Nm
Nennstrom	I_{norm}	10 A
Nutenzahl	N	12
Polpaarzahl	p	5

Abbildung 23: Fehlertoleranter Aktorik-Motor mit Spezifikationen

kompensieren und einen zweiten teilweise mit zum Beispiel der Verringerung des maximalen Drehmoments auszugleichen. Durch Verwendung der Phasenzahl 6 kann die benötigte Überauslegung reduziert werden, ohne gleichzeitig die zusätzliche Peripherie stark zu erhöhen. Für den Demonstrator wurde ein vorhandener Motor mit einer Nutenzahl von 12 verwendet und umgewickelt. Dazu wurde nur jeder zweite Zahn mit einer Einschichtwicklung bewickelt, um einen Kurzschluss zwischen zwei Strängen konstruktiv auszuschließen. Mit dem in der Abbildung 23 gezeigten Nut-Pol-Verhältnis kann die elektromagnetische Kopplung ohne Berücksichtigung der Sättigung zu Null gesetzt werden. Die sechs Stränge sind einzeln herausgeführt und sollen mit jeweils einer Vollbrücke angesteuert werden. Die Gesamttopologie des fehlertoleranten Aktorik Demonstrators ist in Abbildung 24 gezeigt. Auf den detaillierten Aufbau der Vollbrücken-Leistungselektronik wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

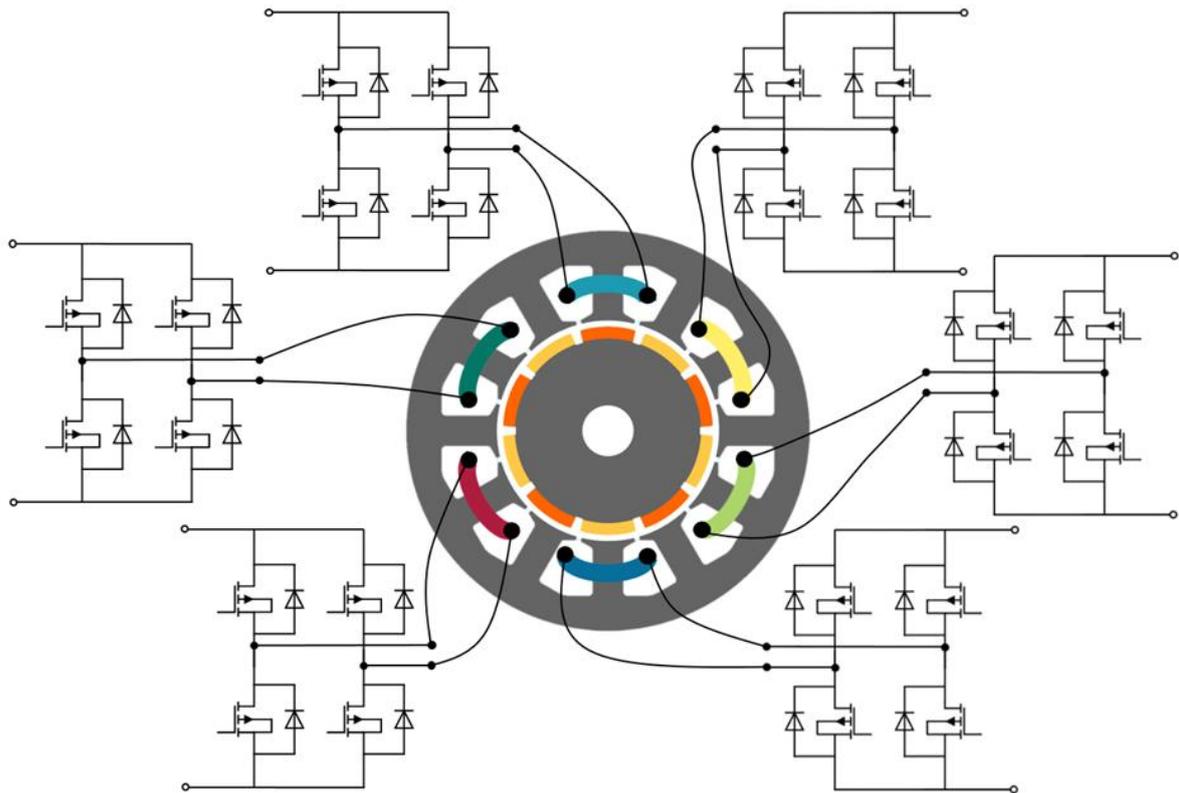


Abbildung 24: Gesamtkonzept Aktorik-Motor mit Leistungselektronik

II.1.5.1.2 Fehlertolerante Leistungselektronik

Wie schon beschrieben soll der sechphasige Motor mit jeweils einer Vollbrücke pro Phase angesteuert werden. Für das Projekt wurde eine Vollbrücke um zwei zusätzliche Schalter ergänzt, um eine dynamische Fehlereinprägung zu ermöglichen. Die Topologie für eine Motorphase ist in Abbildung 25 gezeigt.

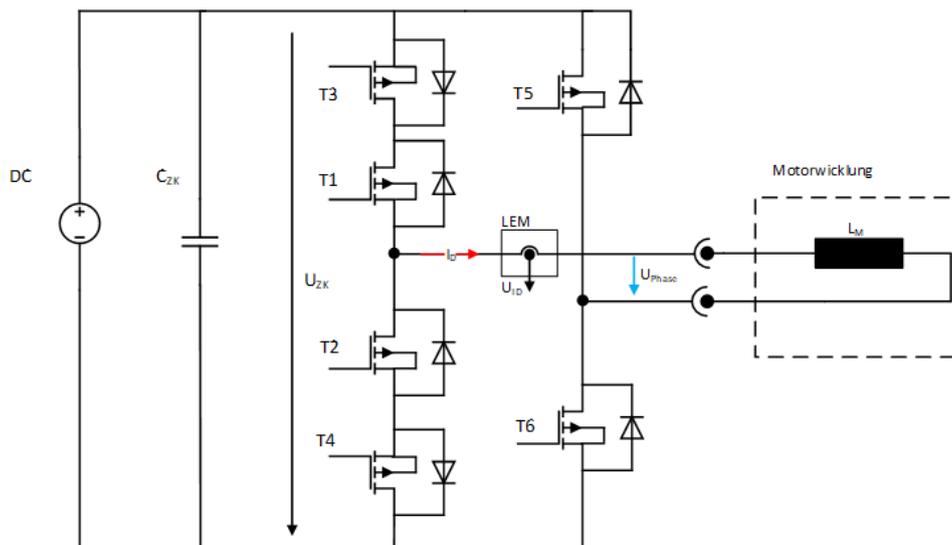


Abbildung 25: Topologie einer Vollbrücken-Leistungselektronik-Karte mit zusätzlichen MOSFETs zur dynamischen Fehlereinprägung.

Die Vollbrücken-Topologie kommt ursprünglich aus dem Bereich des DC-Motors. Im vereinfachten Fall kann man bei dem sechsphasigen Motor mit baulich getrennten Phasenwicklungen vom gleichen Verhalten ausgehen. Bei der Topologie werden die Schalter T1 und T2 sowie T5 und T6, wie bei einer normalen Vollbrücke des DC-Motors getaktet. Die Schalter T3 und T4 sind im Normalbetrieb dauerhaft durchgeschaltet. Durch diese beiden extra Schalter lässt sich jedoch dynamisch eine Unterbrechung erzeugen. Wie schon in AP4 beschrieben ist dieser Fehler - neben dem Kurzschluss - einer der Hauptfehler. Ohne diese extra eingefügten Schalter lässt sich die Unterbrechung nicht dynamisch in eine Leistungselektronik einfügen, da MOSFETs natürlicherweise eine parasitäre Diode aufweisen und demnach auch bei geöffnetem Schalter in eine Richtung leitfähig sind.

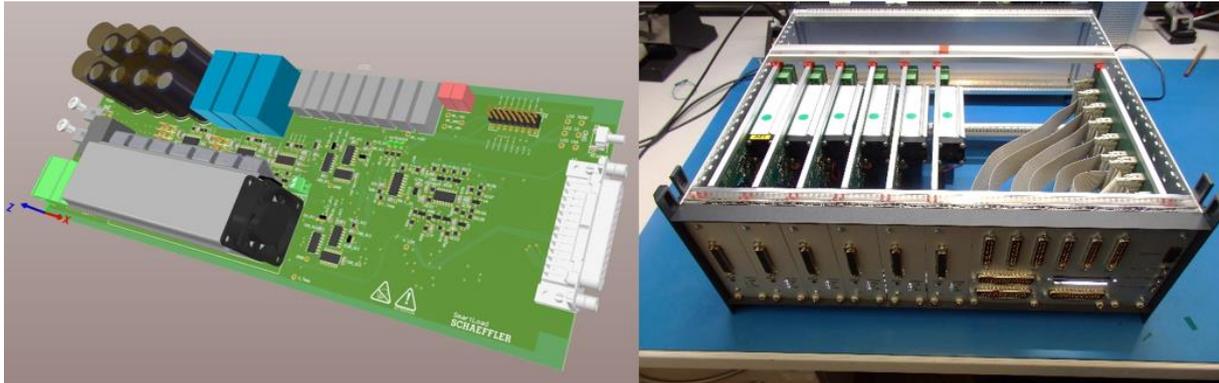


Abbildung 26: Foto des gesamten Gesamtaufbaus der Leistungselektronik und 3D-Ausleitung einer Platinenkarte aus dem CAE-Programm Altium-Designer

Für das Gesamtsystem wurden sechs solcher Karten aufgebaut und miteinander verschaltet. Das Schaltungsdesign und das Platinen-Layout wurden mithilfe der CAE-Software Altium-Designer durchgeführt. Die Platine und Komponenten wurden anschließend bestellt und per Hand gelötet und aufgebaut. Danach wurden die Leistungselektronikkarten einzeln in Betrieb genommen und anschließend als Gesamtsystem miteinander verschaltet. Als Digitaler Signalprozessor (DSP) wird ein dSPACE-SCALEXIO System, welches für das SmartLoad-Projekt erworben wurde, verwendet. Die Einzelkarte sowie das Gesamtsystem sind in Abbildung 26 zu sehen.

II.1.5.1.3 Modellbildung und Simulation

Für die Simulation wurde ein 6-phasiges lineares Strangmodell aufgebaut, welches eine Fehlereinprägung ermöglicht. In der Gesamtsimulation werden zwei Motoren mechanisch miteinander gekoppelt, sodass sich ein Prüfling (PU1) und eine Lastmaschine (PU2) ergibt. Die feldorientierte Regelung im d/q-System erfolgt mit einem PI-Regler.

Zunächst wird ein Gesamtüberblick der Simulation in Abbildung 27 gezeigt.

Am Anfang der Simulation wird der Lastmaschine ein Drehzahlsprung auf 2000 rpm vorgegeben. Bei 0,2 Sekunden wird dem Prüfling ein Drehmomentsprung von 0,22 Nm vorgegeben. Bei 0,4 Sekunden wird eine Unterbrechung (Open-Circuit) von Phase 1 simuliert, welche bei 0,5 s kompensiert wird. Man sieht wie die Unterbrechung ab 0,4 s zu einem Drehmoment Rippel führt, der bei 0,5 s dann vollständig kompensiert werden kann.

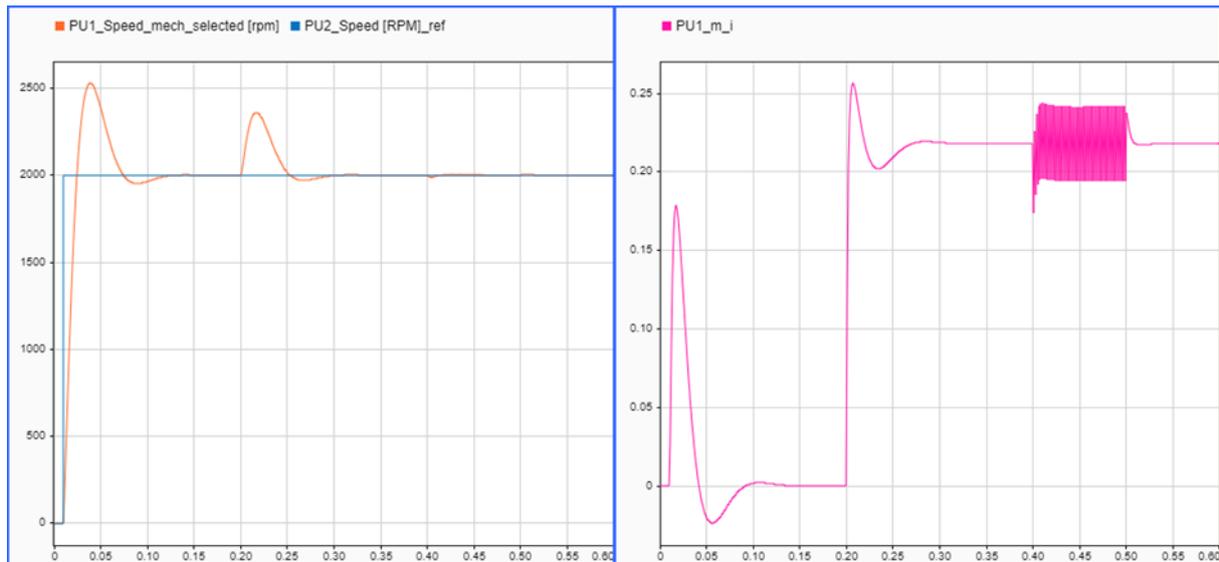


Abbildung 27: Gesamtüberblick Simulation Aktoriksystem

In Abbildung 28 wird die Detailansicht der Unterbrechung bei 0,4 s gezeigt. Man kann in den Strömen sehen, dass die normale dq-Regelung ohne Kompensation den Motor weiter betreiben kann, indem der Strom auf die anderen Phasen verteilt wird. Vor allem die gegenüberliegende Phase 4 übernimmt die Stromführung. Allerdings ergibt sich, wie ebenfalls in Abbildung 28 zu sehen ist, ein Drehmomentrippingel.

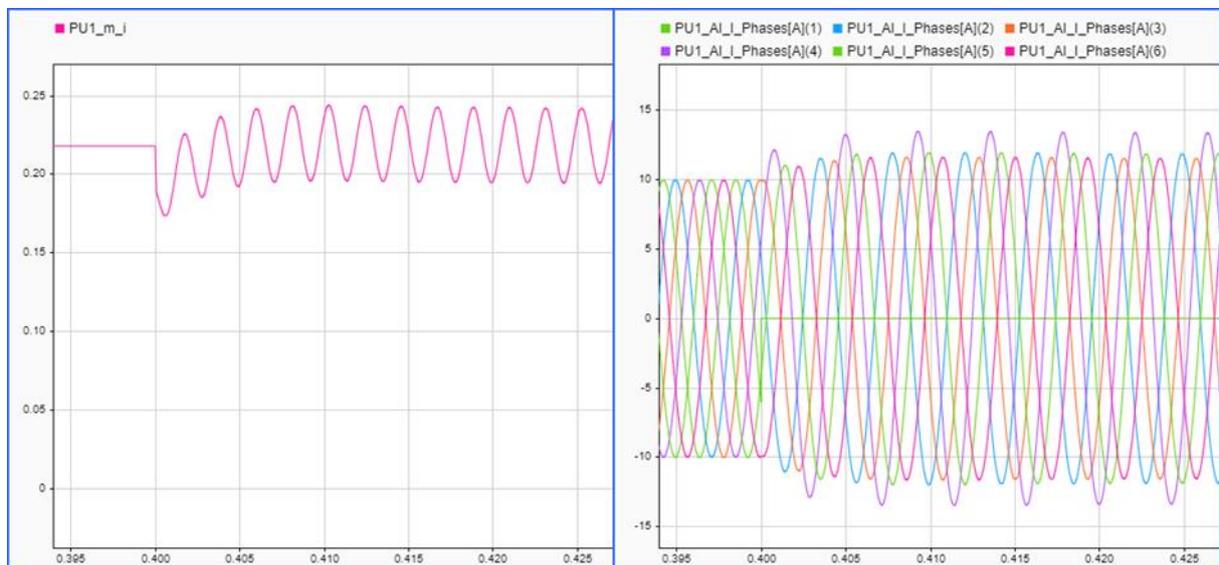


Abbildung 28: Detailansicht Simulation – Unterbrechung Phase 1 bei 0,4 s

In Abbildung 29 wird die Detailansicht der Kompensation bei 0,5 s gezeigt. Es ist zu sehen, dass der Drehmomentrippingel vollständig ausgeglet werden kann, indem die Ströme anders auf die Phasen verteilt werden. Hierbei übernehmen vor allem die benachbarten Phasen (Phase 2 und Phase 6) die Stromführung.

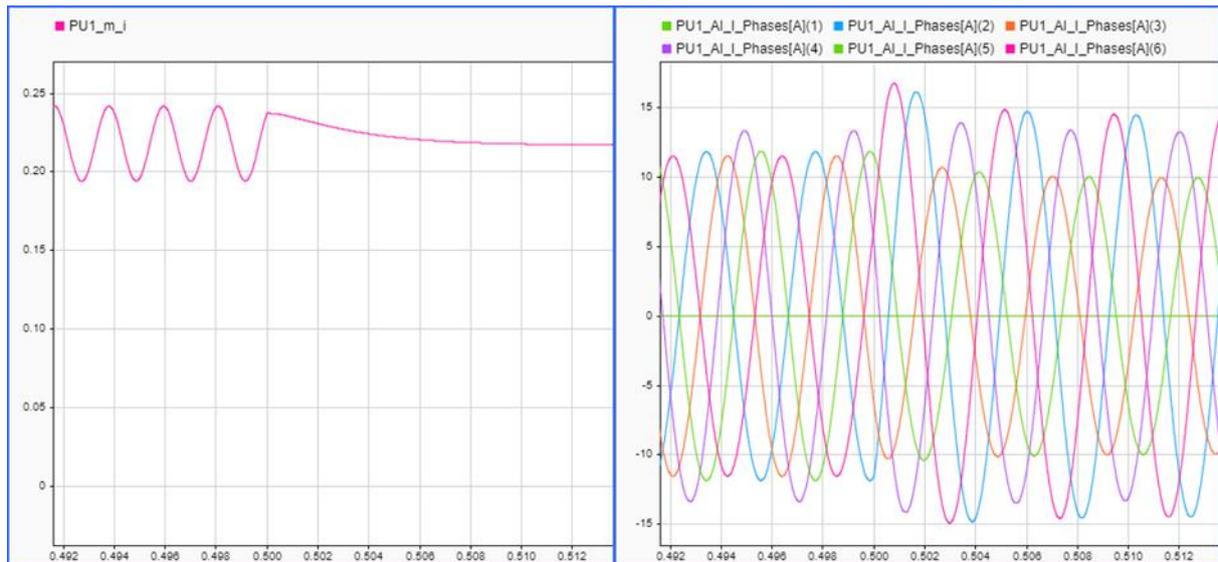


Abbildung 29: Detailansicht Simulation – Kompensation Phase 1 bei 0,5 s

II.1.5.2 Demonstratorfahrzeug

II.1.5.2.1 Mechanische und elektrische Erweiterungen am Demonstratorfahrzeug

Die in AP1 (Tabelle 4) ermittelten Anpassungen und Erweiterungen wurden umgesetzt. Dabei wurden Aufwände, die die Mechanik betreffen (Getriebetausch, Halterungen) vom Projektpartner KIT-FAST durchgeführt. Von Schaeffler wurden die Schnittstellen zu den von den Projektpartnern beigesteuerten Systemen definiert und die Integration auf elektrischer, elektronischer und Software-Ebene umgesetzt und die Inbetriebnahme durchgeführt.

Die notwendigen Modifikationen betreffen im Wesentlichen die Aufrüstung des Fahrzeuges hinsichtlich automatisierter Fahrfunktionen. Hierzu zählen Sensoren (Kamera und Lidar und Lokalisierung), das zentrale Steuergerät (Drive-Box) und die Kommunikationsschnittstelle (Telemetrie). Außerdem sind die Hinterachse mit Raddrehzahlsensoren ausgerüstet. Um die Torque-Steering-Funktion durch beide Antriebsmotoren zu realisieren, wurden das Lenkgetriebe und Fahrgetriebe durch die Ausführungen mit höheren Übersetzungen ersetzt.

Um einen Fehlerfall während der Fahrt zu einem definierten Zeitpunkt auszulösen, wurde eine Vorrichtung entworfen, die die Stromversorgung des Lenkaktor-Steuergerätes unterbrechen kann. Dies erfolgte über einen Stellmotor, der über eine Winde eine Sicherung aus deren Halterung ziehen kann. Durch diese Unterbrechung kann der Lenkaktor nicht mehr angesteuert werden und ist momentenfrei. Eine Übersicht der umgesetzten Erweiterungen zeigt Abbildung 30. Von links oben im Uhrzeigersinn sind dies:

- Lidar und Kamera
- Drive-Box (Steuergerät für Automatisierungsfunktionen)
- Motion-Box (Lokalisierungssystem)
- Raddrehzahlsensor
- Vorrichtung zur Fehlerauslösung (Unterbrechung Stromversorgung Lenkaktorsteuergerät)

- Antriebsgetriebe mit angepasster Übersetzung
- Lenkgetriebe mit angepasster Übersetzung

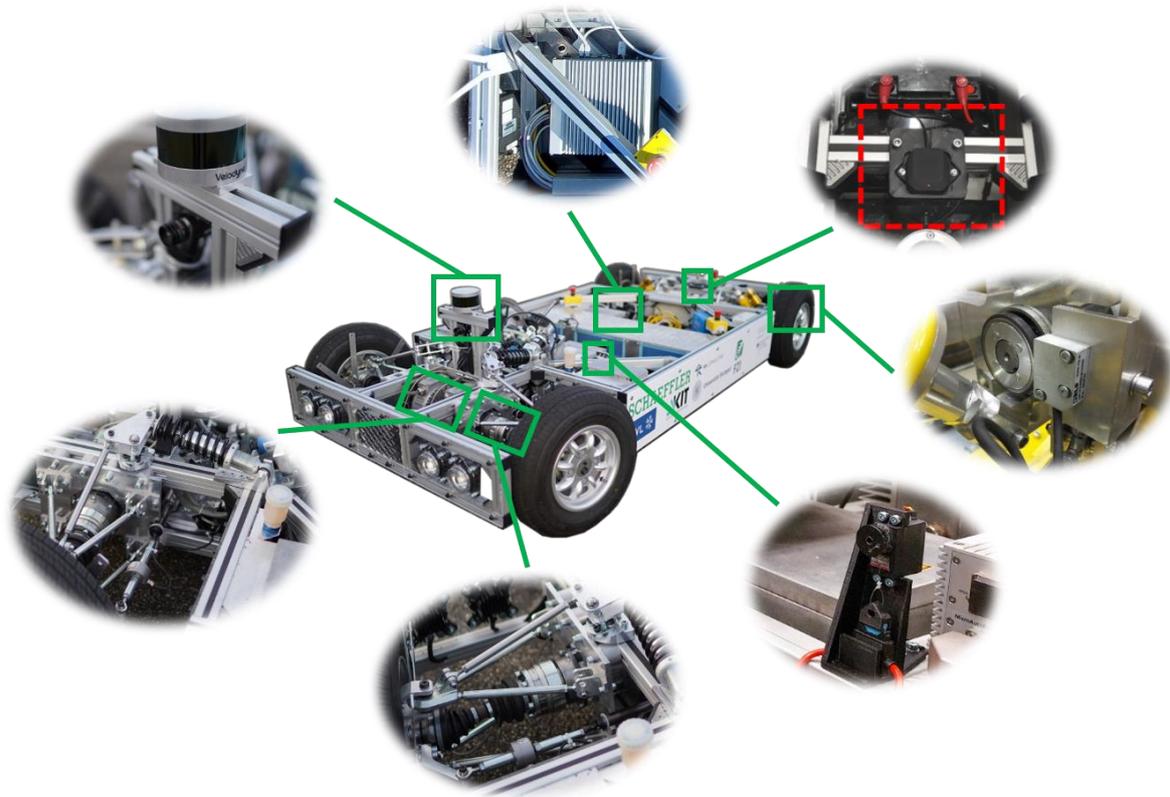


Abbildung 30: Mechanische und elektrische Erweiterungen am Demonstratorfahrzeug

Nach abgeschlossener Inbetriebnahme der einzelnen Erweiterungen erfolgten Erprobungen und iterative Optimierungen aller Teilsysteme. Unter anderem wurden notwendige Änderungen an der Implementierung der Schnittstelle zur Motion-Box vorgenommen. Zur Reduktion der störenden Effekte im Lenksystem (Reibmomente und Spiel) wurde dieses gewartet und dabei auch der Lenkmomentensensor durch den Hersteller neu kalibriert.

Für die effiziente Erprobung der automatisierten Fahrfunktionen ist eine performante WLAN-Verbindung zu den Laptops am Leitstand erforderlich. Damit dies beim Abfahren des Rundkurses auf der Dynamikfläche auch bei größerer Entfernung zum Leitstand ermöglicht werden kann, wurde das Fahrzeug und der Leitstand mit leistungsstärkeren WLAN-Routern ausgestattet.

Nach Abschluss der Modifikationen und Optimierungen der Teilsysteme stand das Demonstratorfahrzeug für die Umsetzung, Erprobung und Validierung der Projektziele zur Verfügung. Abbildung 31 zeigt abschließend links das Demonstratorfahrzeug, wie es aus dem Projekt e²-lenk übernommen wurde und rechts, wie es nach der Fertigstellung im Projekt SmartLoad zum Einsatz kam.

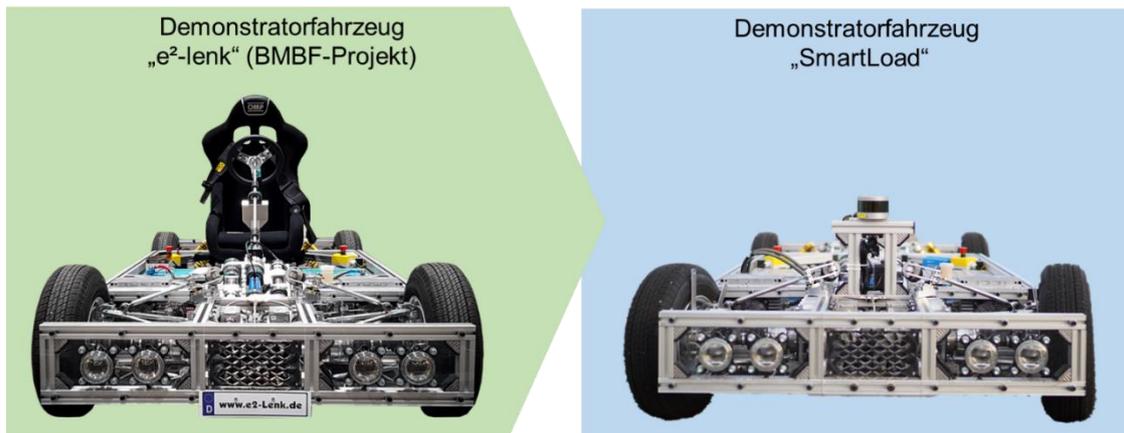


Abbildung 31: Fertiggestelltes Demonstratorfahrzeug

II.1.5.2.2 Fehlertolerante Gesamtfahrzeugregelung

Durch die fehlertolerante Gesamtfahrzeugregelung soll das Fahrzeug in der Lage sein, funktionelle Redundanzen, welche auf Wechselwirkungen zwischen den Aktorsysteme basieren, zu nutzen und somit trotz Ausfall eines Aktors sicher bzw. verfügbar bleiben. Die im Folgenden „SmartLoad Reliability Control“ genannte Funktion des Redundanzmanagements hat das Ziel, die größtmögliche Funktionsfähigkeit des Fahrzeuges im Falle eines Komponentendefekts bereitzustellen. Abbildung 32 veranschaulicht dies anhand des verwendeten Leitbeispiels (Lenkaktorausfall bei Kurvenfahrt). Neben dem konventionellen Ansatz der homogenen Redundanz (mehrfach verbaute Lenkaktoren) soll der "SmartLoad Reliability Control" – Ansatz auch diversitäre Redundanzen, wie in diesem Fall die Torque Steer Funktion, zur Erfüllung der Sicherheit und Optimierung der Verfügbarkeit nutzen können. Als sicher wird das Fahrzeug bewertet, wenn es trotz Ausfall in einen sicheren Zustand, wie zum Beispiel Nothalt am Fahrbahnrand überführt werden kann. Das Fahrzeug ist zusätzlich als „verfügbar“ zu betrachten, wenn es trotz eines Ausfalls weiterhin vollumfänglich sicher, das heißt mit zusätzlicher Rückfallebene für den Fall eines weiteren Fehlers, betrieben werden kann.

SmartLoad Reliability Control

“Größtmögliche Funktionsfähigkeit im Falle eines Komponentendefekts ermöglichen”

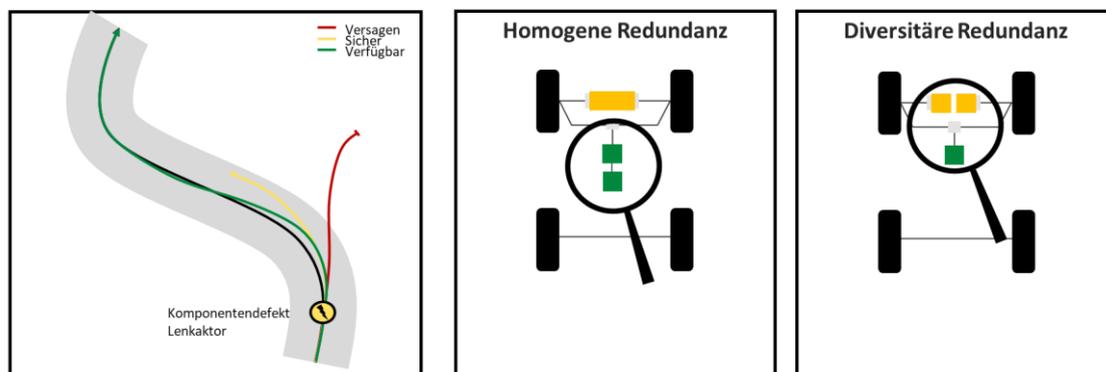


Abbildung 32: Nutzung homogener und diversitärer Redundanz durch den "SmartLoad Reliability Control" – Ansatz (Lenkaktoren in grün, Antriebsmotoren in gelb dargestellt)

II.1.5.2.2.1 *Konzept*

Das Konzept des "SmartLoad Reliability Control" – Ansatzes umfasst die in Abbildung 33 dargestellten Module. Die Fahrdynamikregelung und Stellgrößenzuweisung ist kaskadiert umgesetzt, um die Freiheitsgrade, die die Fahrzeugführung und die Fahrwerksaktuierung mit sich bringen, bestmöglich im Sinne des „SmartLoad Reliability Control“ – Ansatzes nutzen zu können. Im Folgenden wird zunächst eine Übersicht zur Funktionsweise der einzelnen Module gegeben, auf die in den nachfolgenden Kapiteln detailliert eingegangen wird.

Der Trajektorienfolge- und Fahrdynamikregler regelt die Position und Orientierung des Fahrzeugs entsprechend der vom Planer geforderten Trajektorie ein. Die dazu notwendigen Antriebsmomente und Lenkmomente werden im darauffolgenden Modul der Stellgrößenzuweisung generiert. Die Stellgrößenzuweisung kann dabei beispielsweise das geforderte Lenkmoment sowohl durch einen Lenkaktor als auch durch verteilte Antriebskräfte erzeugen. Somit lässt sich die Funktionen „Lenken“ im Fehlerfall auch ohne funktionsfähigen Lenkaktor umsetzen.

Das „SmartLoad Reliability Control“ – Modul bildet die übergeordnete und koordinierende Einheit. Diese verfügt über die Informationen aus dem Zustandsdiagnosemodul und kann über die Stellgrößenzuweisung in die Fahrzeugregelung eingreifen. Ein erkannter Ausfall oder eine Beeinträchtigung eines Aktors wird als Limit der Aktorstellgröße in der Stellgrößenzuweisung berücksichtigt. Somit kann eine alternative Verteilung der Aktormomente gefunden werden, welche die vom Regler geforderte Größe (z.B. Lenkmoment) trotz Ausfall umsetzt.

Darüber hinaus lassen sich in diese Architektur auch fehlertolerante Aktoren integrieren, welche über die Möglichkeit einer internen Kompensation eines Fehlers verfügen. Lässt sich kein ausreichender Kompensationsmechanismus intern finden, dann kommuniziert der Aktor den Grad der eingeschränkten Leistungsfähigkeit an das „SmartLoad Reliability Control“ – Modul, welches daraufhin auf Systemebene die Kompensation mit einem alternativen Aktor oder Teilsystem umsetzt.

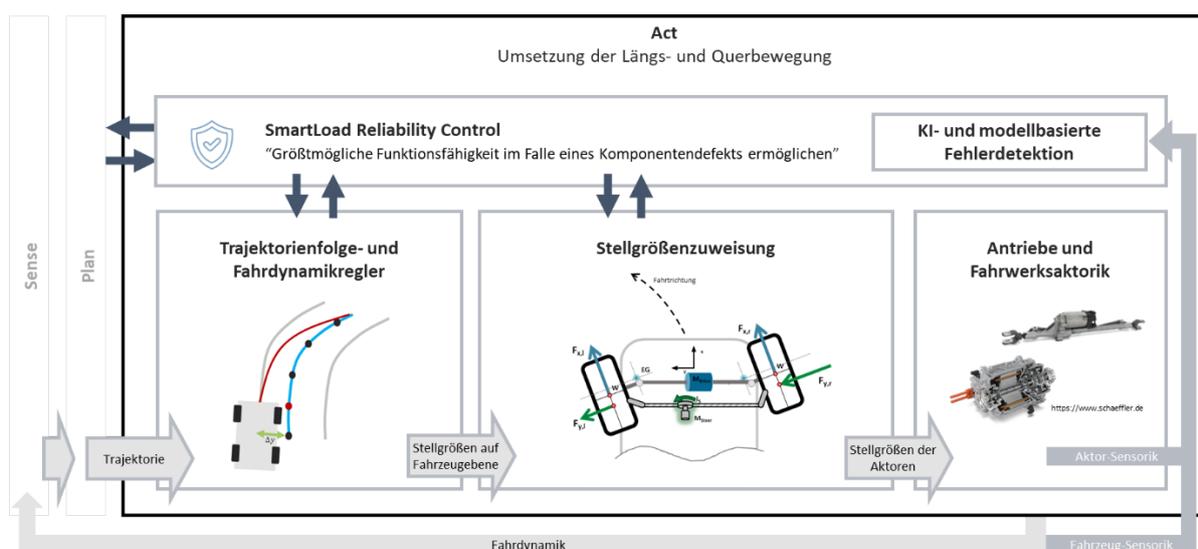


Abbildung 33: Kaskadierte Regelungsarchitektur mit „SmartLoad Reliability Control“ – Ansatz

Zur gemeinsamen Verwendung des Simulationsmodells mit den Projektpartnern wurde das Modell um ein Control-Panel ergänzt, welches eine vereinfachte Nutzung des Modells ermöglicht.

II.1.5.2.2.2 Voruntersuchungen anhand eines Modellfahrzeugs

Als Vorstudie zum "SmartLoad Reliability Control" - Ansatz wurden Untersuchungen an einem Modellfahrzeug im Maßstab 1:5 durchgeführt. Der Vorteil bei der Verwendung eines Modellfahrzeug besteht unter anderem darin, dass der Aufwand zur Erprobung neuer Ansätze geringer ist als bei einem größeren Fahrzeug. Gründe dafür sind unter anderem die Verfügbarkeit des Versuchsgeländes, Unabhängigkeit von Wetterbedingungen und geringfügigere Maßnahmen zur Absicherung von Versuchsfahrten. Auch war es möglich, mehrere studentische Arbeiten und Projekte anhand des Modellfahrzeugs durchzuführen.

Bei dem Modellfahrzeug handelt es sich um ein knickgelenktes Fahrzeug, welches an allen vier Rädern einen elektrischen Antrieb hat. Es benötigt keinen Lenkaktor um den Knickwinkel zu regeln, da es mit dem Prinzip der Differentiallenkung gelenkt werden kann. Dabei kommt die Knickbewegung durch unterschiedlich große Antriebsmomente auf der rechten und linken Seite einer Fahrzeughälfte zustande. Das Fahrzeug und die Funktionsweise ist in Abbildung 34 gezeigt.

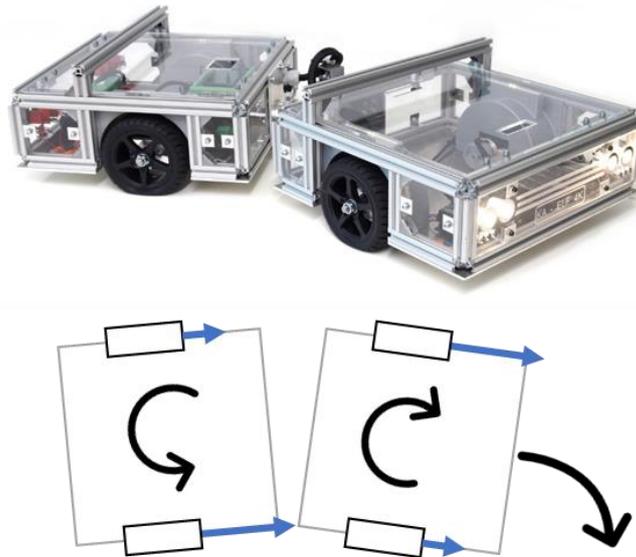


Abbildung 34: Knicklenker-Modellfahrzeug für Voruntersuchungen zum „SmartLoad Reliability Control“ - Ansatz

Aufgrund der vier Antriebe und der Wechselwirkung zwischen Antreiben und Lenken besteht bezüglich der Überaktuierung ein vergleichbarer Aufbau wie beim Demonstratorfahrzeug, auch wenn sich der Fahrzeugtyp und die Art der Wechselwirkung unterscheiden.

Das Fahrzeug wurde, wie auch das Demonstratorfahrzeug, aus dem Projekt „e²-Lenk“ übernommen, musste aber zur Umsetzung des "SmartLoad Reliability Control" – Ansatz mit größeren Steuergeräten ausgerüstet werden. Zudem wurden Antriebe und Getriebe durch performantere Versionen ersetzt.

Bewertet wurde der Ansatz analog zum Demonstratorfahrzeug anhand einer Kurvenfahrt, bei der es zum Ausfall einer der Antriebe kommt. Die Aufgabe des "SmartLoad Reliability Control" – Ansatzes ist es, die Antriebsmomente nach dem Ausfall derart zu verteilen, dass die Kurvenfahrt bei gleichbleiben-

der Geschwindigkeit und gleichbleibendem Knickwinkel fortgeführt werden kann. Die Ergebnisse sind in Abbildung 35 zu sehen. Als Referenz wird eine Regelung verwendet, die die Ausfälle nicht berücksichtigt. Bei $t = 50\text{s}$ wird der Ausfall initiiert. Es ist zu erkennen, dass bei der Referenz-Regelung daraufhin die Geschwindigkeit um 11 % zurückgeht und der Lenkwinkel ungewollt um 33% steigt. Beim Versuch mit aktiviertem "SmartLoad Reliability Control" tritt bei der Geschwindigkeit neben den bereits vor dem Ausfall auftretenden Schwankungen keine Abweichung auf. Der Knickwinkel weicht nach dem Ausfall mit 5% nur noch leicht ab. Somit konnte gezeigt werden, dass die Auswirkung des Ausfalls durch den „SmartLoad Reliability Control“ – Ansatz maßgeblich reduziert werden konnte.

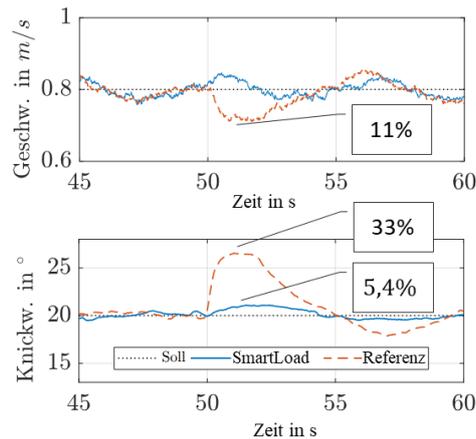


Abbildung 35: Verlauf von Geschwindigkeit und Knickwinkel bei Ausfall eines Antriebs mit und ohne „SmartLoad Reliability Control“

II.1.5.2.2.3 Trajektorienfolgeregelung

Die Trajektorienfolgeregelung generiert die Fahrdynamikstellgrößen derart, dass das Fahrzeug dem vorgegebenen Kurs folgt und auftretende Abweichungen reduziert. Als Eingangsgröße wird aus der geplanten Trajektorie der dem Fahrzeug nächstgelegene Punkt ausgewertet. Die Krümmung an diesem Punkt dient als Vorsteuerung. Die Stellgröße wird bei Abweichung der Krümmung und der lateralen Position korrigiert, wodurch sich das Fahrzeug zurück auf die geplante Trajektorie bewegt. Durch die Parameter k_1 und k_2 kann das Verhalten des Reglers angepasst werden.

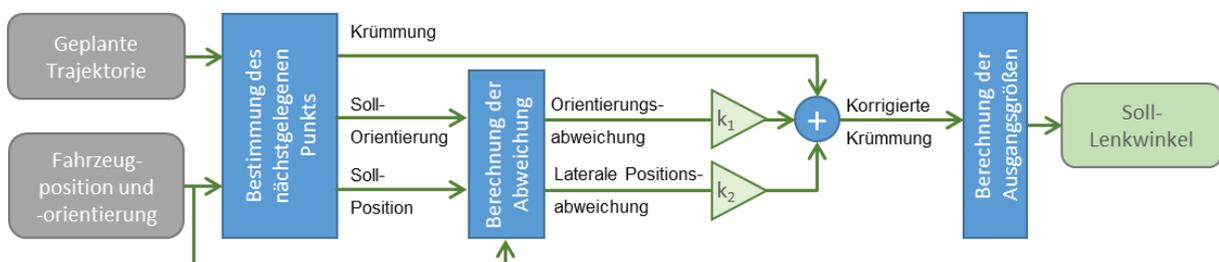


Abbildung 36: Trajektorienfolgeregler

II.1.5.2.2.4 *Lenkmoment durch Torque Steer Funktion*

Das Prinzip das für die diversitäre Redundanz der Lenkfunktion genutzt wird, heißt Torque Steer. Dabei werden Antriebsmomente an den beiden Rädern der gelenkten Achse nicht nur zum Antreiben, sondern auch zum Erzeugen einer Lenkbewegung der Räder genutzt. In Abbildung 37 sind links die wirkenden Kräfte auf die Räder bei einer konventionell aktivierten Lenkung dargestellt. Die blau eingezeichneten Antriebskräfte sind gleich groß und heben sich in ihrer Wirkung auf das Lenkmoment auf, da sie entgegengesetzte Kräfte auf die Zahnstange hervorrufen. Das Lenkmoment wird in diesem Fall von einem der beiden Lenkaktoren erzeugt. Rechts ist das Torque Steer Prinzip dargestellt. Wird am rechten Rad mehr Antriebsmoment aufgebracht als am linken, heben sich die beiden Kräfte in ihrer Wirkung auf die Zahnstange nicht auf und es verbleibt eine Kraft, die dieselbe Auswirkung auf das Lenksystem hat wie das Lenkmoment eines Aktors. Durch gezieltes Einstellen der Differenz der Antriebskräfte kann somit die Funktion des Lenkaktors ersetzt werden.

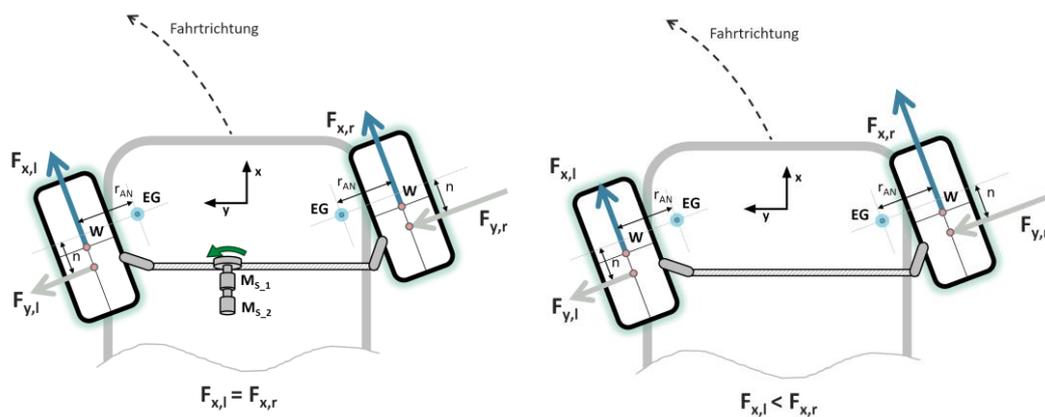


Abbildung 37: Prinzip des Lenkens mittels Lenkaktor und mittels Torque Steer

II.1.5.2.2.5 *Fahrdynamikregelung und Stellzuweisung*

Abbildung 38 zeigt den gewählten Aufbau für die Fahrdynamikregelung und die Stellgrößenzuweisung (Control Allocation). Die Sollwertgenerierung wird hierbei als Eingang betrachtet und kann im Closed-Loop-Betrieb vom Trajektorienfolgeregler empfangen werden. Die Fahrdynamikregelung regelt den Lenkwinkel und Geschwindigkeit mittels zweier unabhängiger PID-Regler.

Das Gesamtlenkmoment M_S kann sowohl von Lenkaktor sowie durch den Torque Steer Effekt (Differenz der Antriebsmomente) erzeugt werden. In der Aktor-Control-Allocation wird dieser Zusammenhang berücksichtigt, um aus den Fahrdynamikstellgrößen die tatsächlichen Aktorstellgrößen zu bestimmen. Durch die Berücksichtigung dieser Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Aktoren kann eine systemübergreifende Redundanz bereitgestellt werden, da Limitierungen der Aktoren bei der Verteilung berücksichtigt werden. Können nicht mehr alle fahrzeugweiten Stellgrößen umgesetzt werden, kann zusätzlich eine Priorisierung erfolgen und beispielsweise das Lenken höher als das Antreiben gewichtet werden.

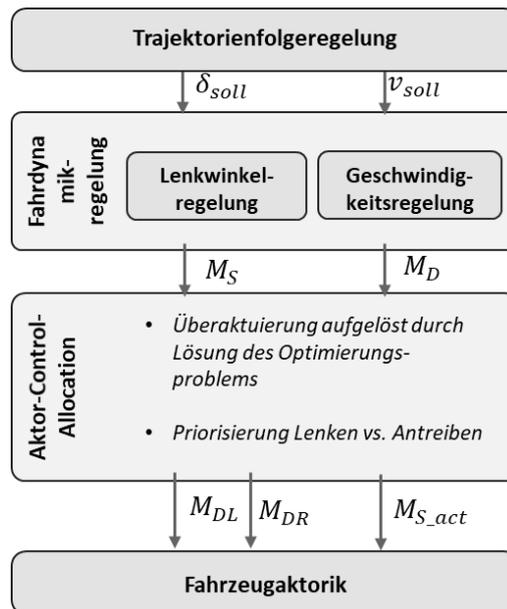


Abbildung 38: Fahrdynamikregelung mit kaskadierter Stellgrößenzuweisung (Control Allocation)

II.1.5.2.2.6 „SmartLoad Reliability Control“ – Modul

Das „SmartLoad Reliability Control“ – Modul koordiniert die Verteilung der Stellgrößen und damit die Nutzung der Aktoren. Über die in II.1.5.2.2.5 beschriebene Stellgrößenzuweisung kann das Modul über die Vorgabe von Limits und Gewichtungsfaktoren in die Verteilung eingreifen. Die Zustandsdiagnose, welche vorhandene Limitierungen der Aktoren ermittelt, stellt eine wesentliche Eingangsgröße dar. Die Auswertung und Interpretation des Fahrzeugzustands führt zur situationsangepassten Wahl der Parameter der Stellgrößenzuweisung. Dadurch können beispielsweise erkannte Ausfälle unmittelbar berücksichtigt werden und deren negative Auswirkung auf die Fahrzeugführung kompensiert werden.

II.1.5.2.2.7 Umsetzung und Erprobung in Simulationsumgebung

Die Regelungsarchitektur wurde in Matlab/Simulink implementiert und in das CarMaker Fahrzeugmodell integriert. Um das Verhalten des gewählten Ansatzes vergleichen zu können, wurde zudem eine vereinfachte Regelung entworfen, welche über keine Berücksichtigung der Aktorzustände in der Stellgrößenzuweisung verfügt.

Zusätzlich wurden in das Simulationsmodell die Teilkomponenten des Projektpartners KIT-FAST integriert, welche die Funktionen der Fehlerinjektion und Fehlererkennung umfassen. Für eine benutzerfreundliche Bedienung des komplexen Simulationsmodells wurde das in Abbildung 39 gezeigte Control Panel entworfen.

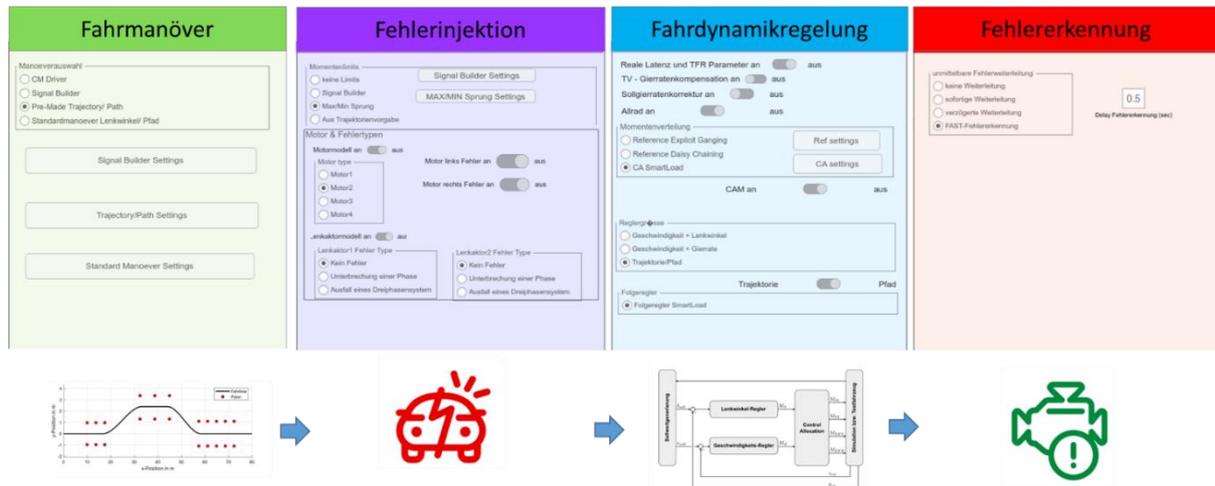


Abbildung 39: Benutzerfreundliches Control Panel zur Verwendung des komplexen Gesamtsimulationsmodells

Die Parametrierung und Erprobung des Trajektorienfolgereglers führte zu einer robusten Lösung, die sowohl größere Abweichungen von bis zu 2 m stabil ausregelt (siehe Abbildung 40) und beim Abfahren des Rundkurses Abweichungen kleiner als 10cm aufweist.

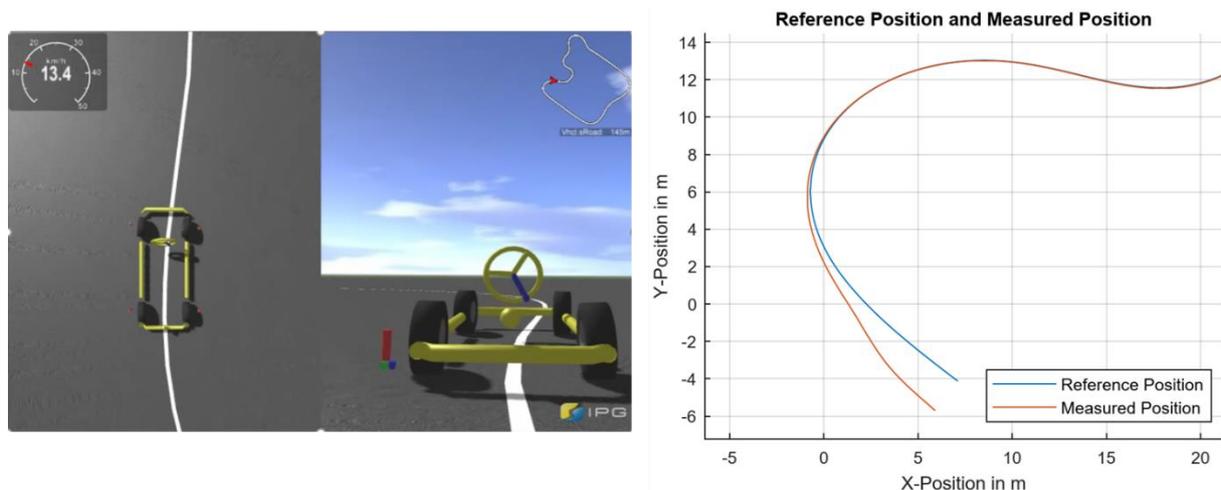


Abbildung 40: Erprobung des Trajektorienfolgereglers in der Simulationsumgebung

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme des Folgereglers konnten alle weiteren Untersuchungen anhand des im Projekt definierten Rundkurses (Abbildung 15) erfolgen.

Zunächst fand ein Vergleich der Lenkfunktion mittels Lenkaktor und mittels Torque Steer statt. Mit beiden Verfahren wurde der Rundkurs abgefahren. In Abbildung 41 sind links die Lenkaktormomente (oben), die Antriebsmomente (mittig) und der Soll- und Ist-Lenkwinkel aufgetragen. Auf der rechten Seite sind diese Werte für den Fall der Verwendung der Torque Steer Funktion zu sehen. Ein Vergleich der Lenkwinkelverläufe zeigt unmittelbar, dass mit beiden Varianten der geforderte Kurs gleichwertig abgefahren werden kann. Ein Blick auf die Momente zeigt dabei, dass im linken Fall der Lenkaktor genutzt wurde und die Antriebsmomente jeweils gleich groß sind. Auf der rechten Seite

hingegen wird kein Lenkaktormoment genutzt, allerdings sind die Antriebsmomente unterschiedlich groß und deren Differenz ersetzt die Funktion des Lenkaktors.

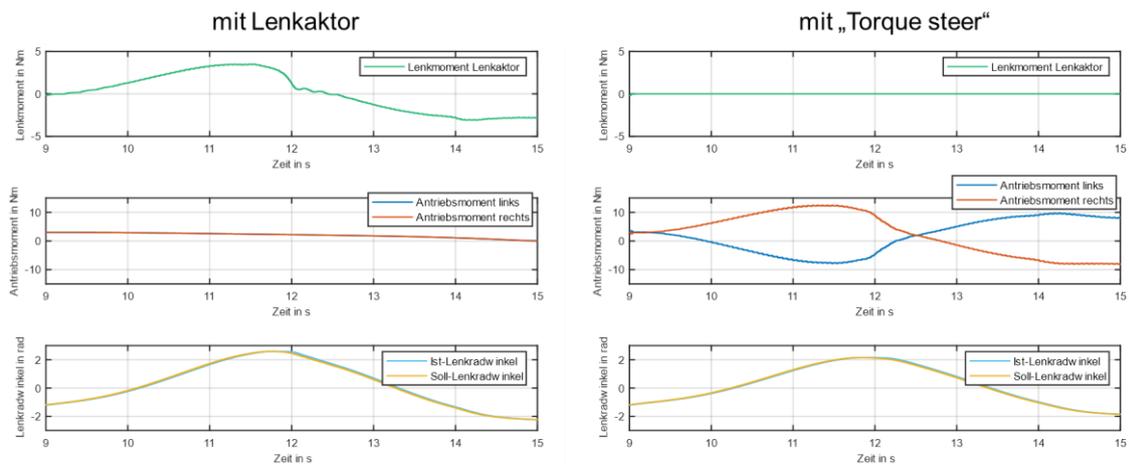


Abbildung 41: Querdynamikregelung mittels Lenkaktor und mittels Torque Steer (Ausschnitt aus Rundkurs)

Im nächsten Schritt wurde das „SmartLoad Reliability Control“ – Modul zusammen mit der Stellgrößenzuweisung und der Fehlererkennung hinzugezogen. Bei $t = 10\text{s}$ wurde der Ausfall des Lenkaktors eingeleitet. Ohne die Kompensation des Fehlers kommt das Fahrzeug wie zu erwarten vom Kurs ab, da es keine Möglichkeit zur Beeinflussung der Querdynamik zur Verfügung hat. In Abbildung 42 ist dies an der Abweichung von Soll- und Ist-Lenkwinkel zu erkennen nachdem ab $t = 10\text{s}$ das Lenkaktormoment den Wert 0 annimmt. Mit aktivierter Kompensations-Funktion wird unmittelbar nach dem erkannten Ausfall des Lenkaktors das Lenkprinzip auf Torque Steer umgestellt. Somit wird der Ausfall kompensiert, sodass das Fahrzeug ohne Auswirkung des Ausfalls dem vorgegebenen Kurs folgen kann, womit die geforderte Funktionsweise des „SmartLoad Reliability Control“ simulativ nachgewiesen werden konnte.

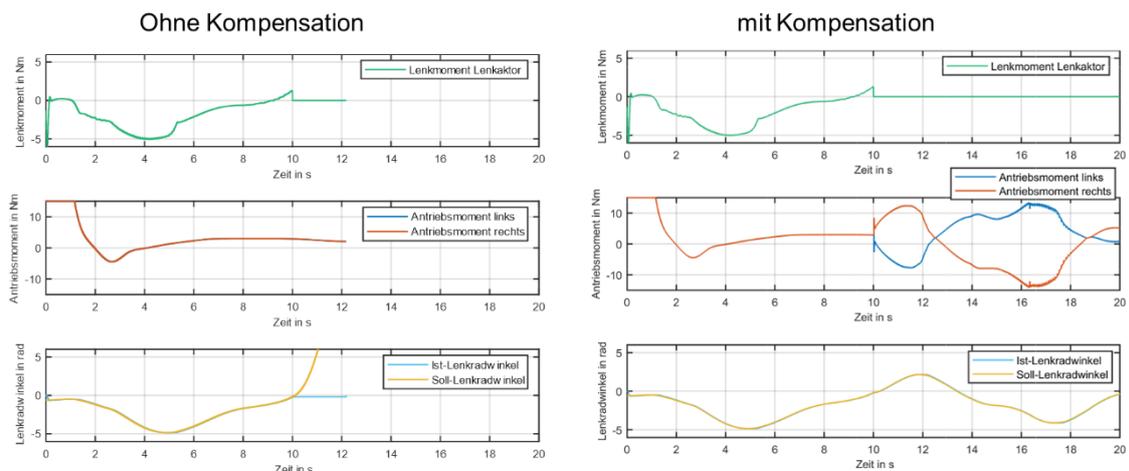


Abbildung 42: Simulativer Nachweis der „SmartLoad Reliability Control“ Funktionalität

II.1.5.2.2.8 *Implementierung und Inbetriebnahme auf dem Demonstratorfahrzeug*

Die Inbetriebnahme und Optimierung der einzelnen Teilsysteme und Erweiterungen (Abschnitt II.1.5.2.1) erfolgte parallel und iterativ. Für die Inbetriebnahme der Systeme der Partner wurden Integrationstermine vorbereitet und gemeinsam mit den Partnern durchgeführt. Aufgezeichnete Messreihen wurden ausgewertet und dem Projektpartner zur Verfügung gestellt.

Da durch das iterative Vorgehen die gesamte Funktionalität des Demonstratorfahrzeugs zunächst nicht zur Verfügung stand, wurde die Funktion des "SmartLoad Reliability Control" – Ansatzes „open loop“, also isoliert von anderen Modulen wie Trajektorienfolgeregelung und Fehlererkennung erprobt.

Für diese Versuche wurde das Fahrmanöver über die Geschwindigkeits- und Lenkwinkelvorgabe angesteuert. Bei einer Slalomfahrt wurde ein Ausfall des Lenkaktors initiiert. Abbildung 44 zeigt drei Versuchsfahrten aus der Vogelperspektive. Basierend auf Videoaufnahmen wurde der tatsächlich gefahrene Pfad ergänzt. Rechts sind die nach dem Ausfall anliegenden Momente für den Lenkaktor und die beiden Fahrtriebe dargestellt. Die oberste Zeile bildet die Referenzfahrt ohne Ausfall. In der Mitte ist das Verhalten des Fahrzeuges bei Ausfall des Lenkaktors ohne Kompensation zu sehen. Da keine Lenkaktuierung möglich ist, verlässt das Fahrzeug die vorgegebene Slalomfahrt. In der letzten Zeile ist die dritte Versuchsfahrt mit Kompensation durch den "SmartLoad Reliability Control" – Ansatz dargestellt. Die Kompensation erfolgt über die Torque Steer Funktion, wodurch das Fahrzeug allein durch Verteilen der Antriebskräfte auf die beiden angetriebenen Vorderräder dem Slalomkurs folgen kann.

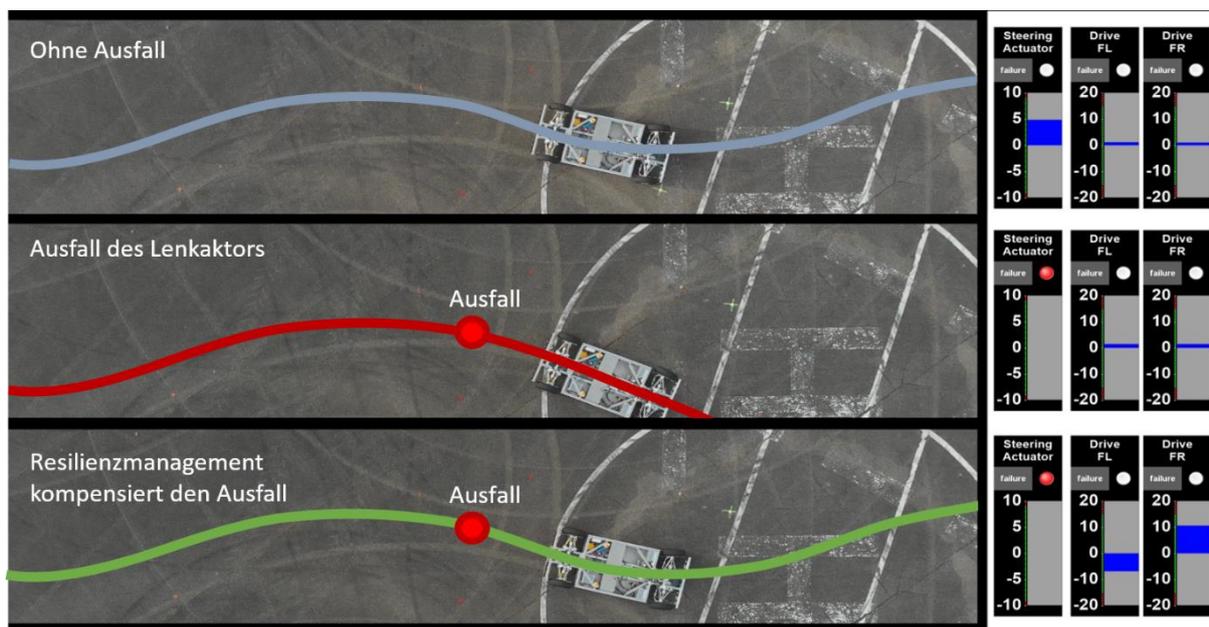


Abbildung 43: Erprobung der Kompensation des Lenkaktorausfalls auf dem Demonstratorfahrzeug

Nach Inbetriebnahme des Lokalisierungsmoduls (Motion-Box) und der Drive-Box konnte die Inbetriebnahme des Trajektorienfolgereglers erfolgen. Aufgrund der gegenüber der Simulation in der Realität auftretenden Latenzeffekte in den Sensoren und Aktoren konnte die Genauigkeit der Simulation (10cm) nicht erreicht werden. Die resultierende maximale Abweichung beim Abfahren des Kurses mit dem Demonstratorfahrzeug betrug 50cm, was sich aber als ausreichend genau für den betrachteten Einsatzzweck herausgestellt hat (siehe Abbildung 44).

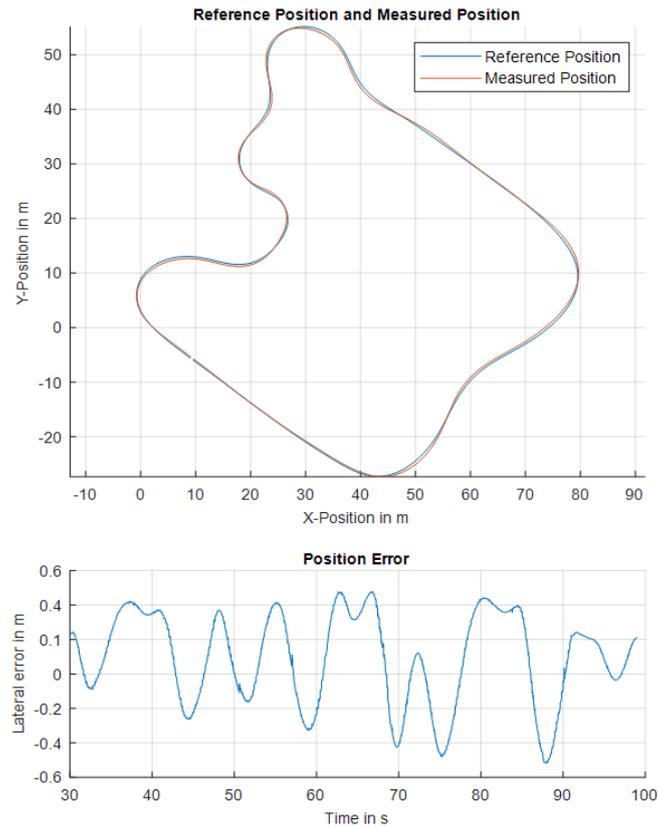


Abbildung 44: Erprobung des Trajektorienfolgereglers auf dem Demonstratorfahrzeug

II.1.6 AP7: Validierung

II.1.6.1 Fehlertolerantes Aktorsystem

II.1.6.1.1 Versuchsdurchführung

Die Validierung wurde mit dem in Abschnitt II.1.1.4.2 beschriebenen Kleinantriebsprüfstand durchgeführt. Der Versuch kann in folgende drei Phasen aufgeteilt werden: Fehlerfreier Betrieb, Fehlerfall bzw. Phasenausfall und Kompensation. Der Versuch wurde vor der anschließenden Messung noch einmal simuliert, was in Abbildung 45 gezeigt ist. Für den Versuch wird ein Strom in q-Richtung von 15 A eingeprägt, was ein Drehmoment von circa 0.55 Nm erzeugt. In der Simulation werden alle drei Phasen durchlaufen. Man erkennt sehr gut die Möglichkeit einer Kompensation, bei der das geforderte Drehmoment ohne großen Rippel gehalten werden kann, indem geschickt erhöhte Phasenströme auf den restlichen fünf Phasen eingeregelt werden.

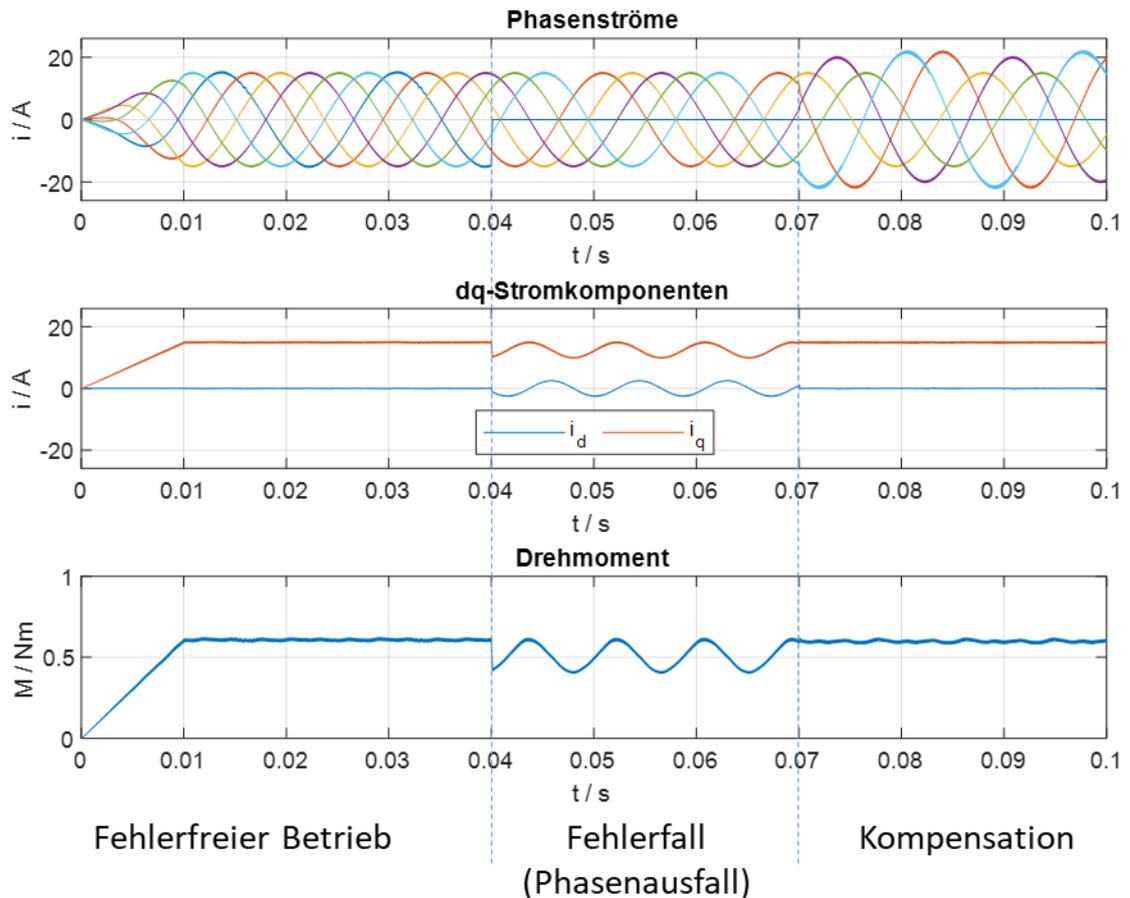


Abbildung 45: Simulationsergebnisse Validierung fehlertolerantes Aktoriksystem

II.1.6.1.2 Versuchsauswertung

Die Ergebnisse der realen Messung am Prüfstand sind in Abbildung 46 gezeigt. In Abbildung 46 a) befindet sich der Aktor im Normalbetrieb bei einem definierten Sollwert von $I_q = 15$ A. Es zeigt sich, dass das Drehmoment ein wenig geringer als in der Simulation ausfällt und im Mittel bei circa 0.52 Nm liegt. Der Drehmomentrippel ist gering. Bei Abbildung 46 b) wird der Phasenausfall im Betrieb gezeigt. Die Ströme I_d und I_q sind nicht mehr konstant und es ergibt sich ein großer Drehmomentrippel. In Abbildung 46 c) wird die Kompensation eingeschaltet. Der Strom der fehlenden Phase wird geschickt auf die verbleibenden fünf Phasen aufgeteilt. Es ergeben sich nahezu konstante I_d und I_q Ströme und dementsprechend auch ein relativ geringer Drehmomentrippel.

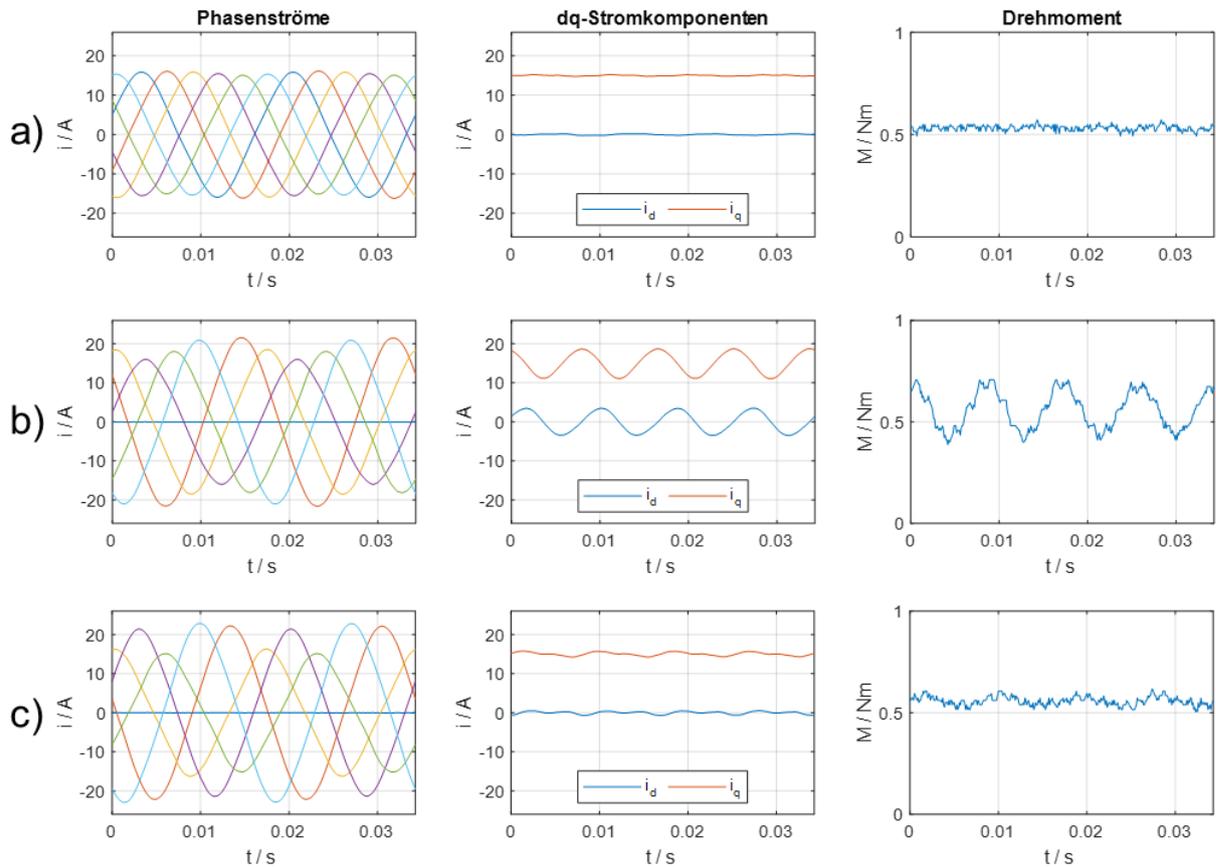


Abbildung 46: Validierung und Messung am Kleinantriebsprüfstand des fehlertoleranten Aktoriksystems mit a) fehlerfreier Betrieb und b) Fehlerfall (Phasenausfall) und c) Kompensation

II.1.6.2 Demonstratorfahrzeug

Die Validierung des "SmartLoad Reliability Control" – Ansatzes wurde simulativ und auf dem realen Demonstratorfahrzeug durchgeführt. Die Simulativen Ergebnisse wurden bereits im Kontext des AP6 (II.1.5.2.2.7) beschrieben und bewertet. Im Folgenden wird auf die durchgeführten Validierungsversuche mit dem realen Demonstratorfahrzeug eingegangen.

II.1.6.2.1 Versuchsdurchführung

Die Untersuchung der Funktion des "SmartLoad Reliability Control" – Ansatzes erfolgte anhand desselben Szenarios wie in der simulativen Validierung, wodurch ein direkter Vergleich der Ergebnisse ermöglicht wurde. Parallel zu den Versuchen wurden Filmaufnahmen aus verschiedenen Perspektiven durchgeführt, welche die Auswertung unterstützen und für die Erstellung des Abschlussvideos verwendet wurden (<https://youtu.be/J1B6gFQZBF8>).

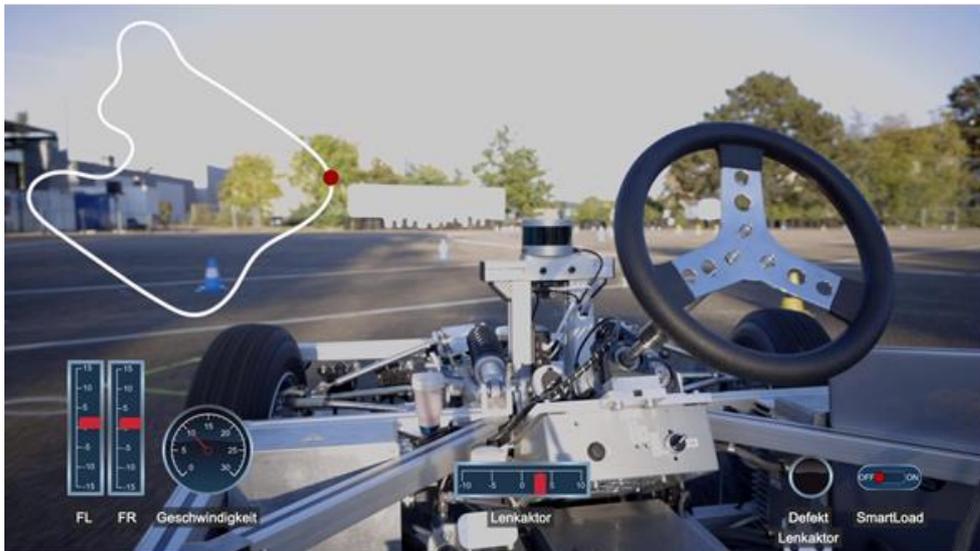
II.1.6.2.2 Versuchsauswertung

Das Szenario des Lenkaktorausfalls während der Kurvenfahrt findet zunächst ohne die "SmartLoad Reliability Control" – Funktion statt (Variante „a“). Abbildung 47 zeigt die Onboard-Perspektive mit eingeblendeter Position auf dem Rundkurs (links oben). Neben den Antriebsmomenten des rechten und linken Rades (links unten) ist die Geschwindigkeit und in der Mitte das Lenkaktormoment dargestellt. Neben dem Zustand des "SmartLoad Reliability Control"-Moduls (an- oder ausgeschaltet) ist rechts unten zu erkennen, ob der Aktor defekt ist und dieser Defekt erkannt wurde. Zunächst folgt das Fahrzeug unter Verwendung des Lenkaktors dem Kurs (1a), die Antriebsmomente sind gleich groß, tragen also nicht zum Lenkmoment bei. Zum Zeitpunkt des mittleren Bildes (2a) erfolgt das Auslösen des Defektes. Die Vorrichtung, die dazu die Sicherung der Spannungsversorgung des Lenkaktorsteuergrätes zieht, ist oben rechts eingeblendet. Der Lenkaktor liefert kein Lenkmoment mehr und somit verlässt das Fahrzeug den Kurs (3a) und wird über das händische Auslösen des Remote-Notausknopfes zum Stehen gebracht.

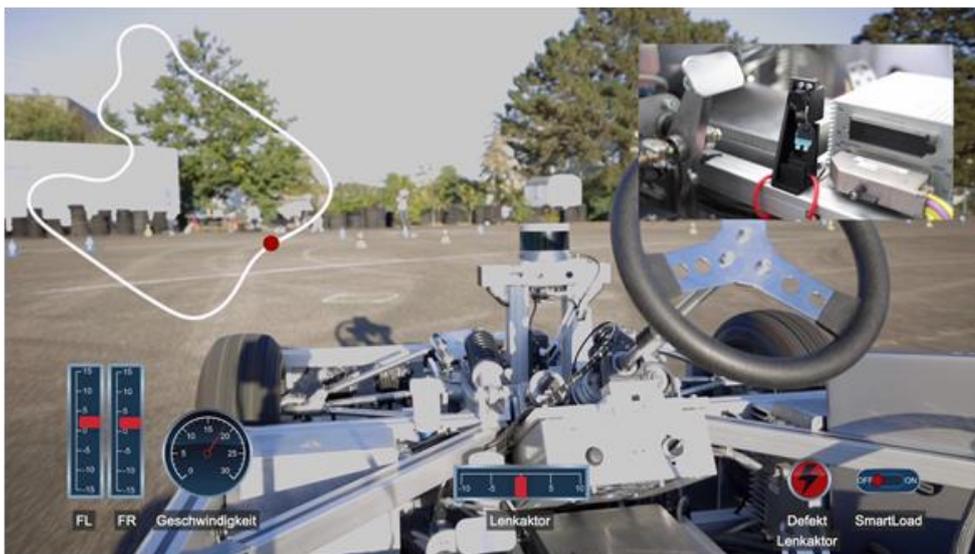
Der Ablauf mit aktivierter "SmartLoad Reliability Control" – Funktion (Abbildung 48) zeigt vor dem Ausfall zunächst denselben Zustand (1b). Nach Auslösen des Fehlers (2b) wird unmittelbar ein Differenzmoment auf die Antriebe gebracht (siehe Momentenanzeige) wodurch die Lenkfunktionalität erhalten bleibt und das Fahrzeug weiter dem Kurs folgen kann (3b).

Die Trajektorie, die dabei abgefahren wird, ist in Abbildung 49 anhand der Drohnenaufnahmen ersichtlich. Die entsprechenden Positionen zu den Zeitpunkten 2a/b und 3a/b sind markiert.

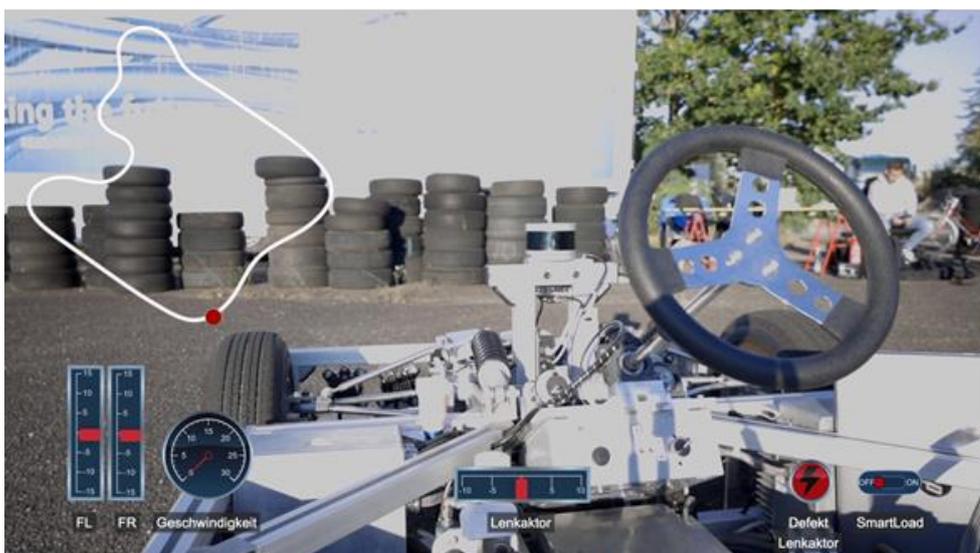
Abschließend erfolgt ein Blick auf die aufgezeichneten Messdaten. In Abbildung 50 sind hierfür die aufgezeichneten Werte für Lenkaktormoment, Antriebsmoment und Lenkwinkel für die Fahrt mit aktivierter "SmartLoad Reliability Control"-Funktion den entsprechenden Werten aus der Simulation gegenübergestellt. Der Ausfall erfolgt an derselben Position im Rundkurs was in der Simulation dem Zeitpunkt $t = 10\text{s}$ und in den Messdaten dem Zeitpunkt $t = 275,9\text{s}$ entspricht. Der qualitative Verlauf der simulativen und gemessenen Werte zeigt eine große Übereinstimmung der jeweiligen Kurven. Aufgrund von Reibungen und Latenzen sind die Messwerte stärker mit Schwingungen überlagert als die Signale der Simulation. Entscheidend für die Funktionalität des "SmartLoad Reliability Control"-Ansatzes ist aber wie gut das Fahrzeug trotz Ausfall dem Lenkwinkelverlauf folgen kann und wie schnell die Kompensation erfolgt. Die Verläufe von Soll- und Ist-Lenk Winkel zeigen hier keine Abweichung in Folge des Ausfalls, sodass mit dem erarbeiteten "SmartLoad Reliability Control"-Ansatz sämtliche Anforderungen an ein Redundanzmanagement für diversitäre Redundanz erfüllt sind und sowohl simulativ als auch anhand des Demonstratorfahrzeug nachgewiesen werden konnte.



1a



2a



3a

Abbildung 47: Validierungsfahrt ohne "SmartLoad Reliability Control"-Funktion



1b



2b



3b

Abbildung 48: Validierungsfahrt mit "SmartLoad Reliability Control"-Funktion

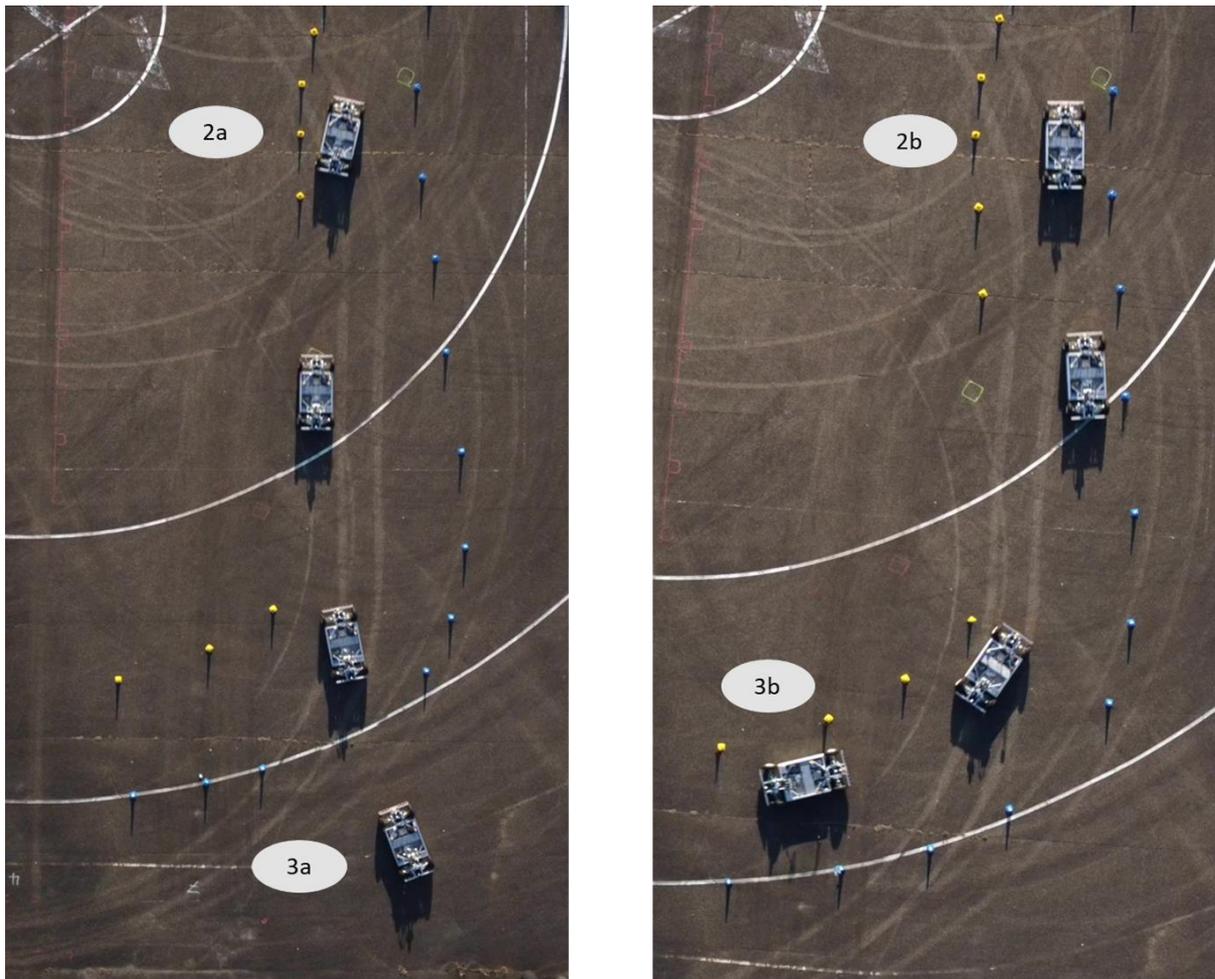


Abbildung 49: Vogelperspektive der Validierungsfahrt ohne (links) und mit (rechts) "SmartLoad Reliability Control"-Funktion

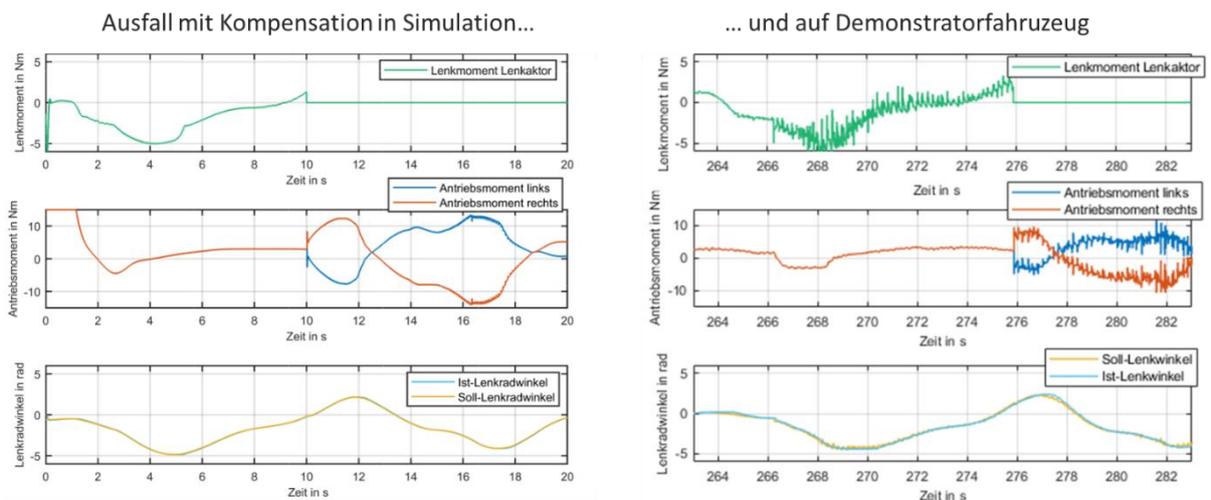


Abbildung 50: Vergleich simulativer und gemessener Werte für Lenkmoment, Antriebsmomente und Lenkwinkel bei Aktorausfall mit aktiver "SmartLoad Reliability Control"-Funktion

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wesentlichen Kosten des Projektes entfallen auf die Personalkosten (ca. 90%). Die kostenneutrale Verlängerung des Projektes um einen Monat hatte keine Auswirkung auf das ursprünglich geplante Fördervolumen. Zu den weiteren Kosten zählen Materialkosten für die Erweiterung und Modifikation des Demonstratorfahrzeugs und Aufbau des Aktorik-Demonstrators sowie Nutzung von Softwarelizenzen.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der Verlauf der Arbeit im Projekt folgte der im Projektantrag formulierten Planung bzw. der begründeten Überarbeitung des Plans im Laufe des Projektes (Verlängerung um einen Monat aufgrund pandemiebedingter Verzögerung praktischer Tätigkeiten). Alle im Arbeitsplan formulierten Aufgaben wurden erfolgreich bearbeitet; es waren keine zusätzlichen Ressourcen für das Projekt nötig.

Für das Teilprojektziel „Fehlertolerante Aktorik“ wurde ein Aktorikkonzept inklusive elektrischer Maschine, Leistungselektronik und Regelung zur Anwendung in hochautomatisierten Fahrzeugen erarbeitet, simulativ und experimentell umgesetzt und bewertet. Es konnte gezeigt werden, dass sich Fehler und ihre Auswirkungen auf das System kompensieren lassen.

Auf Fahrzeugebene wurde das vorhandene Demonstratorfahrzeug mit Funktionen für den automatisierten Betrieb erweitert. Methoden für Redundanz- und Zuverlässigkeits-Management ("SmartLoad Reliability Control"-Ansatz) wurden erarbeitet und sowohl simulativ als auch auf dem realen Fahrzeug umgesetzt und bewertet. Durch gezielte Nutzung von funktioneller Redundanz der Systeme mit hochintegrierter Längs- und Querführung konnte nachgewiesen werden, dass eine Kompensation des Lenkaktorausfalls durch die radselektiven Antriebe möglich ist.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes SmartLoad ermöglichen es Schaeffler, die Forschung und Entwicklung an künftigen Themen im Bereich der hardwareminimalen Redundanz sowohl auf Aktor-, als auch auf Fahrzeugsystemebene weiter voranzutreiben und einen wertvollen Beitrag zur zukünftigen Mobilität zu leisten. Sichere Aktorsysteme mit minimalem Aufwand, Bauraum und Kosten sind eine wichtige Voraussetzung für die wirtschaftliche Realisierung zukünftiger automatisierter Fahrzeugkonzepte, sowohl im Hinblick auf automatisierte PKW als auch auf neuartige Mobilitätskonzepte wie People Mover.

Für die aktorbezogenen Ansätze konnten bereits konkrete Anknüpfungspunkte an laufende Vorentwicklungsprojekte gefunden werden, sodass ein Transfer der Erkenntnisse in Produkte in naher Zukunft als wahrscheinlich betrachtet werden kann.

Die Redundanzkonzepte auf Fahrzeugebene setzen überaktuierte Systeme der Längs- und Querführung voraus (z.B. radselektive Antriebe an der gelenkten Achse). Aktuell sind derartige Fahrzeuge nur im Forschungsumfeld zu finden. Serienanwendungen sind derzeit nicht bekannt. Dies könnte sich in den kommenden Jahren mit der Einführung autonomer Shuttle-Busse (People-Mover) ändern. Die erforschten Anträge können dann unter Berücksichtigung des bis dahin geltenden zulassungstechnischen Rahmen weiterverfolgt werden.

II.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Bei Recherchen während des Projektes wurden folgende Fortschritte identifiziert:

Tabelle 8: Relevante Forschungsprojekte

Akronym	Projekttitle	Link
RISE	Redundanzarme Implementierung sicherheitskritischer Funktionen in autonomen Elektrofahrzeugen	https://www.elektronikforschung.de/projekte/rise

Tabelle 9: Relevante Veröffentlichungen

Autor	Art	Titel
Ataei, Mansour; Khajepour, Amir; Jeon, Soo	Journalbeitrag	A Study on Applicable Control Methods of Electric Power Steering System in Dynamic Redundancy Environments
Hernandez-Alcantara, Diana; Amezquita-Brooks, Luis; Morales-Menendez, Ruben; Sename, Olivier; Dugard, Luc	Journalbeitrag	The cross-coupling of lateral-longitudinal vehicle dynamics: Towards decentralized Fault-Tolerant Control Schemes
Ma, Biao; Liu, Yahui; Ji, Xuewu; Yang, Yiyong	Journalbeitrag	Investigation of a steering defect and its compensation using a steering-torque control strategy in an extreme driving situation
Huang, Chao; Huang, Hailong; Naghdly, Fazel; Du, Haiping; Ma, Dazhong	Journalbeitrag	Actuator fault tolerant control for steer-by-wire systems.
Huang, Chao; Naghdly, Fazel; Du, Haiping; Huang, Hailong	Journalbeitrag	Fault tolerant steer-by-wire systems: An overview
Kirli, Ahmet; Chen, Yusen; Okwudire, Chinedum E.; Ulsoy, Ali Galip	Journalbeitrag	Torque-Vectoring-Based Backup Steering Strategy for Steer-by-Wire Autonomous Vehicles With Vehicle Stability Control
Lee, Sungwook; Yoon, Yookhyun; Park, Jahnghyon; Hong, Wanggi	Journalbeitrag	Control Allocation of Rear Wheel Steering and Electronic Stability Control with Actuator Failure.
Venkita, Seshan Ramanathan; Boukroune, Boulaïd; Mishra, Anurodh; van Nunen, Ellen	Journalbeitrag	A Fault Tolerant Lateral Control Strategy for an Autonomous Four Wheel Driven Electric Vehicle

II.6 Veröffentlichungen

II.6.1 *Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Zeitschriften und bei Konferenzen*

- Han, C.; Seiffer, A.; Orf, S.; Hantschel, F.; Li, S.: Validating Reliability of Automated Driving Functions on a Steerable VEHICLE-in-the-Loop (VEL) Test Bench. 21. Internationales Stuttgarter Symposium (Stuttgart 2021)

Weitere Veröffentlichungen zum gewählten „SmartLoad Reliability Control – Ansatz“ sind in Vorbereitung.

II.6.2 *Veröffentlichungen im Kontext von Öffentlichkeitsarbeit*

Die im Rahmen des Zwischen- und Abschlussmeilenstein angefertigten Videoaufnahmen der Versuchsfahrten mit dem Demonstrator wurden auf der Projekt-Website (<http://www.smartload-project.de/>) und dem Projekt-Youtube-Kanal (https://www.youtube.com/channel/UC4P7GdZsapBUgAH4WnH23_g) veröffentlicht:

- Demonstratorfahrzeug auf Dynamikfläche:
<https://www.youtube.com/watch?v=MdbC2mQTRGY>
- Demonstratorfahrzeug auf Prüfstand:
<https://www.youtube.com/watch?v=sZx5uyoZYjo>
<https://www.youtube.com/watch?v=ORQTo2JatvU>
- SmartLoad Abschlussveranstaltung:
<https://www.youtube.com/watch?v=J1B6gFQZBF8>