

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## IdenT

Identifikation dynamik-und sicherheitsrelevanter  
Trailerzustände für automatisiert fahrende Lastkraftwagen

# Abschlussbericht



**Laufzeit: 01.02.2020 - 30.04.2023**

Förderkennzeichen:

19|19008A

19|19008B

19|19008C

19|19008D

19|19008E

19|19008F



# Inhaltsverzeichnis

Einleitung und Motivation .....	2
1. Systemkonzept.....	3
1.1. Auswahl Systemkomponenten.....	3
1.2. Konzeption Sensornetzwerk .....	3
1.3. Konzeption Gesamtsystem .....	5
1.4. Experimentelle Voruntersuchung .....	5
2. Datenerfassung und Datenmanagement .....	7
2.1. Sensornetzwerk & Datenübertragung .....	7
2.2. Informationsrückmeldung.....	26
2.3. Kooperative Datenplattform .....	26
3. Modellbasierte Zustandsschätzung .....	28
3.1. Straßenanregung.....	28
3.2. Algorithmen Trailerzustand .....	29
3.3. Digitaler Offline-Zwilling .....	37
3.4. Zustandsbestimmung Komponenten.....	54
3.5. Informationsrückmeldung.....	56
4. Online-Informationsgenerierung .....	58
4.1. Umfeldüberwachung.....	58
4.2. Digitaler Online-Zwilling .....	65
4.3. Maschinelles Lernen.....	73
4.4. Informationsfusion .....	79
4.5. Schnittstelle digitaler On- / Offline-Zwilling .....	79
5. Demonstration und Evaluation.....	83
5.1. Ausrüstung Versuchsfahrzeug.....	83
5.2. Versuchsfahrten.....	88
5.3. Vorstellung und Diskussion.....	90
6. Projektmanagement .....	92

# Einleitung und Motivation

Aktuelle Studien stellen für die Zukunft des Gütertransports auf der Straße eine zunehmende Automatisierung von Funktionen in Aussicht, die langfristig autonom ablaufende Transportprozesse zur Folge haben wird [1] [2]. Daraus resultieren neue, bis dato nicht berücksichtigte Anforderungen an zukünftige Nutzfahrzeuge und deren Komponenten. Zum einen müssen dynamikrelevante Zustandsgrößen, wie Schwerpunktposition, Fahrwerk- und Reifeneigenschaften für autonome, schnelle Fahrmanöver (Ausweichmanöver oder Bremswegvorhersage) bekannt sein und berücksichtigt werden. Zum anderen sind sicherheits- und funktionsrelevante Zustandsgrößen und Parameter, die heute im Rahmen der Abfahrtskontrolle vom Fahrer überprüft werden, zukünftig automatisch zu erfassen, auszuwerten und Fahrzeugbetreibern, Werkstätten und Behörden zur Verfügung zu stellen.

Während Zugmaschinen bereits heute über leistungsfähige Sensorsysteme zur Fahrerassistenz verfügen, ist die Anzahl elektronischer Komponenten im Trailer bislang sehr gering. Das elektronische Bremssystem (EBS) ist die einzige elektronische Komponente, die heute in Deutschland nahezu flächendeckend in Trailern verbaut wird.

Selbst Reifendruck-Kontrollsysteme, die theoretisch eine Früherkennung von Reifenschäden ermöglichen, haben in Deutschland nach Recherche von BPW eine geringe Marktpenetration. Für weitere funktions- und sicherheitsrelevante Systeme (Bremsen, Federung, Lagerung) sind keine am Markt verfügbaren Lösungen bekannt, die Zustandsinformationen liefern oder gar Vorhersagen zum Zustand der Komponenten erlauben. Während bei konventionellen Fahrzeugen der Fahrer eine Kontroll- und Bewertungsfunktion des Fahrzeugzustandes übernimmt, erfordern autonom agierende Systeme eine automatisierte und objektivierte Bewertung des Zustandes, damit insbesondere die der Fahrdynamik zugrundeliegenden Modellannahmen ihre Gültigkeit erhalten. Darüber hinaus sind aktuelle und genaue Informationen über den Fahrzeugzustand für die Anpassung der autonomen Fahrstrategie und der fahrdynamischen Grenzen aufgrund der Variation von relevanten Fahrzeugparametern (wie z.B. die Masse oder die Schwerpunktslage) relevant.

Das Fehlen dieser Zustandsinformation des Trailers limitiert aktuelle und zukünftige Entwicklungen des automatisierten Fahrens im straßenengebundenen Güterverkehr im Hinblick auf Ökonomie, Fahrdynamik und Sicherheit. Die systematische, kontinuierliche und idealerweise lückenlose digitale Erfassung, Bewertung und Dokumentation von Umgebungszuständen (Straßenzustand) sowie Informationen zu Fahr- und Fahrzeugzuständen (Dynamik, Lebensdauer, Verschleiß) des Trailers inklusive hochbeanspruchter, sicherheitskritischer Komponenten (z.B. Fahrwerkskomponenten) und von Umgebungszuständen (Straßenzustand) ist für den autonomen Betrieb von Lkws essenziell.

Ziel des Vorhabens IdenT ist die Ermittlung und Bereitstellung von zuverlässigen Informationen durch den Trailer zur Unterstützung des autonomen Fahrens der Zugmaschine. Die Informationen bestehen aus den aktuellen Zuständen fahrdynamik- und sicherheitsrelevanter Komponenten, aus der aktuellen Trailerdynamik und aus den aktuellen Umgebungsinformationen „rückwärtiger Raum“ sowie „Fahrbahnbeschaffenheit“. Zur Erreichung des Ziels wird ein Gesamtsystem („IdenT-System“) entwickelt und an einem Demonstrationstrailer in Fahrversuchen validiert.

Das Vorhaben „Identifikation dynamik- und sicherheitsrelevanter Trailerzustände für automatisiert fahrende Lastkraftwagen“ (IdenT) wurde vom 01.02.2020 bis zum 30.04.2023 gefördert. Das Vorhaben IdenT profitiert von den Erfahrungen und dem Know-How der ausgewählten Projektpartner. Jeder der Projektpartner liefert einen wichtigen Beitrag zur erfolgreichen Durchführung des Vorhabens. Das Projekt ist in sechs Arbeitspakete, dargestellt in Abbildung 1, unterteilt.

AP	Bezeichnung	1. Jahr				2. Jahr				3. Jahr				I
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
1	<b>Systemkonzept</b>													Kostenneutrale Verlängerung
1.1	Auswahl Systemkomponenten													
1.2	Konzeption Sensornetzwerk													
1.3	Konzeption Gesamtsystem													
1.4	Experimentelle Voruntersuchung													
2	<b>Datenerfassung &amp; Datenmanagement</b>													
2.1	Sensornetzwerk & Datenübertragung													
2.2	Informationsrückmeldung													
2.3	Kooperative Datenplattform													
3	<b>Modellbasierte Zustandsschätzung</b>													
3.1	Straßenanregung													
3.2	Algorithmen Trailerzustand													
3.3	Digitaler Offline-Zwilling													
3.4	Zustandsbestimmung Komponenten													
3.5	Informationsrückmeldung													
4	<b>Online-Informationsgenerierung</b>													
4.1	Umfeldüberwachung													
4.2	Digitaler Online-Zwilling													
4.3	Maschinelles Lernen													
4.4	Informationsfusion													
4.5	Schnittstelle digitaler On- / Offline-Zwilling													
5	<b>Demonstration und Evaluation</b>													
5.1	Ausrüstung Versuchsfahrzeug													
5.2	Versuchsfahrten													
5.3	Vorstellung & Diskussion													
6	<b>Projektmanagement</b>													
	Meilensteine				•					•			•	

Abbildung 1: Projektagenda im Gesamtüberblick

## 1. Systemkonzept

### 1.1. Auswahl Systemkomponenten

Im Rahmen des ersten Arbeitspakets (AP1) wurden sämtliche sicherheits- und funktionsrelevanten Komponenten des Trailers umfassend untersucht und hinsichtlich ihrer typischen Verschleiß- und Versagensmechanismen analysiert. Dabei wurde ein systematischer Ansatz verfolgt, der auf umfassenden Ausfallstatistiken beruhte und gleichzeitig die Prioritäten der Kunden berücksichtigte. Diese Priorisierung bildete die Grundlage für die weitere Arbeit.

Im Anschluss daran wurden spezifische Indikatoren entwickelt und gesucht, die dazu dienen sollten, Verschleiß und Versagen in den identifizierten Komponenten zu erkennen. Diese Indikatoren wurden auf Grundlage einer gründlichen Analyse der Versagensmechanismen festgelegt. Aus diesen Indikatoren wiederum wurden präzise Messgrößen abgeleitet, insgesamt etwa 50 an der Zahl. Diese Messgrößen waren entscheidend, um den Zustand der einzelnen Komponenten zu überwachen und potenzielle Probleme frühzeitig zu erkennen.

Parallel dazu wurden relevante Systemparameter festgelegt, die insbesondere für autonome Fahrmanöver von Bedeutung sind. Hierzu zählte beispielsweise der Schwerpunkt des Fahrzeugs. Ähnlich wie bei den Verschleiß- und Versagensindikatoren wurden auch für diese Parameter geeignete Messgrößen und Messprinzipien entwickelt, um eine zuverlässige Bestimmung ihrer Werte zu gewährleisten.

### 1.2. Konzeption Sensornetzwerk

#### Messgrößen und Sensorkonzept

Basierend auf den gewählten Sytemkomponenten in AP 1.1 wurden die benötigten dynamische Messgrößen und Messstellen zur Ermittlung der Trailerdynamik sowie des Zustands und der Belastung der relevanten Komponenten abgeleitet. Hierbei wurden drei zentrale Messgrößen identifiziert auf Basis derer die digitalen Zwillinge mit Daten versorgt werden können: Achsbeschleunigung und Balgdruck an allen 6 Achsenden sowie Aufbaubeschleunigung mit Drehrate jeweils rechts und links am Aufbau des Trailers.

Die Anforderungen an die Sensorik wurden in Workshops mit den Projektpartnern diskutiert. Im Fokus stand hier die Praxistauglichkeit, der Installationsaufwand und die Kosten. Es zeigt sich, dass eine wesentliche Datenquelle für das Sensornetzwerk Beschleunigungssensoren



sind. Diese sind als MEMS Chips mit relativ geringen Energiebedarf verfügbar und werden zur Fahrdynamikregelung sowie in vielen Consumer Electronic Produkten eingesetzt. Die Preise und Genauigkeiten variieren stark, beginnend bei wenigen Cent pro Chip bis hin zu zweistelligen Euro Beträgen. Eine Aussage wie sich geringere Genauigkeiten der Sensorsignale auf das Vorhersageergebnis der Zwillinge auswirkt, ließ sich zur Laufzeit von AP 1.2 noch nicht zuverlässig treffen. Die anvisierte Vorgehensweise war daher zunächst qualitativ hochwertigere Chips einzusetzen, um eine ausreichende Datenqualität sicherzustellen und die Fähigkeit des Sensornetzwerkes zu zeigen. Im Projektverlauf sollte dann die Frage nach der notwendigen Sensordatenqualität durch künstliche „Verschlechterung“ der aufgezeichneten Sensordaten untersucht und abschließend bewertet werden. Am LBF wurden für AP 2 Versuche mit verschiedenen MEMS Beschleunigerchips geplant, um reale Unterschiede der Chips im Vergleichsversuch zu ermitteln und eine passende Auswahl für das Sensornetzwerk zu treffen. Hierbei stellte sich heraus, dass es preisgünstige Chips gibt, die hervorragende Datenqualität liefern und aus Kostengründen hier keine Kompromisse hinsichtlich der Datenqualität eingegangen werden müssen.

Da die digitalen Zwillinge einen kontinuierlichen Zeitdatenstrom für ihre Berechnungen benötigen, wurde entschieden, die Sensorknoten an Achse und Aufbau kabelgebunden auszuführen. Hierbei erfolgt die Stromversorgung und Datenkommunikation über ein CAN-Bus Netzwerk, das direkt mit dem Controller des Online Zwilling verbunden ist. Über ein solches kabelgebundenes Netz lassen sich die Messdaten zuverlässig und mit geringer Latenz übertragen. Parallel dazu wurden auch kabellose Kommunikationsverfahren basierend auf Kommunikationstechnologien wie LORA, NB-IOT oder Bluetooth für eine direkte Kommunikation der Sensoren mit dem Offline-Zwilling in der Cloud berücksichtigt. Diese fanden Anwendung in einem Achskapselsensor, der am Radkopf montiert wird und dort Zustandsdaten in Form von Beschleunigungssignalen und Temperaturen erfasst.

#### Algorithmen zur Datenvorverarbeitung

Teil des Sensornetzwerk Konzeptes waren auch Algorithmen, mit denen die gesammelten Messdaten dezentral im Sensorknoten vorverarbeitet werden können. Eine solche Vorverarbeitung entlastet zum einen den digitalen Zwilling bei seinen Rechenoperationen und zum anderen stehen die Sensordaten im Knoten noch in ihrer gesamten ungefilterten Bandbreite für die Berechnungen zur Verfügung, wodurch sie mehr Informationen beinhalten können. Im Austausch mit den jeweiligen Partnern wurden geeignete Algorithmen für die dezentrale Vorverarbeitung der Messdaten identifiziert und für eine spätere Umsetzung in AP2 vorgemerkt. Die nachfolgende Auflistung sammelt entsprechend der Schwerpunkte der einzelnen Projektpartner diese Algorithmen, die prinzipiell für eine dezentralen Datenvorverarbeitung im Sensornetzwerk in Frage kommen:

- IMES
  - Algorithmus zur Berechnung des Reifendrucks im Achssensor
    - Schätzung aus Achsbeschleunigung
    - Klassierung der Messdaten
  - Algorithmus zur Berechnung der Raddrehzahl in Achssensor
  - Anomalie-Erkennung Achse: Reifendruck, Lagerschäden, Schäden am Reifen
  - Algorithmus zur Schätzung der Schwerpunktposition am Trailer an hinterer Achse
- ITWM
  - Algorithmus zur radspezifischen und dezentralen Berechnung der Straßenrauigkeit
- LBF
  - Algorithmus zur dezentralen und energieautarken Überwachung des Zustandes der Wälzlager

- Achsintegrierter Kilometerzähler
- Zustandsdiagnose der Elastomerlager
- Rainflow Zählung

### 1.3. Konzeption Gesamtsystem

Um die Kommunikation zwischen dem Sensornetzwerk, dem Übertragungsmodul (OKIT) und der Recheneinheit (Online-Zwilling) zu gewährleisten, wurde der CAN-Bus als Schnittstelle festgelegt. Dies ermöglichte eine effiziente und zuverlässige Übertragung der gesammelten Daten. Zur Parametrierung der Online-Zwilling-Modelle wurde das TCP-Protokoll verwendet, um die Modellparameter genau einzustellen.

Gleichzeitig wurden weitere praktische Schritte unternommen: Die Integration einer Kamera in das Versuchsfahrzeug sowie die Inbetriebnahme der Datenplattform (OKIT) wurden vorangetrieben. Damit resultiert die in Abbildung 2 dargestellte Struktur des IdenT-Gesamtsystems.

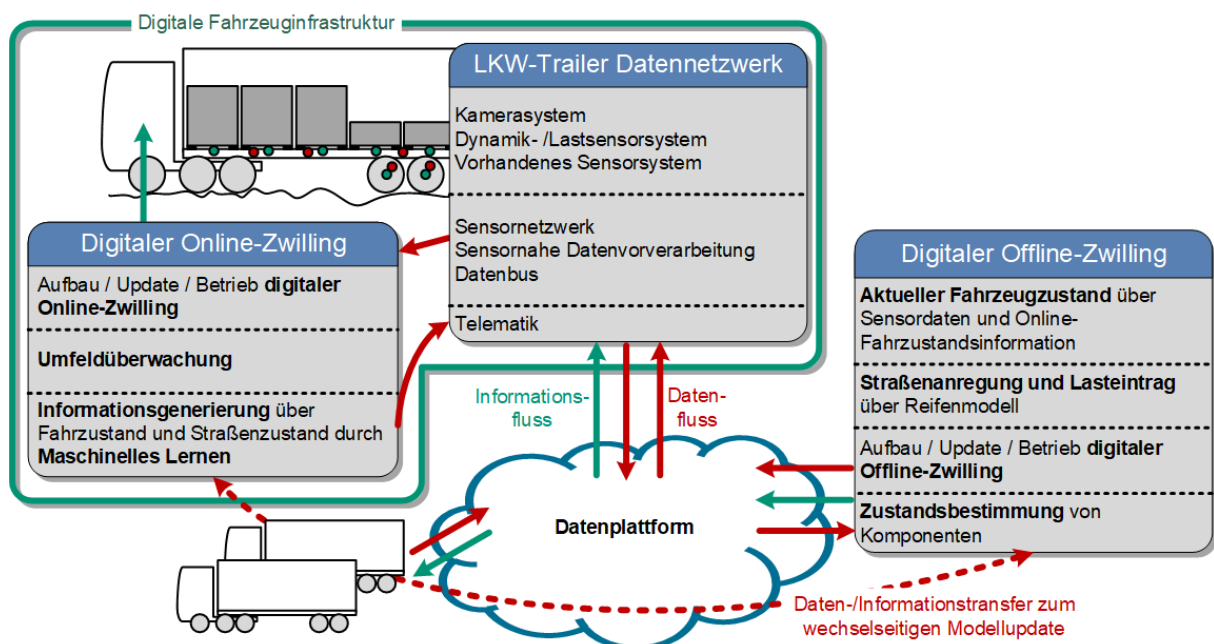


Abbildung 2: Struktur des IdenT-Gesamtsystems

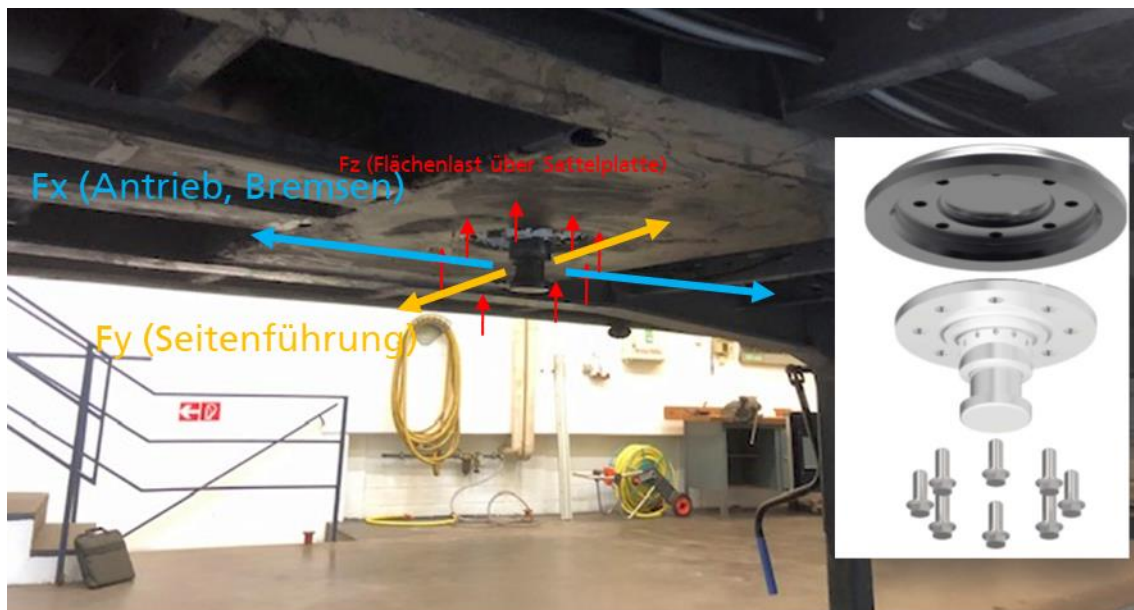
### 1.4. Experimentelle Voruntersuchung

#### Straßenprofil

Hinsichtlich Straßenprofilermittlung wurden verschiedene Messdaten verglichen und untersucht, um zu ermitteln welche Messgrößen geeignet sind, die Algorithmen zur Ermittlung des Straßenprofils zu betreiben. Eine Analyse der Sensitivität der Algorithmen wurde durchgeführt und erste Schritte zur Einbettung der Algorithmen in die Simulink-Umgebung wurden getan.

#### King Pin - Kräfte

Die Abstimmung mit den Projektpartnern zeigte, dass eine wesentliche Größe zur Validierung der Zwillinge die Anbindungskräfte zwischen Trailer und Zugmaschine sind. Diese Schnittstelle ist im Trailer über den sogenannten Königszapfen (King Pin) realisiert, siehe Abbildung 2.



**Abbildung 3: Königszapfen mit Lastangriff**

Der Königszapfen ist ein sicherheitsrelevantes, hochbelastetes Bauteil, das Verschleiß unterliegt. Entsprechend hoch sind die Anforderungen an die Zuverlässigkeit. Wünschenswert wäre eine dauerhafte Instrumentierung im Betrieb, um die Schnittkräfte im Zwilling zu nutzen. Eine kostengünstige, ausreichend genaue Sensorinstrumentierung ist unter den gegebenen Randbedingungen jedoch nicht realisierbar. Daher wurde sich darauf verständigt, am IdenT-Trailer einmalig eine Messeinrichtung umzusetzen, die als Prototypenapplikation die erforderlichen Messdaten bereitstellt, um die Simulationsmodelle zu validieren. Nach dieser Validierung ist davon auszugehen, dass die Schnittkräfte zukünftig durch einfacher verfügbare Messgrößen des Sensornetzwerkes in ausreichender Genauigkeit berechnet werden können. Aufbau und Integration der KingPin Messplattform ist in Arbeitspaket 5.1 näher beschrieben.

Diese Integrationen mündeten in einer erfolgreichen Versuchsfahrt, die als wichtiger Meilenstein galt. Ab diesem Zeitpunkt stand das Versuchsfahrzeug bereit für weitere Messfahrten. Im November 2020 fand schließlich die erste offizielle Messfahrt statt. Die dabei gesammelten Messdaten lieferten wertvolle Informationen, die zur Entwicklung und Validierung von Simulationsmodellen, sowohl des Online-Zwilling als auch des Offline-Zwilling, verwendet wurden.

Nach einer Laufzeit von etwa 12 Monaten wurde das AP1 gemäß dem Plan abgeschlossen. Die umfassenden Vorarbeiten, die Entwicklung des Sensornetzwerkes, die Integration der notwendigen Technologien und die erfolgreiche erste Messfahrt bildeten einen soliden Grundstein für die weiteren Phasen des Projekts.

## 2. Datenerfassung und Datenmanagement

### 2.1. Sensornetzwerk & Datenübertragung

Zur Umsetzung der in AP 1 definierten Messgrößen wie Balgdruck, Achs- und Aufbaubeschleunigungen wurde mit den Projektpartnern ein Konzept des Sensornetzwerks inkl. Datenspeicherung, Datenauswertung und Datenübertragung erarbeitet, welches die benötigte Rechenleistung und Bandbreite auf dem Trailer bereitstellt.

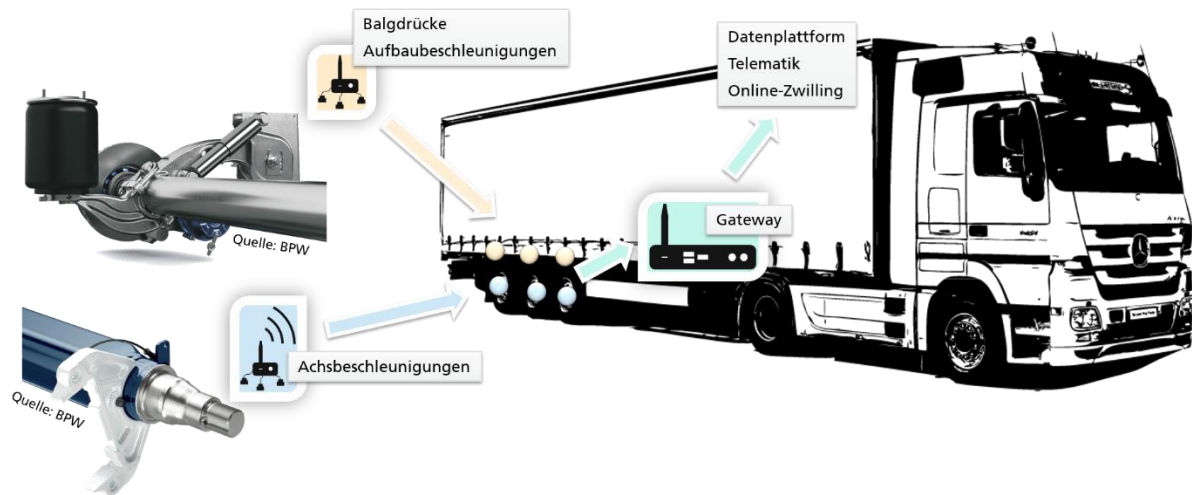


Abbildung 4: Übersicht Sensornetzwerk

Hierzu hat das Fraunhofer LBF zusammen mit TS3 bilaterale Workshops zu den Qualitätsanforderungen an das Sensornetzwerk mit den Kollegen am LBF und den Projektpartnern IMES, Industrial Science und ITWM durchgeführt. Ziel der Workshops war die Definition detaillierter Anforderungen an die Messdatenerfassung und -übertragung auf dem Trailer. Es wurden quantitative Kennzahlen von Qualitätsanforderungen erarbeitet. Ein Auszug aus den Ergebnissen ist in Tabelle 1: dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht Qualitätsanforderungen Sensordaten

Nr	Stichwort	Beschreibung	Kennzahl	LBF	ITWM	IMES	IS
1	Bandbreite	Frequenzintervall Nutzsignale	Min. Unter Grenzfrequenz	0 Hz	0 Hz	0 Hz	0 Hz
			Max. Obere Grenzfrequenz	40 Hz	50 Hz	< 50 Hz	15 Hz
2	ADC	Minimale Auflösung der AD-Wandlung	Auflösung ADC	12 bit	12 bit	>=12 bit	-
3	Amplitude	Genauigkeit der Signalamplituden	Amplitudengenauigkeit	unbekannt	Wichtig	Genauigkeit 0.1 m/s <sup>2</sup>	Hoch
4	Phase	Genauigkeit der Signalphasen	Phasengenauigkeit	-	Wichtig	TBD	TBD
5	Echtzeit-anforderung	Verzögerung der Messdaten	Alterung Messdaten	Keine	keine	Gering	Gering
6	Echtzeit-anforderung	Verzögerung der Reaktion	Alterung Reaktionskette Fahrdynamik	keine	unbekannt	Gering	-
7	Netzwerk-spezifische Information	Phasenverschiebungen zwischen Messkanälen	Zeitsynchronisation	Konstante ok	Wichtig Jitter < 1ms	-	-

Basierend auf den Qualitätsanforderungen der Projektpartner an die Sensordatenqualität wurden verschiedene Sensoren zur Erfassung der Beschleunigungen und Balgdrücke recherchiert, beschafft und im Labor getestet. Ein wesentliches Selektionskriterium war hierbei auch der Preis der Sensorchips, da dieser für den wirtschaftlichen Erfolg ausschlaggebend

sein kann. Die Preisspanne der am Markt verfügbaren Chips liegt hier zwischen wenigen Cent bis zu hunderten Euro.

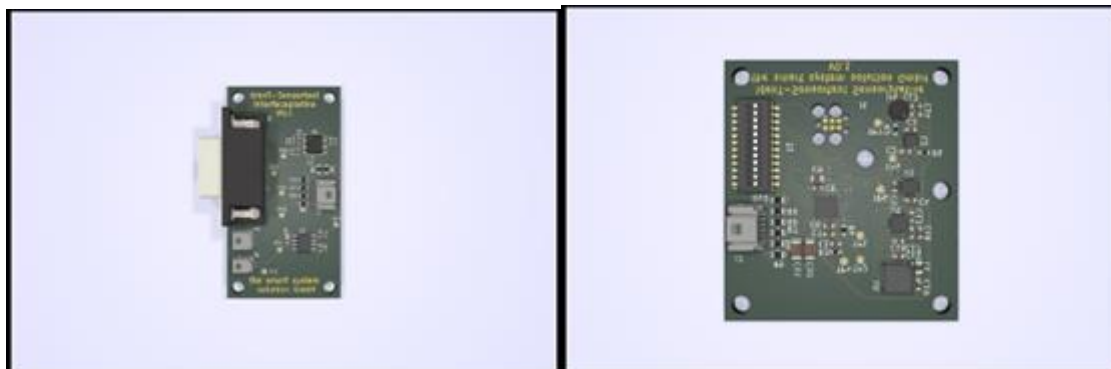
#### Laboruntersuchung des Sensornetzwerks „Beschleunigungssensorik“

Da kein Sensor den gesamten Messbereich bis 50 g abdeckt, wurde entschieden in den Sensorknoten eine Sensordatenfusion umzusetzen. Ein Sensor für den niedrigen Amplitudenbereich erfasst mit guter Genauigkeit die fahrbetriebstypischen Beanspruchungen. Ein weiterer Sensor mit einem Messbereich bis 100 g erfasst die Sonderbelastungen mit niedrigerer Genauigkeit. Die geeignetsten Sensoren, die in AP 2.1 identifiziert wurden, sind mit ihren technischen Daten in Tabelle 2: gelistet.

**Tabelle 2: Sensorauswahl basierend auf den Ergebnissen von AP 2.1**

Sensor Typ	Messbereich	Datenrate Ausgangssignal	Digitale Auflösung	Temperatur- Bereich	Signal zu Rausch Level
BMA456	$\pm 2\text{ g}$ , $\pm 4\text{ g}$ , $\pm 8\text{ g}$ , $\pm 16\text{ g}$	1.5 Hz...1600 Hz	16 bit	-40 ... +85°C	120 $\mu\text{g/vHz}$
H3LIS331DL	$\pm 100\text{g}$ , $\pm 200\text{g}$ , $\pm 400\text{g}$	0.5 Hz ....1 kHz	16 bit	-40 ... +85°C	15 mg/vHz

Die in der Recherche gefundenen MEMS wurden von ts3 auf eine eigens entwickelte Prototypenplatine montiert und dem LBF für Versuche zur Verfügung gestellt.

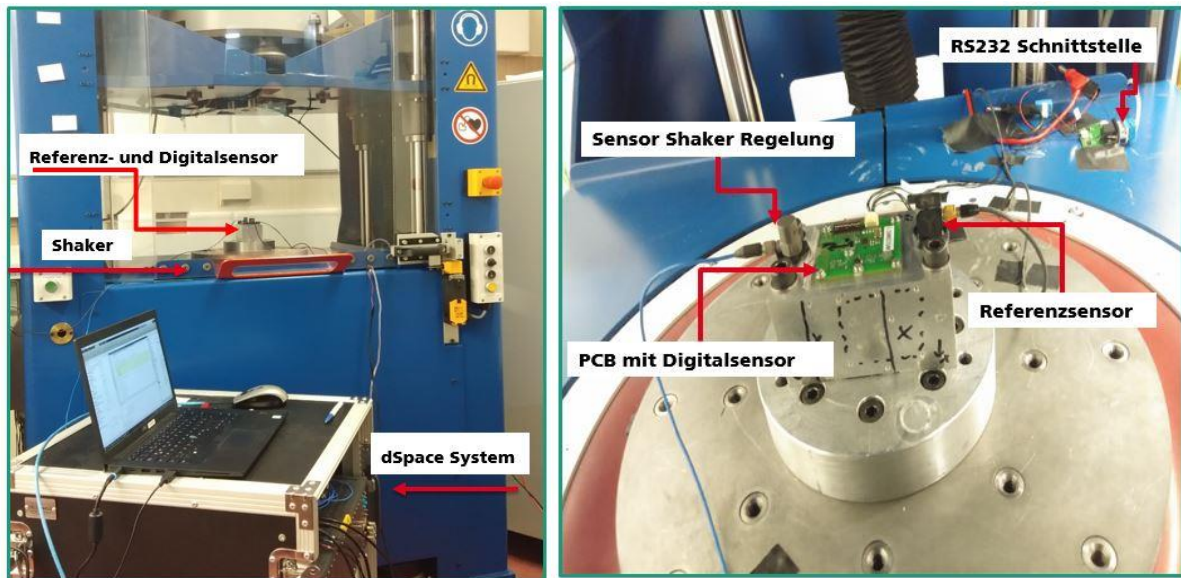


**Abbildung 5: Interface und Sensor-/Prozessormodul für Laborerprobung MEMS-Beschleunigungssensoren**

Die hierfür entwickelte Firmware erlaubt die Auswahl unterschiedlicher Betriebsmode (u.a. Messbereiche, Abtastraten, zuschaltbare Filter) über DIP-Schalter, sowie die Synchronisation der Messdaten mit Hilfe eines Synchronisationspulses und Zeitstempeln. Zweiteres dient auch als Vorarbeit für die später im Trailer-Datennetzwerk zu implementierenden Methoden für eine phasengenaue Fusion von Daten unterschiedlicher Sensoren.

Zur Charakterisierung am LBF werden die Sensoren auf einem elektrodynamischen Shaker montiert und mit definierten Beschleunigungsamplituden und Frequenzen beaufschlagt. Die gemessenen Signale werden mit einem Referenzsensor aus dem Laborbereich verglichen, um die Eignung der Sensoren für Lagerdiagnostik festzustellen. Die Datenerfassung während der Versuche erfolgt mit einem dSpace System und die Analyse der Messdaten mit der Software MATLAB. Mittels Dip-Schalter auf der Platine sind unterschiedliche Einstellungen der MEMS möglich (wie Messbereich, Datenrate und Auflösung). Die Charakterisierung erfolgt mit unterschiedlichen Schaltereinstellungen, um den Einfluss auf Qualitätsparameter wie Frequenzgang, korrekte Amplitude, Rauschpegel und Phasenverzögerung zu untersuchen.

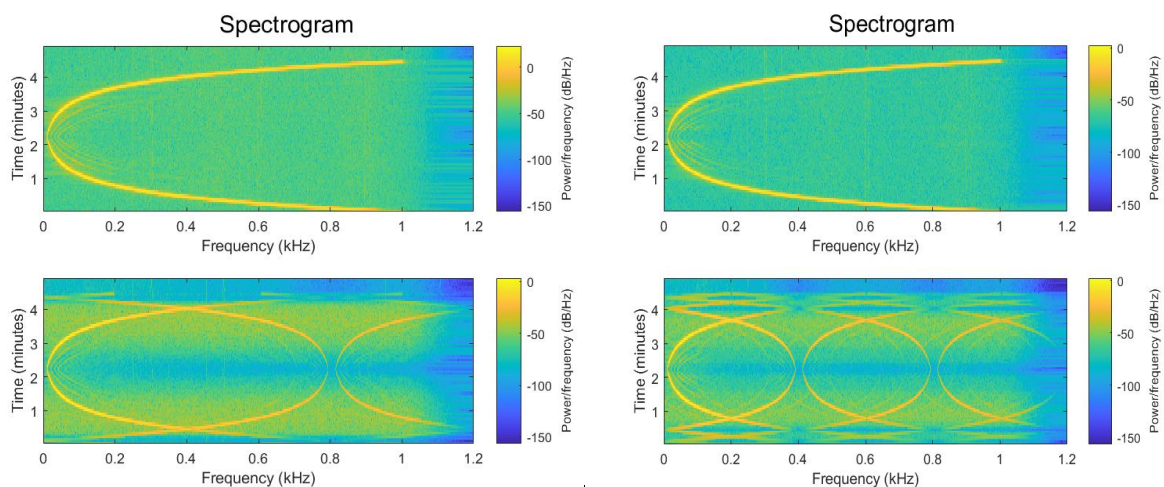




**Abbildung 6: Shaker-Testaufbau zur Charakterisierung der Digitalsensoren am LBF**

In Abbildung 6 ist der Versuchsaufbau am LBF dargestellt. Die Sensorplatte wird mit einer Halterung auf den Shaker geschraubt. Zusätzlich wird ein Referenzsensor (PCP 356A16) und ein weiterer Beschleunigungssensor für die Shaker Regelung auf die Halterung geklebt. Mittels eines M+P Regelungssystems können die Sensorplatten mit definierten Amplituden und Frequenzen getestet werden.

Die Analyse der Sensordaten der getesteten MEMS basiert auf Qualitätsparametern für den Einsatz von Lagerdiagnostik. Hierbei wurden die beiden Sensoren BMA456 und LSM6DSM als geeignete Kandidaten der getesteten Sensoren identifiziert. Die Wasserfalldiagramme der beiden Sensoren sind in Abbildung 7 dargestellt. Hierbei zeigen beide Sensoren bei Einstellung der maximalen Datenrate ein nutzbares Signal im Frequenzbereich bis 1 kHz. Bei Einstellung der geringeren Datenrate der Sensoren ergeben sich maximal nutzbare Frequenzbereiche von 400 Hz beim BMA456 und 200 Hz beim LSM6DSM. Allerdings treten hierbei deutliche Signalartefakte auch bei niedrigeren Frequenzen unterhalb von 400 Hz beziehungsweise 200 Hz auf.



**Abbildung 7: Wasserfalldiagramm oben/unten: maximale/minimale Datenrate, links: BMA456, rechts: LSM6DSM**

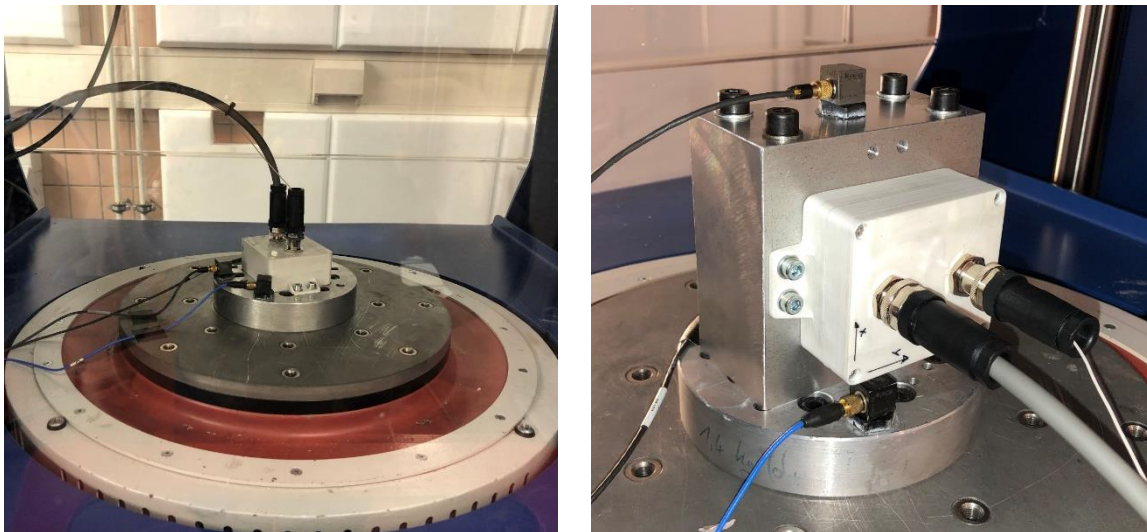
Es wurde eine erste Generation von Sensorknoten für das Trailer-Datennetzwerk entwickelt. Diese zeichnet sich u.A. durch Verwendung eines sehr großzlig dimensionierten

Microcontrollern aus, so dass erste Methoden zur lokalen Datenvorverarbeitung auf den Sensorknoten mit Hilfe eines am LBF vorhandenen Code-Builders mit überschaubarem Aufwand aus der Matlab/Simulink-Umgebung (bei den meisten Projektpartnern im Einsatz) übernommen werden können. Für eine Serienumsetzung ist dann ein weniger Ressourcen beanspruchendes Design (kosten und energieverbrauchsoptimiert) in Abhängigkeit der endgültig zu implementierenden Funktionalität angestrebt.

Im Folgenden wurden diese beiden Sensoren auf eine Mikrocontroller-Platine aufgebracht wobei der Sensor BMA... für den niedrigen Amplitudenbereich bis 16 g gedacht ist und typische Fahrmanöver genau erfassen kann, während der Sensor H3... den hohen Amplitudenbereich bis 100 g abdeckt und damit Sonderereignisse mit hohen Amplituden erfasst.

Die Platine wurde in ein Gehäuse integriert und bildet so einen Sensorknoten, der im Trailer installiert werden kann und die Signale über einen CAN-Bus ausgibt. Um sicherzustellen, dass die Sensorik auf der Platine wie vorgesehen funktioniert, wurden die Sensorknoten auf dem Shaker des LBF getestet. Mit den Tests wurden die folgenden Punkte überprüft:

- Liefern die ausgegebenen Signale die korrekte Amplitudenskalisierung und stimmt die Koordinatenrichtung?
- Wie groß ist der Phasenverzug und die Totzeit durch die digitale Datenübertragung?
- Treten durch Platine und Gehäuse Resonanzeffekte auf, die den nutzbaren Frequenzbereich beeinflussen?



**Abbildung 8: Test des Ident Sensorknotens mit CAN-Bus Anbindung auf dem Shaker**

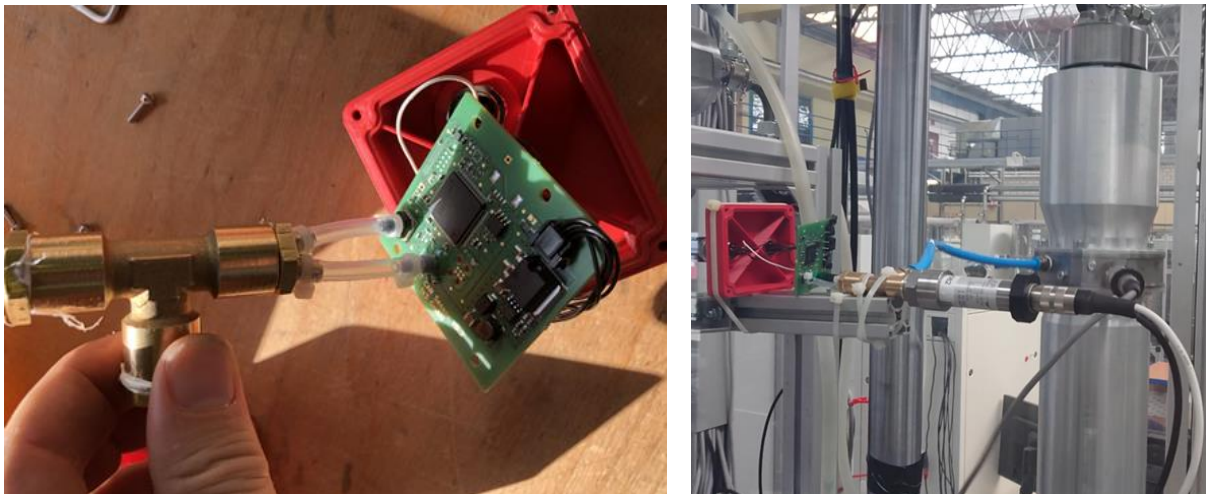
Abbildung 8 zeigt den untersuchten Sensorknoten auf dem Shaker. Die Untersuchung wurde in drei Raumrichtungen durchgeführt. Zum Vergleich der Amplitudengenauigkeit wurden die Beschleunigungen des Shakers mit Referenzsensoren aufgezeichnet. Zur Untersuchung des Phasenverzugs und der Totzeit wurde aus dem Sensorknoten zusätzlich ein Synchronisationssignal herausgeführt, das durch eine Pulsflanke jeweils das Triggern eines Timers anzeigt. Das Timersignal wurde mit über den CAN Bus übertragen. Auf diese Weise können die Sensorknoten mit der externen Datenerfassung synchronisiert werden.

Die Amplitudenskalisierung der untersuchten Sensoren stimmte mit der Skalierung der Referenzsensoren überein. Eine Anpassung war hier nicht notwendig. Weiterhin ist festzustellen, dass die Platinen und Gehäuse der Sensorknoten keine Resonanzeffekte zeigen, die die Bandbreite der Sensorik im relevanten Frequenzbereich einschränkt.



## Laboruntersuchung des Sensornetzwerks „Drucksensorik“

Ähnlich zum Vorgehen mit den Beschleunigungssensoren wurden auch die Drucksensoren zur Messung des Balgdruckes experimentell untersucht. Im Bereich von Low-Cost Drucksensorik auf MEMS Basis gibt es deutlich weniger Auswahl als bei den Beschleunigungssensoren. Weiterhin bieten hier die Datenblattangaben weniger Informationen, um die Eignung zu bewerten. So wurden nur zwei Drucksensoren gefunden die preislich und vom Messbereich überhaupt für die Anwendung in Frage kommen. Zu den dynamischen Eigenschaften gab es keine Angaben. Typischer Einsatzzweck der ausgewählten Sensoren ist in Taucheruhren. Diese müssen den Wasserdruck zuverlässig messen, wobei eine Wassertiefe von 100 m einem Druck von 10 bar entspricht und damit den Maximaldruck in der Trailer Luftfeder gut abdeckt. Bedenken bestanden hinsichtlich der Dynamik, also bis zu welchen Frequenzen der Sensor messen kann. Weiterhin war vorgesehen die Sensoren über einen dünnen Schlauch anzuschließen, der unter Umständen einen Tiefpasscharakter aufweist und so die hochfrequenten Druckschwankungen in der Luftfeder nur gedämpft passieren lässt.

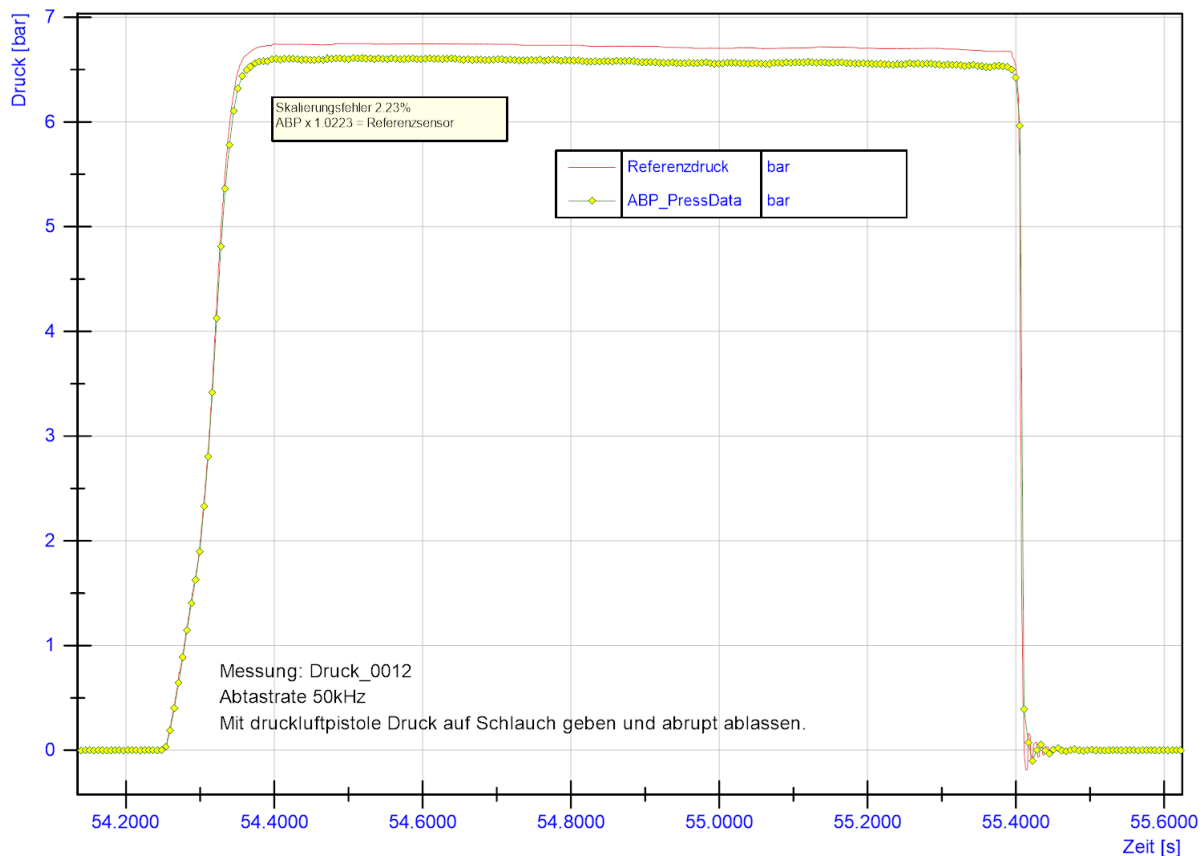


**Abbildung 9: Prototypenplatine mit zwei Drucksensoren auf Luftfederprüfaufbau von Industrial Science**

Abbildung 9 (links) zeigt die Prototypenplatine, die von ts3 zum Test der beiden Drucksensoren aufgebaut wurde. Die Sensorsignale wurden wie bereits bei den Beschleunigungsaufnehmern beschrieben über einen CAN Bus ausgegeben und über einen Timer auf dem Mikrocontroller synchronisiert. Mit dem im Bild sichtbaren Druckluftadapter kann ein Referenzdruckaufnehmer angeschlossen und die Sensorik mit Luftdruck beaufschlagt werden. Die Geometrie des Adapters entspricht den Abmaßen, wie sie auch im Trailer typischerweise an den Luftfedern verwendet werden.

Die Sensorik wurde auf einem Prüfaufbau von Industrial Science untersucht. Der Aufbau ist in Abbildung 9 (rechts) dargestellt. Mit dem Aufbau war es möglich die Sensorik in einem Frequenzbereich bis 15Hz zu testen. Bis zu dieser Frequenz konnte noch keine frequenzabhängigen Effekte in den Sensorsignalen festgestellt werden. Eine höhere Dynamik mit mehr als 15 Hz und größeren Amplituden wurde durch eine Anregung mit Druckluftpulsen untersucht. Ein entsprechender Messschrieb ist in Abbildung 10 dargestellt. Zu sehen ist hier, dass der Druckverlauf, der mit dem MEMS Sensor gemessen wurde, dem Verlauf des Referenzsensors sehr gut folgt. Es ist keine Beeinträchtigung der Dynamik des MEMS Sensors durch die dünnen Anschlusschläuche zu erkennen. Auch hinsichtlich der Amplitudentreue liefert der MEMS Sensor gute Werte. Ein Vergleich der Amplituden liefert eine Abweichung von 2,3% zwischen MEMS und Referenzsensor. Der untersuchte MEMS Sensor scheint aufgrund dieser Versuchsergebnisse gut für die Druckerfassung der Luftfeder im Ident Trailer geeignet und wurde von ts3 in die Sensorknoten integriert.

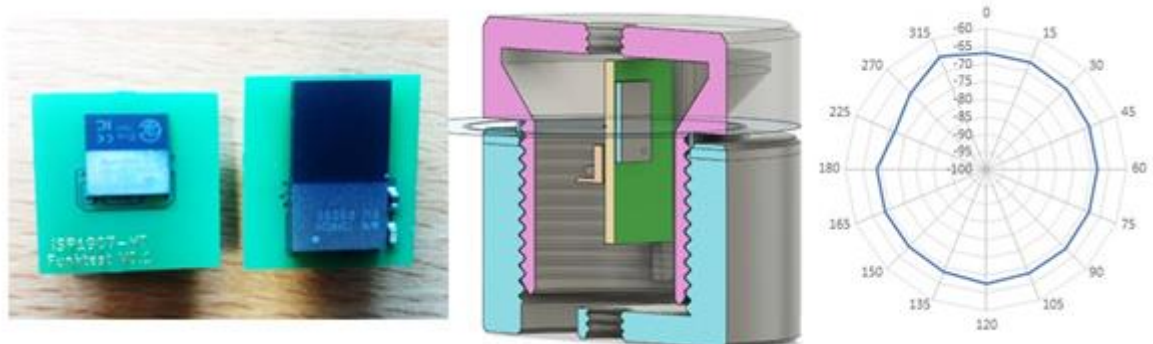




**Abbildung 10: Charakterisierung der MEMS-Drucksensoren mit Druckluftpulsen**

### Achskapselsensor

Neben den kabelgebundenen Sensoren des Sensornetzwerkes wird auch ein kabelloser Sensor für die Montage in der Achskapsel entwickelt. Dieser Sensor ist dazu gedacht, autonom Sensordaten zu erfassen, auszuwerten und über eine Funkschnittstelle mit dem Fahrzeug oder Fahrzeugextern auszutauschen. Die hierfür benötigte Funkschnittstelle wird von ts3 entwickelt. Dazu wurde ein Dummy eines Achskapselsensors mit den zuvor aus der theoretischen Vorbetrachtung erfolversprechend scheinenden Antennentypen und -anordnungen prototypisch erstellt.



**Abbildung 11: Testplatten mit zwei verschiedenen Funkmodulen (links), schematische Anordnung im Gehäuse (Mitte), Beispiel eines aufgenommenen Antennendiagramms (rechts)**

Um die Funkübertragungseigenschaften aus dem Rad heraus abschätzen zu können wurde ein Rad mit Nabe aufgebaut und mit einer variabel positionierbaren Sende-Antenne in der

Kapsel ausgerüstet. In einer Freifeld Messkampagne wurden verschiedene Antennenpositionen bezüglich ihrer Abstrahlcharakteristik vermessen. Abbildung 12 zeigt ein Foto des Freifeld-Versuchsaufbaus. Basierend auf den Funkfeld Messungen wurde durch ts3 ein Sendemodul ausgewählt und dessen Orientierung definiert, welches in der Achskapsel zum Einsatz kommt.



**Abbildung 12: Funkfeldvermessung des Achskapselsensors im Freifeld**

Zur Versorgung des Achskapselsensors mit Energie soll aufgrund der begrenzten Kapazität keine Batterielösung eingesetzt werden, denn die Funkschnittstelle hat einen recht hohen Leistungsbedarf. Da in der Achskapsel eine Drehbewegung vorliegt liegt es nahe, die Energieversorgung durch einen kleinen Generator in der Achskapsel sicherzustellen.

Als erstes muss der für den Generator zur Verfügung stehende Drehzahlbereich bekannt sein. Im Projekt hat man sich darauf geeinigt, den Abrollumfang  $U_r$  eines Trailerrades mit 3.2m festzulegen. Das ergibt einen Abrolldurchmesser des Rades von etwas mehr als einem Meter.

Daraus ergibt sich für das Verhältnis von Drehzahl zu Geschwindigkeit:

Damit ist

$$\frac{v_{\text{Trailer}}}{\frac{\text{km}}{\text{h}}} = \frac{U_r}{\text{m}} \cdot 0.06 \frac{n_{\text{Rad}}}{\frac{1}{\text{min}}} = 3.2 \cdot 0.06 \frac{n_{\text{Rad}}}{\frac{1}{\text{min}}} = 0.192 \frac{n_{\text{Rad}}}{\frac{1}{\text{min}}}$$

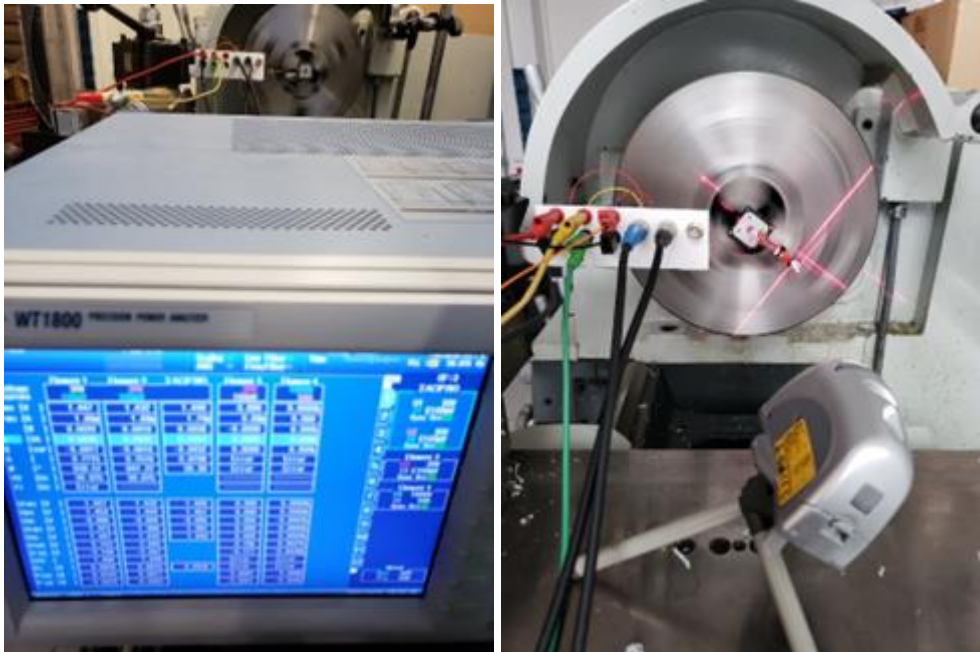
Bei den letztendlich ausgewählten Generatoren handelt es sich um 7-polige bürstenlose Gleichstrommotoren, die üblicherweise elektronisch kommutiert werden. In unserem Fall werden sie wie Synchrongeneratoren durch eine 6-pulsige Brücke gleichgerichtet. Die Frequenz des Drehstroms der Motoren lässt sich mit den bei ts3 vorhandenen Messgeräten

einfach und genau bestimmen, die Drehzahl mechanisch zu erfassen ist für uns schwieriger. Für Motoren mit der Polzahl  $p$  gilt:

$$\frac{n_{mech}}{1} = 60/7 \cdot \frac{f_{el}}{Hz}$$

Wenn man möchte, dass das Messsystem bei 20 km/h anfängt zu arbeiten, muss man eine Motordrehzahl von 100 1/min zugrunde legen.

Es wurden verschiedene kleine und kostengünstige Elektromotoren recherchiert und von ts3 hinsichtlich ihrer Leistungsausbeute vermessen.



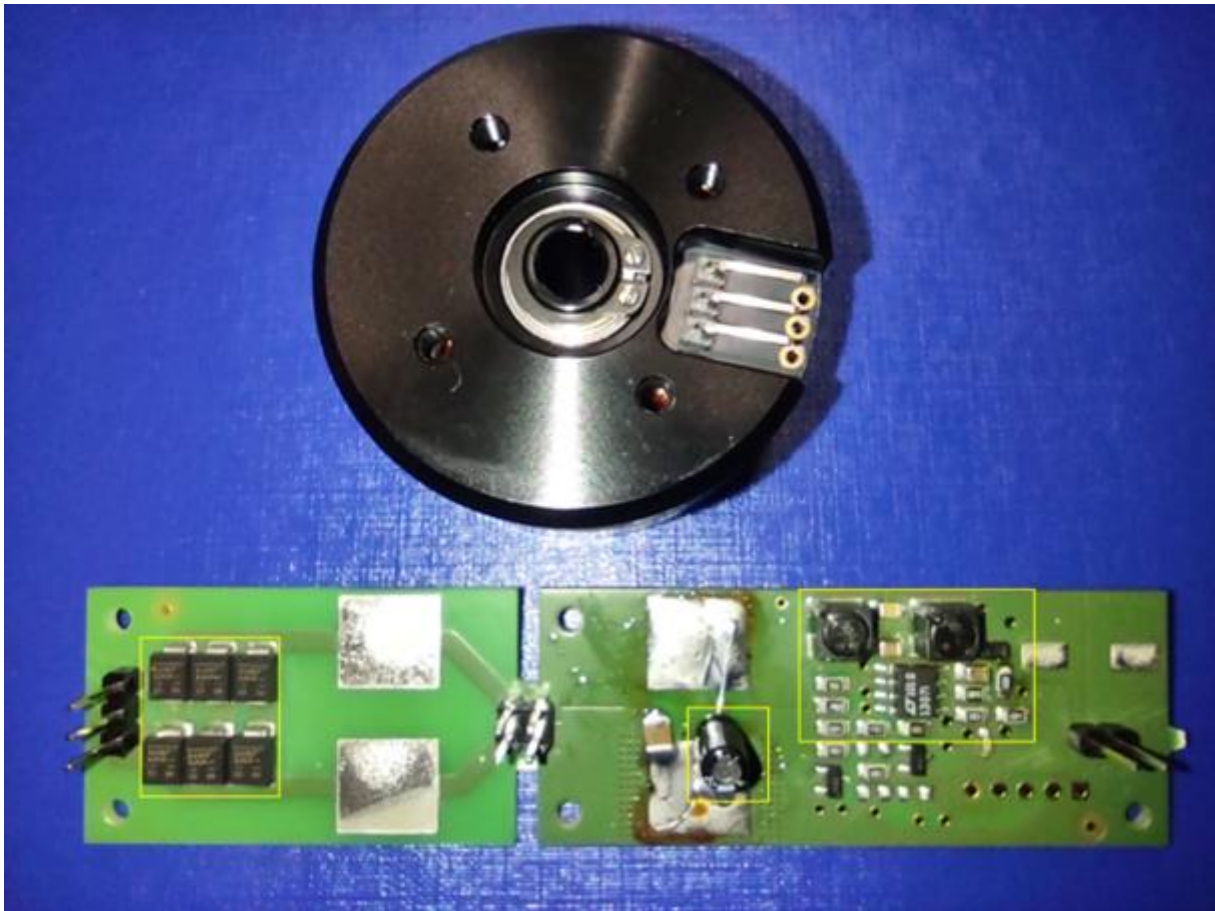
**Abbildung 13: Messung der Leistungsabgabe eines 3-Phasen-Kleinstgenerators mit fixer Drehmomentabstützung und Abstützung über Masse/Pendel**

Der erfolgversprechendste Motortyp ist der GB4106 von T-Motor, ein kleiner Stellmotor aus dem Kameragimbal einer Drohne.

Nach Analyse der Eigenschaften der zur Verfügung stehenden Motoren haben wir nach einem Wandler gesucht, der eine Leistung von 100 bis 300mW bei einer Ausgangsspannung zwischen 3 und 5 Volt aus einer Eingangsspannung zwischen 1 und 12V erzeugen kann. Von Analog Devices ist mit dem LT1307 ein Baustein verfügbar, der diese Anforderungen erfüllt. Angelehnt an einen Schaltungsvorschlag von Analog Devices wurde daraus ein SEPIC-Wandler entwickelt.

Im folgenden Bild ist der experimentelle Aufbau gezeigt, den wir für den Wandler entwickelt haben. Der Aufbau enthält einige zusätzliche Bereiche für zusätzliche Komponenten, um verschiedenen Optionen und Betriebsarten ausprobieren zu können. Essenziell für den Wandler sind die gelb umrandeten Bereiche auf der Leiterplatte.





**Abbildung 14: Experimenteller Aufbau des SEPIC - Wandlers mit vorgeschaltetem Gleichrichter im Größenvergleich zum GB36-1 - Motor**

Die folgenden Abbildungen zeigen einen Vergleich der Ausgangsleistung zwischen Wandler und Motor ohne Gleichrichter. Auf den ersten Blick mag das Ergebnis vielleicht enttäuschen, da die Ausgangsleistung der Gesamtanordnung nur ca. 1/3 der Generatorleistung beträgt, dazu muss man jedoch bedenken, dass die Konverterschaltung an den geschätzten Leistungsbedarf des Sensorknotens von maximal 300mW angepasst ist. Im Grunde ist auch die Anpassung an die Quellimpedanz des Generators nicht optimal. Aus dem Geschwindigkeits-Leistungs-Diagramm der Gesamtanordnung geht hervor, dass

- Die Schaltung bei 10km/h anläuft, ohne jedoch nennenswert Leistung liefern zu können,
- bei 20km/h 20 – 25mW liefern kann, was zum Betrieb der Sensoren - evtl. mit reduzierter Datenrate – ausreicht,
- bei 30km/h 50 – 75mW liefert, was zum vollen Betrieb der Sensoren ausreichen sollte und
- ab 55 – 65 km/h die höchstmögliche Leistung von 300mW liefern kann, die auch uneingeschränkter Funkbetrieb und das Laden eines Pufferspeichers erlaubt.

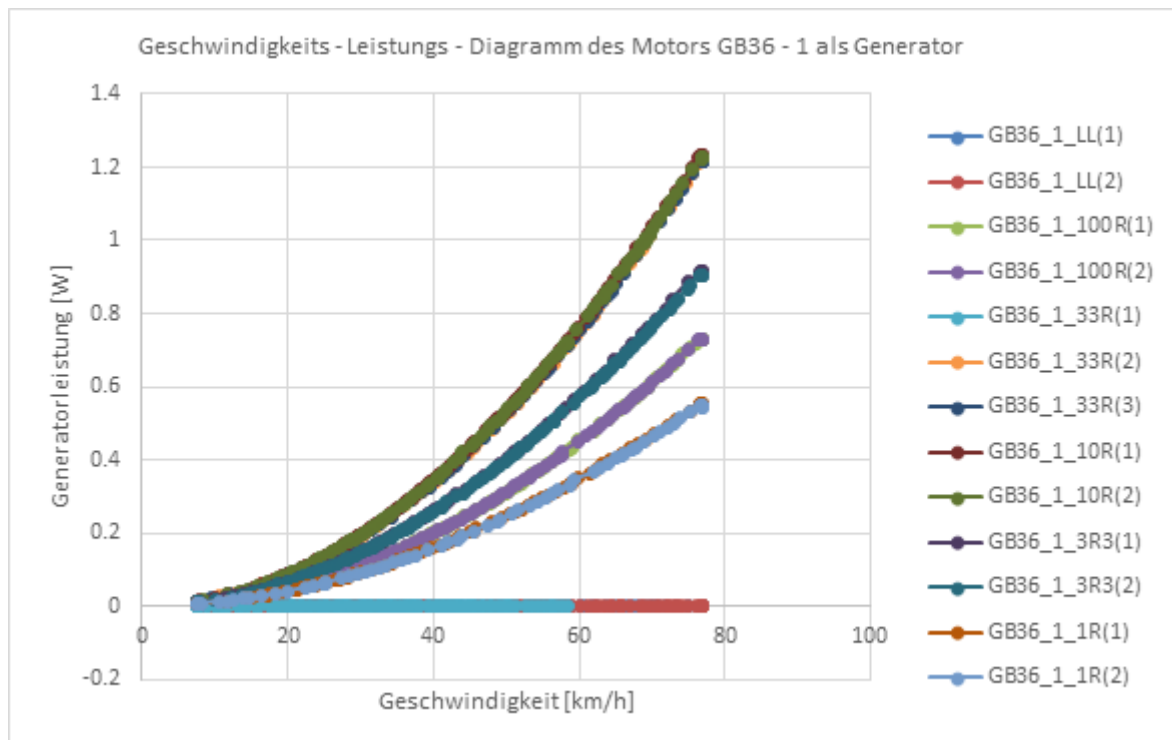


Abbildung 15: Geschwindigkeits - Leistungsdiagramm für den Motor

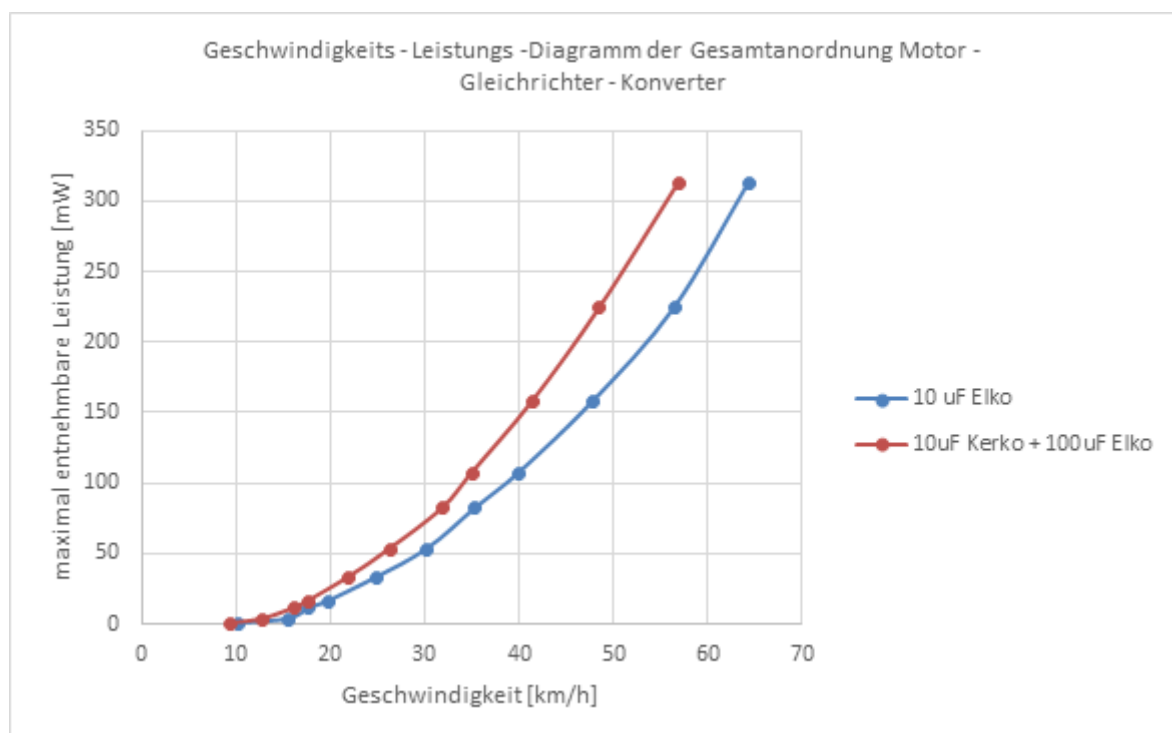


Abbildung 16: Geschwindigkeits- Leistungsdiagramm für die gesamte Motor - Wandler - Anordnung

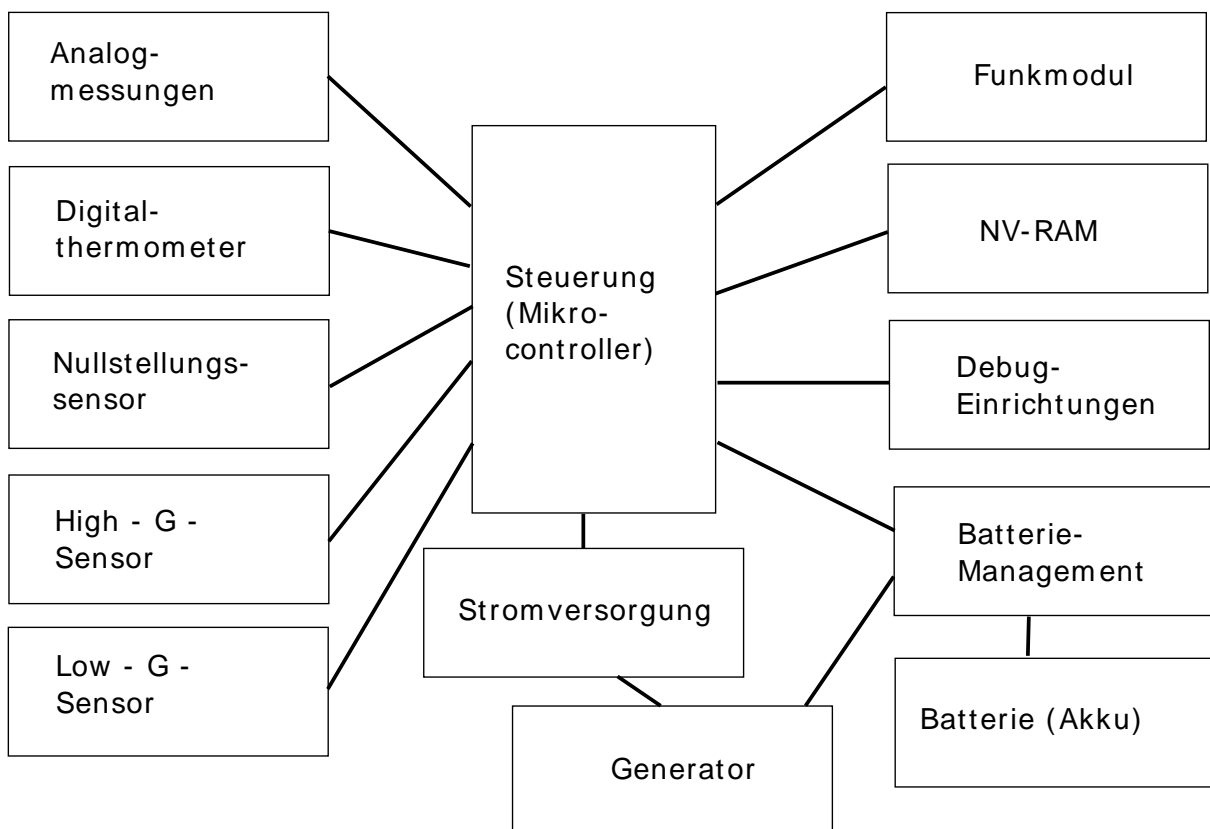
Um die Fahrdynamik des Trailers beobachten zu können, muss der Sensor geeignete Daten, sprich Beschleunigungswerte in Echtzeit an den Bordrechner senden können. Da sich der Sensor mit dem Rad dreht, ist eine Transformation in ein ruhendes Koordinatensystem und aufgrund der geringen Bandbreite der Funkstrecke auch eine Datenreduktion erforderlich. Für den Hardwareaufbau bedeutet das, dass man an dieser Stelle einen genügend leistungsfähigen Prozessor vorsehen muss. Zur Erfassung der Beschleunigungswerte kommen die von den übrigen Sensoren schon bekannten High – G und Low G – Sensoren

zum Einsatz. Um die Drehbewegung beobachten zu können, werden zum einen die Phasenspannungen des Generators, zum anderen ein Indeximpuls gemessen.

Neben der Erfassung und Bewertung des aktuellen Bewegungszustandes des Fahrzeugs sollen aber auch Langzeitdaten zum Zustand der Achse, im Besonderen zum Zustand des Radlagers gesammelt werden. Hier ist neben den Beschleunigungssensoren, die hier als Körperschallmikrofone eingesetzt werden, auch die Temperatur an mehreren Stellen innerhalb der Achskapsel erforderlich. Aus diesen Daten sollen Parameter errechnet werden, die den Zustand der Achse beschreiben. Um im Sensor Langzeitanalysen durchführen zu können, müssen mehrere solcher Parametersätze über längere Zeit gespeichert werden. Dazu wurde ein vom Prozessor unabhängiger, nichtflüchtiger Speicher in Form eines ferroelektrischen RAM, eines F-RAM, vorgesehen.

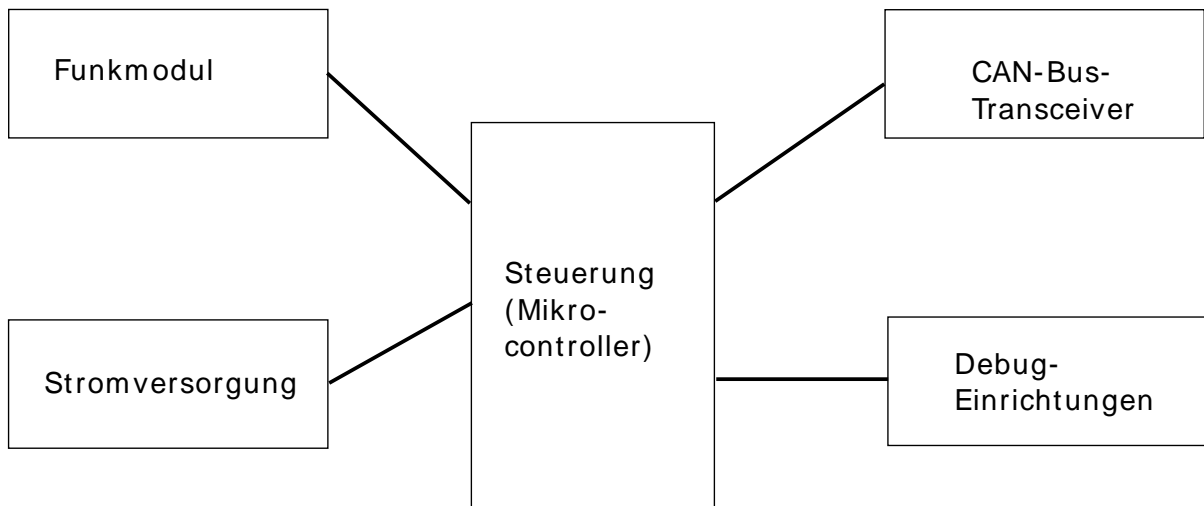
Aus der möglichen Notwendigkeit der Übermittlung solcher Langzeitdaten im Stand des Fahrzeugs, z.B. an einem Werkstor, ergibt sich auch die Notwendigkeit die Stromversorgung der Sensoren weiter auszubauen und mit einem Akku zu ergänzen, der in Phasen hoher Fahrzeuggeschwindigkeit überschüssige Energie aus dem Generator aufnehmen sowie in kurzen Phasen niedriger Geschwindigkeit – beziehungsweise im Stand – wieder abgeben kann. Diese ergänzende Spannungsversorgung muss über eine intelligente Software steuerbar sein.

Aus dem Anforderungsprofil ergibt sich das Blockschaltbild des Sensors:



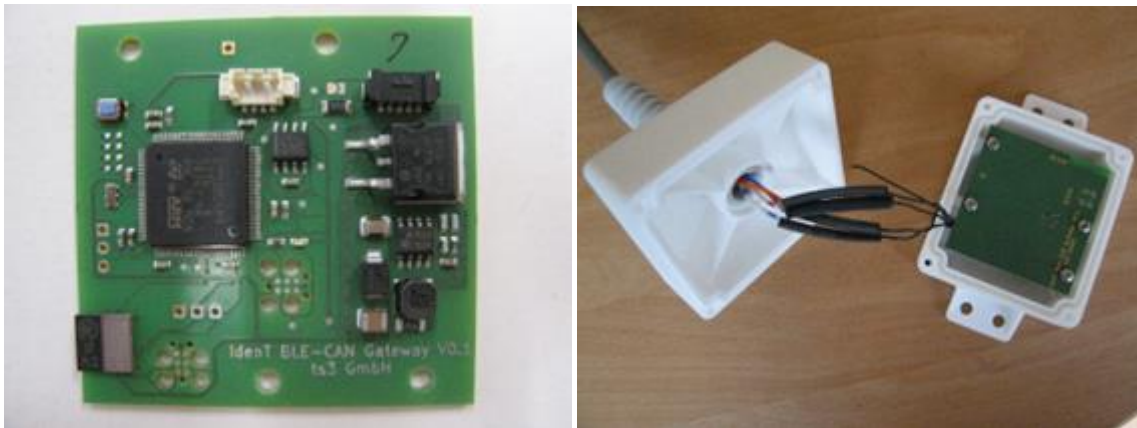
**Abbildung 17: Blockschaltbild des Achskapselsensors**

Zu der Funkstrecke gehört weiterhin ein Modul, das die Funksignale in Signale auf dem in Fahrzeug eingebauten CAN-Bus umsetzt, im folgenden Umsetzer genannt. Das folgende Blockschaltbild zeigt den Aufbau:



**Abbildung 18: Blockschaltbild des Bluetooth-CAN-Umsetzers**

Das Funkmodul ist gegenüber den anderen Geräten neu, um die gesamte Sensorlösung möglichst modular zu halten, wurde als Prozessor der gleiche Typ wie bei den anderen Sensorknoten verwendet, obwohl ein einfacherer Prozessor von der erforderlichen Rechenleistung her ausgereicht hätte. Die folgenden Bilder zeigen die Leiterplatte vor und während des Einbaus in das Gehäuse.



**Abbildung 19: Bluetooth-CAN-Umsetzer; Leiterplatte (links), eingebaut in Gehäuse (rechts)**

Nachdem die grundlegenden Möglichkeiten zum Bau eines Achskapselsensors abgeklärt waren, wie Stromversorgung, Übertragung der Daten mit Funk, Ausnutzung des vorhandenen Bauraums, konnte mit der Entwicklung eines Prototypen des Sensors begonnen werden.

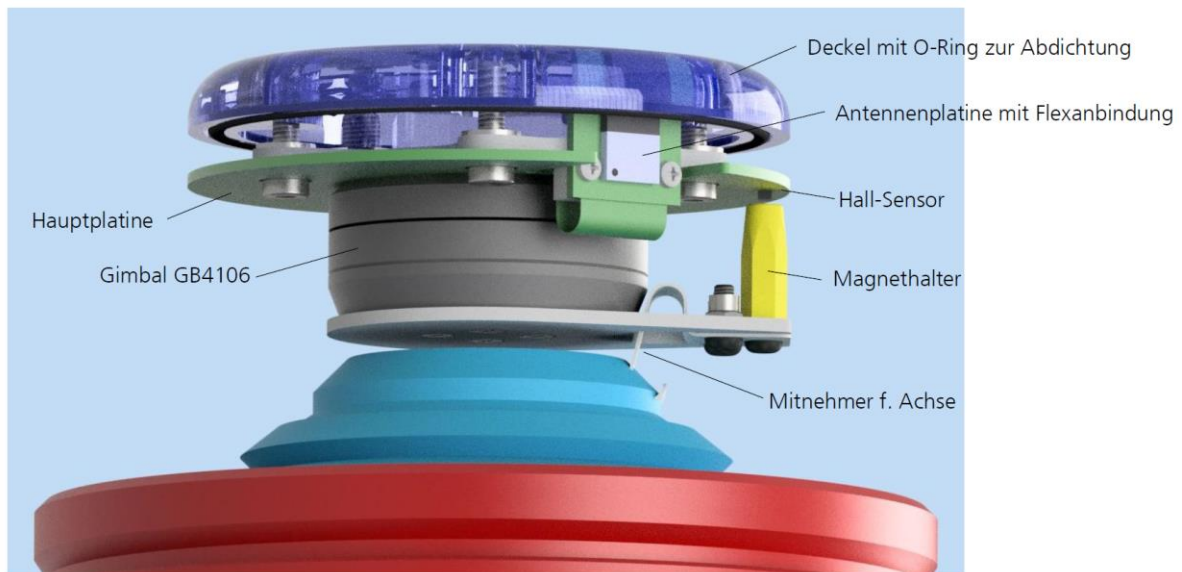
Der Sensor besteht grundsätzlich aus zwei Einheiten, dem eigentlichen in der Achskapsel verbauten Sensor, und einem Umsetzer, der die vom Sensor gelieferten Daten empfängt und in einen äquivalenten Datenstrom auf dem schon implementierten CAN-Bus umwandelt. Dieser Umwandler beinhaltet keine eigene Sensorik und ist daher relativ einfach aufgebaut.

Während der Versuche mit den Prototypen stellte sich heraus, dass der Flaschenhals der Übertragungskette zwischen Sensor und Fahrzeugrechner die Funkstrecke über Bluetooth darstellt. Daher sollte auch eine Vorverarbeitung der Sensordaten unbedingt auf dem Sensor, und nicht im Umwandler implementiert werden. Der Umwandler ist aus informationstechnischer Sicht als passiv anzusehen.

Basierend auf den geometrischen Abmessungen und dem Platzbedarf in der Achskapsel wurde vom LBF eine Konstruktion entworfen, wie der Motor zusammen mit Platinen, Sensorik



und dem Funkmodul in der Achskapsel untergebracht werden kann. Abbildung 20 zeigt die Konstruktion, die im weiteren Projektverlauf prototypisch umgesetzt wurde.



**Abbildung 20: Konstruktionsentwurf des Achskapselsensors**

Beim Aufschrauben des Achskapselsensors auf den Achsstummel ist es erforderlich, dass ein Mitnehmer in eine Nut des Achsstummels greift und so als Momentenstütze für den Motor dient. Abbildung 21 zeigt ein Bild des Schnittmodells aus 3D gedruckten Bauteilen, mit denen die Montage des Sensors untersucht wurde.

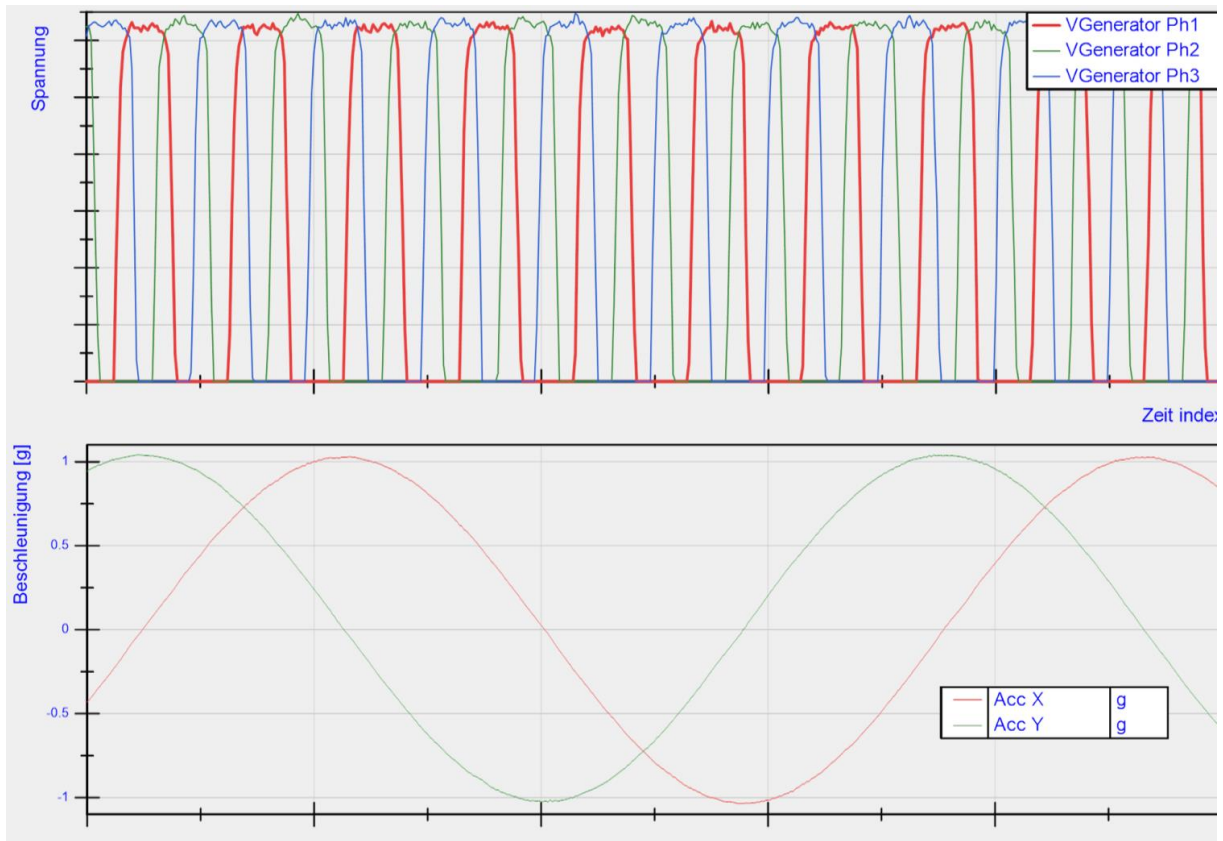


**Abbildung 21: Schnittmodell des Achskapselsensors zur Untersuchung der Montagemöglichkeit**

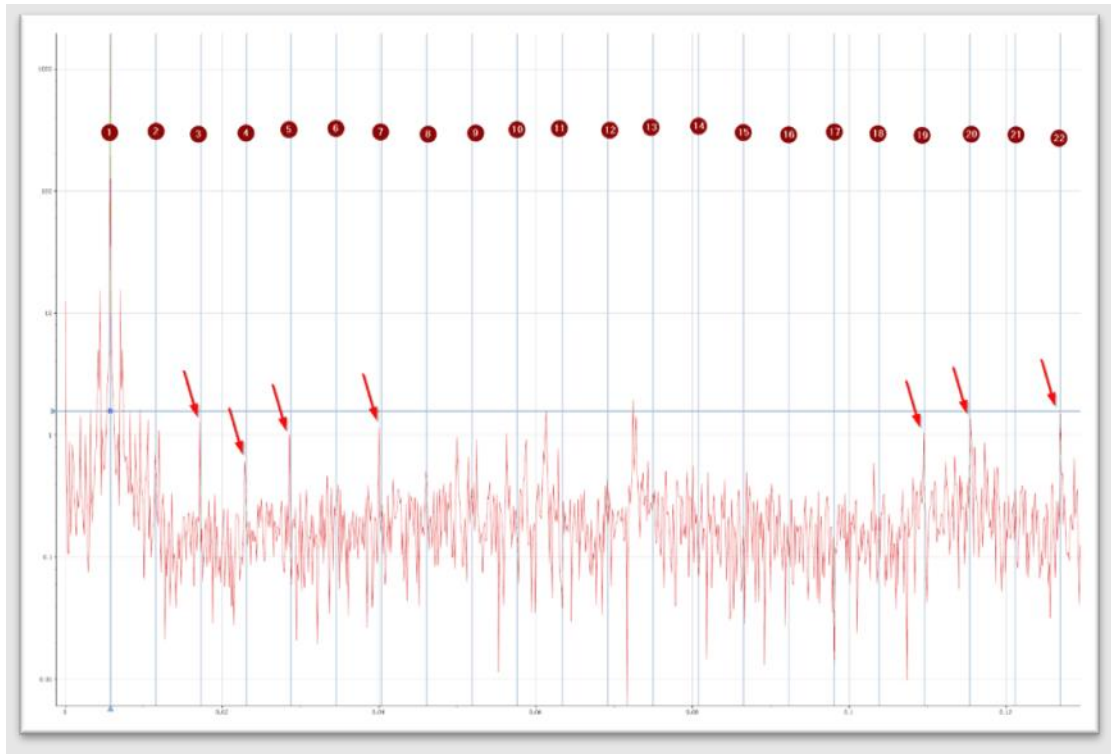
Der Achskapselsensor wurde bei ts3 mit der Elektronik-Platine bestückt und in Betrieb genommen. Auf einer Drehbank wurde von ts3 die Funktion der Energy Harvester Schaltung optimiert, um elektrische Energie über den Generator zu gewinnen. Abbildung 22 zeigt die Messdatenverläufe der Phasenspannungen des Generators und das aufgezeichnete Beschleunigungssignal. In den Spannungsverläufen der drei Motorphasen ist zu erkennen, dass es 7 Spannungspulse pro Motorumdrehung und Phase gibt. Dreht man den Motor per



Hand fühlt man jeden Puls jeder Phase als Rastmoment. Die Befürchtung bestand, dass sich diese Rastmomente negativ auf die Signalgüte des Beschleunigungssensors auswirken. Daher wurden Frequenzanalysen der Beschleunigungssignale durchgeführt, um diese auf die Anregung durch das Rastmoment zu untersuchen. Abbildung 23 zeigt eine Frequenzanalyse mit markierten Seitenbändern der Drehzahl. Die Darstellung auf der y-Achse ist logarithmisch. Die Anregung durch das Rastmoment ist erkennbar, jedoch liegt die Amplitude nur minimal über dem Rauschpegel des Sensors. Im Betrieb am Trailer sind daher keine negativen Auswirkungen des Rastmomentes auf die Signalgüte zu erwarten.



**Abbildung 22: Achskapselsensor im Test auf einer Drehbank, oben: Verläufe der Phasenspannungen, unten: Verlauf des Beschleunigungssignals im drehenden Koordinatensystem**



**Abbildung 23: Frequenzanalyse des Beschleunigungssignals zur Erkennung von Anregungen durch das Rastmoment des Generators**

Eine Besonderheit bei der Montage des Sensorknotens in der Achskapsel liegt darin, dass sich die ganze Elektronik samt Sensor im Betrieb mit dem Rad mit dreht. Möchte man die Messdaten im ruhenden Fahrzeug Koordinatensystem haben, so müssen die Messdaten entsprechend dem Raddrehwinkels transformiert werden. Hierzu ist eine recht genaue Drehwinkelerfassung des Rades notwendig. Am LBF wurden hierzu verschiedene Methoden untersucht, die auf dem Sensorsignalen, den gemessenen Phasenspannungen des Generatormotors und einer zusätzlichen Magnetscheibe beruhen. Basierend auf einem Testdatensatz der mit dem Achskapselsensor auf einer Drehbank gemessen wurde, wurden die Algorithmen zu Koordinatentransformation entwickelt und implementiert. Abbildung 24 zeigt verschiedene Bilder des Achskapselsensors.



**Abbildung 24: Achskapselsensor, links: Sensorplatte mit Generator, mitte: Magnetscheibe zur Drehzahlerfassung, rechts: Test auf der Drehbank**

### Dezentrale Algorithmen auf den Sensorknoten

Das dezentrales und intelligente Sensornetzwerk wurde auf Basis von STM 32F407 Prozessoren umgesetzt. Die Entscheidung für diesen Prozessor wurde getroffen, da er über eine große Rechenkapazität bei gleichzeitig niedriger Energieaufnahme verfügt. Weiterhin ist für diesen Prozessor die Unterstützung durch die Rapid Control Prototyping (RCP)-Methodik implementiert. Das Prinzip ist in Abbildung 25 skizziert. Hierbei wird in der Programmierumgebung MATLAB/SIMULINK ein Modell aufgebaut, das den Algorithmus zur Datenauswertung beinhaltet. Mittels der eingebetteten Coder-Toolbox von MATLAB wird automatisch ein auf den Mikrocontroller lauffähiger C-Code generiert. Durch diese Technologie findet eine Beschleunigung der Produktentwicklungszeit statt, da RCP einen einfacheren Übergang vom modelbasierten Softwaredesign zur Zielimplementierung bietet. So kann schon in der Entwurfsphase eine entworfene Strategie schnell mit dem realen System getestet werden. Eine zeitaufwendige und fehleranfällige manuelle Codierungsprozedur mit Low-Level Programmierung entfällt, wodurch sich der Fokus auf das Design, der Implementierung und Evaluierung der Algorithmen selbst konzentriert.

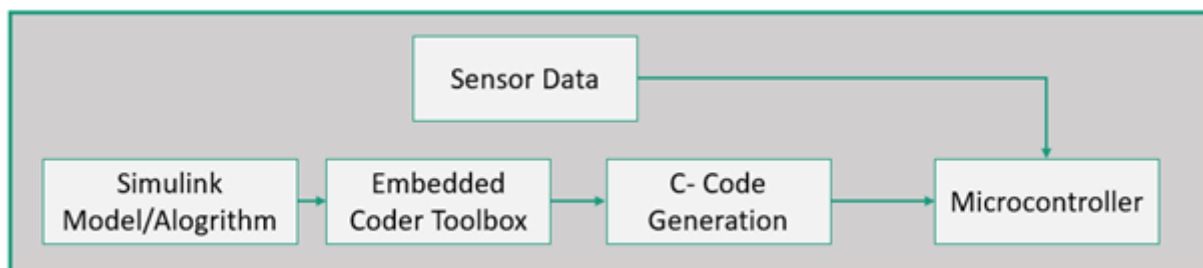
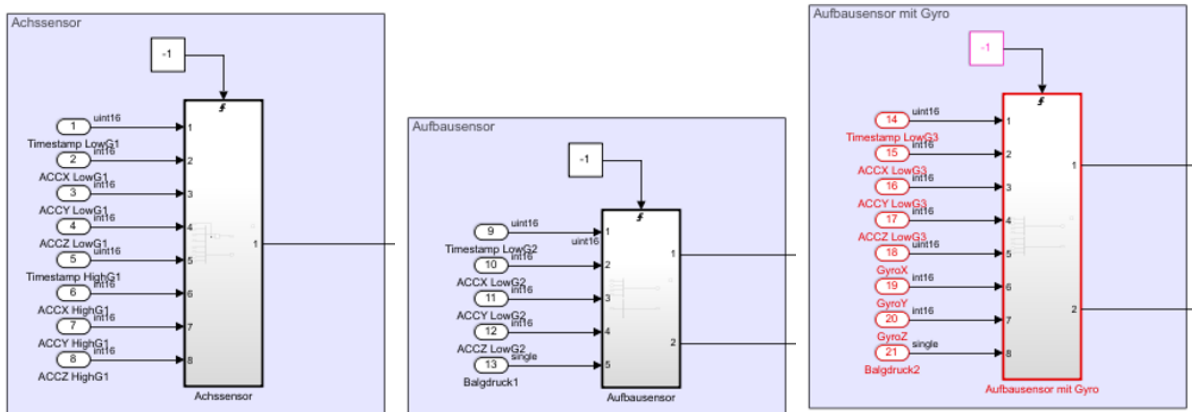


Abbildung 25: Rapid Control Prototyping (RCP) Methode mit Nutzung der Embedded Coder Toolbox

Die direkte Vorverarbeitung der Daten auf den Sensorknoten hat den Vorteil, dass die Messdaten hier noch in der vollen Abstrakte vorliegen. Für die Datenübertragung über den CAN Bus muss die Übertragungsrate aus Kapazitätsgründen reduziert werden. Weiterhin können die Sensorknoten bei bestimmten, einfachen Analyseaufgaben auch im Stand-alone-Betrieb ohne die Anbindung an den Online Zwilling Daten analysieren und Zustandsinformationen sammeln.

Für die Implementierung von Algorithmen der Partner wurde in Matlab / Simulink eine Umgebung definiert, mit der sich neuer Code einfach auf die Sensorknoten übertragen lässt. Die Besonderheit ist dabei, dass hierzu die STM IDE Entwicklungsumgebung weiterhin genutzt werden kann. Lediglich der relevante Code zur Signalverarbeitung wird über Matlab nach C kompiliert und kann so direkt in der Entwicklungsumgebung eingebunden werden. Auf diese Weise wird das von ts3 entwickelte Framework beibehalten, das die Sensoranbindung und CAN Kommunikation sicherstellt und besonders energie- und ressourcensparend programmiert ist. Abbildung 26 zeigt die vordefinierten Sensor Blocks auf deren Basis die Partner Signalverarbeitungsalgorithmen entwickeln können.



**Abbildung 26: Simulink Blocks zur Bereitstellung von Sensorsignalen für Partneralgorithmen**

Für die Implementierung der Auswertelgorithmen auf dem Sensorknoten, unter Verwendung des bestehenden Frameworks von ts3, wurden die bereitgestellten Simulink Modelle der Partner hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit überprüft. Zum Zweck der Übertragbarkeit müssen die Simulink Modelle als Matlab Funktion deklariert und für die Kompilierung in C angepasst werden, weil damit eine besonders speichereffiziente Weiterverwendung möglich ist. Dies erfordert die iterative Bewertung hinsichtlich Funktionalität und Kompatibilität für die Übertragung auf den Sensorknoten. Da auf dem Sensorknoten nur ca. 300 kB Speicher für die Auswertelgorithmen zur Verfügung stehen, muss die Anzahl und Komplexität der Auswertemethoden begrenzt werden.

Unter Berücksichtigung der Anforderungen an die Datenvorverarbeitung wurden die folgenden Algorithmen auf den Sensorknoten implementiert:

- Rainflow Zählverfahren,
- Berechnung eines Rauigkeits-Index (IRI – International Roughness Index)
- Drehwinkelberechnung des Achskapselsensors mit Koordinatentransformation
- Berechnung von Kennwerten zur Lagerdiagnose

Mittels der Sensorsignale können damit Lastkollektive und Lebensdauerabschätzungen, basierend auf der Rainflow-Matrix, berechnet werden. Die Ausgabe der Daten erfolgt über das ts3 Framework an die CAN-Schnittstelle des Trailers.

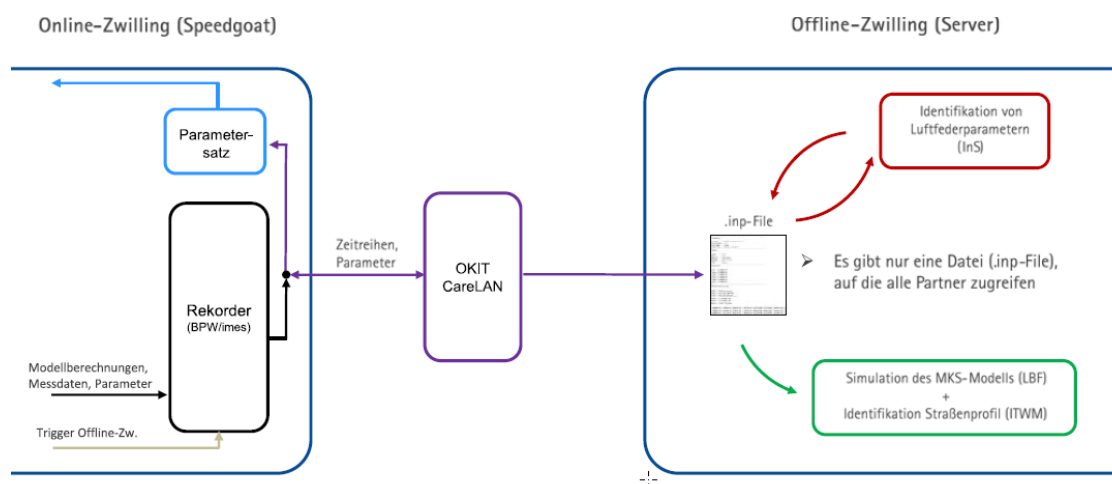
Aufgrund des begrenzten Speicherplatzes im Prozessor, konnten nicht alle Algorithmen uneingeschränkt umgesetzt werden. So hatten zum Beispiel die selbstlernenden Algorithmen zur Anomaliedetektion einen vielfach höheren Speicherplatzbedarf als er im Sensorknoten zur Verfügung stand. Auch die Algorithmen zur Unwuchtdetektion konnten wegen Speichermangel nicht implementiert werden.

Zu Beginn des AP2 wurden die Architektur des Gesamtsystems (vgl. Abschnitt 1.3 sowie die Kommunikationsschnittstellen (CAN-Bus und TCP) gemeinsam mit OKIT festgelegt. Außerdem wurden Konzepte erstellt, um zusätzliche (Labor-)Sensorik an das zentrale Datenerfassungssystem und das Rapid-Control-Prototyping Steuergerät anzubinden.

Im Versuchsfahrzeug wurde die OKIT-Telematik (OKIT CareLAN) für den Einsatz im Versuchsfahrzeug bezüglich Schnittstellen, Protokolle und Spannungsversorgung angepasst. Außerdem wurde das Rapid-Control-Prototyping Steuergerät (Speedgoat), welches im späteren Projektverlauf den Online-Zwilling abbildet und rechnet, beschafft, installiert und in Betrieb genommen. Mit Hilfe einer Testfahrt wurde die Kommunikation zwischen den Knoten (zentraler Messrechner, Online-Zwilling und Übertragungsmodul) getestet und validiert.

Parallel zu den Arbeiten am Versuchsfahrzeug fand eine Abstimmung mit OKIT und imes statt, um eine geeignete Schnittstelle zur Übertragung von relevanten Fahrmanövern, in Form von „Episoden“ (Zusammenfassung mehrere hoch abgetasteter Messsignale), zu spezifizieren. Neben der Schnittstelle wurde ein Mechanismus entwickelt, welcher die „Episoden“-Daten und -Parameter dem Offline-Zwilling zur Verfügung stellt.

Ergebnis der Abstimmung mit OKIT und imes war ein Trigger Manager, welcher die relevanten Fahrmanöver detektiert, sowie ein Datenrekorder, der für die Datenvorhaltung sowie -aufzeichnung zuständig ist. Abbildung 27 zeigt in diesem Zusammenhang das Konzept als Blockschaltbild. Dargestellt ist der Online-Zwilling (Speedgoat), der Offline-Zwilling (Server / Cloud) sowie die OKIT CareLAN als Bindeglied / Gateway. Sobald im Online-Zwilling ein Trigger berechnet wird (Trigger Offline-Zwilling), startet der Rekorder eine Aufzeichnung. Bestandteil dieser sind sowohl Zeitreihen (Messdaten vom zentralen Messrechner sowie Modellberechnungen) als auch geschätzte Parameter. Sobald der Trigger inaktiv wird, beendet der Rekorder die Aufzeichnung und beginnt über die CareLAN Einheit eine Übertragung der Daten an den Offline-Zwilling. Abschließend wird aus dem Datenpaket eine zentrale Datei, ein sogenanntes .inp-File (im Folgenden auch INP-File), erzeugt, welches Zeitreihen und Parameter in einer Datei vereint. Diese Datei dient in den weiteren Prozessschritten (z.B. Identifikationsroutinen und Straßenprofil Identifikation) als Eingangsdatei.



**Abbildung 27: Blockschaltbild des Trigger Prozesses**

Die Funktionsweise des Trigger Managers, welcher den Trigger „Trigger Offline-Zw.“ Berechnet, wird in Abbildung 28 dargestellt. Gezeigt ist ein Blockschaltbild des Online-Zwillings. Dieses enthält die Einzelmodelle (vertikale Anregung, Überwachung des Fahrwerkzustands und Fahrdynamisches Modell), welche über den zentralen Messrechner (DEWESoft Messrechner) mit Eingangsdaten (CAN-Daten und vorverarbeitete Kamera Daten) versorgt werden, sowie die Bestandteile des Trigger-Prozesses (Trigger Manager, Rekorder sowie OKIT CareLAN). Jedes Einzelmodell berechnet neben Ausgangsgrößen einen Trigger, welcher dem Trigger Manager zugeführt wird. Ein zusammengeführter Trigger löst dann die Datenaufzeichnung aus und überträgt die Sequenz an den Offline-Zwilling bzw. an die Cloud.



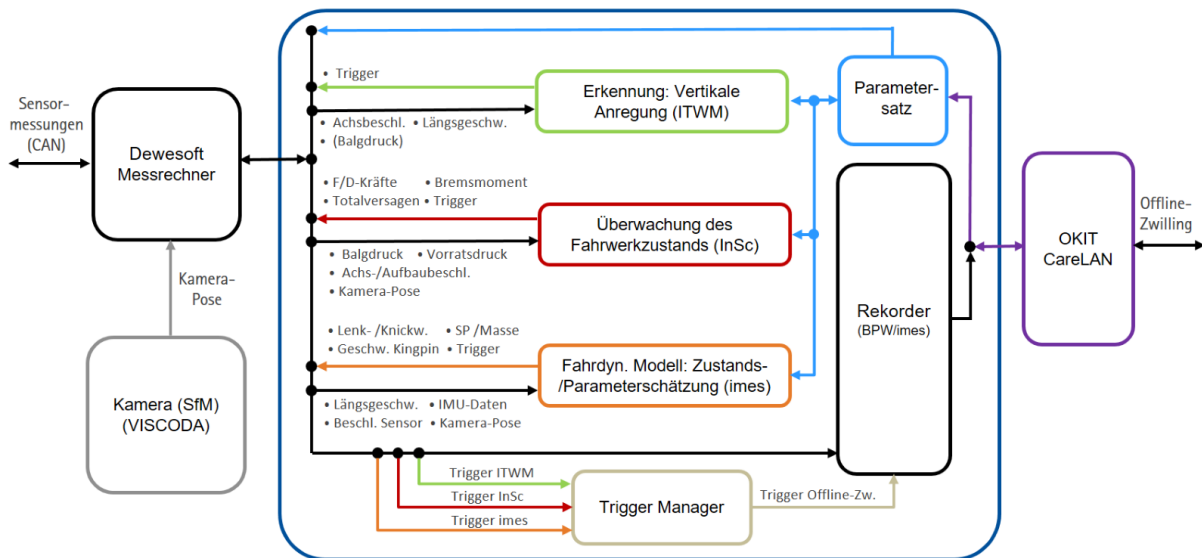


Abbildung 28: Blockschaltbild des Online-Zwillings inklusive Trigger-Manager

In Zusammenarbeit mit OKIT und imes wurde zusätzlich eine Schnittstelle zur Parametrierung der Online-Zwilling Modelle spezifiziert. Der Parameterraustausch zwischen der Cloud und dem Online-Zwilling sowie der Cloud und dem Offline-Zwilling wurde implementiert und getestet.

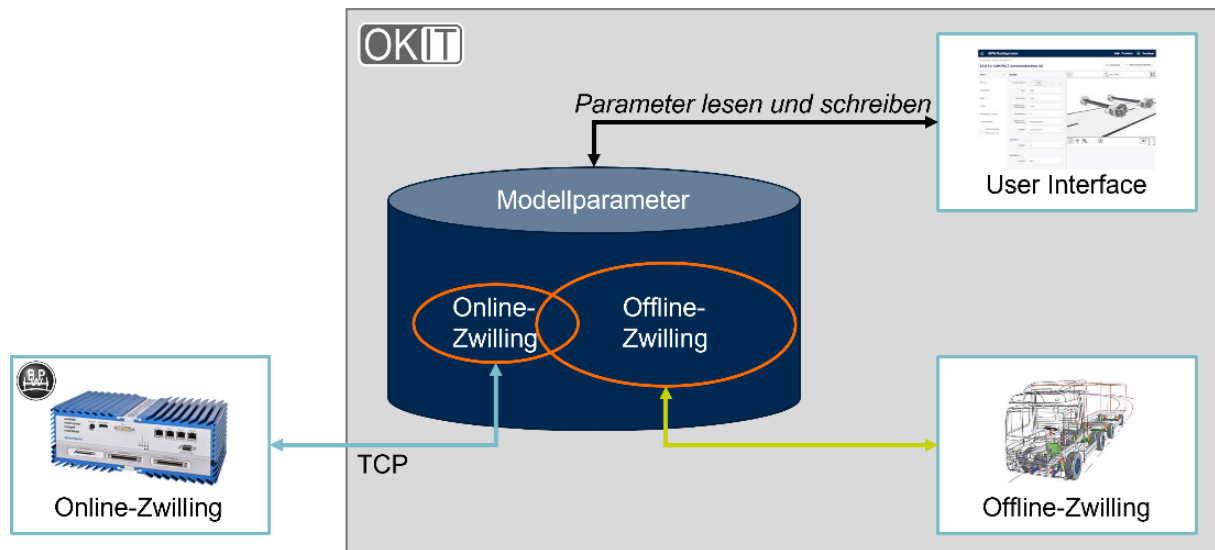


Abbildung 29: Schematische Darstellung des Parameterraustausches

Das Konzept (s. Abbildung 29) sieht vor, dass die OKIT-Cloud der Dreh- und Angelpunkt des Austausches ist. Über diesen zentralen Ablageort Tauschen Modelle (Online- und Offline-Zwilling) sowie ein Userinterface Daten aus. Damit Konflikte ausgeschlossen werden können, erfolgt eine Priorisierung der Teilnehmer.

Nach erfolgreicher Implementierung des Trigger Managers und des Trigger Prozesses fand eine Erstinbetriebnahme mit intensiven Tests statt. Dabei erfolgten die Tests sowohl im Labor als auch im Versuchsfahrzeug. Besonders die Labortests halfen dabei, Fehler in einem frühen Entwicklungsstand zu identifizieren, zu reproduzieren und Abhilfemaßnahmen zu entwickeln. Dadurch war es möglich, die Versuchsfahrten mit einem robusteren Prozess (Online-Zwilling, Offline-Zwilling und Gateway) durchzuführen.

## 2.2. Informationsrückmeldung

Zur Visualisierung der erfassten Daten dient ein agil anpassbares Dashboard. Es kann live verwendet werden um die eingehenden Informationen anzuzeigen. Die erfassten Daten werden darüber hinaus auch dauerhaft vorgehalten und können auch im Nachgang, während der Auswertung mit dem Dashboard dargestellt werden. Zusätzlich zu den über die Zeit sensorisch erfassten Daten wird auch die jeweilige Position des Fahrzeugs angezeigt, so dass sich die Daten aufgrund der auf der Karte erkennbaren Fahrmanöver leichter plausibilisieren lassen.

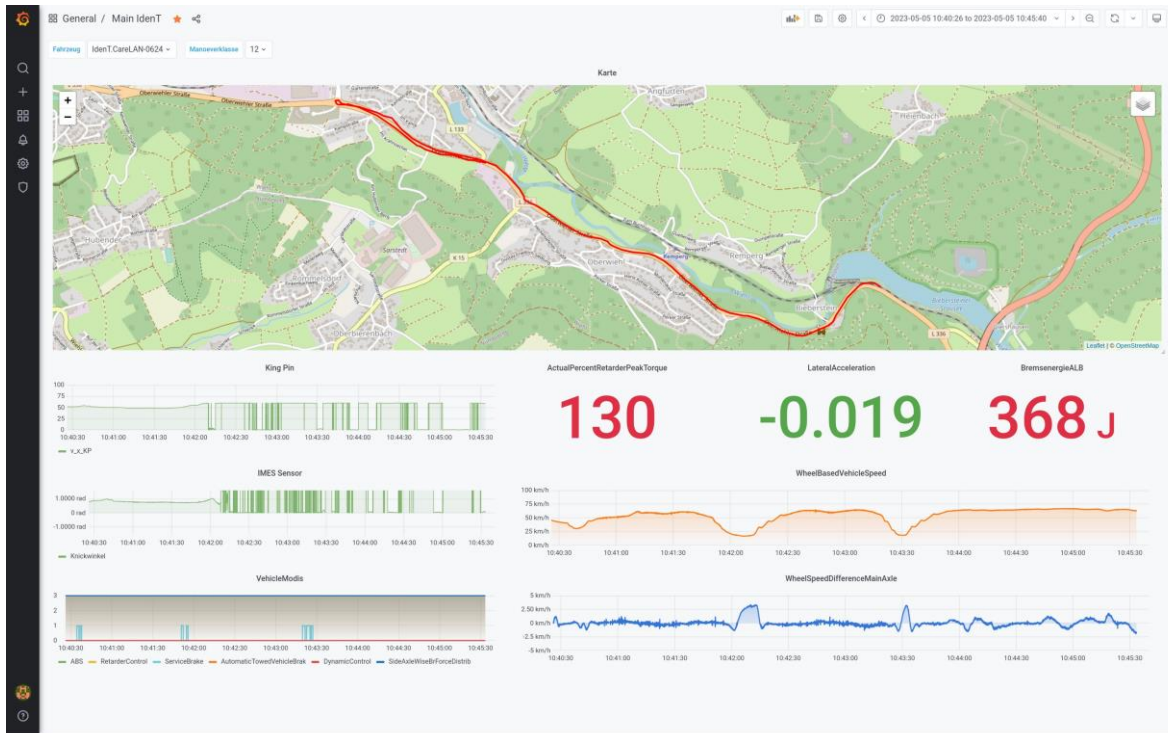


Abbildung 30: Grafana-Dashboard zur Visualisierung der erfassten Informationen

Eine weitere Form der Informationsrückmeldung war die Übertragung der Ergebnis-Artefakte aus den Rechnungen des Offline-Zwillings. Diese Artefakte konnten direkt auf dem dafür vorgesehenen OKIT-Host mit dem Namen Geminae eingesehen und abgeholt werden. Die Artefakte wurden aber auch live, unmittelbar nach Entstehung, in die OKIT-Cloud ausgeleitet, wo sie über den Webbrowser zur weiteren Analyse verfügbar sind.

## 2.3. Kooperative Datenplattform

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die OKIT-Cloud-Plattform als ein essenzielles Werkzeug für den Austausch von Messdaten, Dateien, Diagrammen und Dokumentationen sowie für die gemeinsame Bearbeitung von Office-Dokumenten eingesetzt. Diese Plattform ermöglichte eine effiziente und sichere Verwaltung und gemeinsame Nutzung der Forschungsdaten.

Eine sinnvolle Eigenschaft der OKIT-Cloud war die Möglichkeit, in Echtzeit an Office-Dokumenten zu arbeiten, Diagramme zu erstellen und Whiteboards gemeinsam zu nutzen. Dateien und Daten konnten, so die Projektpartner dies nutzen wollen, live auf die eigenen Laptops, Server, Handies etc. synchronisiert werden, so dass die Daten instantan auch lokal verfügbar gemacht wurden. Diese Funktionen förderten die Zusammenarbeit und ermöglichten es den Teammitgliedern, Ideen schnell auszutauschen und zu diskutieren. Unter anderem die Prozessarchitektur des Offline-Zwillings und die Datenschnittstellen zwischen den einzelnen Offline-Prozess-Komponenten ist so entstanden, bei dem sich sehr viele Projektpartner eng

miteinander abstimmen mussten. Darüber hinaus wurde die Webmeeting-Funktion genutzt, um Meetings direkt über die Plattform abzuhalten. Diese Funktion verbesserte die Kommunikation zwischen den Projektpartnern erheblich und trug dazu bei, Zeit und Reisekosten zu sparen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt war die Sicherheit und Zugriffskontrolle, die die in Deutschland betriebene OKIT-Cloud bot. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass nur autorisierte Personen auf sensible Forschungsdaten zugreifen konnten und die Kommunikation zwischen den Projektpartnern und zwischen den technischen Komponenten stark gesichert ablief, was den Schutz des geistigen Eigentums und unter Einhaltung von Datenschutzbestimmungen gewährleistete.

Hilfreich war die Möglichkeit, Daten aus den IT-Prozessen live in die OKIT-Cloud zu übertragen. INP-Dateien, sowie Software- und Datenartefakte konnten über die Cloud leicht unter den Projektpartnern und zwischen den IT-Ressourcen ausgetauscht werden. Dies ermöglichte kürzere Entwicklungszyklen und eine unmittelbare Weitergabe von Ergebnissen an die beteiligten Projektpartner und es ermöglichte schnellere Entwicklungsiterationen und fundierte Entscheidungen auf Grundlage aktueller Daten. Die benutzerfreundliche Oberfläche von der OKIT-Cloud erleichterte die Navigation und Nutzung erheblich, was die Einarbeitungszeit der Forschungspartner reduzierte und die Anwendung der Plattform vereinfachte.

Insgesamt erwies sich OKIT-Cloud als wertvolle Ressource für das multidisziplinäre Forschungsteam. Diese Plattform führte zur Effizienz in der Zusammenarbeit bei gleichzeitiger Sicherheit und ermöglichte die effektive Bewältigung komplexer Forschungs- und Entwicklungsaufgaben. Es ist auch zu erwähnen, dass die Projektbearbeitung in die Zeit der Corona-Maßnahmen gefallen ist und das Vorhandensein einer vernetzenden Cloud die coronabedingten Komplikationen zumindest teilweise ausgleichen konnte.

Als weitere Ressource der Kooperativen Datenplattform der OKIT wurde im Rahmen des Forschungsprojekts das Jupyter Lab angeboten, um interaktive Auswertungen der erfassten Daten zu realisieren. Diese Plattform ermöglichte es, komplexe Datensätze auf eine effiziente und flexible Weise zu analysieren. Jupyter Lab bot die Möglichkeit, Python-Code in interaktiven Notebooks zu schreiben und auszuführen, was eine detaillierte Datenanalyse und Visualisierung erlaubte. Dies erwies sich als äußerst nützlich, um Einblicke in die gesammelten Forschungsdaten zu gewinnen.

Die interaktiven Funktionen von Jupyter Lab erlaubten es den Forschern, in Echtzeit mit den Daten zu interagieren, verschiedene Analysen durchzuführen und die Ergebnisse direkt zu visualisieren. Dies beschleunigte den Analyseprozess erheblich und ermöglichte fundierte Entscheidungen auf Grundlage der Daten. Darüber hinaus ermöglichte Jupyter Lab die Dokumentation der Analyseprozesse in Form von Markdown-Notizen, was die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse verbesserte.

Für die Software-Artefakte wurde ein Sourcecode-Repository in der OKIT-Cloud bereit gestellt. Der Offline-Prozess und Software-Artefakte der Projektpartner wurden hier systematisch hinterlegt, versioniert und zwischen Entwicklung und Testbetrieb, zwischen Entwicklern und Maschinen sicher und vollständig ausgetauscht.

Die Cloud wurde auch genutzt, um den bundesweit verteilt arbeitenden Projektpartnern Zugriff auf ihre eigenen im Trailer verbauten Hardwarekomponenten zu ermöglichen. So wurde die Kamera angebunden, der Zugriff auf den Speedgoat implementiert und die Softwareupdates über die Ferne auf den Sensorknoten im Sensornetzwerk ermöglicht. Nicht zuletzt dieses Fähigkeit der OKIT-Cloud hat die Erprobung der Entwicklungen der Projektpartner beschleunigt ohne aufwändige Anreisen notwendig zu machen.



### 3. Modellbasierte Zustandsschätzung

#### 3.1. Straßenanregung

Auf Basis von Messdaten einer Testfahrt auf der DAF-Teststrecke (Eindhoven, NL) wurden mit dem MKS-Modell (Offline-Zwilling) der Partner Iterationen zur Generierung bzw. Rückrechnung des entsprechenden Straßenprofils der Teststrecke durchgeführt.

Die dabei zunächst angewandten Iterationsstrategien beruhten auf manueller, Experten-basierter Einstellung der Verfahrensparameter je Iteration und zeigten erfolgreich das große Potential der Methodik auf, um bestmögliche Übereinstimmung in den betrachteten Zielgrößen (Targets, in diesem Fall primär vertikale Messradkräfte und modale Federwege) zu erreichen.

Auch unterschiedliche automatisiert ablaufende Iterationsstrategien wurden implementiert, getestet und zeigten unter Betrachtung der gleichen Targets hinsichtlich betriebsfestigkeits-relevanter Qualitätskriterien und der Rechenintensität zufriedenstellende Ergebnisqualität.

Im späteren Betrieb werden vertikale Messradkräfte und Federwege auf Grund der kostenintensiven Messapparatur planmäßig nicht mehr zur Verfügung stehen, sondern lediglich Vertikalbeschleunigungen an den Achsen des Trailers. Daher wurden im finalen Stand die Vertikalbeschleunigungen an der ersten Achse des Trailers als Targets betrachtet und entsprechende Iterationsstrategien qualifiziert, hinsichtlich Robustheit und Ergebnisqualität weiterentwickelt und entsprechend analysiert.

Das MKS-Modell der Partner wurde darüber hinaus für das adaptierte Verfahren der iterativ lernenden Regelung zur Berücksichtigung einer zeitlich variablen Geschwindigkeit erweitert und in den vorgesehenen Prozess integriert. D.h. im Identifikations-Schritt wird das frequenzbasierte lineare Modell immer noch auf Basis einer konstanten Fahrgeschwindigkeit abgeleitet, während bei der Rückrechnung des entsprechenden Straßenprofils im Iterations-Schritt mit variabler Fahrgeschwindigkeit das Straßenprofil so mitbewegt wird, dass die relative Geschwindigkeit zwischen Zugmaschine/KingPin und Straße der konstanten Geschwindigkeit aus der Identifikation entspricht (siehe Abbildung 31).

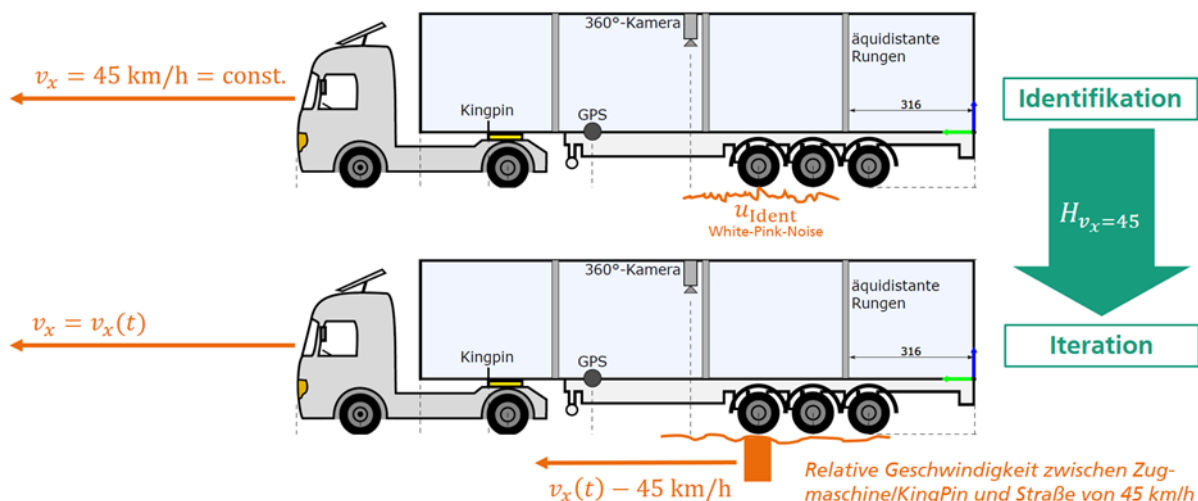


Abbildung 31: Variable Geschwindigkeit  $v(t)$  und mitbewegtes Straßenprofil

Die entsprechenden Tests lieferten insbesondere auf Basis der simulierten Daten sehr gute Resultate und zeigten insgesamt die Funktionalität des methodischen Ansatzes, so dass dieser im weiteren Verlauf für die Integration in den gesamten IdenT-Prozess weiterentwickelt und weitere automatisierte Iterationsstrategien abgeleitet wurden.

Die Integration der Rückrechnung des Straßenprofils in den gesamten IdenT-Prozess wurde erfolgreich realisiert. So wurden aus den Methoden der iterativ lernenden Regelung zwei

Funktionalitäten (Artefakte: „IdentModel“ & „IterProfile“) im Sinne der konkretisierten Prozesskette entwickelt (siehe Abbildung 47) auf der Ident-Cloud in den Gesamtprozess integriert und validiert. Die Artefakte sind lauffähig und wurden im Zusammenspiel mit den Artefakten der Projektpartner im Gesamtprozess weiter getestet und qualifiziert.

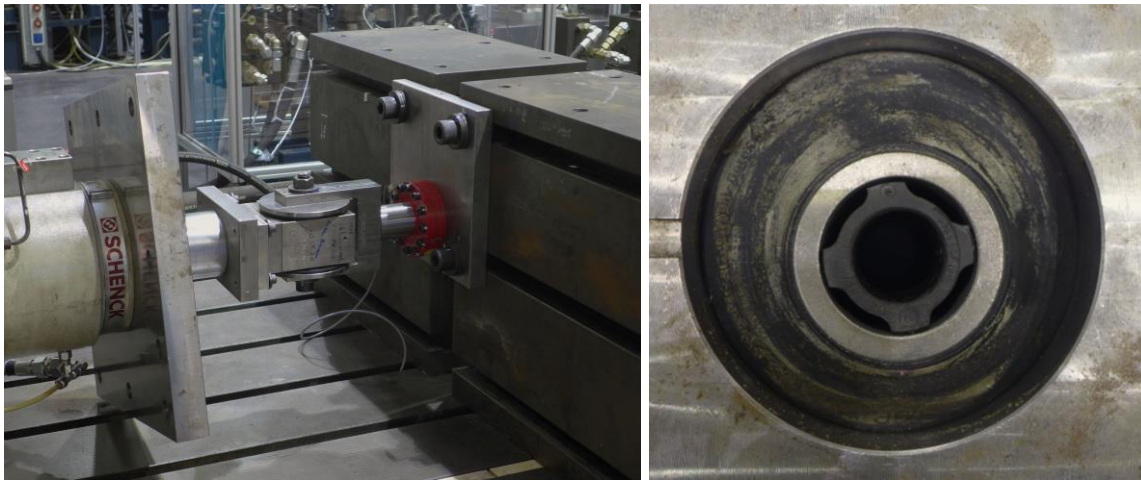
Zusammenfassend wurde die Einbettung der Methodik der Iterativ Lernenden Regelung mit dem MKS-Modell der Projektpartner in die Simulationsumgebung und Prozesskette erfolgreich umgesetzt. Im Rahmen der vorliegenden Randbedingungen (automatisierte Iterationsstrategie, zur Verfügung stehende Messgrößen (vertikale Achsbeschleunigungen) und Modellgüte) ist das Ergebnis genauso erwartbar und daher sehr zufriedenstellend. Die Ergebnisse sind in [7] publiziert.

### 3.2. Algorithmen Trailerzustand

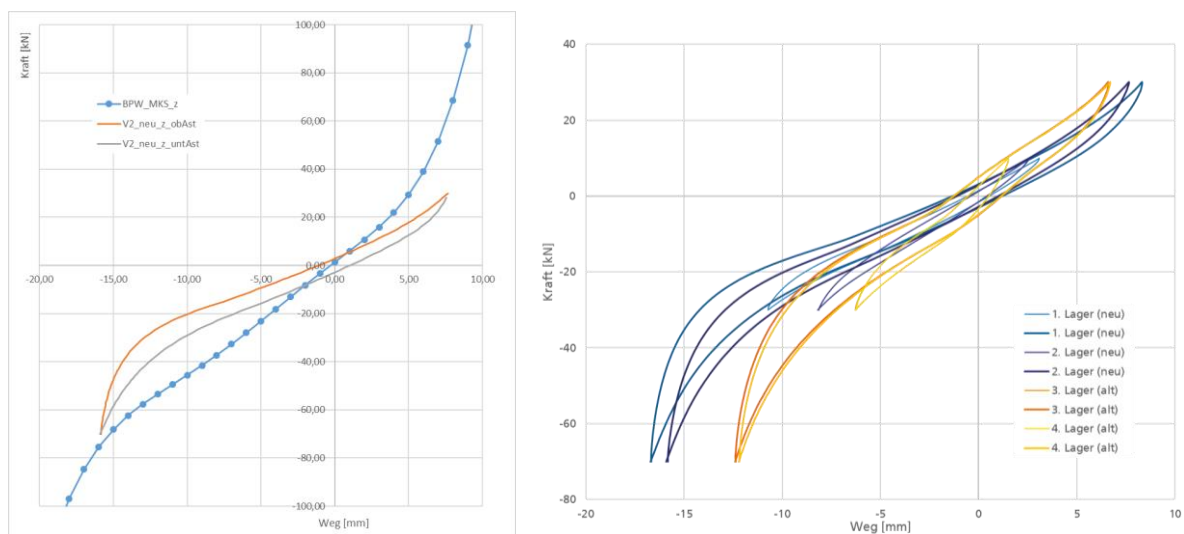
Auf Basis der Komponentenauswahl im AP1 wurden seitens Offline-Zwilling die Algorithmen zur Identifikation der Elastomerlager und der Luftfeder, des Dämpfers und der Bremse entwickelt und implementiert.

Die Arbeiten des Fraunhofer LBF haben sich im Wesentlichen auf das Elastomerlager im Lenkerauge (Trailingarm Buchse) des Trailer-Fahrwerks fokussiert. Auf jeder Achsseite stellt das Elastomerlager die Verbindung zwischen dem Trailingarm des Fahrwerks und dem Trailer-Aufbau dar und übernimmt sowohl longitudinale als auch laterale sowie teilweise vertikale Achslasten. Die quasi-statischen und dynamischen Lagercharakteristiken werden für optimierte Fahrdynamik und Schwingverhalten ausgelegt, da diese Komponente eine wesentliche Rolle in der Achsdynamik spielt. Eine Veränderung solcher Charakteristiken aufgrund von Alterungsphänomenen aber auch von Streuung in der Fertigung führen dazu, dass das dynamische Verhalten und deshalb auch die Belastung des Systems nicht mehr dem Auslegungsprozess entsprechen. Das kann eventuell zu einer Degradation des fahrdynamischen Verhaltens und zu einer erhöhten Belastung des Trailers führen. Eine frühzeitige Identifikation des veränderten dynamischen Verhaltens des Elastomerlagers ist deshalb eine relevante Funktion für ein Diagnose-System, um derartige Systemänderungen zu vermeiden und eine prädiktive Wartung an dieser Stelle durchzuführen.

Für die weiteren Arbeiten im AP 3.2 und im AP 3.3 wurde das Elastomerlager zunächst am Prüfstand am Fraunhofer LBF charakterisiert. In der Abbildung 32 sind der Prüfaufbau und der Prüfling dargestellt. Das Elastomerlager wurde in den zwei radialen Richtungen charakterisiert, die der longitudinalen (x) und vertikalen (z) Richtungen des Fahrzeugs entsprechen. Die Charakterisierung erfolgte sowohl für einen neuen als auch einen gealterten Zustand. Die Ergebnisse der quasi-statischen Charakterisierung in der vertikalen z-Richtung sind in Abbildung 33 dargestellt. Auf der linken Seite ist die gemessene Kraft-Weg-Kennlinie mit der Kennlinie aus dem Datenblatt des Elastomerlagers verglichen. Aufgrund der deutlichen Unterschiede in den Charakteristiken wurde festgestellt, dass das ungealterte und das gealterte Lager verschiedenen Bauständen entsprechen und damit nur eingeschränkt vergleichbar sind. Auf der rechten Seite sind die Ergebnisse verschiedener Stichproben im neuen und gealterten Zustand dargestellt. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden numerische Modelle für das Elastomerlager im neuen und degradierten bzw. nicht nominalen Zustand hergeleitet. Aufgrund der unterschiedlichen Baustände wurden die Kennlinien im degradierten Zustand synthetisch generiert unter Berücksichtigung des Zielstreubandes für die Auslegung sowie den Unterschieden der beiden charakterisierten Baustände. Der somit generierte Verlauf dient dazu sowohl Alterungs- als auch Streuungseffekte aus der Fertigung qualitativ zu berücksichtigen. Mit dieser Datenbasis besteht das Ziel, für die im Projekt entwickelten Identifikationsalgorithmen die Degradation der Elastomerlager unabhängig vom Degradationsphänomen zu erkennen.



**Abbildung 32: Prüfaufbau für die Messung der Elastomerlager (links) und Elastomerlager-Prüfling (rechts)**



**Abbildung 33: Ergebnisse der Elastomerlager-Charakterisierung in der vertikalen Richtung (links) und Vergleich der gemessenen Kennlinien neuer und gealterter Elastomerlager (rechts)**

Das gesamte Konzept der Aktivitäten zur Identifikation des Elastomerlager-Zustands ist in Abbildung 34 dargestellt.

Besonders für die erste Entwicklungsstufe der Algorithmen zur Identifikation des Elastomerlager-Zustands wurden mehrere Simulationen mit dem MKS-Modell inkl. Zugmaschine durchgeführt, in denen die Qualität der Straßenoberfläche sowie Manöver-Parameter variiert und unterschiedlich kombiniert wurden. Um stochastische Effekte zu berücksichtigen, wurden verschiedene Profile der Straße für definierte Qualitätsstufen der Straße mit Random-Prozessen generiert. Die Veränderung des Elastomerlager-Zustands wurde im MKS-Modell mit Implementierung eines Multiplikationsfaktors für die resultierende Kraft künstlich simuliert.

In der letzten Projektphase wurden auch die Messdaten aus den ATP-Messungen (März und Mai 2022) mit dem Ganzfahrzeug berücksichtigt. Die Messungen der ersten Kampagne in März wurden mit dem Trailer in nominalen Zustand (inkl. Elastomerlager) durchgeführt. Im Mai wurden Messfahrten mit unterschiedlichen gealterten bzw. beschädigten Komponenten durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden beschädigte Elastomerlager an der ersten Achse eingebaut.

Auf Basis der Simulations- und Messdaten wurden sowohl Physik-basierte als auch KI-basierte Identifikationsalgorithmen für den Elastomerlager-Zustand entwickelt. Die Definition

der Inputdaten ist eng mit den verfügbaren Messdaten gekoppelt. In Abbildung 35 sind die an der Achse verfügbaren Messstellen dargestellt, die für die Identifikation des Elastomerlager-Zustands relevant sind. Im Wesentlichen wurden die Achsbeschleunigungen relativ zum Aufbau als relevante Größen verwendet, da diese die Information der Veränderung der dynamischen Eigenschaften der Elastomerlager tragen.

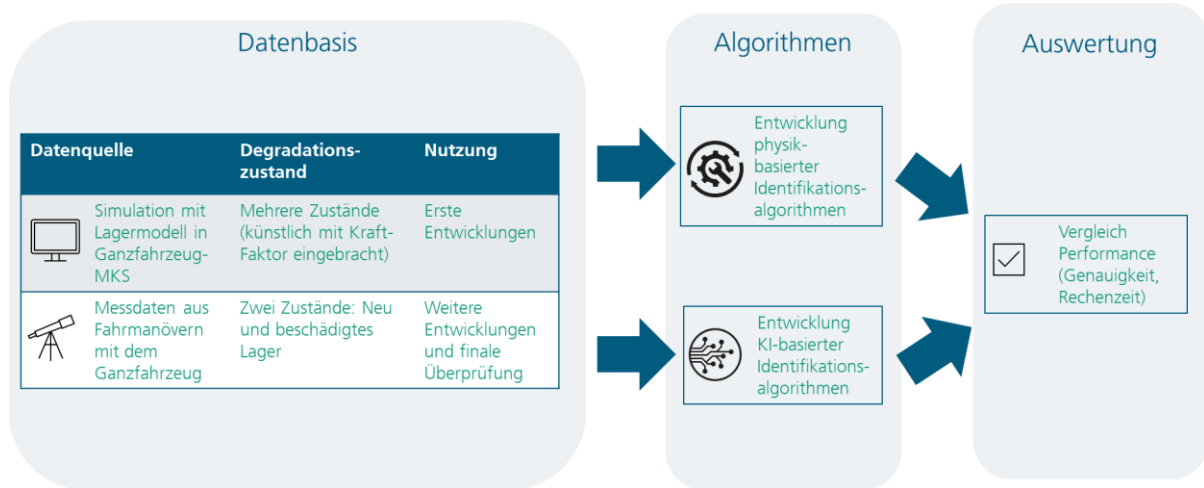


Abbildung 34: Konzept und Arbeitsplan zur Identifikation des Elastomerlager-Zustands

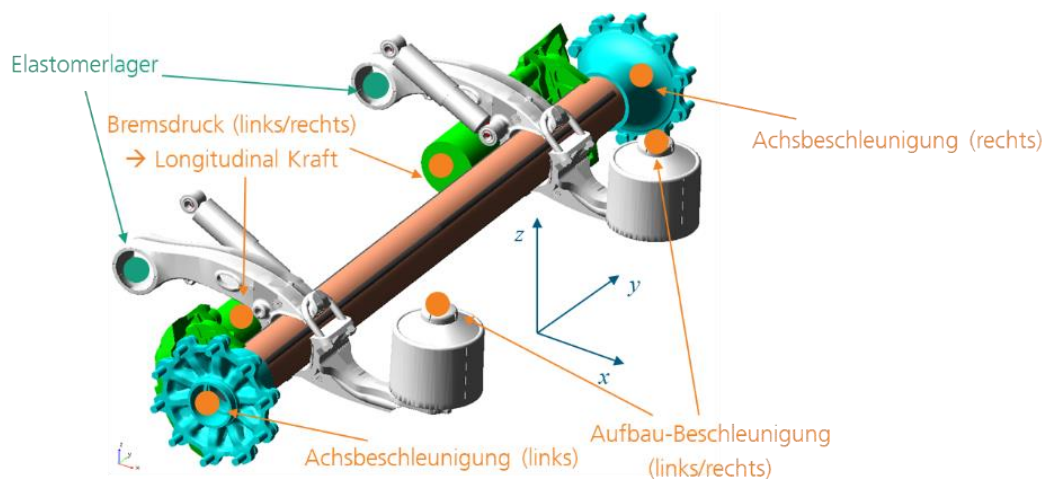


Abbildung 35: MKS-Modell der Achse mit markierten Sensorstellen, die für die Identifikation des Elastomerlager-Zustands relevant sind

Pipeline	Datensatz	Frequenz	quantitative Metriken									
			Laufzeit (Eine Iteration)				Gesamte Laufzeit der Kreuzvalidierung (CV)				Accuracy	
			Datenvor-bereitung	Feature Extraction	Training	gesamt	Datenvor-bereitung	Feature Extraction	Training	gesamt	Training Accuracy	Test Accuracy
MiniRocket + Ridge Classifier	sliding window (30 Sek., 96% Überlappung)	1000	01:09:28	01:09:08	00:05:52	2:24:28	01:09:28	05:45:41	00:29:21	7:24:30	0,9922	0,9831
MiniRocket + Random Forest	sliding window (30 Sek., 96% Überlappung)	1000	01:09:28	01:09:08	00:22:24	2:41:00	01:09:28	05:45:41	01:51:59	8:47:08	0,9923	0,9823
MiniRocket + SVM	sliding window (30 Sek., 96% Überlappung)	1000	01:09:28	01:09:08	04:59:56	7:18:32	01:09:28	05:45:41	24:59:38	31:54:47	0,9905	0,9904
Mcfly-AutoML	sliding window (30 Sek., 96% Überlappung)	1000	00:43:39	00:00:00	02:08:00	2:51:39	-	-	-	-	0,9908	0,9891

Abbildung 36: Ergebnisse der Identifikation des Elastomerlager-Zustands auf Basis KI-Methoden (Training- und Test-Daten aus MKS-Ergebnissen)

Pipeline	Datensatz	Frequenz	quantitative Metriken									
			Laufzeit (Eine Iteration)				Gesamte Laufzeit der Kreuzvalidierung (CV)				Accuracy	
			Datenvor- bereitung	Feature Extraction	Training	gesamt	Datenvor- bereitung	Feature Extraction	Training	gesamt	Training Accuracy	Test Accuracy
MiniRocket + Ridge Classifier	sliding window (30 sec., 25% Überlappung)	100	00:12:23	00:00:14	00:00:15	00:12:52	00:12:23	00:01:10	00:01:16	00:14:49	1,0000	0,9986
MiniRocket + Ridge Classifier	sliding window (30 sec., 96% Überlappung)	100	03:09:00	00:04:48	00:06:55	03:20:44	03:09:00	00:24:02	00:34:36	04:07:38	1,0000	1,0000
MiniRocket + Random Forest	sliding window (30 sec., 96% Überlappung)	100	03:09:00	00:04:48	00:14:32	03:28:20	03:09:00	00:24:02	01:12:39	04:45:41	1,0000	1,0000
MiniRocket + SVM	sliding window (30 sec., 96% Überlappung)	100	03:09:00	00:04:48	03:44:45	06:58:34	03:09:00	00:24:02	18:43:47	22:16:49	1,0000	1,0000
McFly-AutoML: InceptionTime	sliding window (30 sec., 50% Überlappung)	100	00:19:14	00:00:00	00:09:17	00:28:31	00:19:14	00:00:00	00:46:23	01:05:37	1,0000	1,0000

**Abbildung 37: Ergebnisse der Identifikation des Elastomerlager-Zustands auf Basis KI-Methoden (Training- und Test-Daten aus Messdaten)**

Die KI-basierten Identifikationsalgorithmen für den Elastomerlager-Zustand wurden im Berichtszeitraum am Desktop-Rechner final umgesetzt und erfolgreich getestet. Hierfür wurden Algorithmen zur automatisierten Feature-Extraction mit verschiedenen Machine Learning-Methoden kombiniert. Darüber hinaus ist eine Pipeline basierend auf McFly-AutoML entwickelt worden, die Machine Learning Modelle direkt aus den Inputdaten ohne vorherige Feature-Extraction automatisiert erstellt. Die Ergebnisse der unterschiedlichen implementierten Pipelines sind in Abbildung 36 für Inputdaten aus den MKS-Ergebnissen und in Abbildung 37 für die Daten aus Messungen zusammengefasst. Die Inputdaten der einzelnen Manöver wurden mit 1000 Hz (MKS), bzw. mit 100 Hz (Messung), abgetastet und mit einem *Sliding Window* Verfahren in kleinere Datensätze aufgeteilt. Alle Pipelines wurden mit dem etablierten Verfahren der Kreuzvalidierung in 5 verschiedenen Kombinationen von Training- und Testdaten sortiert, wobei die Aufteilung Training/Test jeweils 80/20 beträgt. Das ermöglicht eine finale Bewertung der Genauigkeit der KI-Modelle, die nicht direkt von einer bestimmen Aufteilung der Training- und Testdaten abhängt. Die Ergebnisse der Test-Genauigkeit (*Accuracy*) zeigen, wie gut die entwickelten Methoden den Zustand der Elastomerlager schätzten, besonders bei den Messdaten. Hier ist der Unterschied des Elastomerlager-Verhaltens zwischen den zwei getesteten Zuständen (neu und beschädigt) markant, sodass die KI-Methoden ihn sehr gut identifizieren können. In der MKS sind die unterschiedlichen Zustände der Elastomerlager künstlich mit einem Steifigkeitsfaktor simuliert, wobei der Faktor von 0,5 bis 1,5 variiert und kleinere Abweichungen zum nominalen Zustand darstellt. Die Test-Genauigkeit ist dennoch auch mit diesen Daten sehr hoch.

Für die finale Umsetzung eines KI-basierten Algorithmus zur Identifikation des Elastomerlager-Zustands wurde die auf MiniRocket mit Ridge Classifier basierte Pipeline implementiert. Der final entwickelte Algorithmus wurde als Python Code für die Implementierung auf die Offline-Zwilling-Cloud geliefert, ohne dass eine weitere Kompilierung notwendig war. Die final implementierte Funktion liest als Input die INP-Datei (siehe AP 4.5) und importiert die Zeitreihen der Achsbeschleunigungs-Messungen aus der Datei. Als Ergebnis liefert sie einen Report in Form einer Text-Datei. Ein Beispiel davon ist in der Abbildung 38 dargestellt, in dem die Elastomerlager sich im neuen Zustand befanden. Jedes Lager wurde von der Funktion ausgewertet und sein Zustand (neu oder degradiert bzw. alt) geschätzt. Wie im Beispiel zu sehen ist, wurden die Elastomerlager, bis auf einzelne Ausnahmen, immer als neu für alle betrachteten 20 s Zeitfenster des Manövers identifiziert.



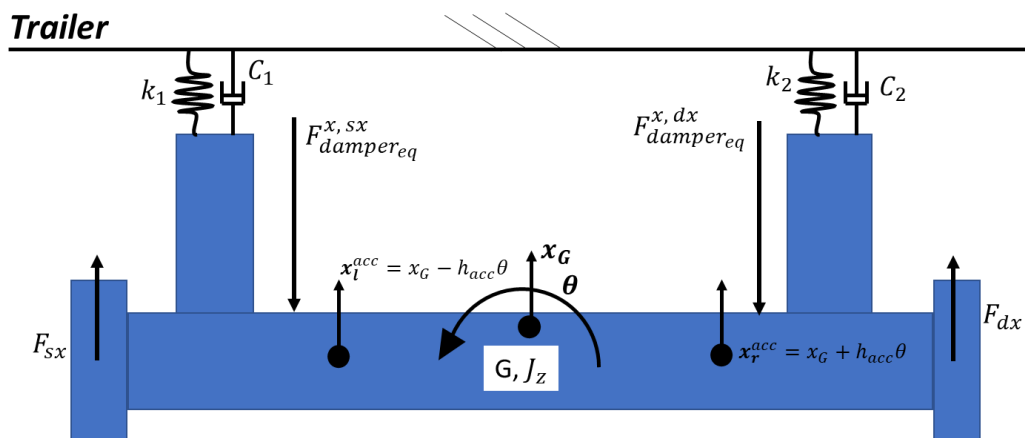
Das Lager jeder Achse wird jeweils auf Intervallen mit einer Länge von 20 s ausgewertet.  
 Ein negativer Wert bedeutet, dass ein Lager als neu identifiziert wurde. Ein als alt identifiziertes Lager wird mit einem positiven Wert gekennzeichnet.  
 Je höher der Betrag, desto sicherer ist die Identifikation.

Links Achse 1:	[ -0.8716378   -0.18893155   0.27387363   -0.43589014 ]
Rechts Achse 1:	[ -0.4040096   -0.18443975   0.07769897   -0.3374313 ]
Links Achse 2:	[ -1.650338   -1.2908227   -1.1714602   -1.4037192 ]
Rechts Achse 2:	[ 0.2752738   -0.37792864   -0.4040526   -0.61188006 ]
Links Achse 3:	[ -1.0149534   -1.1475877   -0.13057876   -1.1191599 ]
Rechts Achse 3:	[ -1.2793498   -0.9216213   -1.1591202   -1.3096479 ]

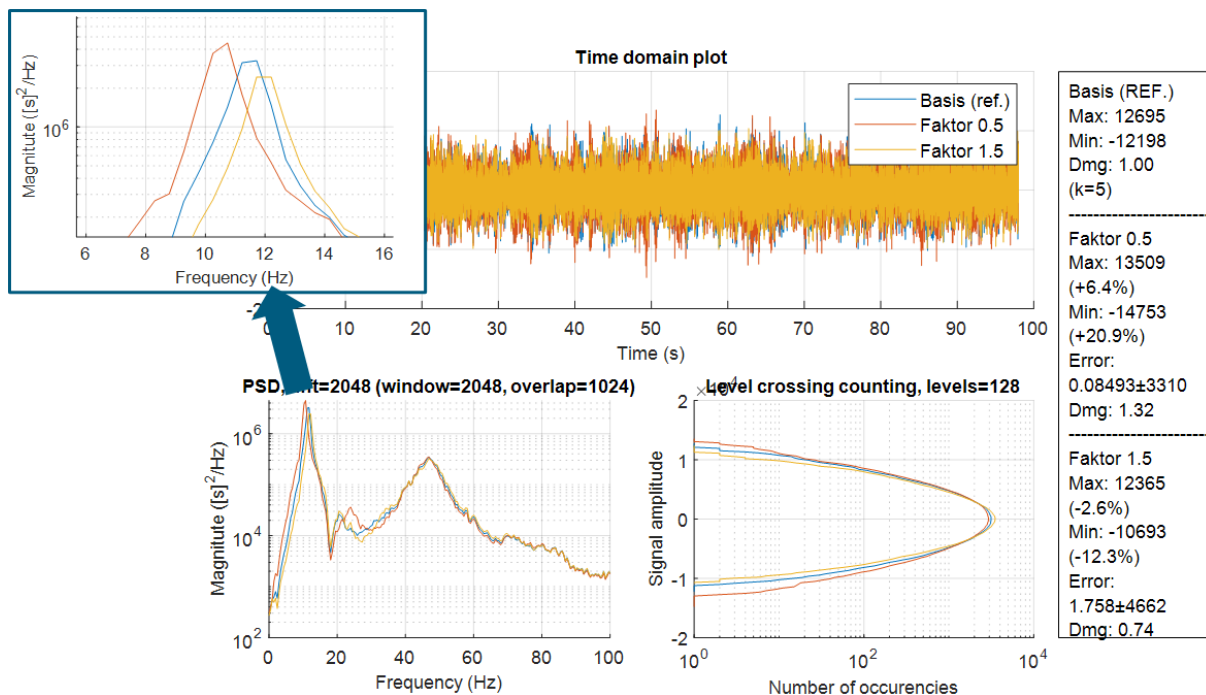
**Abbildung 38: Beispiel der Output-Datei der KI-basierten Funktion zur Identifikation des Elastomerlager-Zustands**

Die parallele Entwicklung der Physik-basierten Identifikationsmethoden basierte auf dem vereinfachten physikalischen Modell der Achse, das in Abbildung 39 dargestellt ist. Die Achse wurde als Starrkörper modelliert und zusammen mit den Elastomerlagern als schwingendes System in der x-y-Ebene analysiert. Eine wichtige Rolle spielen hier die Dämpfer, die aufgrund des Einbauwinkels eine wesentliche Komponente der Kraft in der x-Richtung haben. Die Steifigkeits- und Dämpfungskoeffizienten der Elastomerlager wurden dabei mit einem Kalman Filter identifiziert. Der Fokus der Schätzung lag hier bei dem ersten Peak des Frequenz-Spektrums der Achsbeschleunigung in der x-Richtung. Wie in Abbildung 40 zu sehen ist, wird sowohl die Frequenz als auch die Amplitude des Peaks von den Elastomerlager-Eigenschaften beeinflusst. Die Identifikation solcher Parameter basiert nach diesem Ansatz auf der Minimierung der Abweichung des Frequenz-Peaks zwischen Messung und Simulation.

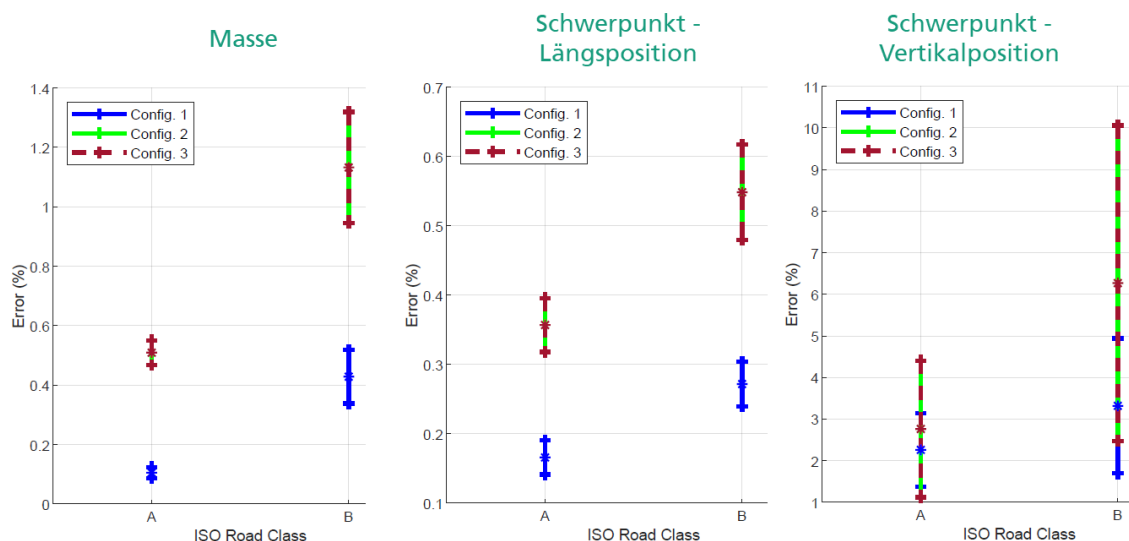
Aufgrund der Qualität der Ergebnisse und der einfacheren Implementierung wurde der KI-basierte Ansatz an dieser Stelle bevorzugt und als einzige Methode final umgesetzt.



**Abbildung 39: Mechanisches Achsmodell für die Physik-basierte Identifikation des Elastomerlager-Zustands**



**Abbildung 40: Ergebnisse der Achsbeschleunigung (A2 links) in einer simulierten Geradeausfahrt mit verschiedenen Kraft-Faktoren des Elastomerlagers**



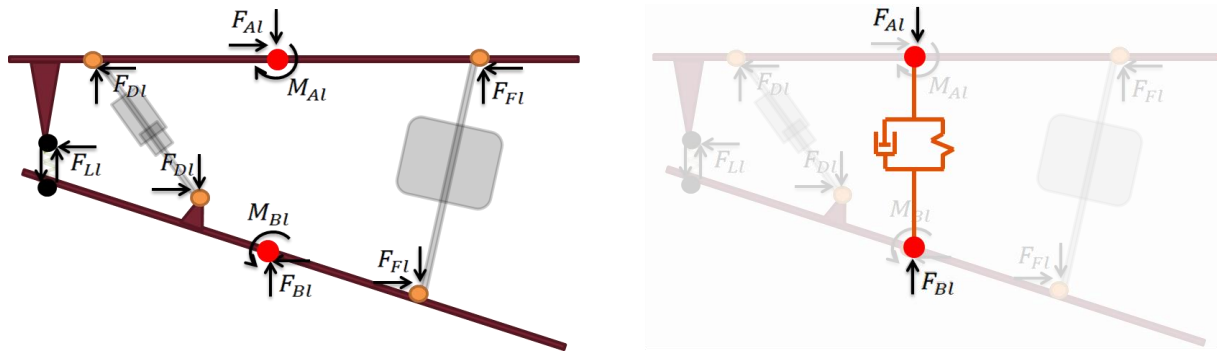
**Abbildung 41: Fehler in der Schätzung einiger Trägheitsparameter des Trailers auf Basis verschiedener Konfigurationen von verfügbaren Sensoren**

Parallel zu den Untersuchungen an der Komponente Elastomerlager wurde das Thema der Schätzung der Trägheitseigenschaften des Trailers im Rahmen einer Masterarbeit in Kooperation mit der Universität Pisa (Italien) untersucht. Verschiedene Hypothesen bzgl. Verfügbarkeit von Sensoren wurden präsentiert und deren Einflüsse auf die Genauigkeit der Schätzung der Trägheitsparameter ausgewertet. Als Beispiel zeigt Abbildung 41 die Ergebnisse für die Parameter Masse, Schwerpunkt-Längsposition und -Vertikalposition. Die Konfigurationen unterscheiden sich bzgl. der Verfügbarkeit der Messungen der Dämpferwege (gemessen in Config. 1, geschätzt in Config. 2 und 3) und der Rad-Einfederungen (gemessen in Config. 1 und 2 und geschätzt in Config. 3).

Als vertikaldynamisch relevante Komponenten wurden in AP 1 die Luftfedern, Dämpfer und Bremsen identifiziert. Zur Identifikation dieser Komponenten wurden vorhandene Komponentenmodell bei Industrial Science (Luftfeder, Bremsreaktionskraft) und Literatur

(restliche Komponenten) zu einem Achsmodell zusammengefügt. Das Modell ist ein dreidimensionales, kinematisches Achsmodell. zu berücksichtigen sind hierbei die Radlast, das Bremsmoment, Federkräfte, Dämpferkräfte, Elastomerlagerkräfte und die Übertragung von Kräften über die Luftfederstütze, insbesondere bei Wankanregungen.

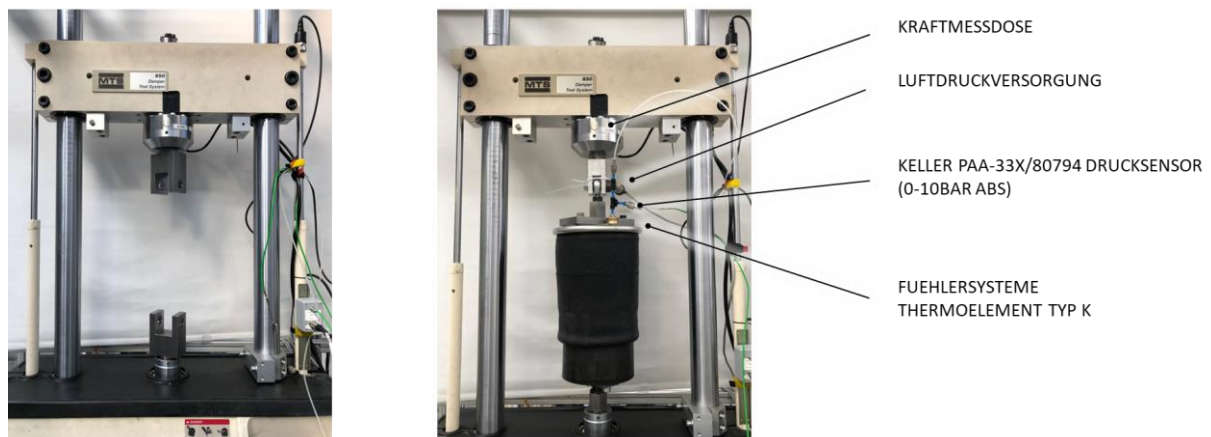
Das kinematische Modell lässt sich für die Applikation im Online-Zwilling auf die vertikale Kraft- und Kinematikkomponenten reduzieren (Abbildung 42).



**Abbildung 42: zweidimensionale Darstellung des kinematischen Achsmodell mit Kraftangriffspunkten und den wirkenden Kräften und Momenten (links). Reduzierung auf die vertikalen Komponenten (rechts).**

Zur Parametrierung des Achsmodells werden geometrische Informationen der Achse benötigt. Diese liegen in Form von Datenblättern vor. Luftfeder und Dämpfer können aus Datenblättern (geringere Qualität), Fahrversuchen (mittlere Qualität) oder aus Komponentenmessungen (höchste Qualität) parametrieren werden. Das Elastomerlager und Nebensteifigkeiten lassen sich am effizientesten über geeignete Fahrmanöver bestimmen.

Als Referenz wurden durch die TU Darmstadt im Unterauftrag für Industrial Science jeweils eine verschlissene, eine neuwertige Luftfeder sowie ein verschlissener und ein neuwertiger Dämpfer vermessen. Die Komponenten wurden von BPW zur Verfügung gestellt. Die Vermessung erfolgte in einem Dämpferprüfstand. Aus den Versuchsergebnissen lassen sich sowohl Daten für die Parametrierung der Modelle, wie auch Erkenntnisse über den Verschleiß der Komponenten und deren Auswirkungen auf die Funktion ableiten.



**Abbildung 43: Luftfeder (links) und Dämpfer (rechts) im Hydropulser Prüfstand an der TU Darmstadt.**

Für die Luftfeder zeigt sich eine Änderung der Tragfläche im verschlissenen Zustand. Für den Dämpfer zeigt sich eine Änderung der Dämpferkennlinie.



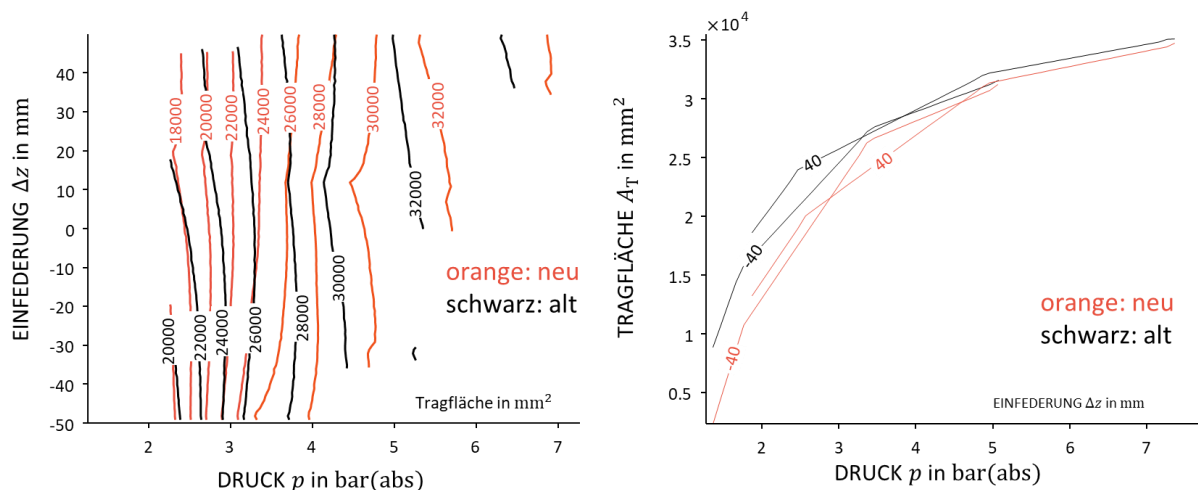


Abbildung 44: Tragflächenänderung mit dem Verschleißzustand.

Zur Identifikation der Zustände wurden zwei Ansätze untersucht. Zum einen die Zustandsschätzung über Sigma-Punkt-Kalmanfilter sowie phänomenologische Ansätze. Für die Zustandsschätzung wurde das Achsmodell in ein vereinfachtes Trailermodell, bestehend aus 3 Achsen und einer Punktmasse im Schwerpunkt integriert. Mit diesem Trailermodell lassen sich unterschiedliche Fahrscenarien und Annahmen (z.B. verschlissene Komponenten) simulieren. Im nächsten Schritt wurde untersucht, ob sich für das Modell Sigma-Punkt-Kalman Filter auslegen lassen. Hierfür stand eine proprietäre Entwicklungsumgebung von Industrial Science zur Verfügung. Mit der zur Verfügung stehenden Sensorik und der Unsicherheit über die Trailermasse, Schwerpunkt und Aufliegekraft konnten jedoch keine zufrieden stellenden Ergebnisse erreicht werden.

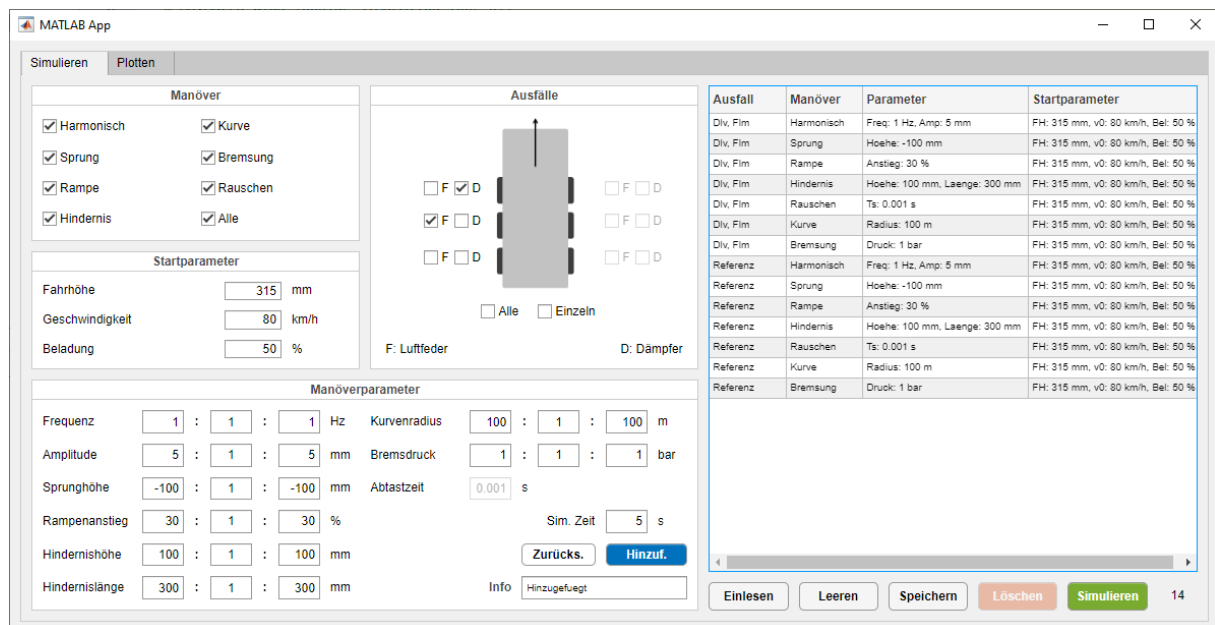


Abbildung 45: Simulationstool, basierend auf dem Trailermodell.

Daher wurden im zweiten Schritt phänomenologische Ansätze untersucht. Diese basieren auf den Auswirkungen verschlissener Komponenten auf das Systemverhalten, bspw. Ausschwingverhalten nach der Überfahrt von Einzelhindernissen. Abgleich von Druck- / Kraftkennlinien für bekannte Beladungszustände, Vergleich von gemessenen Daten mit Simulationsdaten. Über das Simulationstool konnte vorab gezeigt werden, dass diese Ansätze vielversprechend sind.

Eine größere Herausforderung für die Zustandsidentifikation ist die erfolgte Festlegung der Seriensensorik, da im Serienfahrzeug planmäßig keine Federwegsensoren vorgesehen ist, ohne diese jedoch keine zufriedenstellende Modellierung möglich ist. Aus diesem Grund wurde eine Schätzung der Fahrlage aus der Sollfahrhöhe, der Aufbaubeschleunigung und der Rad-/Achsbeschleunigung untersucht. Hierbei ist es jedoch nicht möglich eine Drift des Federwegs – resultierend aus der doppelten Integration – zu verhindern.

Für die Luftfedern waren zu Projektbeginn folgende Versagensmechanismen definiert worden: Leckage, Dehnung / Ablösung des Gewebes, Alterung, Verschmutzung, Bruch der Befestigung. Für den Dämpfer wurden Öl- und Gasdruckverlust sowie ein Bruch der Kolbenstange oder der Befestigung festgelegt. Die unterschiedlichen Versagensmechanismen sind auf Grund theoretischer Überlegungen in der Kraftkurve der jeweiligen Komponenten sichtbar. Beispielhaft ist dies in Abbildung 46 für die Leckage der Luftfeder dargestellt. Um die Verschleißzustände unterscheiden zu können, ist ein Vergleich einer theoretisch (modellbasiert) ermittelten Kraft und der tatsächlichen Kraft im Fahrzeug notwendig. Da sich im Projektverlauf aus Machbarkeitsgründen gegen eine Kraftmessung im Fahrzeug entschieden wurde ist eine Unterscheidung unterschiedlicher Versagensmechanismen für die Komponenten nicht möglich.

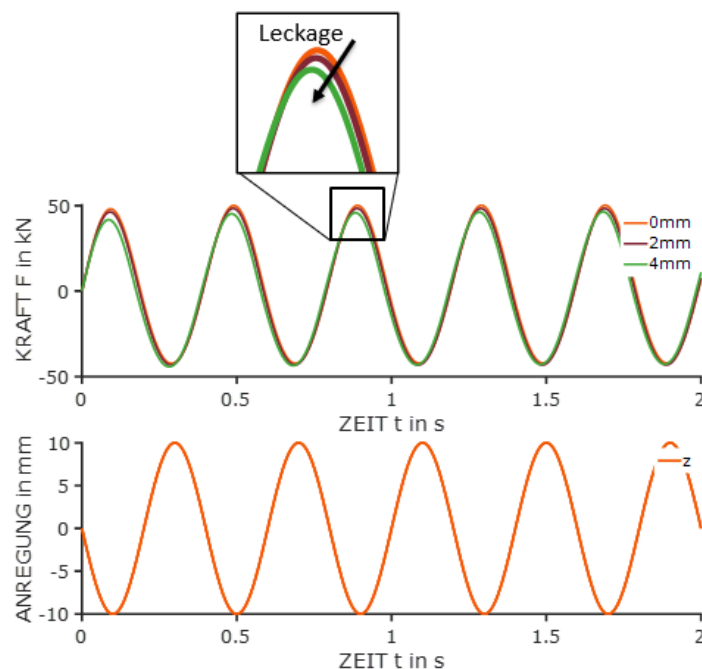


Abbildung 46: Theoretische Auswirkung einer Leckage auf die Kraft der Luftfeder.

Stattdessen wurde ein allgemeiner Verschleißparameter  $\beta$  eingeführt. Dieser verändert im Fall der Luftfeder die Tragfläche (wie in den Komponentenmessungen gesehen)  $A_{T,verschlissen} = \beta_{Feder} A_T$ . Für den Dämpfer ändert sich die Dämpferkonstante  $d_{verschlissen} = \beta_{Dämpfer} d$ .

### 3.3. Digitaler Offline-Zwilling

Im Laufe des gesamten Projekts wurde die Prozesskette zur Umsetzung der einzelnen Prozessschritte des digitalen Offline-Zwillings auf der Cloud mit allen für dieses AP relevanten Projektpartnern unter der Federführung des Projektpartners OKIT intensiv diskutiert, detailliert, implementiert und schrittweise getestet. Durch die Detaillierung wurden an verschiedenen Stellen der Prozesskette Anpassungen im Laufe der letzten Projektphasen erforderlich. Die final resultierende gesamte Prozesskette ist in zwei Abschnitte mit etwas Überlappung unterteilt und in Abbildung 47 und Abbildung 48 dargestellt. Diese grafische Prozessdarstellung wurde vom Projektpartner OKIT als Auslegungsbasis für die Implementierung des Prozesses und der einzelnen Funktionen (Artefakte) auf die Offline-

Zwilling-Cloud permanent gepflegt und in den regelmäßigen Austausch mit den involvierten Partnern zusammen bearbeitet und aktualisiert.

Die Prozessarchitektur lehnt sich an der grafischen Darstellung von Automaten an. Es gibt einen definierten Start des Prozesses, der durch die Bereitstellung von Datenartefakten vom Online-Zwilling ausgelöst wird. In der Folge werden Daten in einzelnen sequentiell nacheinander folgenden Prozessschritten verarbeitet. Zwischenzeitlich werden Entscheidungen zu Iterationen und alternativen Prozessabläufen getroffen. Weitere Artefakte, die zur Übergabe von dynamischen Daten verwendet wurden, wurden über klare Bildsprache ebenfalls kenntlich gemacht und mit den betroffenen Prozessschritten verbunden. Statische Artefakte und solche, die zwischen einzelnen Betrachtungen des individuellen Trailers zwischengesichert wurden, wurden ebenfalls visualisiert. Diese Form der Prozessarchitektur und deren Visualisierung war gewählt worden um eine effiziente Abstimmung der Projektpartner untereinander zu gewährleisten. Jeder Projektpartner konnte so an der Prozessarchitektur erkennen, welche Artefakte ihm für seinen Prozessschritt zur Verfügung stehen und welcher er für die folgenden Schritte liefern musste. Gleichzeitig konnte diese Architektur einfach in eine skalierbare und parallelisierbare Implementierung überführt werden.

Im Ausschnitt 1 (Abbildung 47) wird als wesentlicher Startpunkt für die Mehrkörpersimulation (MKS) des Offline-Zwilling die INP-Datei (siehe AP 4.5) erstellt. Diese enthält alle relevanten variablen Parameter, die Anregungsdaten und Verifikationsdaten (als Zeitreihen) aus dem Online-Zwilling bzw. den Messdaten.

Die INP-Datei sind zusammengesetzte Informationen aus den Messdaten- und Parameterdaten-Kanälen des Online-Zwilling. Die effizient und binär übertragenen Daten werden zunächst aufbereitet und menschenlesbar in eine Textdatei überführt, die auch gleichzeitig die Input-Datei (INP-Datei) für die folgenden Prozesse ist. Der SCADA-Proxy und der von BPW bereit gestellte INP-Konverter arbeiten hier Hand in Hand.

Eine erste Entscheidung zum Prozessablauf (visualisiert durch den Diamanten, eine auf der spitze stehende Raute) wird bereits früh getroffen. Anhand eines in der INP-Datei hinterlegten Triggers wird entweder an den Identifikations-Prozessschritt von InS übergeben, oder an die weiteren Prozessschritte weiter gegeben. Im Falle des Identifikations-Prozessschrittes werden auch Parameter für den Online-Zwilling erzeugt und zurück übermittelt. Je nach weiteren Trigger-Merkmalen werden die übrigen Folgeprozessschritte angesteuert oder nach der Rückübermittlung der Online-Parameter der Prozess auch schon wieder beendet.

Im untersten Teil des Ausschnitts 1 erfolgt das Update des MKS-Modells für die Simulation des aktuellen Abschnitts. Zunächst wird die Entscheidung mit dem Artefakt FlagSchreiben getroffen, ob signifikante Änderungen an der Modellparametrierung, beispielsweise durch die Beladungsänderung, aufgetreten sind, welche eine erneute Identifikation des Übertragungsmodells für die Straßenprofiliteration (Artefakt IdentModel) erfordern würde. Falls das nicht erforderlich ist, kann der Prozess der Straßenprofiliteration direkt initiiert werden. Für jede Simulation des MKS-Modells werden die erforderlichen Eingangsdaten (Reifen, Straße, Anregung usw.) in Form von spezifischen Dateien mit vordefiniertem Format bereitgestellt. Die Funktion ModellUpdate dient als zentrales Prozesselement für diese Phase. Diese erstellt automatisiert die vom Adams-Solver benötigten Input-Dateien für die Simulation eines Abschnittes auf Basis der aktuellen INP-Datei und des Basis-Modells, das als statische Datei archiviert ist. Angepasst werden dafür die Zeitreihen der Input-Signale sowie einige variable Parameter (wie z.B. die Masse und die Schwerpunktlage des Trailers). Dazu werden alle weiteren benötigten Dateien im Modell verlinkt.

Der Ausschnitt 2 (Abbildung 48) beinhaltet den eigentlichen Prozess der MKS (Adams Solver) einschließlich der iterativen Bestimmung des Straßenprofils (Projektpartner ITWM). Die Rückrechnung des Straßenprofils anhand von Messdaten der INP-Datei (sofern der ITWM-

Trigger ein Straßensegment entsprechender Rauigkeit detektiert hat) basiert auf Methoden der iterativ lernenden Regelung und wird durch die beiden Artefakte IdentModel und IterProfile realisiert. Nachdem die dafür benötigte frequenzbasierte Übertragungsfunktion des MKS-Modells mittels IdentModel berechnet oder aktualisiert (siehe Entscheidung mit dem Artefakt FlagSchreiben) wurde, wird das Straßenprofil in einem iterativen Prozess mittels IterProfile als Systemeingang für das MKS-Modell berechnet. Je Iteration liefert IterProfile als Rückgabewert die Entscheidung über eine weitere Iteration oder die Beendigung des Iterationsprozesses, falls die maximale Iterationszahl (einstellbarer Prozessparameter) erreicht ist oder die implementierten Güte- bzw. Abbruchkriterien erfüllt sind. Bei Beendigung des Iterationsprozesses wird der letzte Stand, d.h. das aktuelle Straßenprofil und die entsprechenden Resultate der MKS-Simulation, an die daran anschließende Betriebsfestigkeitsanalyse (Projektpartner LBF) weitergereicht.

Zur Erhöhung der Prozessstabilität wurde die Funktion CheckSimulation erstellt und integriert. Diese Funktion fängt einen Abbruch der Mehrkörpersimulation, beispielsweise aufgrund unzureichender numerischer Konvergenz, automatisiert ab und startet den Simulationsprozess mit modifizierten Prozessparametern erneut. Nach abgeschlossener Simulation des aktuellen Abschnitts (inkl. Straßeniteration) werden die Ergebnisse der MKS ausgewertet. Die Funktion Plausibilisierung vergleicht einige definierte Signale der MKS-Ergebnisse mit den entsprechenden Kanälen der Messdaten aus der INP-Datei, um die Plausibilität der durchgeführten Simulation zu prüfen. Ein Report wird in Form einer Text-Datei generiert, die einige skalare Metriken (wie z.B. die relative Pseudo-Schädigung der Signale) beinhaltet. Im Fall einer positiven Plausibilisierung werden im finalen Artefakt BF-Auswertung die im AP 3.5 definierten Lastsignale aus den MKS-Ergebnisse mit einer betriebsfestigkeitsbasierten Schadensakkumulation ausgewertet. Auch diese Funktion generiert ein Report als Text-Datei, die zusammen mit anderen Ergebnisdateien am Ende des gesamten Aufrufs des Offline-Zwilling-Prozesses für spätere Auswertungen archiviert wird.



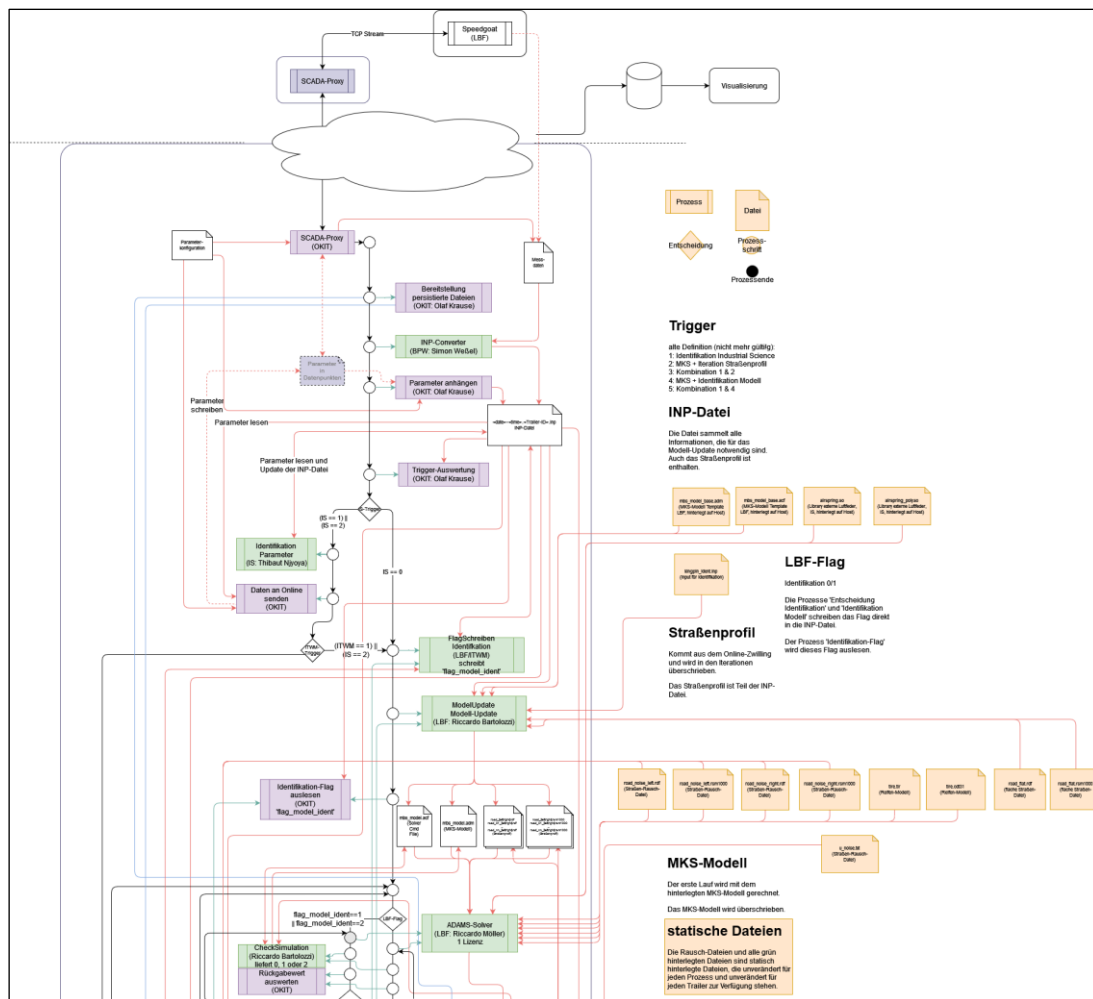


Abbildung 47: Ausschnitt 1 des gesamten Prozesses des Offline-Zwillings

Die einzelnen Artefakte wurden bei den im Offline-Zwilling involvierten Partnern in der Matlab-Umgebung als native Matlab-Funktionen konzipiert und entwickelt. Um diese Funktionen als ausführbare Dateien für die Cloud-Umgebung (d.h. Linux 64 bit Ubuntu 18.04 Betriebssystem) zu erstellen, wurde ein auf dem *Matlab Coder* (Matlab-Toolbox) basiertes Implementierungsverfahren entwickelt und umgesetzt. Dieses ist in Abbildung 49 dargestellt. Mit dem *Matlab Coder* wird automatisiert die Matlab-Funktion in C-Code übersetzt und kompiliert. Die dafür benötigte Entwicklungsumgebung wurde in einem zum Cloud-System äquivalenten Linux-Rechner am Fraunhofer LBF umgesetzt.

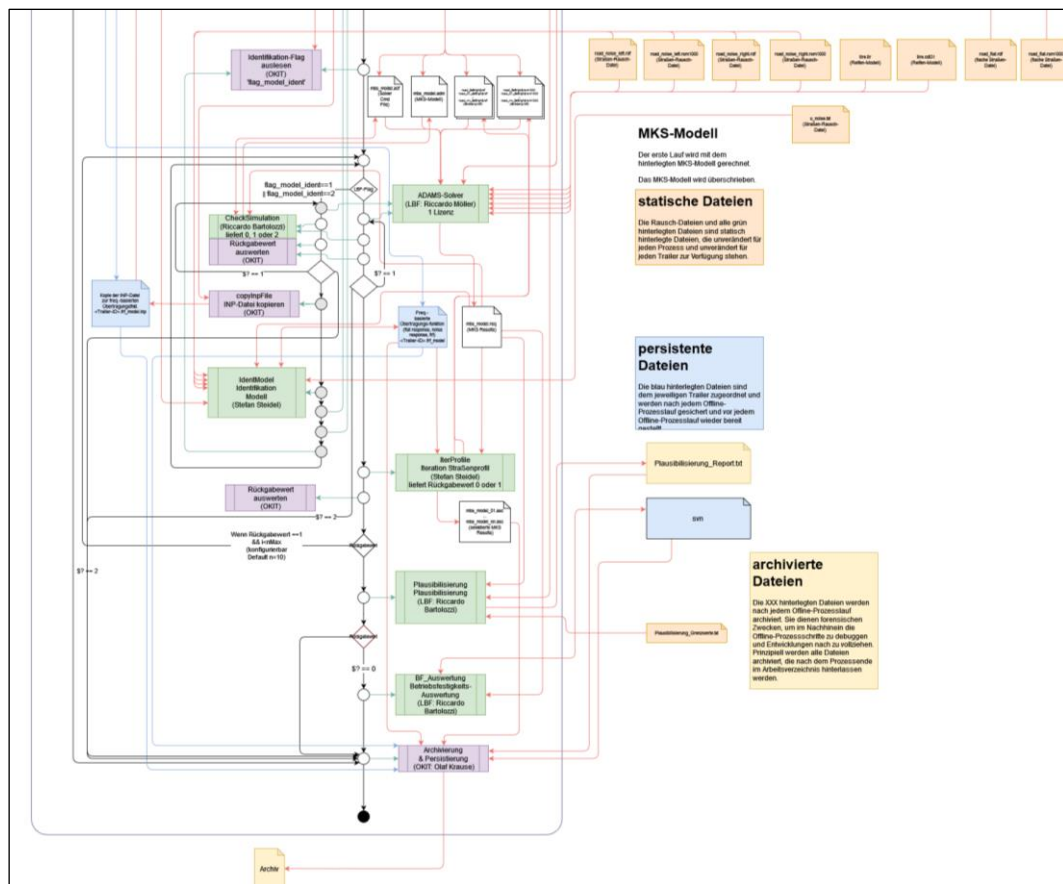


Abbildung 48: Ausschnitt 2 des gesamten Prozesses des Offline-Zwilling

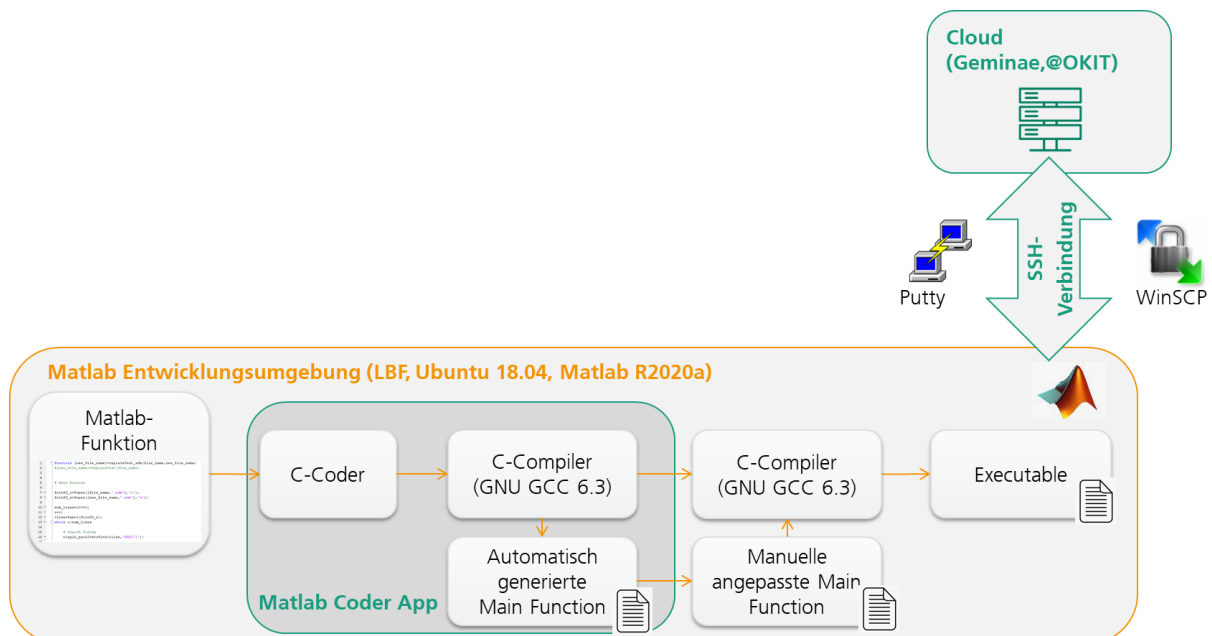


Abbildung 49: Übersicht des Verfahrens zur Implementierung der Artefakte auf die Cloud des Offline-Zwilling

Ein zentrales Element des gesamten Offline-Zwilling ist das MKS-Modell des Trailers. Im Laufe des gesamten Projekts hat sich das LBF sowohl mit dem Aufbau, der Entwicklung und der Anpassung des Modells als auch mit der Integration einiger, von den Projektpartnern bereitgestellter externer Teilmodelle beschäftigt. Im Detail wurde die folgenden Teilmodelle

integriert: Straße (ITWM), Reifen (ITWM), Luftfeder (InS), Elastomerlager (LBF) und Fahrer (LBF).

Das MKS-Modells des Trailers beinhaltet hauptsächlich die drei Achsen und den Traileraufbau, der alternativ als einziger Starrkörper bzw. bestehend aus zwei Starrkörpern verbunden durch kondensierte äquivalente Biege- und Torsionssteifigkeiten modelliert wurde. Das Trailermodell wurde in zwei Varianten aufgebaut, die sich bzgl. der Führung, d.h. der Randbedingung am Kingpin, unterscheiden:

- Variante mit Zugmaschine als vereinfachtes MKS-Modell (d.h. mit Aufbau, Achsen, Fahrer als Trajektorie-basierter Regler und Kingpin-Kupplung, siehe Abbildung 50);
- Variante mit Kingpin-Anregung (d.h. mit vordefinierter kinematischer Anregung am Kingpin in Form einer sogenannten *Motion* in der MKS, siehe Abbildung 51).

Die Variante mit Zugmaschine ermöglicht eine voll digitale Simulation beliebiger Fahrmanöver, ohne dass Messdaten für die Anregung am Kingpin notwendig sind. Diese Variante wurde im Laufe des Projekts für die Generierung von Daten zur Analyse der Parameteridentifikation verwendet, bevor Daten aus Messkampagnen verfügbar waren (siehe u.a. AP 3.2). Zusätzlich wurden Analysen der Belastungszustände für Fahrzustandsvariationen mit dieser Variante durchgeführt. Auf der anderen Seite wurde die Variante mit Kingpin-Anregung für die Nachsimulation von gefahrenen Manövern verwendet. Diese Variante stellt das finale Ziel-Szenario des Offline-Zwillings für die Anwendung auf der Cloud dar.

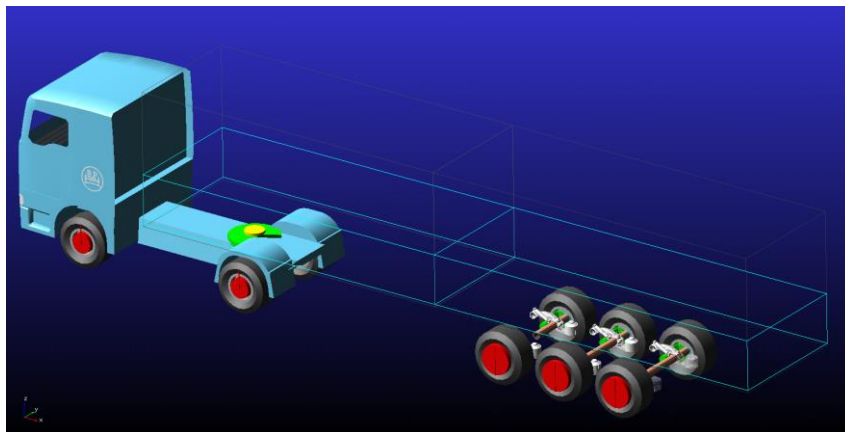


Abbildung 50: MKS-Modell des Trailers: Variante mit Zugmaschine

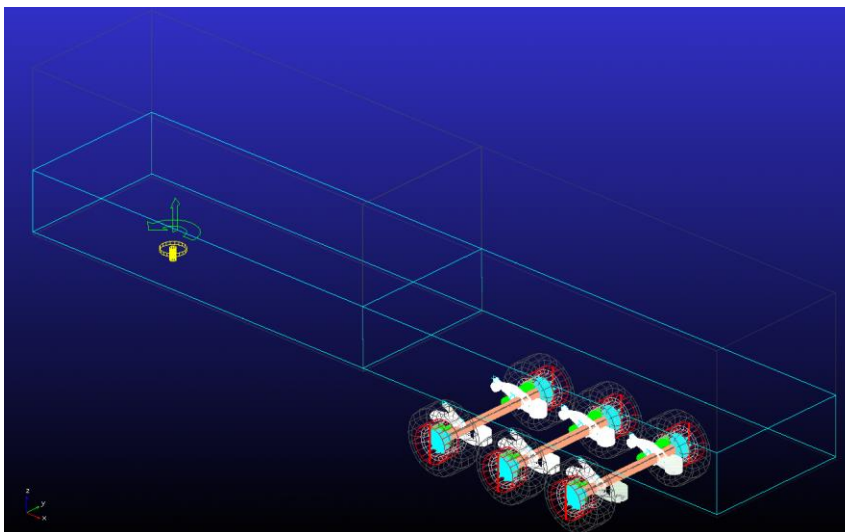
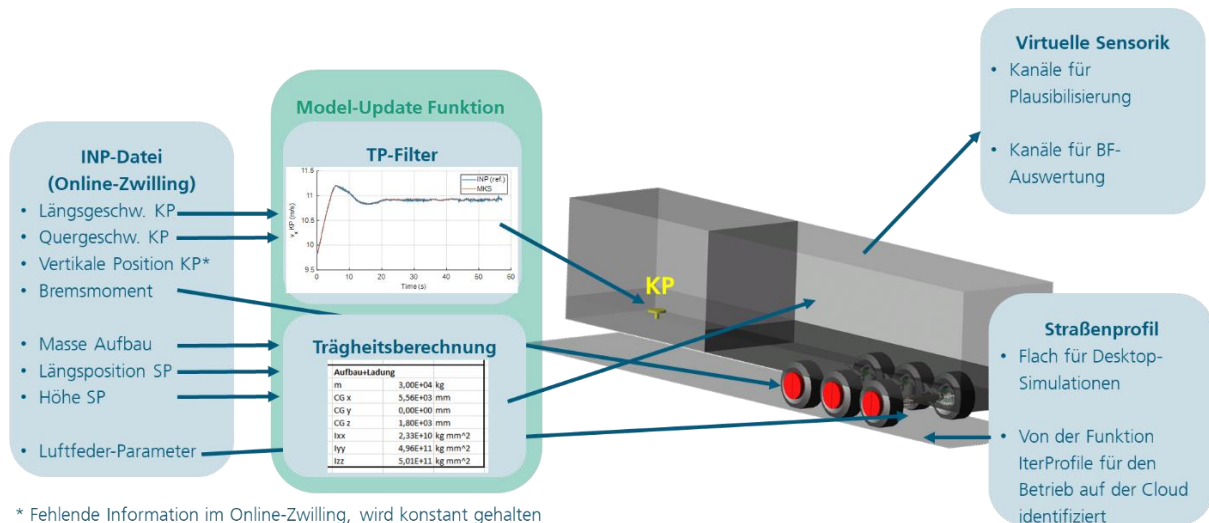


Abbildung 51: MKS-Modell des Trailers: Variante mit King-Pin-Anregung

In Abbildung 52 ist eine Übersicht der Schnittstellen und der wesentlichen Eigenschaften der Variante mit Kingpin-Anregung dargestellt. Aus der INP-Datei wurden die kinematischen Anregungsdaten und das Bremsmoment in Form von Zeitreihen in das MKS-Modells importiert. Diese wurden Tiefpass gefiltert und als Input für die MKS jedes zu simulierenden Abschnitts verwendet. Parallel wurden die variablen Systemparameter aus der INP-Datei eingelesen und damit das MKS-Modell aktualisiert. Wie bereits erwähnt wird das für jeden Abschnitt unterschiedliche Straßenprofil extern identifiziert und als spezifische Datei im Modell verlinkt. Die Modell-Outputs umfassen virtuelle Sensordaten, die sowohl für die Plausibilisierung der Simulation als auch für die Betriebsfestigkeitsauswertung verwendet werden.



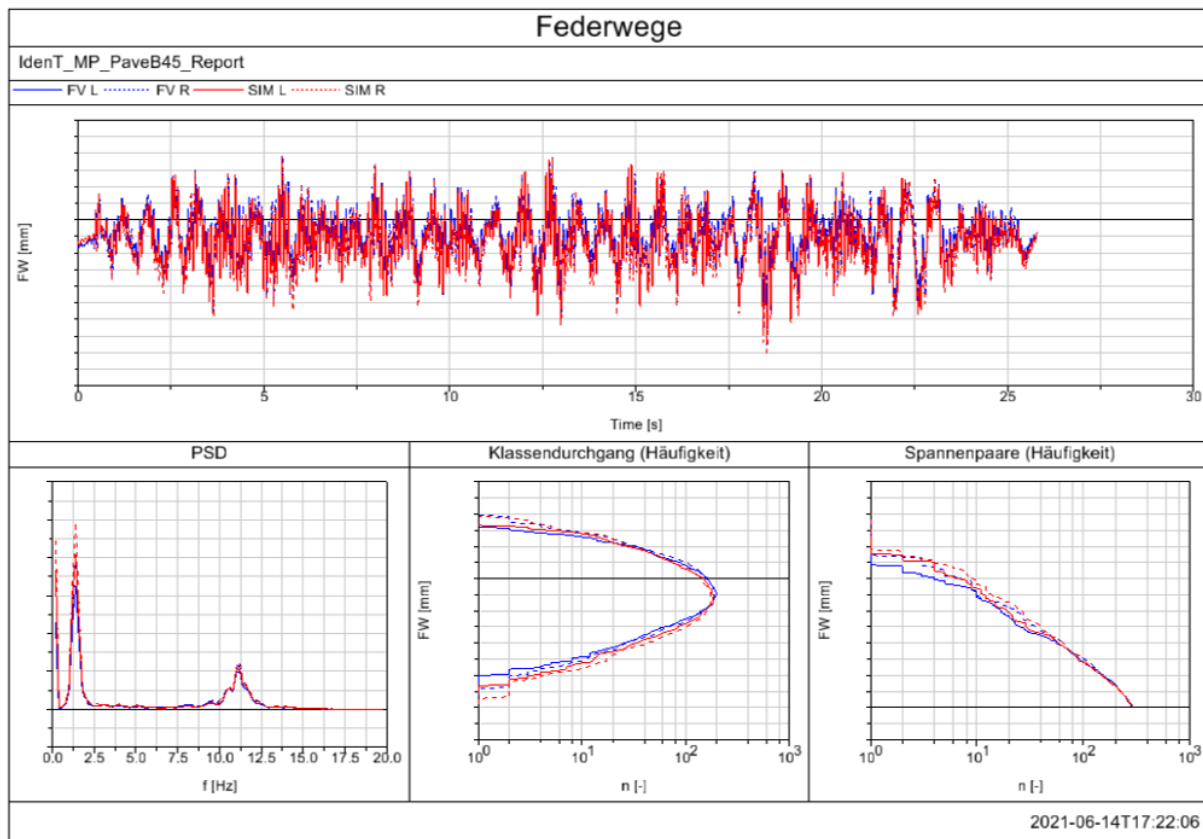
**Abbildung 52: Übersicht der Schnittstellen der Variante des MKS-Modells mit King-Pin-Anregung**

Das MKS-Modell des IdenT-Trailers wurde mit Hilfe eines Fahrzeugmodells der BPW Mehrkörpersimulation validiert. Diese Modellvalidierung ist ein mehrstufiger Prozess, der verschiedene Aspekte des Fahrzeugmodells umfasst.

Für die Validierung der Komponentenmodelle wurde auf vorhandene Modellbibliotheken zurückgegriffen. Das zentrale Submodells der Achse und der Luftfederung wurde zunächst in einem in einem virtuellen Achsprüfstand validiert, der eine gut eingrenzbare und reproduzierbare Umgebung für die Simulation schafft. Als Anregungsmodell dienten dabei Radkräfte, die anhand von Messungen an beiden Rädern in allen sechs Raumrichtungen (drei translatorische und drei rotatorische) erfasst wurden. Insgesamt standen somit zwölf Lasteinleitungs-Kanäle zur Verfügung.

Die vorhandenen inneren Messtellen, wie beispielsweise Balgdruck, Federwege und die Achskörpertorsion, wurden als Zielgröße für die Validierung verwendet. Der Anspruch bestand darin, das dynamische Verhalten der Achse und der Luftfeder im Frequenz- und Amplitudenbereich und auch transient mit hoher Übereinstimmung mit den Messdaten abzubilden und eventuelle Unstimmigkeiten in der Modellierung zu identifizieren und zu korrigieren. Die Ergebnisse dieser ersten Validierungsstufe sind in Abbildung 53 exemplarisch für die Federwege im Vergleich zwischen Fahrversuch (FV) und MKS-Simulation (SIM) dargestellt und sind äußerst zufriedenstellend.





**Abbildung 53: Abgleich des Achsmodells im „virtuellen Prüfstand“**

Im Zeitbereich (oben) erkennt man die gute Übereinstimmung bereits rein visuell. Im Amplitudenspektrum (PSD unten links) können die 2 relevanten Eigenfrequenzen abgelesen werden, die ebenfalls gut, sowohl in Frequenzlage (x-Achse), als auch in der Höhe der Systemantwort (y-Achse) übereinstimmen. Insbesondere in letzterem würde man bei Abweichungen einen Hinweis auf fehlerhaft modellierte Dämpfung erhalten.

In dieser Validierungsstufe ist es zusätzlich zielführend die Parametrierung der Komponenten zu überprüfen. Dies geschieht neben der Analyse der Zeitsignale, auch mit einer Rückidentifikation der Eingangsdaten aus den Systemantworten.

Bei der Luftfederung besteht ein kausaler Zusammenhang zwischen den Federwegen und der Federkraft, die sich über die Komprimierung der eingeschlossenen Luft und damit aus dem Druck in der Luftfeder ergibt. Die daraus resultierende Druck-Federweg-Kennlinie kann gut zwischen Simulation und Messung verglichen werden und lieferte bei Abweichungen Hinweise auf Verbesserungspotenziale in der Modellierung der Luftfeder.

Beim U-Stabilisator verhält es sich ähnlich. Jedoch ist hier der kausale Zusammenhang zur Achskörpertorsion nicht direkt über die Federwege, als vielmehr über die Differenzen der Federwege (Delta-FW) gegeben. Auch hier können über die Rückidentifikation der Stabilisator-Steifigkeit, die als Steigung der Torsions-Delta-FW-Kennlinie interpretiert werden kann, Hinweise gesammelt werden, wo womöglich Unzulänglichkeiten bei den Modellannahmen zu suchen sind. Ein besonderes Augenmerk gilt dabei auch der Streubreite der Datenpunkte, die als Hysterese Anhaltspunkte auf die Übereinstimmung in der modellierten Dämpfung liefert.

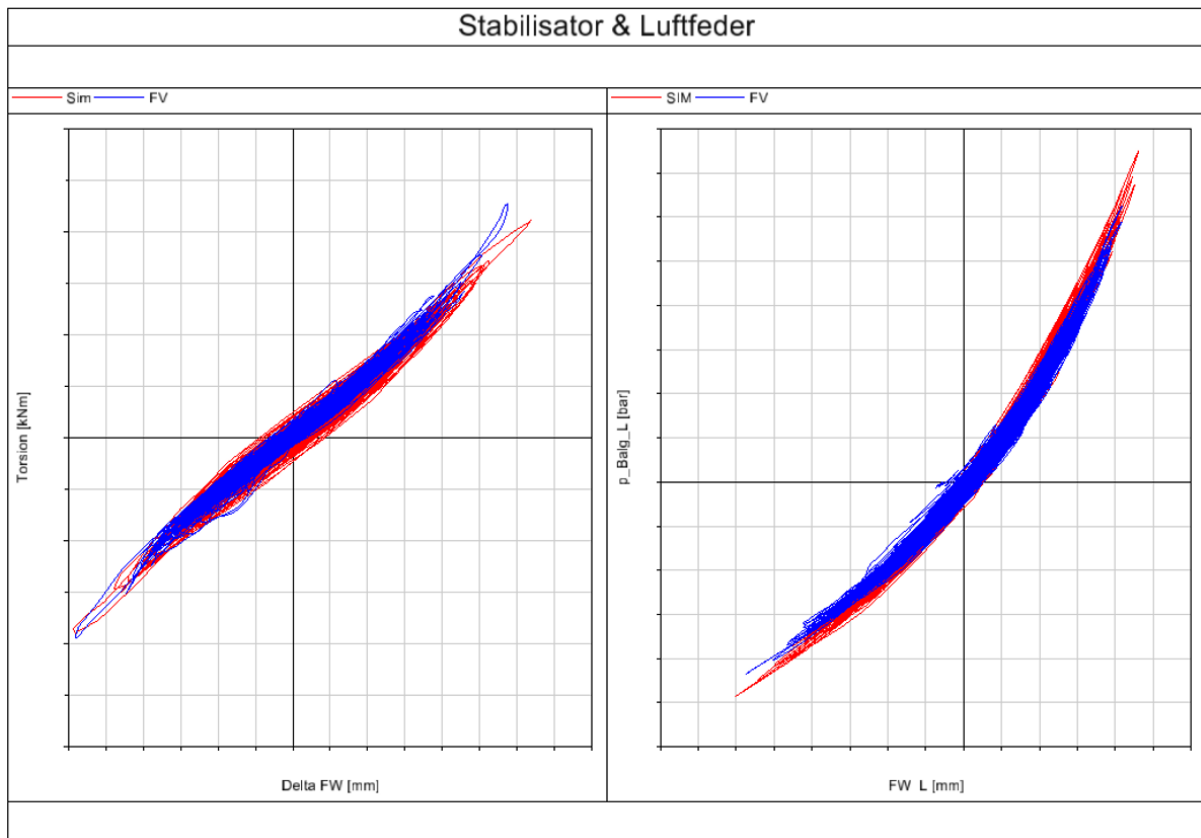


Abbildung 54: Rückidentifizierte Eingangsdaten zur Modellvalidierung

Die letzte Stufe der Modellvalidierung stellt die Gesamt-Fahrzeug-Simulation dar. In der weiter oben beschriebenen Modellstruktur, sind dort alle Modellelemente inkludiert und sind vorher einer Komponenten- oder Subsystemvalidierung unterlaufen. Das Anregungsmodell besteht nun aus der „digitalen Straße“ mit einem Reifenmodell.

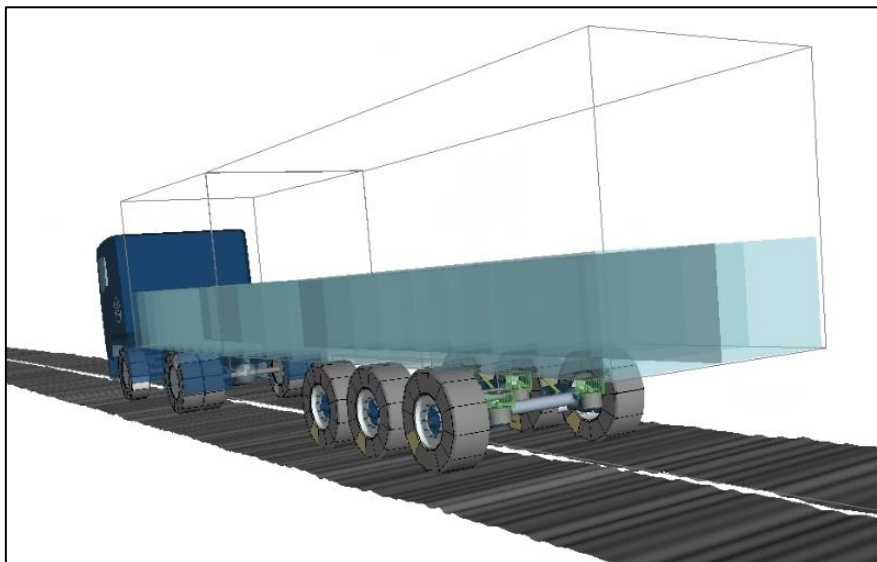


Abbildung 55: Fahrzeugmodell auf der digitalen Straße

Bei Fahrzeugmodellen auf einer digitalen Straße ist es dabei immer wichtig die richtige Interpretation des Vergleichs mit Messdaten heranzuziehen. Zweck der Modelle ist es nicht ein bestimmtes, zuvor gemessenes Fahrmanöver exakt nachzubilden, sondern die Systemdynamik und Anregungs-Charakteristik so gut zu erfassen, dass eine Aussage darüber

möglich ist, inwieweit sich Systemantworten ändern, wenn sich z.B. Systemeigenschaften, wie Steifigkeiten und Dämpfungen aufgrund von Verschleiß ändern. Vor diesem Hintergrund gelingt auch hier die Modellvalidierung ausgesprochen gut, was exemplarisch an der Achskörpertorsion, die in der gleichen Form, wie oben die Federwege dargestellt ist, erkennbar ist.

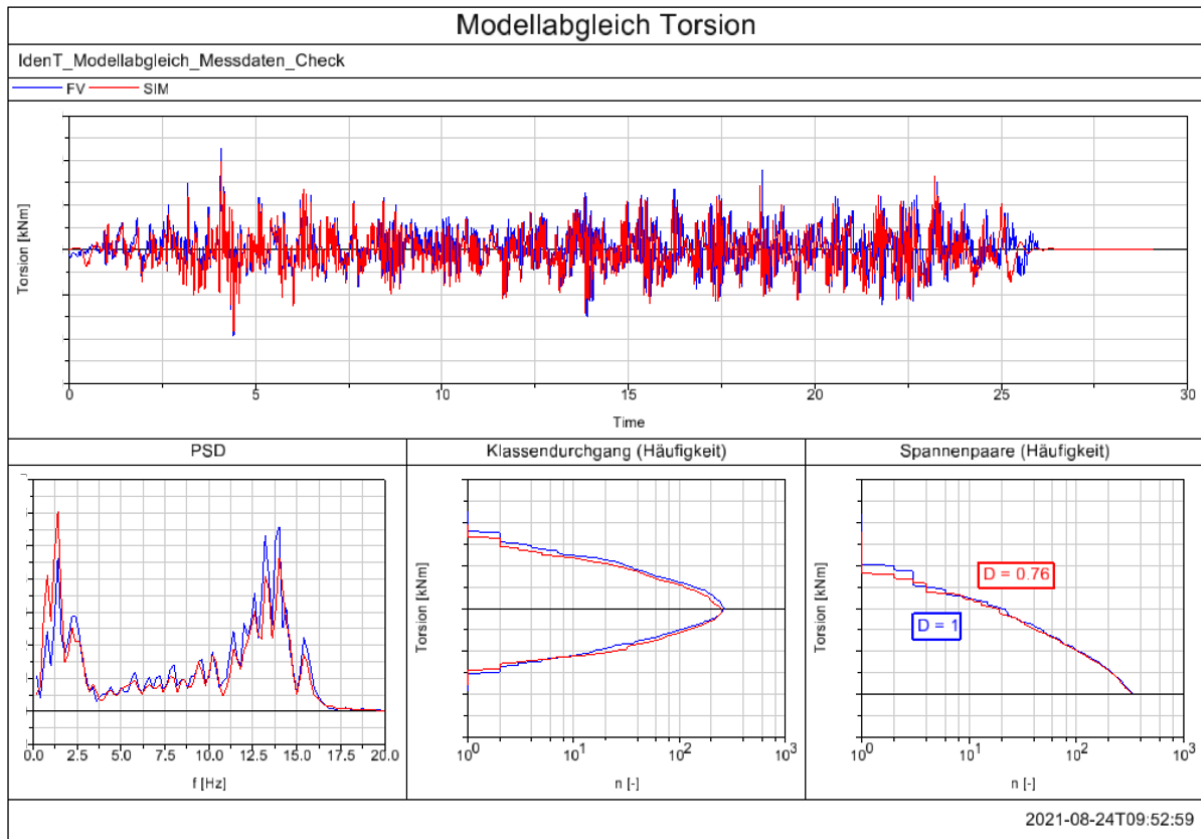


Abbildung 56: Modellabgleich Gesamt-Fahrzeug auf digitaler Straße

Als wesentliches Teilmodell entwickelte der Partner InS ein physikalisches Luftfedermodell in Matlab/Simulink. Dieses wurde über eine dedizierte Schnittstelle zwischen MSC.Adams und Matlab in das MKS-Modell des Trailers importiert. Abbildung 57 zeigt das Konzept dieses Verfahrens, das auf einer Kompilierung des Simulink-Modells als Library basiert, die dann in das MKS-Modell in MSC.Adams eingelesen werden kann. Im Laufe des Projekts wurde sowohl die Qualität als auch die Stabilität des Modells in Zusammenarbeit mit InS durch verschiedene Iterationen verbessert.

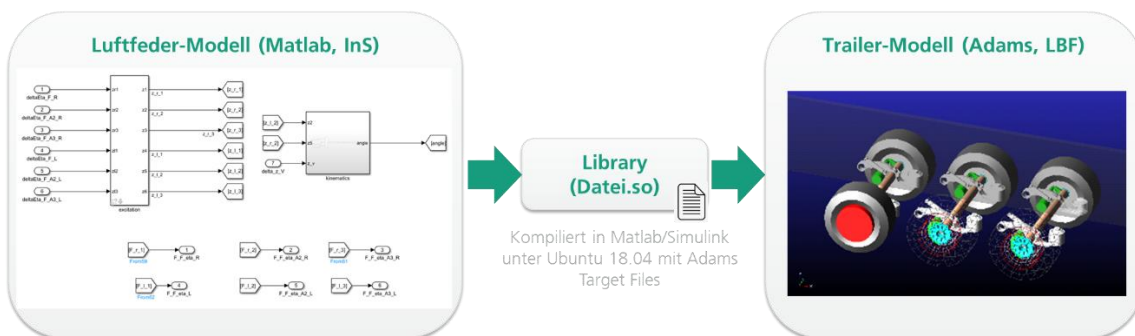


Abbildung 57: Konzept der Implementierung des Luftfedermodells in das MKS-Modell

Das Luftfedermodell erhält die sechs Federwege als Inputgrößen aus dem MKS-Trailermodell zusammen mit einem an der zweiten Achse ermittelten Referenzweg für die Funktion der automatischen Niveau-Regulierung. Als Output liefert das Modell die sechs Kraftsignale, die

zurück in das MKS-Modell geführt werden. Zusätzlich werden weitere Signale geliefert, wie z.B. Temperatur und Druck der Federbälge, die für weitere Auswertungen verwendet werden können.

Das Luftfedersystem des Trailers besteht aus einem Druckbehälter, einem Luftfederventil, dem Heben/Senken Ventil sowie der Verrohrung und den Luftfederbälgen. Der Trailer verfügt über ein mechanisches Ventil zur Einstellung der Fahrhöhe. Über ein Gestänge wird die aktuelle Lage des Aufbaus relativ zu den Achsen an das Ventil übergeben. Die Luftfederbälge sind über das Heben/Senken Ventil über eine Drossel gekoppelt. Dabei sind jeweils drei Bälge in Fahrtrichtung seriell gekoppelt, die rechte und linke Seite des Trailers hingegen parallel. Das Luftfedersystemmodell ist ein vollständiges thermodynamisches Modell dieses Luftkreislaufs. Dabei sind Nachgiebigkeiten und Kompressibilität der Luft, Endlagendämpfer, sowie dämpfende Effekte auf Grund von Querschnittsveränderungen und Rohrleitungslängen berücksichtigt. Ebenso wurde die Funktion des Luftfederventils modelliert, so dass sich die Fahrhöhe des Trailers einregelt. Das Modell basiert auf vorhandenen Modellierungsansätzen für Luftfederdämpfer von Industrial Science. Das Modell wurde in Matlab Simulink implementiert. Abbildung 58 zeigt den Aufbau des Modells.

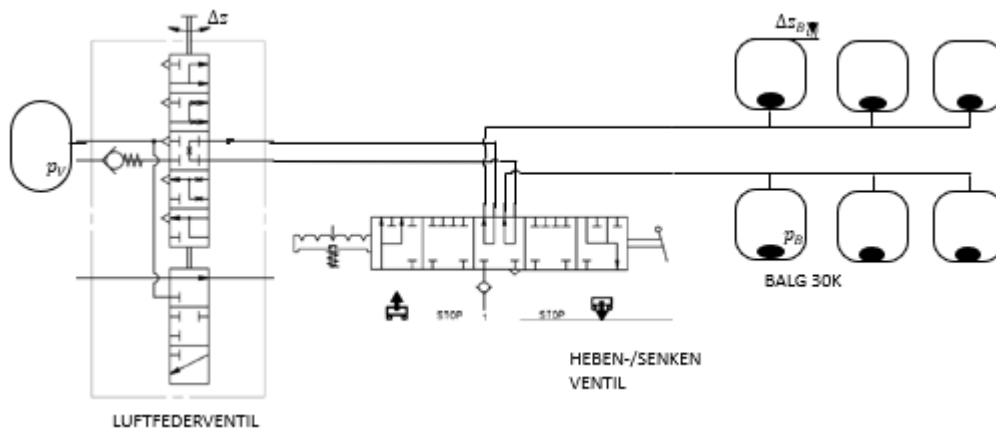


Abbildung 58: Aufbau des Luftfedersystems und Modellierungsansatz im Versuchstrailer.

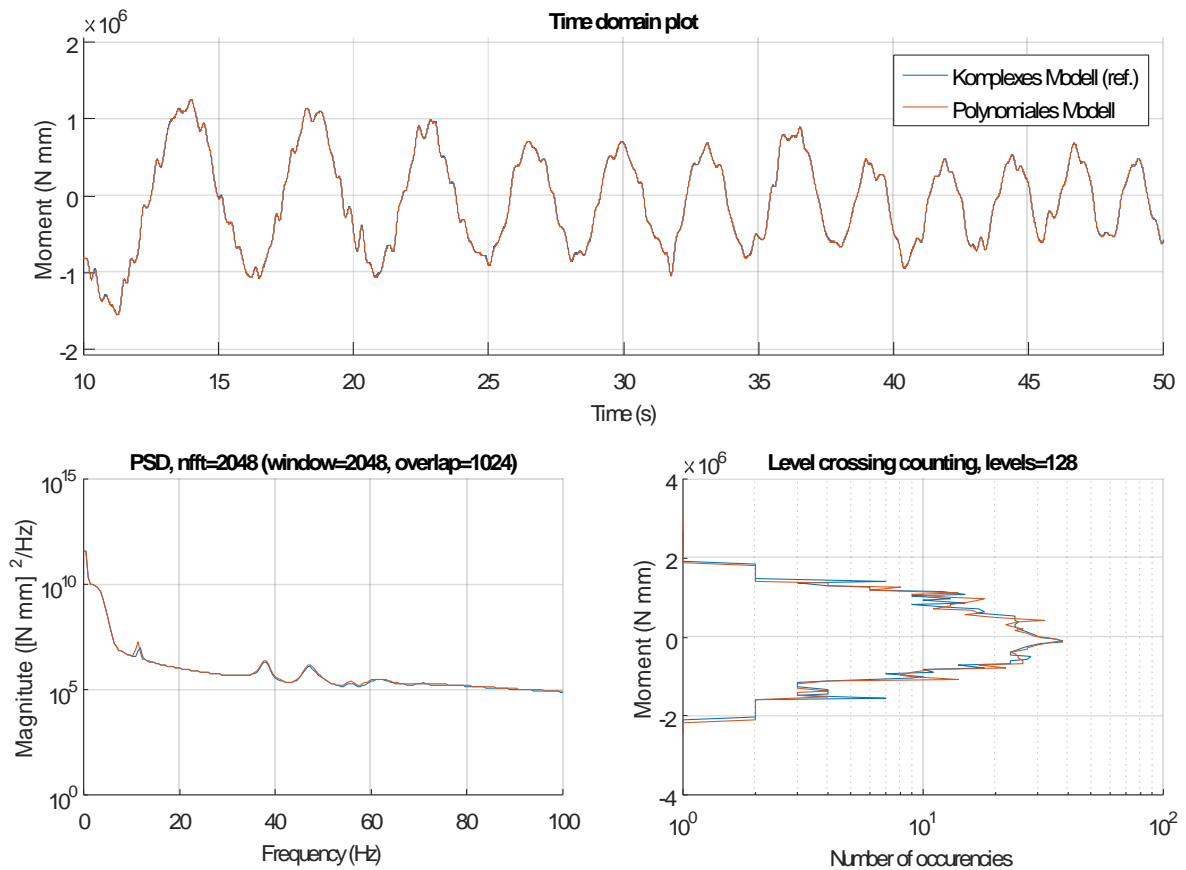
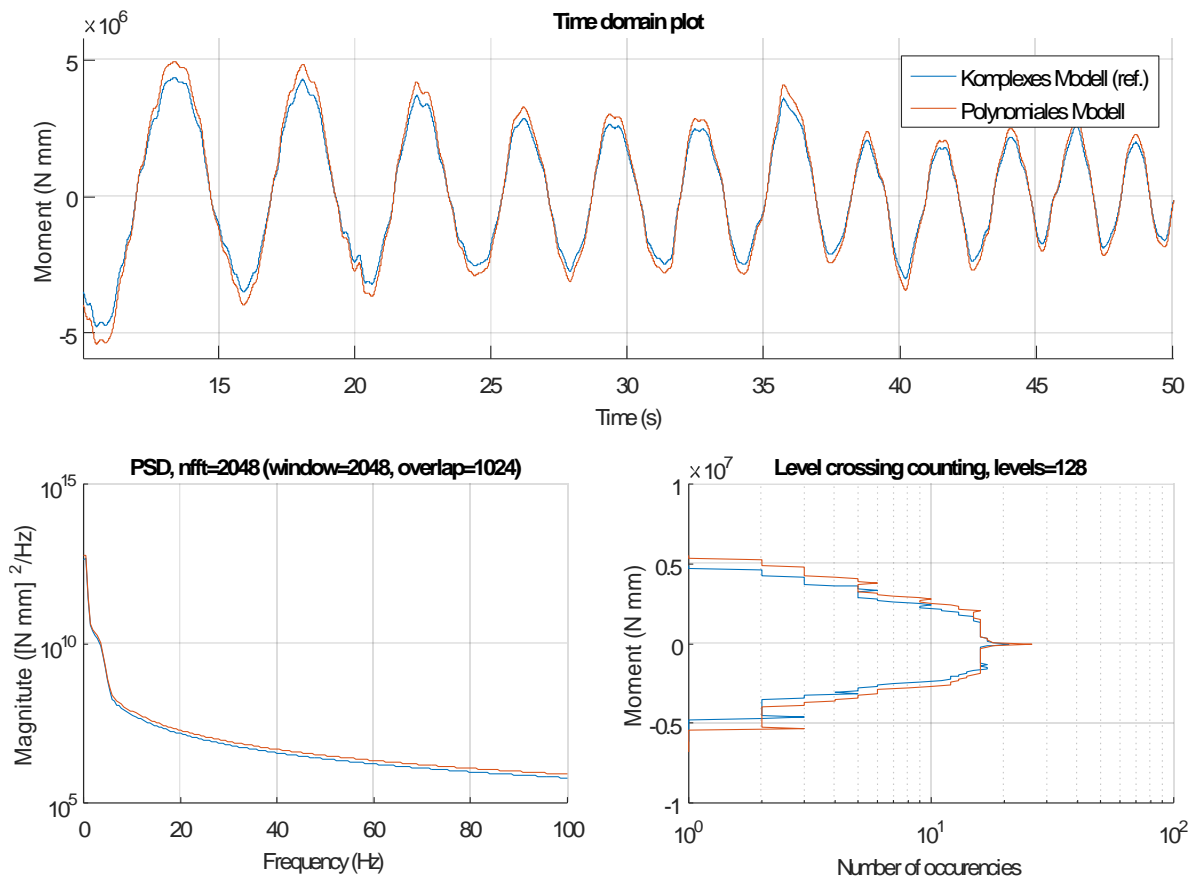


Abbildung 59: Sturzmoment  $M_x$  am Achsschenkel im simulierten Slalom-Manöver. Verglichen sind MKS-Ergebnisse mit dem komplexen und mit dem vereinfachten polynomialen Luftfedermodell





**Abbildung 60: Achskörpertorsionsmoment  $M_y$  an der Achseinbindung im simulierten Slalom-Manöver. Verglichen sind MKS-Ergebnisse mit dem komplexen und mit dem vereinfachten polynomialen Luftfedermodell**

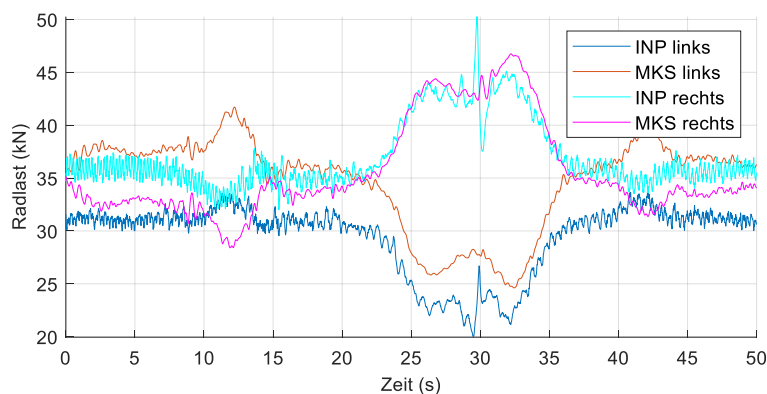
Parallel zum komplexen physikalischen Modell der Luftfeder wurde auch ein vereinfachtes empirisches Modell vom Partner InS entwickelt, das auf einem polynomialen Fitting der Ergebnisse des komplexen Modells basiert. Dieses ermöglicht eine schnellere und stabilere Simulation des Gesamtsystems, wobei das Verhalten der Luftfeder vereinfacht dargestellt ist. Vor allem werden die Luftfedern im vereinfachten Modell als entkoppelte Elemente simuliert, ohne die Interaktion der einzelnen Luftfedern untereinander darzustellen. Die Einflüsse dieses vereinfachten Ansatzes auf die für die Betriebsfestigkeit relevanten Ergebnisse der MKS sind in Abbildung 59 für das Sturzmoment  $M_x$  am Achsschenkel und in Abbildung 60 für das Achskörpertorsionsmoment  $M_y$  an der Achseinbindung dargestellt (siehe Absatz zum AP 3.4 zur Definition dieser Messstellen). Simuliert ist ein Slalom-Manöver, bei dem die Einflüsse der Vereinfachung des Luftfedermodells theoretisch relevant sein sollten. In der Tat wird das Achskörpertorsionsmoment  $M_y$  an der Achseinbindung leicht überschätzt, während lediglich geringe Unterschiede im Sturzmoment  $M_x$  am Achsschenkel erkennbar sind.

Zusätzlich zum Luftfedermodell wurde das vom ITWM bereitgestellte CDTire-Reifenmodell in das MKS-Modell integriert. Für die Reifen sowohl des Trailers als auch der Zugmaschine wurden entsprechende passende Parametersätze bereitgestellt. Im Projekt wurde die Variante 31 des CDTire-Modells implementiert und verwendet.

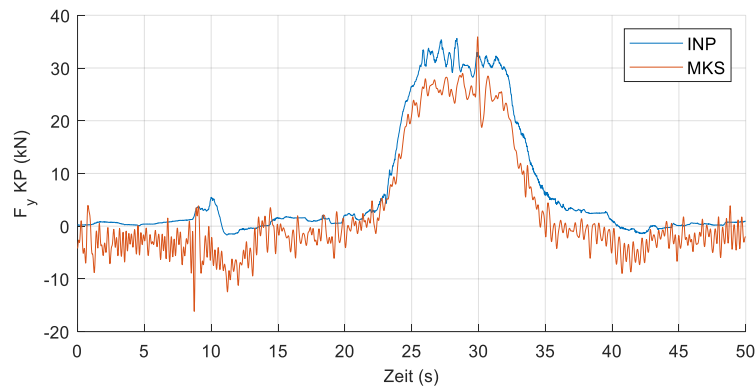
Um die Qualität des simulativen Ansatzes des Offline-Zwillings zu prüfen, wurde intensiv an der Plausibilisierung der gesamten Mehrkörpersimulation gearbeitet. Dafür wurden die im März 2022 durchgeführten Messfahrten mit dem MKS-Modell nachsimuliert. Sowohl die Eingangssignale als auch die Plausibilisierungssignale wurden aus der INP-Datei zu diesem

Zweck importiert. Diese Simulationen wurden am Desktop in einer Projektphase durchgeführt, in der noch keine Ergebnisse zur Straßenidentifikation verfügbar waren. Deshalb wurden sie mit idealer flacher Straße durchgeführt, sodass der Fokus darauf lag, das niederfrequente fahrdynamischen Verhalten zu plausibilisieren. Als Beispiel dieser Analyse sind hier die Ergebnisse eines Spurwechsel-Manövers dargestellt. In Abbildung 61 sind die vertikalen Radlasten an der zweiten Achse und in Abbildung 62 ist die Seitenkraft am Kingpin dargestellt. Diese Ergebnisse zeigen eine generell gute Übereinstimmung im niedrigen Frequenzbereich der Signale. Die bleibenden Abweichungen wurden weiter untersucht und sind auf die folgenden Aspekte zurückzuführen:

- Die Auswertung dieser Analysen hat verdeutlicht, wie relevant die Schätzung der Trägheitsparameter des Trailers für die gesamte Qualität der MKS-Ergebnisse ist. Diese Parameter (d.h. Masse und Schwerpunktlage in der longitudinalen und vertikalen Richtung) werden im Prozess vom Online-Zwilling geschätzt und mittels INP-Datei an den Offline-Zwilling übertragen. Diese Schätzung basiert auf dem CAN-Signal *AxleLoadSum*, das die Summe der Reifenaufstandskräfte des Traileraggregats beinhaltet. In den durchgeführten Messungen hat dieses Signal einen maximalen Fehler von ca. 10-15% relativ zu den mit DMS gemessenen Radlasten ergeben. Ein Fehler in derselben Größenordnung ist deshalb in der aktuellen Schätzung der Trailermasse zu erwarten, was wiederum die in der MKS berechneten Lasten direkt beeinflusst.
- Tiefere Untersuchungen haben gezeigt, wie die resultierenden Schräglauf- und Schwimmwinkel der Trailer aufgrund der festgelegten Geschwindigkeits-Führung am Kingpin sehr stark von den Reifen-Charakteristiken abhängen. Abweichungen in den Handling-Charakteristiken zwischen dem MKS-Reifen und dem realen Reifen können deshalb Fehler in der nachsimulierten Fahrdynamik des Trailers generieren.
- Aufgrund der fehlenden Schätzung der vertikalen Position des Kingpins im Online-Zwilling wird dieser Punkt auf einer festen nominalen Höhe in der Simulation des MKS-Modells des Trailers gehalten.



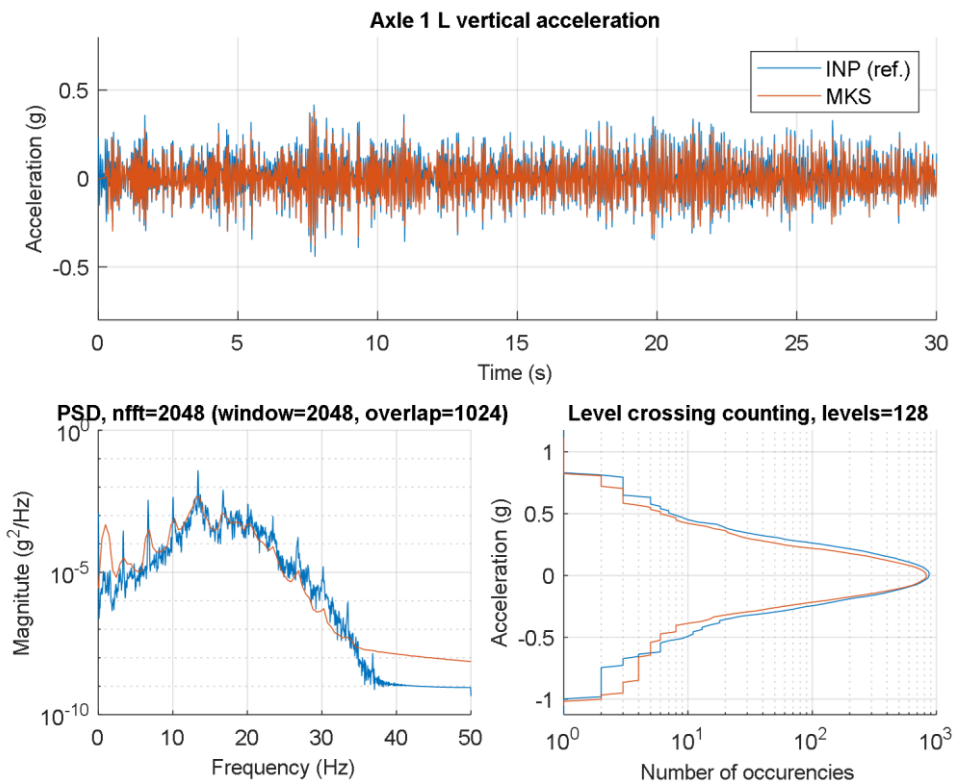
**Abbildung 61: Vertikale Radlasten in einem Spurwechsel-Manöver; Vergleich zwischen Messung (INP) und Simulation (MKS)**



**Abbildung 62: Seitenkraft am Kingpin; Vergleich zwischen Messung (INP) und Simulation (MKS)**

Nach der fahrdynamischen Plausibilisierung wurde das MKS-Modell in den gesamten Offline-Zwilling-Prozess integriert und mit geschätzten Straßenprofilen simuliert. Dafür wurde in Zusammenarbeit mit dem Partner ITWM ein Ansatz für die sogenannte *Moving Road* entwickelt. Dieses basiert auf einer konstanten relativen Längsgeschwindigkeit des Trailers relativ zur Straße von 45 km/h (siehe Absatz zum AP 3.1). Aus diesem Grund muss die Straße im MKS-Modell auf einem sich bewegenden Körper fixiert werden, der eine definierte Bewegung relativ zum *Ground* hat. Im Projekt wurde dieses Konzept für die Längsdynamik vollständig implementiert und anhand einiger Test-Simulationen geprüft. Die Erweiterung für die Querdynamik benötigt die Schätzung des Trailer-Gierwinkels und wurde nur konzeptionell im Projekt präsentiert.

In der finalen Phase des Projekts wurde das vollständige auf die Offline-Zwilling-Cloud implementierte MKS-Modell des Trailers inkl. identifizierten Straßenprofils mit Daten aus den Messfahrten plausibilisiert. Diese stellen exakt dieselben Bedingungen dar, in den der Offline-Zwilling im Betrieb funktioniert. In den folgenden Abbildungen (Abbildung 63 bis Abbildung 66) sind die Ergebnisse des Vergleichs zwischen Messung und Simulation von zwei Signalen (vertikale Beschleunigung und Luftfeder-Druck an der linken Seite der ersten Achse) in zwei Manövern (Geradeausfahrt und Einzelhindernis) dargestellt. Die Signale sind sowohl als Zeitreihe als auch als PSD und *Level Crossing Counting* verglichen.



**Abbildung 63: Vertikale Beschleunigung an der linken Seite der ersten Achse in einem auf der Offline-Zwilling-Cloud nachsimulierten Geradeausfahrt-Manöver; Vergleich zwischen Messung (INP) und Simulation (MKS)**

Die Ergebnisse der vertikalen Beschleunigung zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Dieses Signal wird als Zielgröße für die iterative Identifikation des Straßenprofils verwendet. Damit zeigen diese Ergebnisse mit welcher Qualität das gesamte Verfahren konvergiert. Das Signal des Luftdrucks, das eine indirekte Information zur vertikalen Radlast liefert, zeigt mit dem Signal-Offset zwischen Messung und Simulation das vorher erwähnte Problem der Schätzung der statischen Radlasten. Trotz Abweichungen in den geschätzten statischen Radlasten stimmen die Signalverläufe als Zeitreihen und auch die Frequenzinhalte der Signale sehr gut miteinander überein.

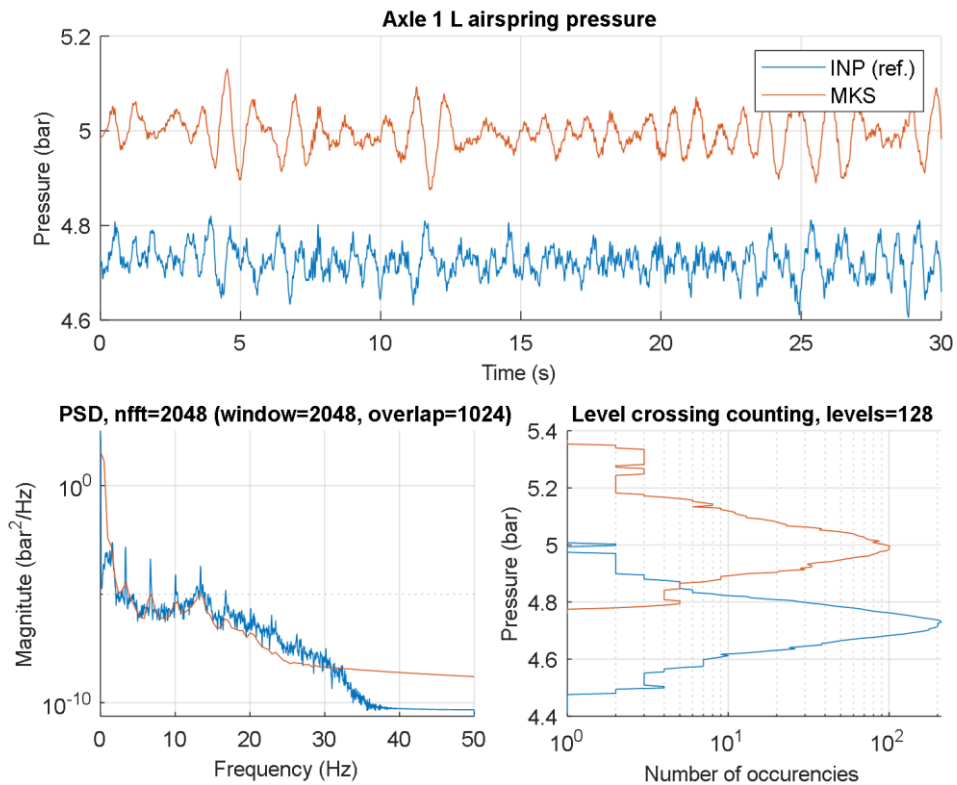


Abbildung 64: Luftfeder-Druck an der linken Seite der ersten Achse in einem auf der Offline-Zwilling-Cloud nachsimulierten Geradeausfahrt-Manöver; Vergleich zwischen Messung (INP) und Simulation (MKS)

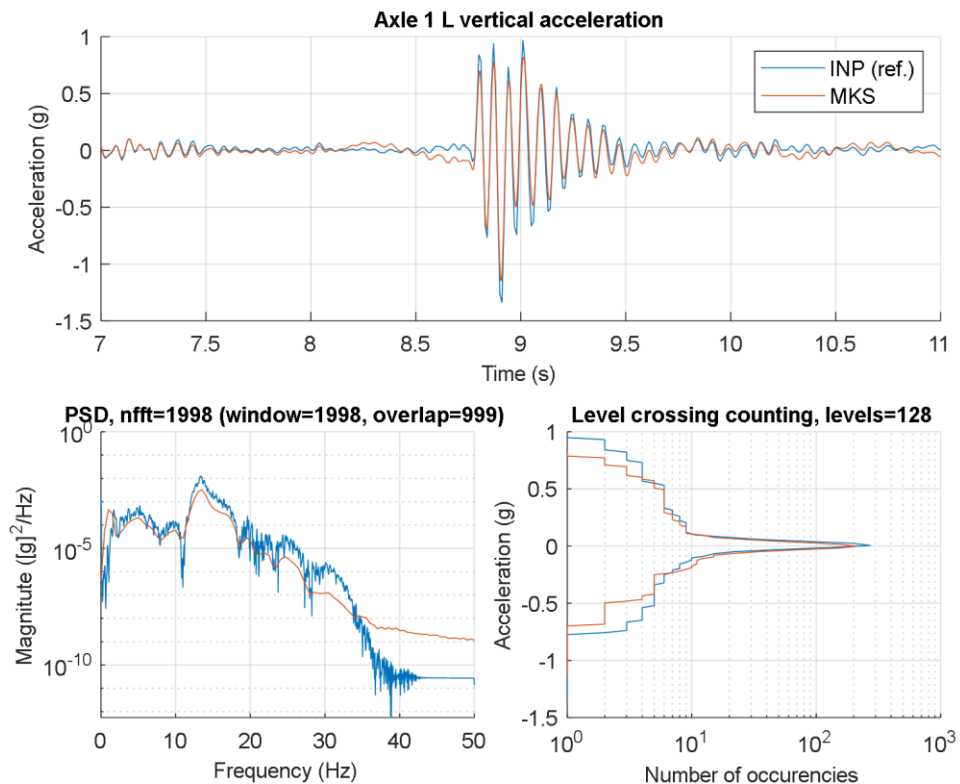
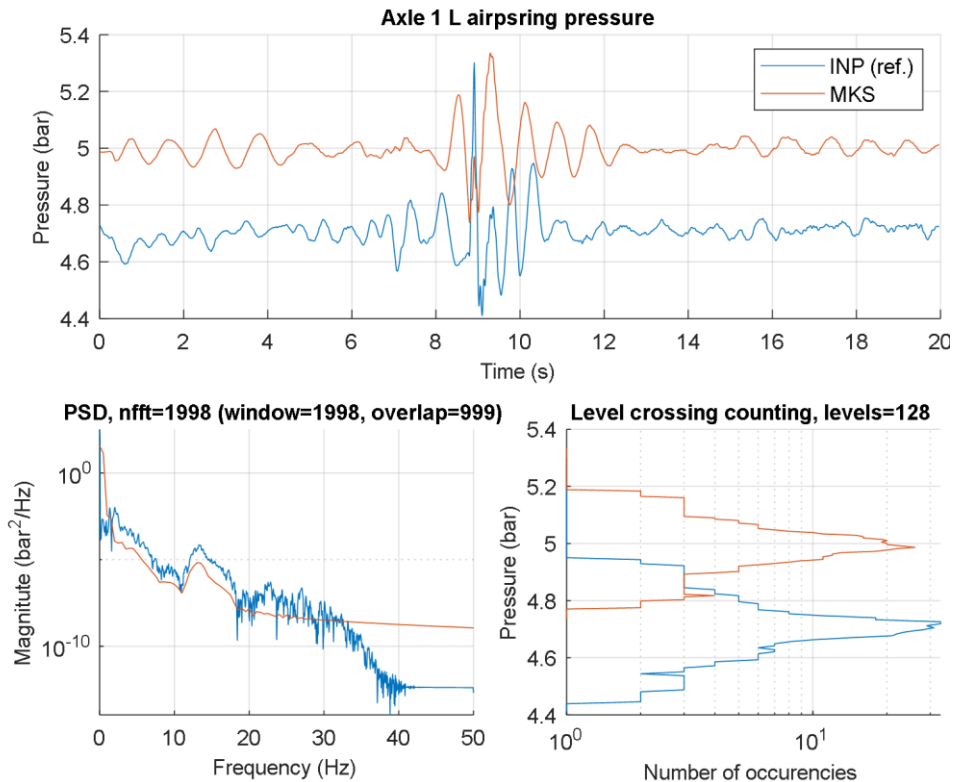


Abbildung 65: Vertikale Beschleunigung an der linken Seite der ersten Achse in einem auf der Offline-Zwilling-Cloud nachsimulierten Einzelhinderis-Manöver; Vergleich zwischen Messung (INP) und Simulation (MKS)



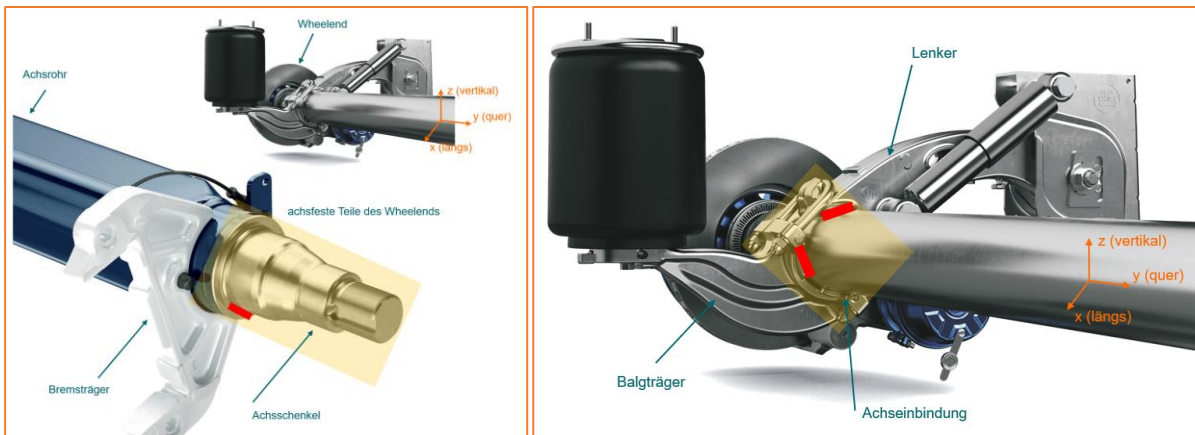


**Abbildung 66: Luftfeder-Druck an der linken Seite der ersten Achse in einem auf der Offline-Zwilling-Cloud nachsimulierten Einzelhindernis-Manöver; Vergleich zwischen Messung (INP) und Simulation (MKS)**

### 3.4. Zustandsbestimmung Komponenten

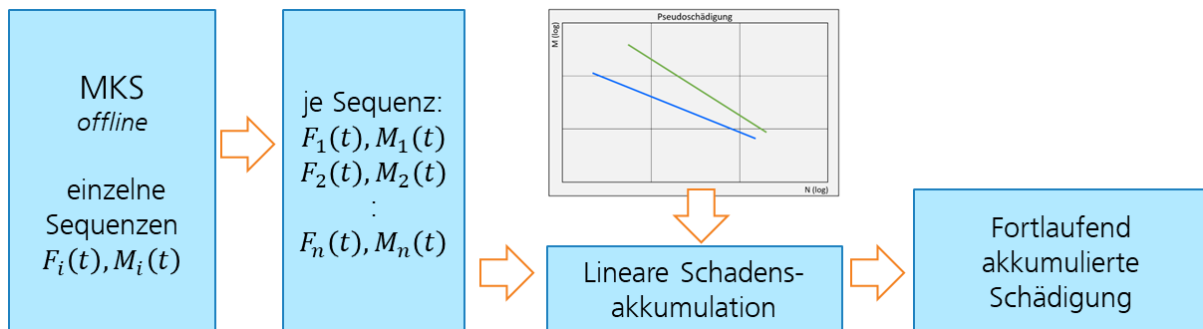
Im Rahmen des Arbeitspakets 3.4 wurde die Funktion für die Betriebsfestigkeitsauswertung (BF-Auswertung im untersten Bereich des Abschnitts 2 der Prozessübersicht, siehe Abbildung 48) konzipiert und in einer ersten Version umgesetzt. In Abstimmung mit dem Partner BPW wurden zwei Bauteile festgelegt, deren Beanspruchung in den Simulationen mit dem MKS-Modell ermittelt werden sollte, um die kumulative Schädigung dieser Bauteile in der Funktion BF-Auswertung zu berechnen.

Die ausgewählten Komponenten und die relevanten Stellen für die Ermittlung der Beanspruchung sind in Abbildung 67 dargestellt. Am Achsschenkel wird das Stutzmoment  $M_x$  ermittelt. Darüber hinaus wird das Achskörpertorsionsmoment  $M_y$  an der Achseinbindung ermittelt. Zu diesem Zweck wurden sogenannten Adams-Requests im MKS-Modell definiert, die diese Schnittlasten darstellen. Diese werden während der Simulation kontinuierlich in der Ergebnisdatei gespeichert.



**Abbildung 67: Definierte Bauteile und Stellen für die Betriebsfestigkeitsauswertung: Sturzmoment  $M_x$  am Achsschenkel (links) und Achskörpertorsionsmoment  $M_y$  an der Achseinbindung (Quelle: BPW)**

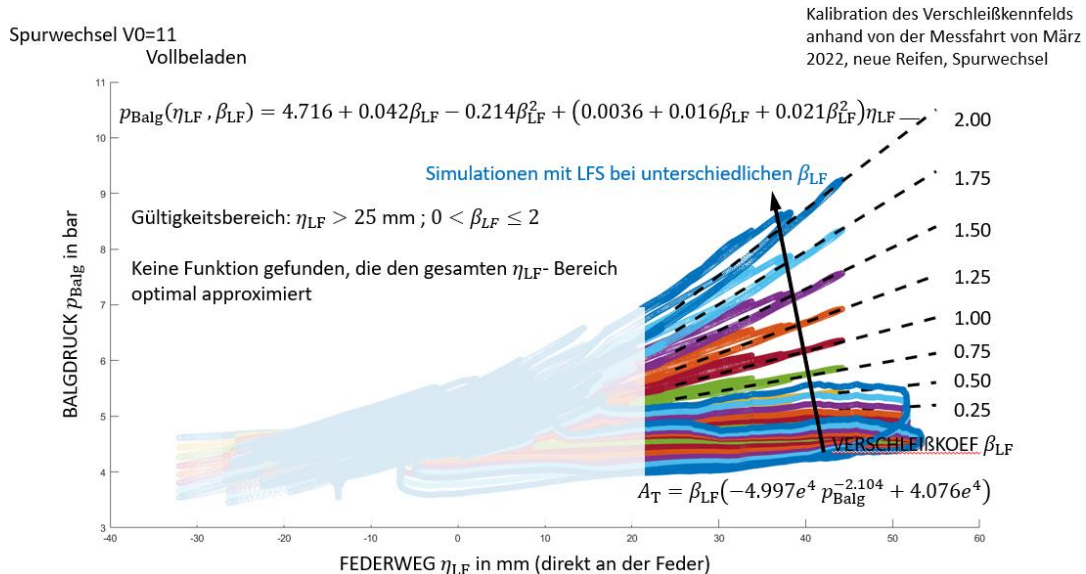
Die Berechnung der Schadensakkumulation erfolgt anschließend in der Funktion *BF-Auswertung* auf Basis des in Abbildung 68 dargestellten Konzepts. Die Bewertung der Beanspruchbarkeit erfolgt durch Pseudo-Wöhlerlinien und Konzepte zur sogenannten Mittelspannungskorrektur, die vom Partner BPW zur Verfügung gestellt wurden. Die fortlaufende akkumulierte Schädigung wird von der Funktion in eine Text-Datei nach jedem simulierten Abschnitt geschrieben und damit im Offline-Zwilling protokolliert.



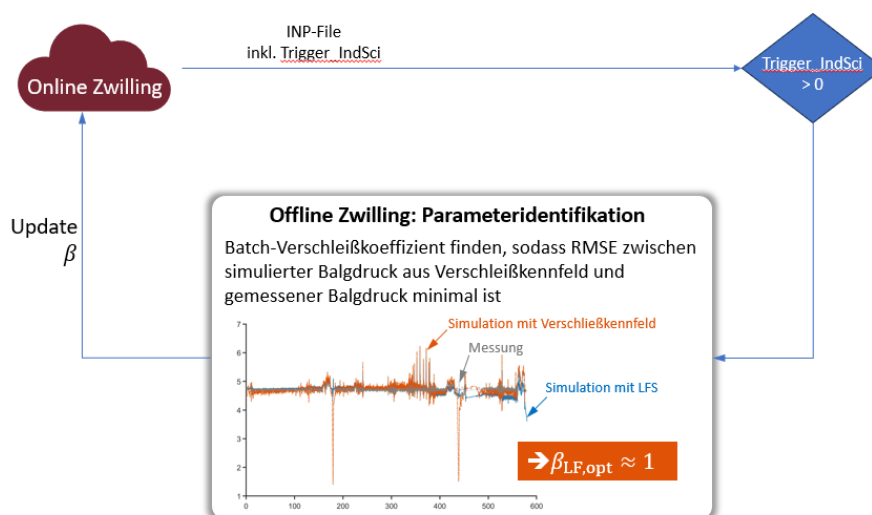
**Abbildung 68: Konzept für die Betriebsfestigkeitsauswertung**

Die Funktion wurde in der letzten Projektphase vollständig implementiert und im Betrieb des Trailers erfolgreich getestet. Die generierten Reports werden am Ende des gesamten Offline-Zwilling-Prozesses zu weiteren Auswertungen archiviert.

Für die Luftfeder werden für unterschiedliche Beladungszustände anhand von, Messfahrten mit dem Luftfedersystemmodell Verschleißkennfelder errechnet. Beispielhaft ist dies in Abbildung 69 für einen vollbeladenen Trailer anhand einer Sinus-Fahrt dargestellt. Die Abbildung beschreibt ebenfalls die Berechnung von  $\beta_{LF}$ . Es ist erkennbar, dass sich der Unterschied im Verhalten der Luftfeder erst bei größeren Federwegen einstellt. Aus diesem Grund werden entsprechende Fahrmanöver im Online-Zwilling detektiert und der Trigger für Industrial Science so implementiert, dass er auf Fahrmanöver mit hohen Federwegen reagiert. Die Identifikation erfolgt, in dem ein getriggertes Fahrmanöver mit dem Luftfedersystemmodell sowie mit dem Verschleißkennfeld simuliert wird bis der RMSE hinreichend klein wird Abbildung 70. Um Artefakte zu vermeiden, wird der Verschleißkoeffizient nicht nach jedem Trigger aktualisiert, sondern das Verhalten über einen längeren Zeitraum beobachtet ob dieses anhält.



**Abbildung 69: Aus Fahrdaten errechnetes Verschleißkennfeld. Es beschreibt den Zusammenhang zwischen Balgdruck und Federweg für einen Beladungszustand. Mit der Simulation wurde der Verschleißfaktor variiert.**



**Abbildung 70: Eine Iteration des Identifikationsprozess.**

### 3.5. Informationsrückmeldung

Im Laufe von Regelmeetings zwischen den im Online- und Offline-Zwilling involvierten Partnern wurde die Informationsrückmeldung vom Offline-Zwilling an die Datenplattform und den Online-Zwilling permanent diskutiert und umgesetzt. In der finalen Konfiguration des Offline-Zwilling, werden die Ergebnisse aus der Simulation des MKS-Modells inkl. Postprocessing der Daten (d.h. Plausibilisierung und Betriebsfestigkeit-Auswertung) nur auf der Cloud archiviert.

Komponentenparameter, in diesem Fall die Verschleißfaktoren  $\beta$  der Luftfeder und des Dämpfers, die vom Partner InS auf dem Offline-Zwilling identifiziert werden, werden zurück an den Online-Zwilling gesendet. Die Kommunikation und die Dateneigenschaften wurden mit den Projektpartnern besprochen und festgelegt.

Die Informationsrückmeldung erfolgt vom Offline-Zwilling über die Cloud-Infrastruktur, dann den Mobilfunk-Datenkanal an die CareLAN-Box und vor dort über einen TCP-Stream zurück an den Online-Zwilling (Speedgoat). Der TCP-Stream ist als effizientes,

datensparsames und projektproprietäres, binäres Datenformat implementiert. Eine detaillierte Beschreibung der implementierten Mechanismen findet sich auch in Abschnitt 2.1

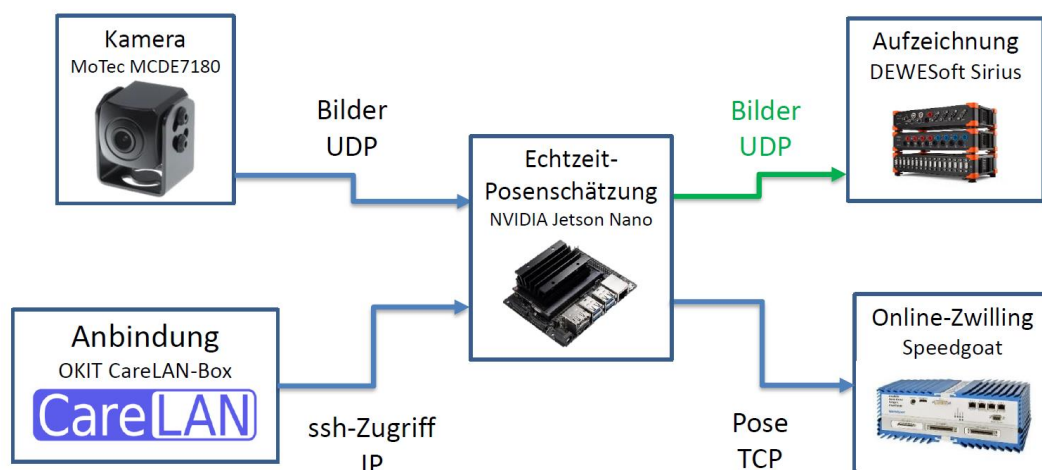
## 4. Online-Informationsgenerierung

### 4.1. Umfeldüberwachung

Die Bestimmung von dynamikrelevanten Zustandsgrößen für LKW-Trailer ist essentiell für die zukünftige Autonomisierung von Transportprozessen. Insbesondere bilden die Eigenbewegung des Trailers und die Beschaffenheit der überfahrenen Straße wichtige Informationsquellen für sicherheitsrelevante Komponenten des Trailers. Der Einsatz von kamerabasierter Sensorik wurde als kostengünstige und vielseitige Möglichkeit im Rahmen der Umfeldüberwachung untersucht. Die Ergebnisse des Arbeitspakets 4.1 gliedern sich in zwei Hauptthemen: Eine umfassende Analyse der 3D-Szene des Trailers und Schätzung der Trailerpose, sowie die kamerabasierte Detektion von Straßenschäden mittels neuronaler Netze.

#### Kamerabasierte Szenenrekonstruktion und Posenschätzung

Zu Beginn des Projektes wurden die zur Verfügung zu stellenden Daten der am Trailer verbauten Kamera mit den Projektpartnern abgestimmt. Es ergab sich, dass für die Weiterverarbeitung im Online-Zwilling eine Schätzung der Kamerapose verwendet werden soll. Neben der Lokalisierung des Kamerazentrums in einem globalen Koordinatensystem waren hierzu insbesondere die Rotationswinkel der Kamera zu bestimmen, um eine Schätzung des Wank-Winkels des Trailers zu ermöglichen. Im Verlauf des Projektes wurde somit zunächst priorisiert die Schätzung der Kamerapose im Live-Betrieb des Systems zur Verfügung zu stellen. Die VISCODA GmbH baute hierzu auf ihren bestehenden Algorithmen zur Bildverarbeitung im Automobilbereich auf. Echtzeitfähige Algorithmen zur Detektion und zum Verfolgen von visuellen Merkmalspunkten, sowie zur Rekonstruktion der 3d Szene gleichzeitige Schätzung der Kamerapose wurden auf der im Trailer-Sensorsystem verbauten Hardware in Betrieb genommen (Details siehe Arbeitspunkte 1.3 und 2.1). Eine Übersicht über die Komponenten des Kamerasystems im Sensornetzwerk ist in Abbildung 71 dargestellt. Die Bilddaten werden auf der für die Automobilindustrie geeigneten Hardware (NVIDIA Jetson Nano mit Linux Ubuntu) verarbeitet und mit einer Rate von 30 Hz werden die errechneten Posen an den Online-Zwilling gesendet.



**Abbildung 71: Schematische Darstellung des Kamerasystems.** Die Bilder der am Trailer verbauten Kamera werden im Sensornetzwerk per UDP Protokoll an das NVIDIA Jetson Nano übertragen. Die Anbindung und Wartung der Hardware wurde über die OKIT CareLAN-Box ermöglicht. Auf dem Jetson Nano wird die Posenschätzung in Echtzeit (30 Hz) durchgeführt und die resultierenden Trailerposen an den Online-Zwilling per TCP Protokoll weitergeleitet. Bildreferenzen: MoTec, OKIT, NVIDIA, dewesoft, speedgoat.

Im Detail bestehen die Algorithmen des structure-from-motion Verfahrens aus den Schritten: Merkmalsdetektion, Merkmalsverfolgung, Triangulierung von 3d Punkten und Optimierung der



Kamerapositionen. Bei der Merkmalsdetektion werden für jedes verarbeitete Bild markante Punkte detektiert, die sich durch einen hohen, lokalen Gradienten des Bildinhaltes auszeichnen [C. Harris and M. Stephens, "A Combined Corner and Edge Detector", in Proc. 4th Alvey Vision Conference, pp. 147-151, (1988)]. Insbesondere Ecken von Objekten oder Kanten, sowie Bereiche mit starken Kontrasten werden in diesem Schritt ausgewählt. Die initiale Auswahl an Merkmalspunkten wird noch durch Hinzunahme von zusätzliche Kriterien, wie die Stärke des Bildgradienten, gefiltert. Um eine vollständigere Rekonstruktion zu erhalten wird auch eine homogene örtliche Verteilung der Merkmalspunkte über das Bild angestrebt. Bei der Merkmalsverfolgung werden die Korrespondenzen zwischen den detektierten Merkmalen von zwei aufeinander folgenden Bildern ermittelt. Die Suche der Korrespondenzen erfolgt lokal und basiert darauf, möglichst gleiche Bildsignalgradientenstruktur in einer Umgebung von wenigen Pixeln um die Merkmalspunkte zu finden [Bruce D. Lucas and Takeo Kanade. "An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision." International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 674–679, (1981)]. Auch hier bestimmen einzustellende Parameter wie die Größe des Bildausschnitts sowie die Abbruchkriterien der Optimierung die Qualität der Korrespondenzen. Ausgehend von dem Set an korrespondierenden Merkmalspunkten können initiale Kameraposen aus der Fundamentalmatrix berechnet werden. Stochastische Verfahren wie z.B. RANSAC (random sample consensus) verringern die Anfälligkeit der Berechnung gegenüber Rauschen und fehlerhaften Korrespondenzen [R. Hartley, and A. Zisserman. "Multiple view geometry in computer vision." Cambridge University press, (2003)]. Alternativ kann der initiale Versatz der Kameras für Anwendungsszenarien im PKW oder LKW auch über eine Schätzung der planaren Bewegung auf einer Bodenebene ermittelt werden (visuelle Odometrie). Die 3d Szenenpunkte der detektierten 2d Merkmalspunkte können nun aus den initialen Kamerapositionen trianguliert werden, unter der Bedingung, dass sich die Kamera zwischen den beiden Bildern ausreichend bewegt hat. Hierbei wird der 3d Punkt als der näherungsweise Schnittpunkt (einen mathematisch exakten Schnittpunkt gibt es auf Grund von Messrauschen typischerweise nicht) aller Sichtstrahlen von korrespondierenden Merkmalspunkten berechnet. Die somit rekonstruierte Szene und Kamerapositionen werden anschließend in einem iterativen Prozess weiter optimiert. In einem Bündelausgleich werden nacheinander, jeweils abwechselnd die Kameraposen einer Teilmenge an Bildern und die gesamte resultierende 3d Szene optimiert. In beiden Schritten werden die Verbesserungen durch Minimierung des Rückprojektionsfehlers der 3d Punkte in die Bilder und anschließenden Vergleich zu den erfolgreich verfolgten, zugehörigen Merkmalspunkten erreicht. Parameter wie die Anzahl an Iterationen, Schwellwerte der maximal erlaubten Rückprojektionsfehler und die Anzahl der zu optimierenden Kameras (im sequentiellen Verfahren sind dies die N vorherigen Bilder) entscheiden über die Qualität der rekonstruierten 3d Szene und die Genauigkeit der geschätzten Kameraposen.

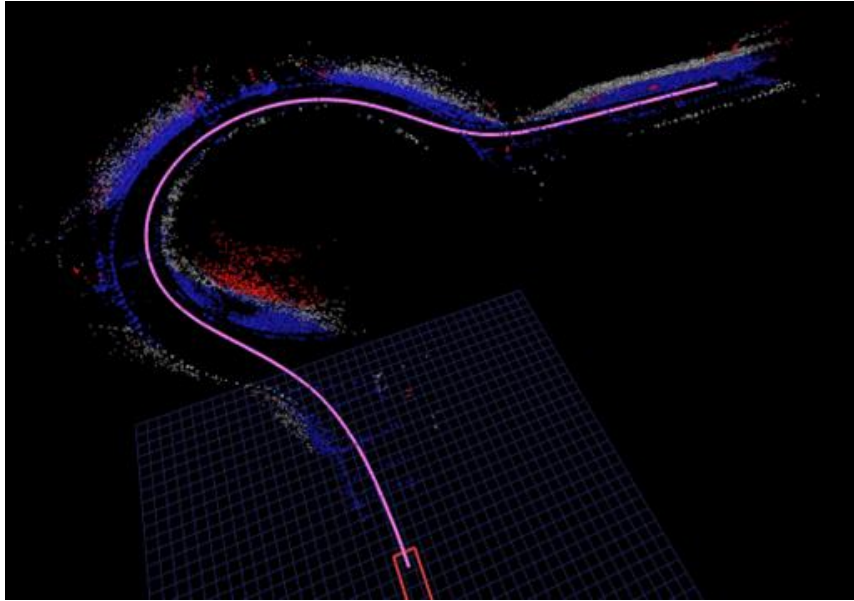


Abbildung 72: Rekonstruierte Szene und Kamerapfad bei der Durchfahrt eines Kreisverkehrs. Rekonstruierte 3d Punkte der Trailer Umgebung sind in blau, rot und grau dargestellt. In violett ist die Trajektorie der Kamera, und somit auch des Trailers, zu sehen.

Da die bestehenden Algorithmen von VISCODA vorrangig für die Anwendung im PKW entwickelt wurden, mussten Weiterentwicklungen der Algorithmen und Anpassungen der in den jeweiligen Modulen verwendeten Parameter durchgeführt werden. Hierbei wurden Kompetenzen von VISCODA zur Parametrierung und Szenenrekonstruktion im Anwendungsfeld von LKW-Trailern weiterentwickelt. Die wesentlichen Gründe für die Anpassung der Algorithmen im IdentT Projekt, im Unterschied zur Anwendung bei PKWs, ergeben sich durch folgende Aspekte:

1. Nutzung einer *einzelnen Kamera* (monokularer Betrieb der Algorithmen) im Vergleich zur Nutzung mehrerer Kameras im PKW. Für PKW-Parkassistentenfunktionen stehen z.B. oft vier Kameras, die eine Rundumsicht erlauben, zur Verfügung (Front, Heck, linker Seitenspiegel und rechter Seitenspiegel).
2. Hohe *Einbaulage* der Kamera, oberhalb des Heckportals, mit stark nach unten geneigter *Ausrichtung*. Das Sichtfeld ist somit hauptsächlich auf den zuvor überfahrenen Fahrbahnuntergrund gerichtet.

Die Verwendung einer Kamera mit Fischaugenlinse, mit einem Öffnungswinkel von ca.  $180^\circ$  und starker Radialverzerrung, ist hingegen analog zu PKW-Anwendungen. Die Kalibrierung der Brennweite, des Hauptpunkts sowie den Parametern zur Kompensation der Radialverzerrung konnten über Standardverfahren der Kamerakalibrierung für die verwendete Kamera durchgeführt werden. Eine Kalibrierung der Extrinsik, also die Bestimmung der Position des Kamerazentrums und die Ausrichtung der Kameraachsen in einem festen Koordinatensystem, bezogen auf den Trailer, wurde nach dem Einbau der Kamera vorgenommen.

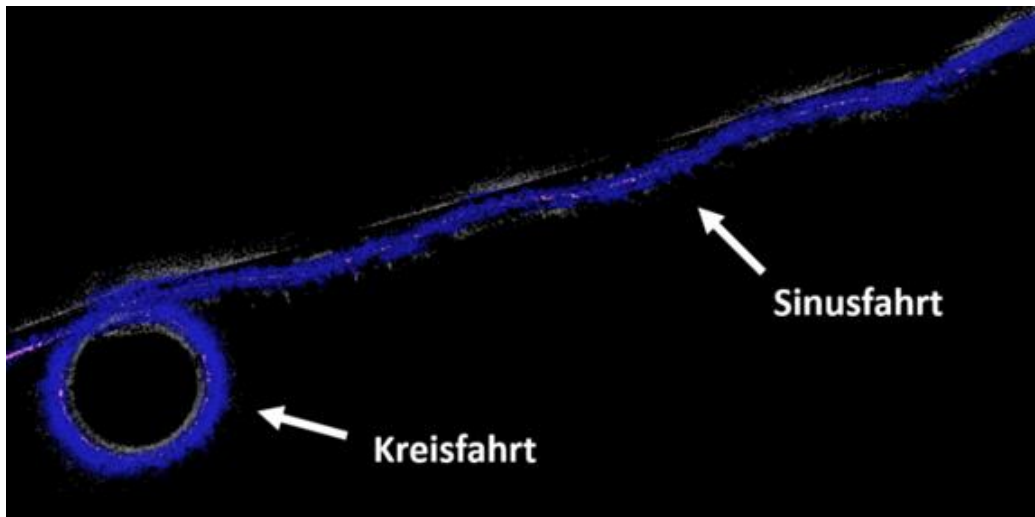


Abbildung 73: Rekonstruierte 3d Punkte (blau) und Kameratrajektorie (violett) für eine Versuchsfahrt auf der ATP-Teststrecke (schräge Draufsicht). Anhand der Szene sind zwei spezielle Fahrmanöver zu erkennen. Einerseits eine Sinusfahrt und anschließend eine vollständige Kreisfahrt.

Ergebnisse zur Szenenrekonstruktion (durch das structure-from-motion Verfahren, siehe oben) wurden für Abschnitte der eingefahrenen Testfahrten und Überlandfahrten auf öffentlichen Straßen erzeugt und zusammen mit dem Institut für mechatronische Systeme (imes) bewertet. Exemplarische Ansichten der Trailer Umgebung und der Kamerabewegung sind in Abbildung 72 und Abbildung 73 dargestellt. Durch die anspruchsvollen Fahrmanöver wurden auch Systemgrenzen der Algorithmen untersucht. Zum Beispiel konnten die Algorithmen zum Merkmalstracking oder zur Berechnung der visuellen Odometrie bei Geschwindigkeiten von 40 km/h durch das Auftreten von motion blur in den Videos keine zuverlässigen Ergebnisse mehr liefern. Ebenso ergab sich, dass asymmetrische Häufungen von Merkmalspunkten am Bildrand die Qualität der Posenschätzung negativ beeinflussten.

Neben den qualitativen Auswertungen von Versuchsfahrten wurde auch eine quantitative Analyse angestrebt. Als wichtige technologische Komponente wurde hierzu eine Metrik zur Bewertung der Posenschätzung gewählt und deren Evaluation in einem automatisierten Prozess implementiert. Der relative pose error (RPE) dient hierbei als Metrik für die lokale Konsistenz zwischen der geschätzten Trajektorie und einer Referenztrajektorie [J. Sturm et al., "A benchmark for the evaluation of RGB-D SLAM systems," 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012, pp. 573-580; Rainer Kümmerle, et al. „On measuring the accuracy of SLAM algorithms.“ Autonomous Robots, 27(4):387–407, (2009)]. Hierbei wird zunächst die Differenzpose  $E_i = (Q_i^{-1}Q_{i+\Delta})^{-1}(P_i^{-1}P_{i+\Delta})$  für die geschätzten Posen  $P_1, P_2, \dots, P_n$  und die Posen  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  der Referenztrajektorie über ein Zeitintervall  $\Delta$  berechnet. Der Translationsfehler (z.B. in [m]) zwischen den Trajektorien ergibt sich dann aus der Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers als

$$RPE = RMSE(E_{1:n}, \Delta) := \left( \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m ||trans(E_i)||^2 \right)^{1/2}$$

wobei  $trans(E_i)$  die Translations-Komponente der relativen Differenzpose  $E_i$  ist. Für Algorithmen zur visuellen Posenschätzung ist es üblich Zeitintervalle  $\Delta$  von einem einzelnen Frame bis zu mehreren Sekunden zu untersuchen. Aus dem Translationsfehler lassen sich dann z.B. Drifts der geschätzten Trajektorie evaluieren, die häufig bei rein visuellen Posenschätzungen auftreten. Als Grundlage für die Posen  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  der Referenztrajektorie werden Daten der GPS- und Beschleunigungssensor-basierten ADMA-

Posenmessung genutzt und in der Berechnung des RPE mit der rein visuellen, kamerabasierten Posenschätzung verglichen (siehe Abbildung 74 und Abbildung 75).

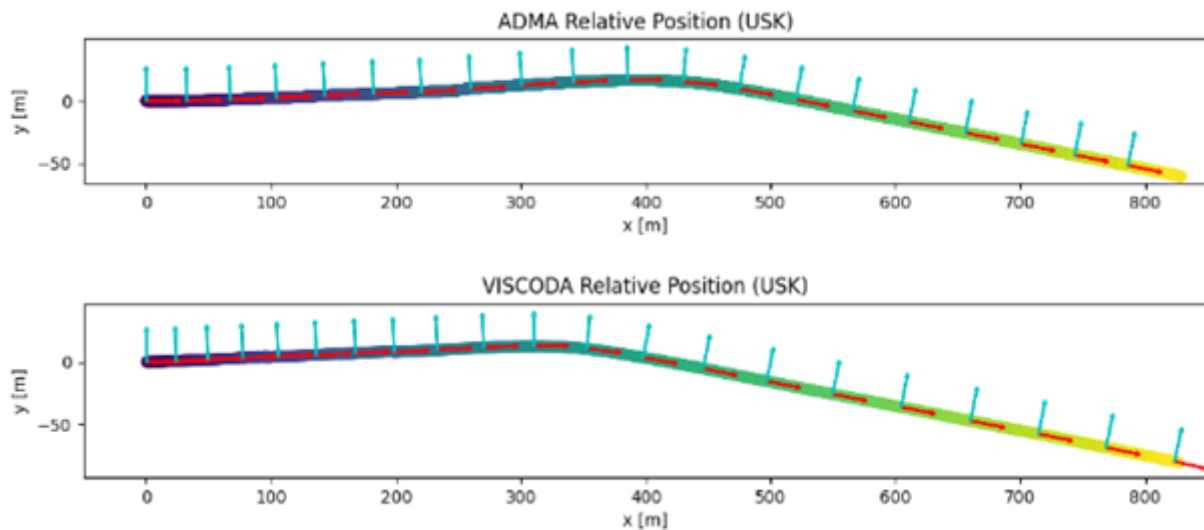


Abbildung 74: Gegenüberstellung der gemessenen Trajektorie des Trailers aus dem Beschleunigungssensor der ADMA (oben) und der geschätzten Pose aus der Rückfahrkamera (unten) in einer Draufsicht. Die Farbe zeigt den zeitlichen Verlauf der Messdaten von dunkel zu hell. In festen Zeitintervallen wurde das lokale Koordinatensystem des Trailers eingezeichnet. Die Posen des ADMA Sensors werden bei der Berechnung des relative pose errors (RPE) als Referenztrajektorie verwendet um die Ergebnisse der kamerabasierten Posenschätzung quantitativ zu bewerten.

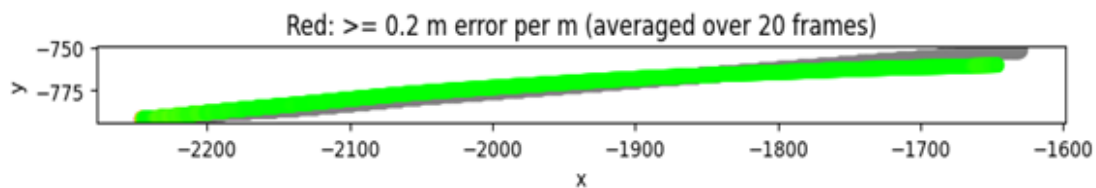


Abbildung 75: Visualisierung des relative pose errors (RPE) in [m] aus einer Testfahrt. Die Referenztrajektorie, als Draufsicht in der x-y Ebene, ist in grau dargestellt. Die geschätzte Trajektorie aus der 3D-Posenschätzung ist entsprechend des RPE eingefärbt.

### Detektion von Straßenschäden

Zusätzlich zur Posenschätzung wurden in der Rückraumüberwachung Strategien zur Detektion von Anomalien untersucht. Hierbei wurden zunächst Recherchen über Datensets zum Training eines neuronalen Netzes zur Detektion von Straßenschäden durchgeführt. Das öffentlich verfügbare „Road damage detection dataset (RDD)“ [Arya et al. RDD2020: An annotated image dataset for automatic road damage detection using deep learning. In: Data in Brief (Vol. 36, p. 107133). Elsevier BV] wurde als Grundlage ausgewählt. Dieses Datenset beinhaltet aktuell (Stand: 2023) 47.420 Bilder aus alltäglichen Straßenverkehrsszenen mit, zu den Bildern assoziierten, Markierungen von Straßenschäden und deren Klassifikationen. Das Bildmaterial stammt aus insgesamt sechs Ländern, repräsentiert also eine hohe geographische Diversität. Neben der geographischen Diversität beinhaltet das Datenset auch Bilder mit verschiedenen Auflösungen und mit stark unterschiedlichen Blickwinkeln, z.B. Aufnahmen, die von einem Motorrad aus oder mit einer Drohne gemacht wurden, was insbesondere für die spezielle Einbaulage der Kamera am IdenT Trailer als Vorteil angesehen wird. Die Klassifikation der Straßenschäden erfolgt in vier Klassen: Längsrisse, Querrisse, Alligator cracks und Schlaglöcher (siehe Abbildung 76). Hierbei ist der Fokus auf Risse im Straßenbelag (Längs- und Querrisse machen etwa 79% des Datensets aus) einerseits für das Training von Detektoren kritisch zu sehen, spiegelt aber andererseits auch die tatsächliche

Auftrittswahrscheinlichkeit solcher Schäden im Straßenverkehr wieder, da sowohl Witterungsbedingt als auch durch fahrzeugbedingte Abnutzung schneller kleinere Risse im Straßenbelag entstehen als ausgedehnte Schlaglöcher. Ebenso ist die unterschiedliche Bewertung des Straßenzustands beim Zusammenführen von Daten aus verschiedenen Quellen kritisch zu sehen, da hierdurch die Lernkriterien für einen Detektionsalgorithmus in verschiedenen Teilen des Datensets unterschiedlich gehandhabt werden.



**Abbildung 76: Beispiele für Straßenschäden aus den Lerndaten des *Road damage detection datasets* (Ref. siehe Haupttext). Von links nach rechts sind die vier Klassen zur Objektdetektion dargestellt: Längsrisse (rot), Querrisse (rosa), Alligator cracks (grün) und Schlaglöcher (gelb).**

Als Detektor wurde YOLOv5 als ein kompaktes und schnelles Netzwerk zur Objektdetektion und Klassifikation ausgewählt [Redmon, J. et al. "You only look once: Unified, real-time object detection." Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. (pp. 779-788), (2016); Jocher, G., et al. YOLOv5 SOTA Realtime Instance Segmentation (v7.0). Zenodo. ultralytics/yolov5: v7.0 (2022), <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3908559>]. Insbesondere im Vergleich mit anderen Detektionsstrategien, wie z.B. der semantischen Segmentierung, bei der jeder Pixel eines Bildes mit einem semantischen Label versehen wird, ist der Rechenaufwand für die Objektdetektion mittels YOLO erheblich verringert. Zusätzlich sind Lerndatensätze zur Objektdetektion oftmals kostengünstiger zu erstellen oder zu erweitern. In diesem Projekt wurde der YOLO Detektor auf dem öffentlichen RDD Datenset trainiert. Hierbei wurden typische Schritte wie die Adaption der Bilder während des Trainings durch Verzerrungen, Spiegelungen und andere geometrische Transformationen durchgeführt und es wurde auf vor-trainierten Gewichten aus einem früheren Stand des Datensets aufgebaut. Die Ausgabe der Detektionen erfolgt pro Bild als zwei-dimensionale Boxen zusammen mit der Klasse der detektierten Anomalie(n) und einem Wahrscheinlichkeitswert, der angibt mit welcher Wahrscheinlichkeit die Anomalie an dieser Stelle vorliegt.



**Abbildung 77: Erfolgreiche Detektionen von Fahrbahnschäden auf Überlandfahrten. Oben: Detektion eines Querrisses, Unten: Detektion eines ausgebeisserten Längsrisses.**

Die Erprobung des Detektionsverfahrens wurde erfolgreich auf Sequenzen von Straßenfahrten, sowie den aufgezeichneten Fahrten auf den Teststrecken durchgeführt. Zu beachten



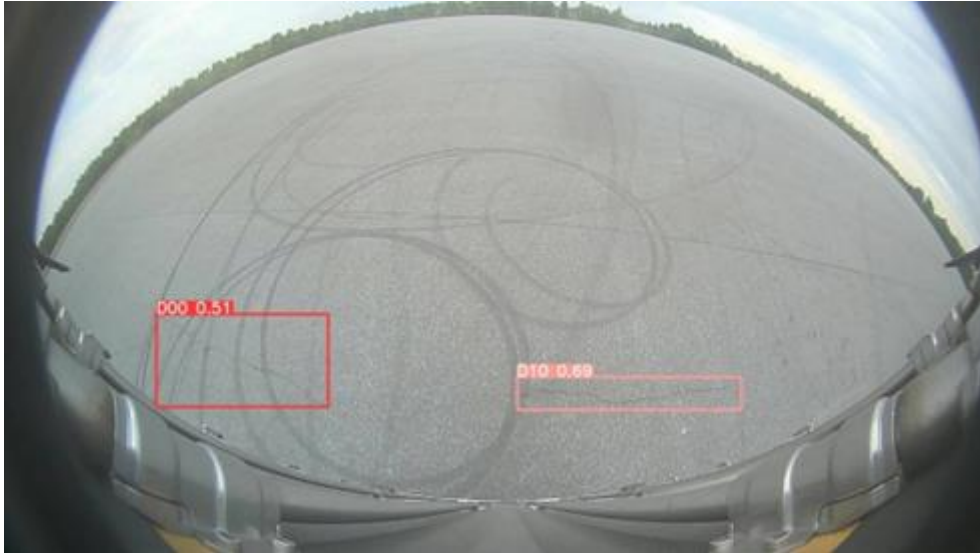
ist, dass diese Daten in keiner Weise während des Trainings des Detektors verwendet wurden. Die Auswertungen auf den Testdaten entsprechen somit einer Analyse der Extrapolationsfähigkeit des trainierten Detektors auf neue Szenarien. Insgesamt konnte eine gute Detektionsqualität der Straßenschäden festgestellt werden, sowohl für die Straßenfahrten, als auch auf den Teststrecken. Das neuronale Netz zeigte eine gute Adaption, trotz des neuen Kontextes im Vergleich zu den Trainingsdaten: Radialverzerrung durch die Fischaugenlinse, hohe Einbauposition der Kamera und Bilddaten aus Deutschland oder von Teststrecken, welche beide nicht im Trainingsset enthalten sind. Beispiele für erfolgreich detektierte Straßenschäden sind in Abbildung 77 dargestellt. Das obere Kamerabild in Abbildung 77 zeigt, dass selbst bei kleinen Rissen oder Spalten in der Fahrbahn eine sensible Erkennung durch das neuronale Netz möglich ist. Im unteren Bild ist zu erkennen, dass auch größere Längsrisse robust als Fahrbahnschaden detektiert werden.



**Abbildung 78: Fehldetektionen bei Überlandfahrten. Oben: Fehlerhafte Detektion eines Schlaglochs an der Stelle eines Straßenablaufs im Bordstein. Unten: Falsch-positive Detektion einer Fahrbahnmarkierung als Längsriss.**

In beiden Fällen zeigt sich, dass die Detektionen zwar eindeutig sind, aber die Detektionswahrscheinlichkeiten oft niedriger sind als in typischen Fällen der Objekterkennung (z.B. Personendetektion). Die Begründung hierfür liegt in der vergleichsweise weniger eindeutigen Objektdefinition von Fahrbahnschäden. Somit kommt es auch gelegentlich zu Fehldetektionen, von denen zwei Beispiele in Abbildung 78 zu sehen sind. Durch den geringen Anteil an Schlaglöchern im Datenset treten insbesondere für diese Klasse häufiger Fehldetektionen auf. Obwohl reichlich Fahrbahnmarkierungen in den Trainingsdaten enthalten sind und dort auch klar von Fahrbahnschäden differenziert werden, traten bei der Analyse des Detektors auf im IdenT Projekt aufgenommenen Daten dennoch falsch-positive Detektionen bei Fahrbahnmarkierungen auf.

Je nach Orientierung des Trailers zur Straße oder bei Fahrten auf den Teststrecken kommt es auch häufig zu Fehlklassifizierungen zwischen Quer- und Längsrissen kommen, da insbesondere bei größeren asphaltierten Flächen, wie z.B. auch bei Parkflächen, die Unterscheidung von Quer- und Längsrissen nicht mehr eindeutig ist. Auf Aufnahmen von den Teststrecken zeigt sich aber auch, dass der Detektor robust ist und Risse gut von Reifenabrieb und anderen Verschmutzungen unterscheiden kann (siehe Abbildung 79).



**Abbildung 79: Robuste Detektion von Straßenschäden bei einer Fahrt auf der Teststrecke. Risse im Asphalt können durch das neuronale Netz von Verschmutzungen der Fahrbahn unterschieden werden.**

#### Zusammenfassung AP 4.1

Im Rahmen der Umfeldüberwachung wurde eine Pipeline zur echtzeitfähigen 3D-Szenenrekonstruktion und Berechnung der Position und Ausrichtung des Trailers in das Sensornetzwerk integriert. Ein Framework zur Analyse der Qualität der Posenschätzung wurde aufgesetzt. Hierbei wurde der relative pose error als Metrik für die Genauigkeit der geschätzten Pose im Vergleich zur Pose aus dem hoch genauen ADMA Sensor implementiert. Zur Erkennung von Fahrbahnschäden wurde ein Objektdetektor ausgehend von der YOLO-Architektur eines neuronalen Netzes umgesetzt. Tests der Detektionsqualität wurden anhand von Straßen- und Teststreckenfahrten durchgeführt und zeigten eine gute Detektionsrate und eine zuverlässige Adaption an die trainingsfremden Szenarien.

#### 4.2. Digitaler Online-Zwilling

Die Hauptaufgabe im vierten Arbeitspaket (AP4) bestand darin, ein Rapid Control Prototyping Steuergerät (nachfolgend als RCP Steuergerät bezeichnet) bereitzustellen, das zur Echtzeitgenerierung von Online-Informationen in der Lage ist. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde ein Arbeitsablauf mittels MATLAB/Simulink entwickelt, der eine unkomplizierte und zügige Integration von individuellen Modellen zu einem Gesamtmodell ermöglichte. Ein bedeutender Bestandteil dieses Arbeitsablaufs war ein Simulink-Vorlagensystem, in das Untermodelle eingefügt wurden. Mithilfe dieser Vorlage konnten sämtliche Ein- und Ausgangssignale sowie Parameter in beide Richtungen mühelos abgerufen werden. Durch diese Herangehensweise war es möglich, die Modelle unabhängig voneinander zu prüfen. Zusätzlich erleichterte dieser Arbeitsablauf sowohl Tests im Offline-Modus als auch Tests unter Verwendung synthetischer Messdaten.

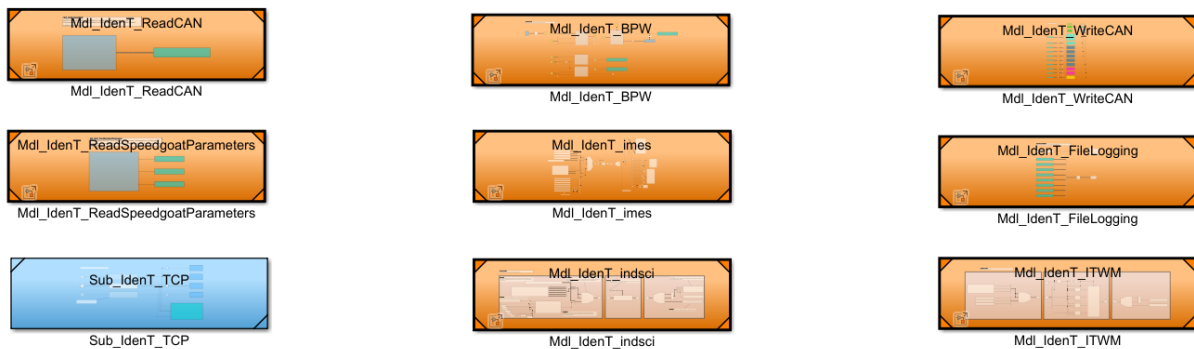
Das Endergebnis, dargestellt als das umfassende Gesamtmodell, ist in Abbildung 80 zu sehen. Dabei handelt es sich um das vollständige Modell des Online-Zwillings, das mittels Simulink erstellt wurde. Dieses Modell integriert die zuvor eigenständigen Untermodelle zu einem kohärenten Gesamtsystem, das die Funktionalitäten des RCP Steuergeräts realitätsnah abbildet.

Die erarbeitete Methode ermöglichte es somit, eine schrittweise Vorgehensweise zur Entwicklung und Validierung von komplexen Systemen zu verfolgen. Durch die klare Trennung der Modelle und die Möglichkeit, diese separiert zu testen, wurde die Fehlersuche und -behebung vereinfacht. Zudem bot der Arbeitsablauf die Flexibilität, verschiedene

Testverfahren zu nutzen, sei es durch das Simulieren mit synthetischen Daten oder das Durchführen von Tests ohne direkte Verbindung zu den physischen Komponenten.

Insgesamt hat das vierte Arbeitspaket einen integrativen Ansatz verfolgt, der es ermöglichte, die Vorteile des Rapid Control Prototyping zu nutzen, während gleichzeitig eine gründliche Überprüfung der Gesamtfunktionalität des RCP Steuergeräts gewährleistet wurde. Die erstellte Methode und das Gesamtmodell stellen somit einen bedeutsamen Schritt in Richtung effizienterer Entwicklung, Testung und Implementierung von Steuerungssystemen dar.

**Mdl\_IdenT:**  
Modell implementiert Main-Modell für den Online-Zwilling im IdenT-Projekt. Hier können die benötigten Modelle referenziert werden.  
Priorisierung für Sub-Modelle wie folgt vorgenommen:  
(1) 00-19 > Einlesen von Daten  
(2) 20-39 > Verarbeiten von Daten  
(3) 40-59 > Ausgabe von Daten



**Abbildung 80: Gesamtmodell des Online-Zwillings in Simulink**

Dargestellt sind die Modelle der Projektpartner (Mdl\_IdenT\_BPW, Mdl\_IdenT\_imes und Mdl\_IdenT\_indsci) sowie Schnittstellen-Modelle, welche die Kommunikation im Trailer-Datennetzwerk des Versuchsfahrzeug sicherstellen. Über die CAN-Schnittstelle(n) werden Modell Ein- und Ausgangsdaten mit dem zentralen Messrechner und dem OKIT CareLAN Gateway ausgetauscht. Über eine TCP-IP Verbindungen werden schädigungsrelevante Sequenzen, in Form von Episoden, mit Hilfe des OKIT-Gateways an die Cloud / den Offline-Zwilling übertragen (siehe auch AP2). Eine weitere TCP-IP Verbindung wird genutzt, um Posen-Informationen der Kamera zu erhalten. Diese Informationen entstammen dabei nicht der Kamera, sondern von einer kleinen Recheneinheit, einem Jetson Nano der Firma Nvidia, welche die Kamera-Bilder vorverarbeitet und die Informationen an den Online-Zwilling weiterleitet. Mit Unterstützung von Viscoda wurde zu diesem Zweck ein eigenes Protokoll entwickelt.

Neben der Hardwarebereitstellung wurde ein modellbasierter Ansatz zur Verschleißschätzung von Scheibenbremsen (Bestandteil des Online-Zwillings) entwickelt. Im Rahmen von Labortests wurde der oben beschriebene Workflow zur Modellintegration erprobt und die Verschleißschätzung evaluiert. Durch von Versuchsfahrten wurden die Verschleiß-Modellparameter mit Hilfe von Messdaten identifiziert und das Modell auf die Gegebenheiten im Versuchsfahrzeug angepasst.

Des weiteren hatte die BPW die Aufgabe, Projektpartner bei der Modellerstellung inhaltlich zu unterstützen. Dafür wurden Datenblätter, Kennlinien etc. für die Parametrierung der Modelle bereitgestellt. Die BPW hat aufgrund der vorliegenden Gesamtmodellkomplexität ebenso bei Fehlersuche sowie der Implementierung von Modellen unterstützt.

Abschließend wurde das Gesamtmodell ausgiebig getestet. Die Tests umfassten funktionale Prüfungen (online Berechnete Ergebnisse vs. „offline“ gerechnete Ergebnisse), Schnittstellen Tests sowie Gesamtmodelltests. Ein Beispielhafter Prüfaufbau ist in Abbildung 81 gezeigt.

Dargestellt ist der Online-Zwilling (rechts), das OKIT CareLAN Gateway (mittig) sowie ein Netzteil zur Spannungsversorgung der Komponenten (links). Als Datenquelle dienten zuvor aufgezeichnete Sequenzen / Messdaten, welche mit Hilfe von Vector CANalyzer erneut „abgespielt“ wurden.



**Abbildung 81: Laboraufbau zur Prüfung des Online-Zwillings**

Mit Hilfe dieses Aufbaus war es reproduzierbar möglich, den Gesamtworkflow (d.h. Eingangsdaten einlesen, Ergebnisse berechnen, Ergebnisse zurückschreiben, .inp-Files erzeugen und versenden) zu evaluieren, bevor das System im Versuchsfahrzeug in Betrieb genommen wurde.

#### Modellbasierte Zustandsschätzung

Für den Offline-Zwilling sind insbesondere folgende Zustände/Zielgrößen bzw. Parameter relevant:

- Longitudinale Geschwindigkeit am Königszapfen
- Laterale Geschwindigkeit am Königszapfen
- Longitudinale Schwerpunktposition des Sattelauflegers
- Vertikale Schwerpunktposition des Sattelauflegers
- Gefederte Masse des Sattelauflegers

Für die Schätzung der Zielgrößen ergeben sich einige grundlegende Anforderungen, damit der praktische Einsatz im Hinblick auf eine spätere Weiterentwicklung der Forschungsergebnisse zur Serienanwendung möglich ist:

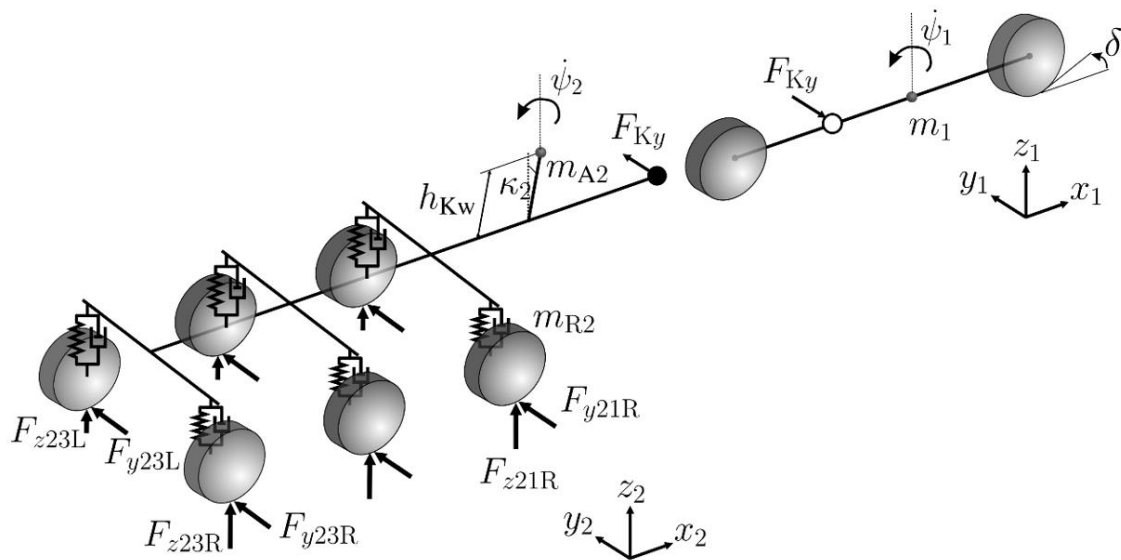
- Aufgrund der limitierten Kommunikation zwischen Zugmaschine und Sattelaufleger, welche sich fast ausschließlich auf Bremssignale beschränkt, müssen alle für die Schätzung verwendeten Größen aus dem Sattelaufleger bezogen werden. Es ist also nicht möglich die Eingaben des Fahrers in Form von Lenkwinkel, Antriebs- und Bremsmoment oder die Längsgeschwindigkeit aus der Sattelzugmaschine zu beziehen.
- Das Schätzverfahren muss adaptiv gegenüber verschiedenen Beladungszuständen sein. Es müssen also verschiedene Schwerpunktpositionen und Massen des Trailers ausschließlich auf Basis von Messungen aus dem Trailer ermittelt werden.



- Es muss eine hohe Schätzungsgüte der Zielgrößen und Parameter sowie der Zustände am Aggregat (den drei Trailerachsen) für alle Beladungszustände vorliegen, da die Beladung in der Praxis ständig veränderbar ist.

Als Grundlage für eine modellbasierte Schätzung mittels eines Unscented Kalman-Filters (UKF) musste ein fahrdynamisches Modell des Sattelzuges erstellt werden. In Abbildung 82 ist das vereinfachte Modell schematisch dargestellt.

Bei dem vereinfachten Modell ist eine explizite Diskretisierung nach Euler erster Ordnung bei einer Abtastrate von 100 Hz möglich, was den Rechenaufwand deutlich reduziert. Darüber hinaus ist die Robustheit des Modells gegenüber Parameterschwankungen hinsichtlich der Stabilität deutlich verbessert. Dies hat positive Auswirkung auf die Identifizierbarkeit der Parameter, worauf im folgenden Punkt eingegangen wird.



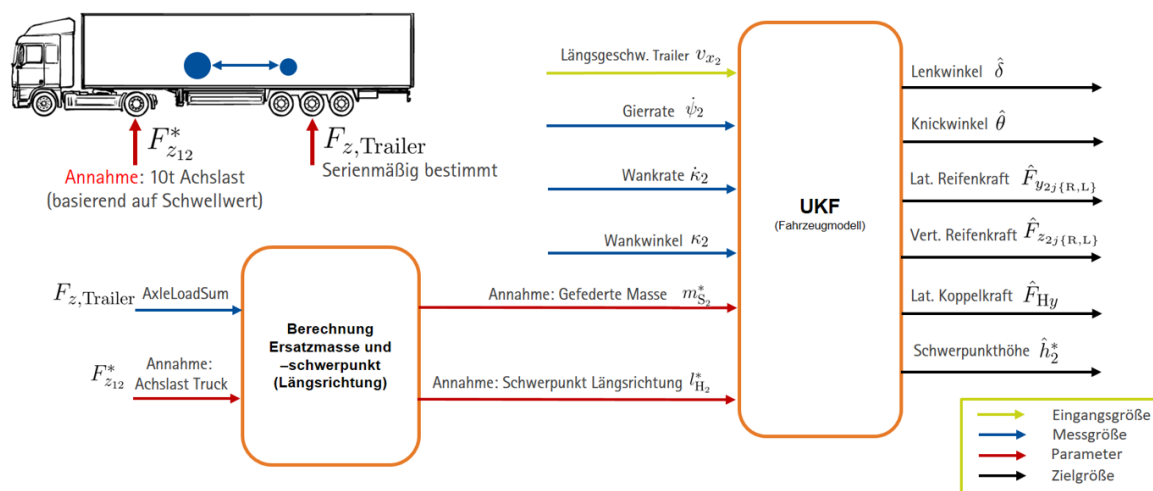
**Abbildung 82: Fahrdynamisches Modell**

Die Parameter des reduzierten fahrdynamischen Modells (Reifenparameter, Steifigkeiten, Masse, Schwerpunktposition, etc.) wurden auf Basis von vorhandenen Messfahrten identifiziert. Dazu wurden Messfahrten ausgewählt, die die Quer- und Wankdynamik besonders anregen, wie z.B. Sinusfahrt, Kreisfahrt, Lenkwinkelsprung und doppelter Spurwechsel bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Zur Identifikation wurde eine Partikelschwarmoptimierung genutzt, die für globale Optimierungsprobleme von höherer Dimension geeignet ist. Das fahrdynamische Modell wurde in [93] publiziert.

Da das fahrdynamische Modell in ausreichender Güte vorliegt und validiert wurde, kann dieses zur weiteren Verwendung in der Schätzarchitektur genutzt werden. Da sich die Masse und die Schwerpunktposition des Trailers in Abhängigkeit seiner Zuladung stark verändern kann, müssen diese Parameter geschätzt oder anderweitig ermittelt werden. Eine Untersuchung zur Identifizierbarkeit von Masse und Schwerpunktposition mit der Profile-Likelihood-Methode hat ergeben, dass nicht alle drei Parameter (Masse, Schwerpunkthöhe und Schwerpunkt in Längsrichtung) unabhängig voneinander bestimmt werden können, wenn ausschließlich Messungen an den drei Trailer Achsen vorliegen. In der Schätzarchitektur wird auf Basis von Domänenwissen eine Ersatzmasse und ein Ersatzschwerpunkt in Längsrichtung bestimmt: In der Praxis ist es für die fahrdynamische Sicherheit wichtig, möglichst viel Achslast auf der zweiten Achse des Trucks zu haben, da es sich hierbei um die Antriebsachse handelt und ein Rutschen der Achse verhindert werden soll. Laut der Gesetzgebung (EU-Richtlinie 96/53/EG) darf die Achse jedoch mit maximal 10t belastet werden. Daher wird auf Basis der gemessenen

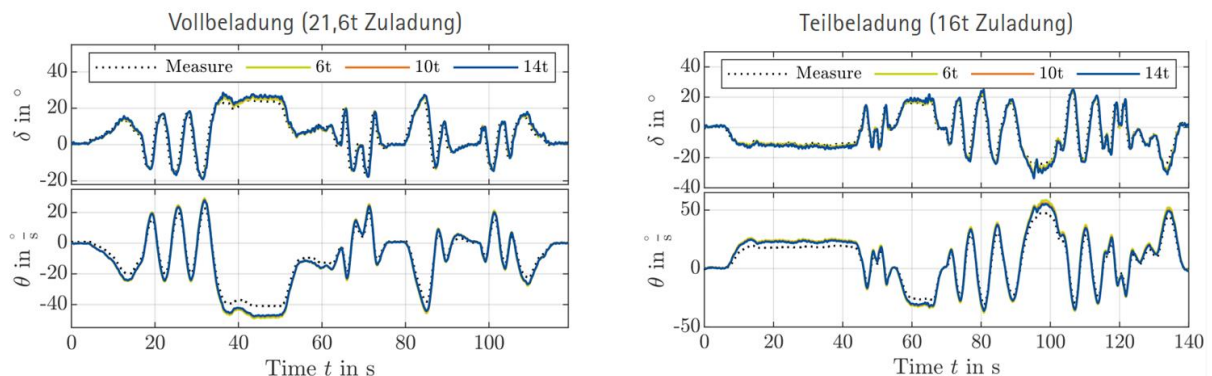


Achslast an den Trailer-Achsen (Aggregatlast) eine Annahme für die Achslast an der Antriebsachse des Trucks getroffen. Ab einer bestimmten Aggregatlast wird die Annahme für die Last auf der Antriebsachse auf 10t festgesetzt. Auf dieser Basis können die Ersatzgrößen für die Ersatzmasse und ein Ersatzschwerpunktposition in Längsrichtung berechnet werden. Die berechnete Ersatzmasse und –schwerpunktposition bewirken die gleiche Aggregatlast wie die tatsächlichen Parameter. Daher können die Zustände an den drei Trailerachsen (laterale und vertikale Reifenkräfte, Schräglaufwinkel) sowie der Lenk- und Knickwinkel gut geschätzt werden. Die Kompensation der Fehlannahmen von Masse und Schwerpunkt findet hauptsächlich in den Kräften am Kingpin statt. Die von dem Modell berechneten Kräfte am Kingpin können deutlich von den tatsächlichen Größen abweichen, wenn man eine Ersatzmasse und einen Ersatzschwerpunkt auf Basis der Aggregatlast bestimmt. Die Kräfte am Kingpin sind für dieses Projekt jedoch aktuell nur nebensächlich, da die fahrdynamischen Zustände am Trailer-Fahrwerk bestimmt werden sollen. Somit ist das Vorgehen unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen vertretbar.



**Abbildung 83: UKF-Architektur zur Zustands- und Parameterschätzung mit Berechnung der Ersatzmasse und des Ersatzschwerpunktes**

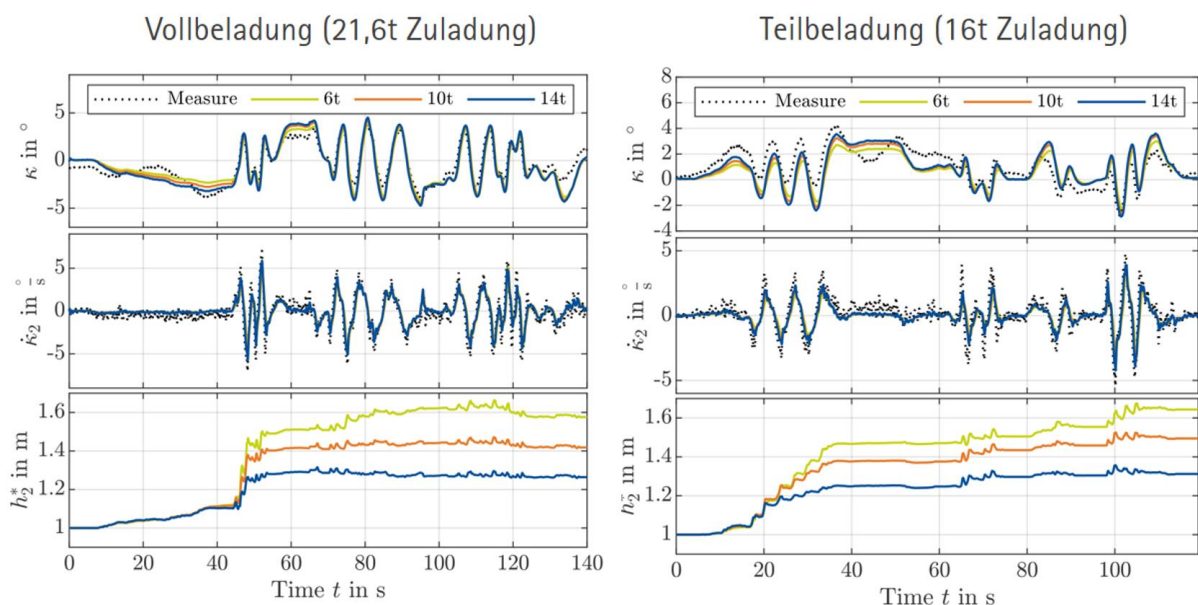
In Abbildung 83 ist die Schätzarchitektur auf Basis der Längsgeschwindigkeit des Trailers und der Messgrößen Gierrate, Wankrate und Wankwinkel umgesetzt. Das UKF schätzt somit alle relevanten Zielgrößen, wie Lenk- und Knickwinkel sowie laterale und vertikale Reifenkräfte des Trailers. Aus dem Zustandsvektor lassen sich ebenfalls die für den Offline-Zwilling relevanten King-Pin-Geschwindigkeiten errechnen.



**Abbildung 84: Schätzung des Lenk- und Knickwinkels für unterschiedliche Annahmen bei Vollbeladung (Links) und Teilbeladung (Rechts).**

Im Folgenden wird zum einen untersucht, wie gut die Schätzgüte des UKF allgemein ist, zum anderen welche Auswirkung die Wahl der Annahme der Achslast auf das Schätzergebnis hat. Dafür wurden zwei Manöver betrachtet, eine Validierungsfahrt im vollbeladenen Zustand (Zuladung 21,6t) und im teilbeladenen Zustand (16t Zuladung). In den folgenden Abbildungen werden die Schätzergebnisse für die Annahme von 6t, 10t und 14t für die Achslast der Antriebsachse des Trucks mit der Messung verglichen. Die Schätzung des Lenk- und Knickwinkels für jeweils voll- und teilbeladen für unterschiedliche Annahmen ist in Abbildung 84 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass unterschiedliche bzw. fehlerhafte Annahmen für die Achslast fast keinen Einfluss auf die Schätzung des Lenk- und Knickwinkels haben, unabhängig von der Beladung. Allerdings ist die Schätzgüte des Knickwinkels bei langgezogenen Kurven leicht fehlerbehaftet. Des Weiteren gibt es einen leichten Zeitverzug bei der Schätzung des Lenkwinkels. Dies kommt dadurch zustande, dass die Dynamik des Zustandes im UKF zu Null gewählt wurde und die Schätzung des Lenkwinkels im Truck auf einer Messgröße im Trailer basiert (der Gierrate), welche bedingt durch das PT1-Verhalten im Aufbau der Reifenquerkraft ebenfalls zeitverzögert

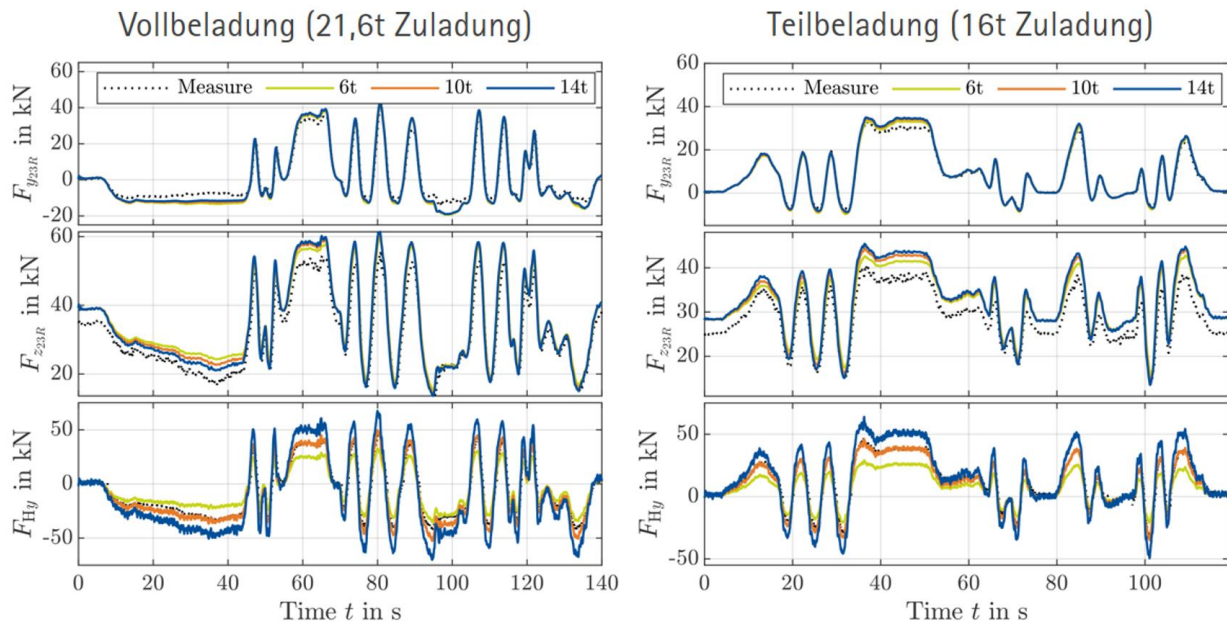


**Abbildung 85: Schätzung der Wankdynamik für unterschiedliche Annahmen bei Vollbeladung (Links) und Teilbeladung (Rechts).**

In Abbildung 85 sind die Ergebnisse der Wankdynamik gezeigt, welche den Wankwinkel, die Wankrate und die geschätzte Ersatz-Schwerpunkthöhe für unterschiedliche Annahmen zeigen.

Es ist zu erkennen, dass unterschiedliche Annahmen zu keinen großen Veränderungen in der Schätzung des Wankwinkels und der Wankrate führen. Generell ist die Schätzgüte bei beiden Größen zufriedenstellend. Bei dem Wankwinkel gibt es außerdem noch einen erhöhten Störgrößeneinfluss durch Fahrbahnnunebenheiten. Einen großen Unterschied gibt es bei der Schätzung der Ersatz-Schwerpunkthöhe. Je kleiner die angenommene Achslast ist, desto kleiner ist auch die berechnete Ersatzmasse. Um das gleiche Wankmoment aufzubringen und somit in dem gleichen Wankwinkel bzw. der gleichen Wankrate zu resultieren, muss sich der Ersatzschwerpunkt erhöhen. Dies ist eindeutig in den unteren Graphen in Abbildung 85 für beide Beladungszustände zu erkennen.

In Abbildung 86 ist die Reifenquerkraft und die Reifenvertikalkraft an der dritten Trailer-Achse rechts sowie die laterale Kraft im Koppelpunkt dargestellt.



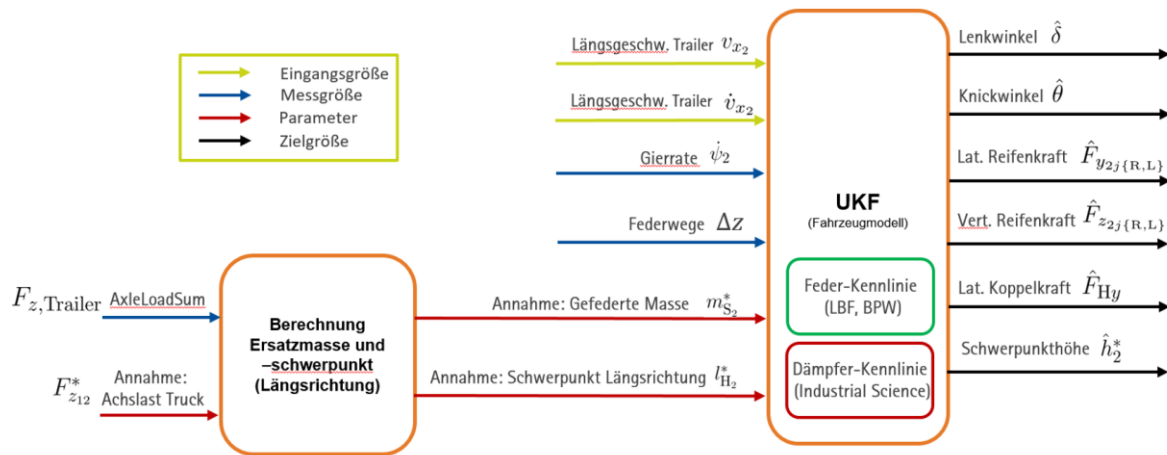
**Abbildung 86: Schätzung der lateralen und vertikalen Reifenkräfte sowie der lateralen Koppelkraft für unterschiedliche Annahmen bei Vollbeladung (Links) und Teilbeladung (Rechts).**

Die unterschiedlichen Annahmen der Achslast haben auf die Schätzgüte der lateralen und vertikalen Reifenkraft nur wenig Einfluss. Dies ist dadurch begründet, dass die aus den unterschiedlichen Annahmen resultierenden Ersatzmassen und –schwerpunkte die gleiche Aggregatlast (bzw. AxleLoadSum) hervorrufen. Somit bilden sich für jede Kombination aus Ersatzschwerpunkt und –masse nahezu die gleichen lateralen und vertikalen Reifenkräfte am Trailer aus. Jedoch müssen etwaige Fehlannahmen der Trailermasse und des –schwerpunkts kompensiert werden. So stimmt bei von der Realität abweichenden Ersatzparametern die laterale Kraft am Königszapfen, dargestellt in Abbildung 86 unten, nicht mehr mit den Messungen überein. Durch eine fehlerhafte Trailermasse und Schwerpunktposition ist die Aufstandskraft am Königszapfen fehlerhaft, welches ebenfalls in fehlerhaften lateralen Reifenkräften des Trucks führt. Dies kann jedoch aufgrund mangelnder Sensorik im Truck nicht validiert werden.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass alle relevante Zustände am Aggregat auch für unterschiedliche Annahmen von zu zufriedenstellenden Schätzergebnissen führen. Den größten Einfluss hat eine Fehlannahme von auf die Schätzung der Koppelkraft. Dies ist jedoch vertretbar, da im Rahmen dieses Projekts die fahrdynamischen Größen am Aggregat (den drei Achsen) des Trailers von Interesse sind. Die Schätzarchitektur mit dem UKF wurde in [4] und [5] publiziert.

Im späteren Verlauf des Projekts wurde die Schätzarchitektur minimal hinsichtlich der Messgrößen angepasst. Es hat sich bei dem Projektpartner Industrial Science herausgestellt, dass sich die Vertikalkräfte in den Feder-Dämpfer-Elementen des Trailers nicht auf Basis von Beschleunigungssensoren schätzen lassen und stattdessen der Federweg eine notwendige Eingangsgröße ist. Somit wurde beschlossen, dass es die technisch beste Lösung ist, anstatt die Vertikalkräfte als Messgrößen in das UKF zu geben (wie ursprünglich geplant), direkt der Federweg als Messgröße zu verwenden und die Dämpfer-Kennlinien von Industrial Science sowie die Federkennlinie beim Wanken, ermittelt vom LBF und BPW, in dem UKF hinterlegt werden. Auf Basis dieser Information kann die Schwerpunkthöhe ebenfalls geschätzt werden.

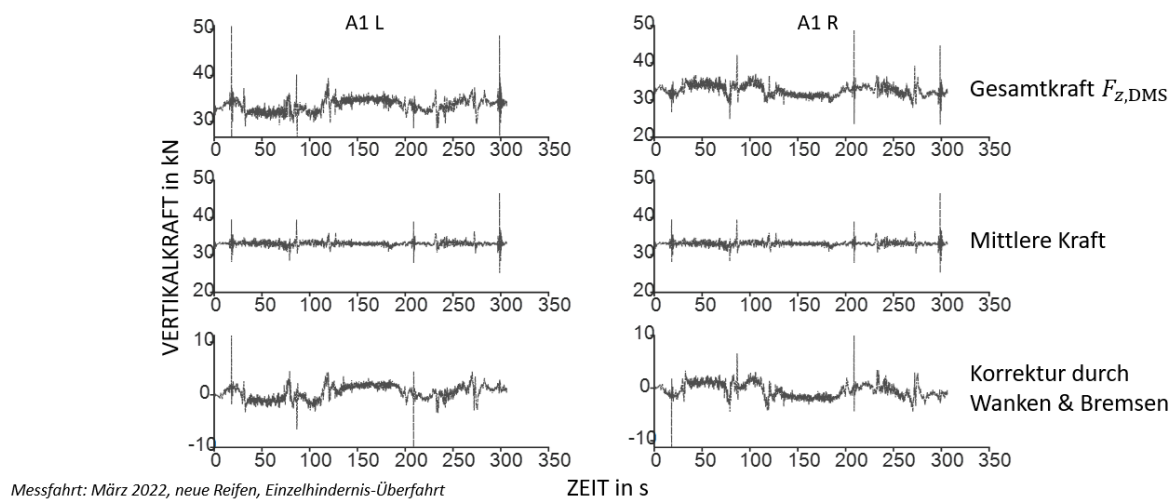
Eine schematische Übersicht von der neuen (und bzgl. des Projekts finalen) Schätzarchitektur ist in Abbildung 87 zu finden.



**Abbildung 87: Schätzarchitektur für die modellbasierte Schätzung mit Fusion der Modelle der Dämpfer- und Federkennlinie. Außerdem wurden final die Federwege als Messgröße genutzt.**

Weiterhin müssen die longitudinale Schwerpunktposition sowie die gefederte Masse des Sattelzuges als Ersatzparameter berechnet werden, die anschließend in das UKF gegeben werden. In Abbildung 87 ist ebenfalls das Sub-Modell von Industrial Science visualisiert.

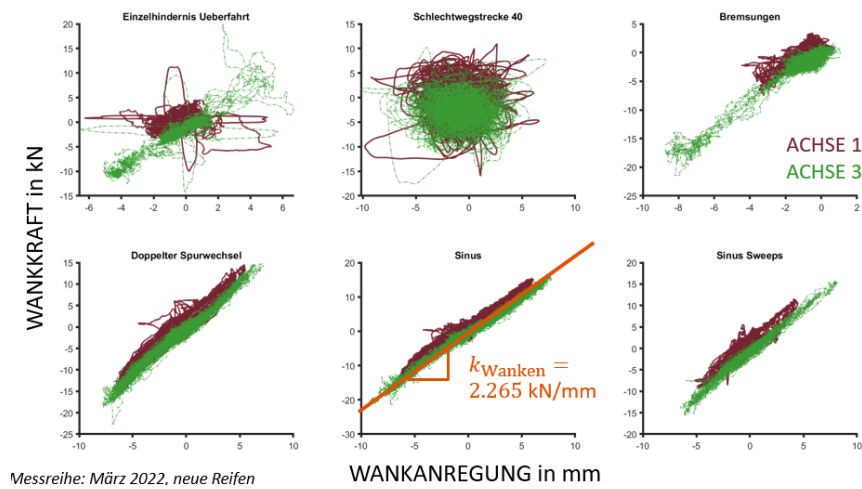
Das reduzierte Achsmodell von Industrial Science zur Bestimmung der Vertikalkräfte wurde wie in Kapitel 3.2 beschrieben aus dem Achsmodell des Offline Zwillings generiert. Auf Grund der Eigenschaften der Achse lassen sich die Vertikalkräfte in 3 Kraftkomponenten aufteilen. Zum einen die Kräfte die durch Feder und Dämpfer wirken, eine Vertikalkraft durch das Bremsmoment bei Bremsmanövern sowie eine Wankkraft die nicht über die Luftfedern sondern über die Luftfederstützen direkt in den Aufbau eingeleitet wird. Die Aufteilung der Kräfte ist in Abbildung 88 dargestellt. Die mittlere Kraft berechnet sich dabei ausschließlich aus Federwegen und Balgdrücken.



**Abbildung 88: Aufteilung der gemessenen Vertikalkraft an den Dehn-Mess-Streifen in die mittlere Kraft, sowie die Korrekturkräfte durch Wanken & Bremsen.**

Die Wankkraft ermittelt sich dabei aus der Steifigkeit der Achse in Wankrichtung  $F_{Wanken} = k_{Wanken} \Delta z_{Wanken}$ , die sich aus allen Haupt- und Nebensteifigkeiten zusammensetzt und nicht vollständig bekannt sind. Zur einfachen Parametrierung eignet sich eine Sinus-Fahrt des Trailers (Abbildung 89).



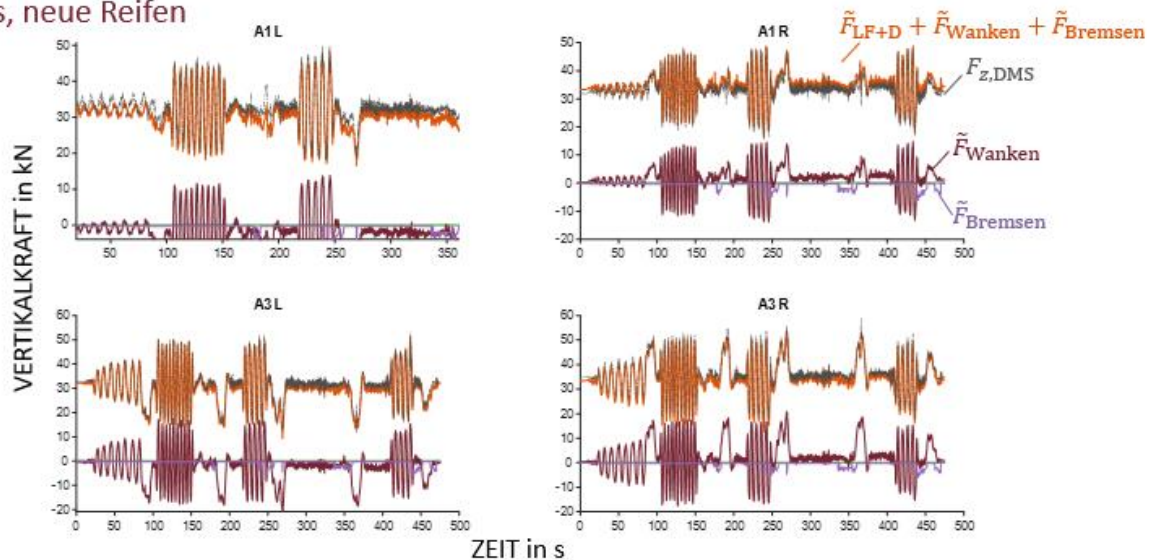


**Abbildung 89: Bestimmung der Wanksteifigkeit aus einer Sinus-Testfahrt.**

Analog lässt sich das resultierende Bremsmoment und der Bremsenreibwert über eine Bremsfahrt bestimmen. Abbildung 90 zeigt beispielhaft die Modellgüte für eine Sinus-Fahrt. Dargestellt sind die gemessenen Kräfte sowie die berechneten Kräfte des Modells. Zusätzlich sind die Wank- und Bremskräfte dargestellt.

Das Anwendungsszenario in der Serie sieht vor, dass das Modell einmalig pro Trailertyp kalibriert werden muss. Hierfür sind eine Bremsfahrt, eine Sinus-Fahrt, sowie die Komponentenkenlinien erforderlich. In der Anwendung benötigt das Modell die Federwege sowie die Balgdrücke.

#### Sinus, neue Reifen



**Abbildung 90: Validierung des Online-Zwilling Modells anhand einer Sinus Fahrt für die 1. und 3. Achse des Trailers auf beiden Seiten.**

### 4.3. Maschinelles Lernen

#### Datengetriebene Zustandsschätzung

Auf Basis des AP 4.2 („Digitaler Online-Zwilling zur Bestimmung der Fahrdynamik“) in Kombination mit dem AP 4.3 („Implementierung der Methoden des Maschinellen Lernens“) wurden am Institut für Mechatronische Systeme Untersuchungen angestellt, inwiefern Methoden des Maschinellen Lernens die Zustandsschätzung im LKW-Trailer verbessern können. Dazu wurde eine datengetriebene Schätzarchitektur erarbeitet, die in Abbildung 91 dargestellt ist. Als Hauptbestandteil dieser Architektur wird eine Gated Recurrent Unit (GRU)



verwendet. Als Eingangsgrößen für das künstliche Neuronale Netz (KNN) werden die gleichen Informationen für die modellbasierte vorgesehen, sodass hier ein fairer Vergleich erzielt wird. Die Anzahl der Hidden-Units in der GRU wurde auf 200 gewählt und das Netz wurde mit dem ADAM-Optimierer trainiert.

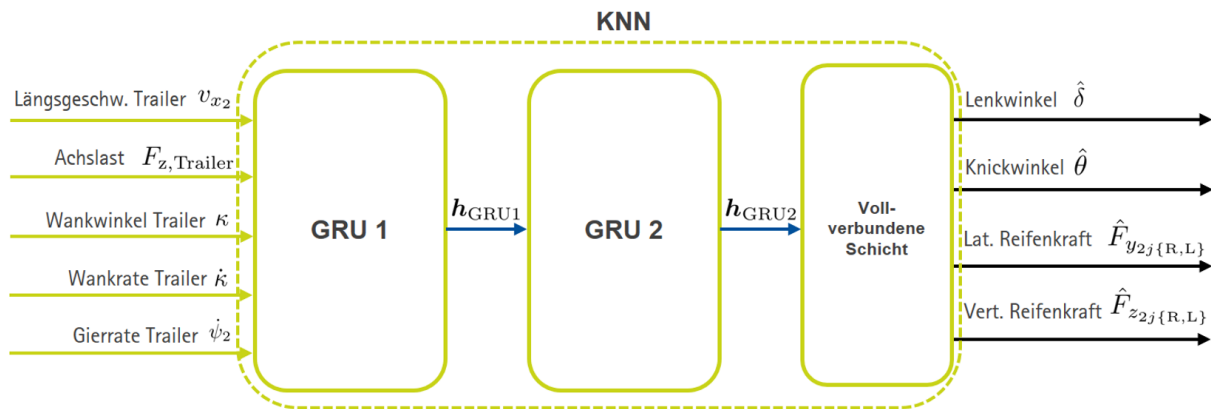


Abbildung 91: Datenbasierte Schätzarchitektur zur Zustandsschätzung am LKW-Trailer

Weiterhin wurde untersucht, inwiefern die modellbasierte und die datengetriebene Schätzarchitektur kombiniert werden können, um die Schätzgüte weiterhin zu verbessern.

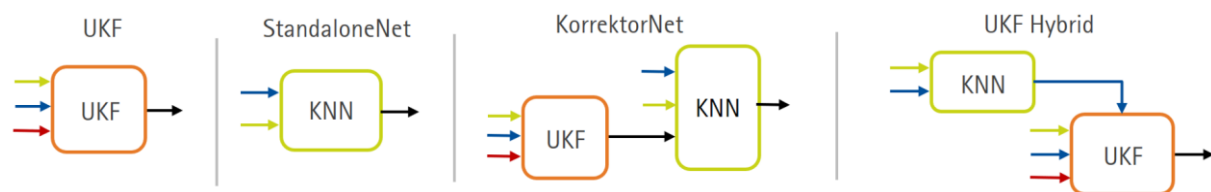


Abbildung 92: Hybride Schätzarchitekturen durch Kombination von modellbasierten und datengetriebenen Methoden

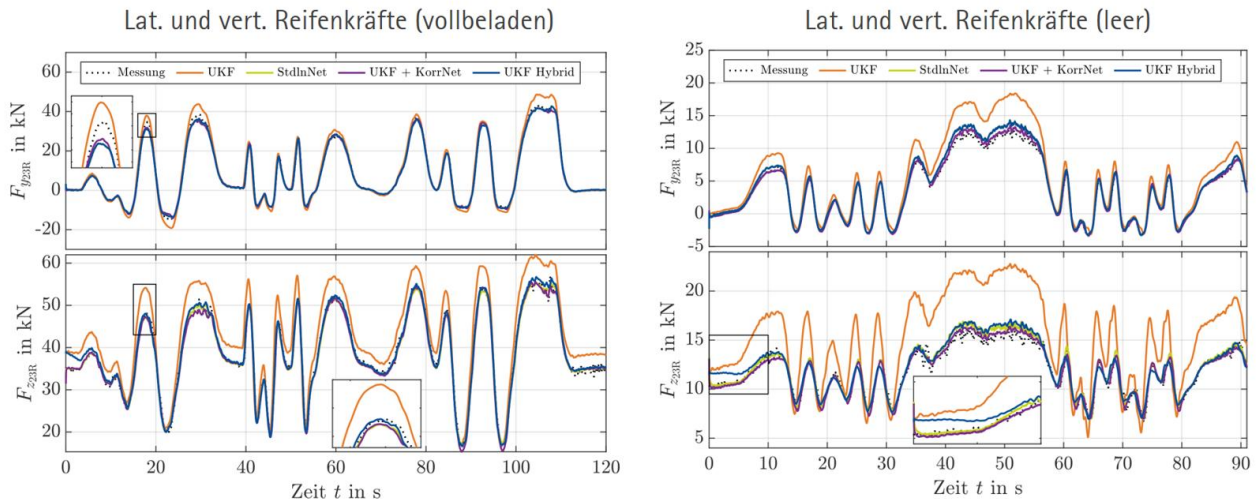
Für die erste hybride Struktur „KorrektorNet“ (siehe Abbildung 92) wurde das KNN hinter das UKF geschaltet, um die Schätzergebnisse den UKF zu korrigieren. Das KNN erhält von dem UKF alle 17 Zustände des Zustandsraummodells sowie die berechneten Vertikalkräfte aller Räder. In der zweiten Variante „UKF Hybrid“ werden die Schätzergebnisse aus dem KNN als zusätzliche (Pseudo-)Messgrößen in das UKF eingeführt. Dabei werden alle Outputs des KNN (Lenkwinkel, Knickwinkel, laterale und vertikale Reifenkräfte) verwendet. Zusätzlich wird der Zustandsvektor um den Parameter der Schwerpunktlängsrichtung erweitert, damit das Modell sich an die zusätzlichen (Pseudo-)Messgrößen der Reifenvertikalkräfte anpassen kann.

Im Folgenden werden vier unterschiedliche Schätzarchitekturen verglichen:

1. UKF
2. StandaloneNet (rein datengetriebenes Modell)
3. KorrektorNet (KNN hinter UKF geschaltet)
4. UKF Hybrid (UKF erhält Outputs des KNN als (Pseudo-)Messungen)

Die unterschiedlichen Schätzmethoden sind auch in Abbildung 92 schematisch dargestellt.

Im Folgenden werden beispielhaft die Schätzergebnisse der Reifenquer- und Reifenaufstandskraft an der dritten Trailerachse rechts in Abbildung 93 für ein Validierungsmanöver mit gemischter querdynamischer Anregung vorgestellt. Auf der linken Seite ist die Schätzung für den vollbeladenen Zustand zu sehen, während auf der rechten Seite der leere Beladungszustand gezeigt ist.



**Abbildung 93: Laterale und vertikale Reifenkraft an der dritten Trailerachse rechts für den vollen und leeren Beladungszustand**

Es ist bei beiden Beladungszuständen zu erkennen, dass das UKF die schlechteste Schätzgüte bietet, während die rein datengetriebene und die hybriden Methoden eine deutlich bessere Schätzgüte erreichen. Dies ist durch Modellfehler im Zustandsraummodell des UKF zu begründen, welche durch den Einsatz von datengetriebenen Methoden kompensiert werden können, da der Fehler antrainiert werden kann.

In Tabelle 3: NMSE für die unterschiedlichen Schätzmethoden bei unterschiedlichen Beladungszuständen ist der Normalized Mean Squared Error (NMSE) für die vier unterschiedlichen Methoden bei den unterschiedlichen Beladungszuständen dargestellt. Dabei hat das KorrektorNet die beste Schätzgüte und das UKF die schlechteste. Die Untersuchungen zu hybriden Schätzarchitekturen wurde in [6] publiziert.

**Tabelle 3: NMSE für die unterschiedlichen Schätzmethoden bei unterschiedlichen Beladungszuständen**

vollbeladen (21,6t)	0,0672	0,0042	<b>0,0039</b>	0,0079
teilbeladen (16t)	0,1053	0,0043	<b>0,0039</b>	0,0111
leer (0t)	0,6708	0,0205	<b>0,0196</b>	0,0496
$\Sigma$	0,8433	0,0290	<b>0,0274</b>	0,0686

Es kann also festgehalten werden, dass eine Kombination aus modellbasierten und datengetriebenen Methoden die Schätzgüte deutlich verbessern kann, was im Rahmen dieses Projekts jedoch nicht ausführlicher untersucht wurde.

### Klassifikation von Unwucht am Reifen

Am Institut für Mechatronische Systeme wurden Untersuchungen zur merkmalsbasierten (featurebasierten) Klassifikation der Unwucht (341g) durchgeführt. Dazu wurden die Messdaten des Ovalrundkurses (ORK) aus dem unbeschädigten Zustand und der Unwucht an der 3. Achse rechts genutzt. Es wurden die Messdaten des seriennahen Sensornetzwerkes herangezogen, das im Rahmen des Projekts IdenT entwickelt und eingebaut wurde.

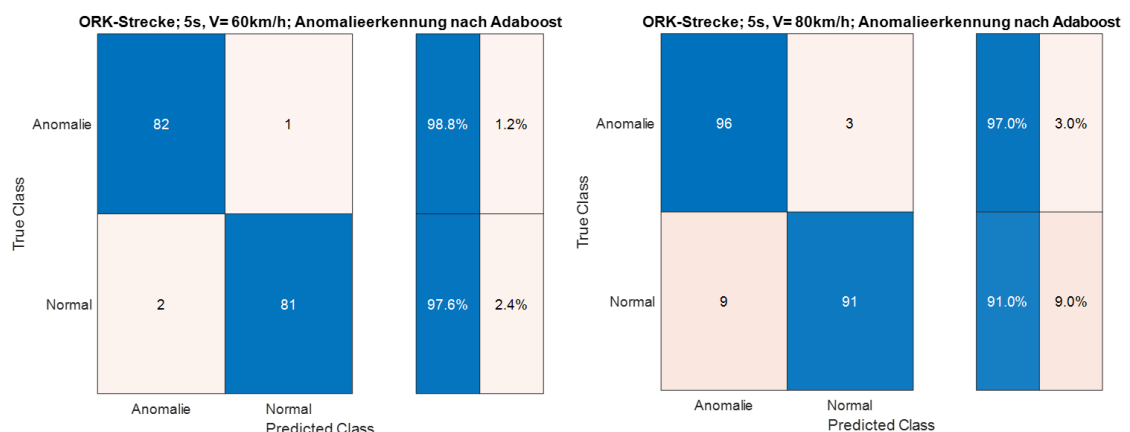
Um die charakteristischen Merkmale extrahieren zu können, wurden die Daten der Achs-Beschleunigungen in x-, y- und z-Richtung verwendet. Die Zeitreihen werden in gleiche Zeitabschnitte mit der Länge von 5 Sekunden eingeteilt und anschließend alle Abschnitte mit einer übermäßigen Beschleunigung bzw. Verzögerung herausgefiltert, sodass nur Abschnitte mit annähernd gleicher Geschwindigkeit verwendet werden. Daraufhin werden verschiedene

Merkmale (Features) auf den einzelnen Abschnitten berechnet. Es haben sich folgende Merkmale als relevant herausgestellt:

- Amplitude des Frequenz-Peaks der spektralen Leistungsdichte bei der zu erwartenden Unwucht-Frequenz
- Amplitude der zu erwartenden Unwucht-Frequenz-Peaks der ersten und zweiten Oberschwingung
- Kurtosis
- Peaks aus der Autokorrelationsfunktion der Zeitsequenz
- Skewness
- Peak-to-RMS Rate

Für die Klassifikation ergeben sich zwei Klassen: Unbeschädigt (ohne Unwucht) und Beschädigt (mit Unwucht). Der Datensatz wird in einen Trainings- und einen Testdatensatz aufgeteilt. Auf Basis der Merkmale werden zwei verschiedene Methoden zur Schadensklassifikation der Unwucht implementiert, die im Folgenden vorgestellt werden.

- **AdaBoost Klassifikator:**



**Abbildung 94: Klassifikationsergebnisse des AdaBoost-Klassifikators**

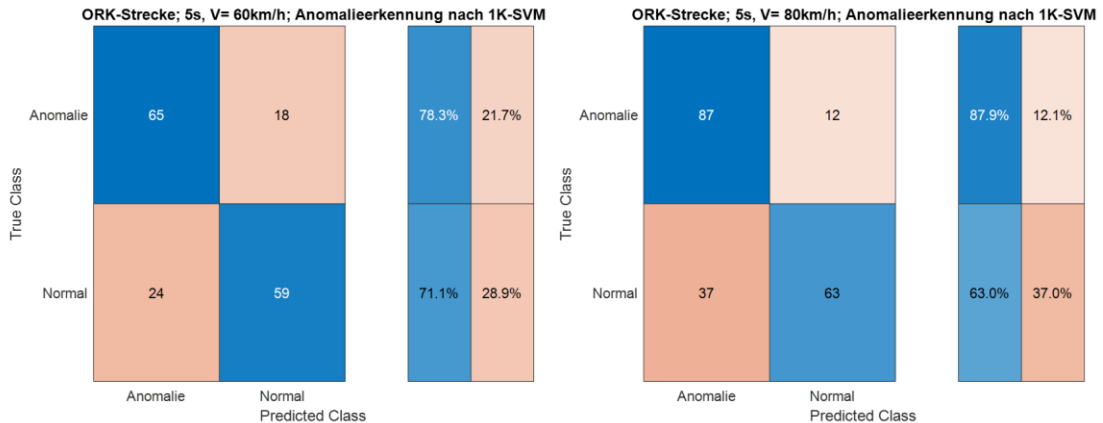
Der AdaBoost Klassifikator wird für überwachte (engl. supervised) Methoden eingesetzt. Während des Trainings erhält der Klassifikator die Features und das entsprechende Label (beschädigt/unbeschädigt). Die Ergebnisse der Klassifikation sind in Abbildung 94 zu sehen.

Der Klassifikator wurde einmal auf einem Datensatz bei 60 km/h und einmal bei 80 km/h trainiert und getestet. Es ergeben sich für die beiden konstanten Geschwindigkeiten, die auf dem Ovalrundkurs (ORK) bei ATP Papenburg gefahren wurden, gute Ergebnisse. Im nächsten Schritt soll ein Training bei kombinierten Geschwindigkeiten vorgenommen werden. Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Klassifikation nur bei höheren und konstanten Geschwindigkeiten funktioniert. Diese kommen allerdings während des Betriebs des Trailers häufig vor (z.B. bei Autobahn- oder Überlandfahrten).

- **One-Class-Support-Vector-Machine**

Während bei dem Training für den AdaBoost Klassifikator sowohl die Features als auch die Labels von beiden Klassen benötigt werden, eignet sich die One-Class-Support-Vector-Machine für sogenanntes semi-supervised Learning. Es wird nur der „Gutfall“, also der unbeschädigte Fall antrainiert und Abweichungen von diesem antrainierten

„Normalfall“ werden als Anomalie klassifiziert. Dies hat den Vorteil, dass nur Daten vom Gutfall benötigt werden, welche häufig relativ einfach beschafft werden können, wohingegen die Daten der Schädigungsfälle eher schwierig bis gar nicht zu beschaffen sind.



**Abbildung 95: Klassifikationsergebnisse One-Class-SVM bei Daten mit 60 km/h und 80 km/h**

In diesem Fall wurde die 1C-SVM mit den Daten des unbeschädigten Zustandes trainiert und auf Daten des Gutfalls und Schlechtfalls getestet. Die Ergebnisse dazu sind in Abbildung 95 zu sehen. Das Training und Testen fand getrennt auf zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (60 km/h und 80 km/h) statt. Es ist auffällig, dass beim Semi-Supervised Training die Ergebnisse nicht so gut sind, wie beim supervised Training des AdaBoost-Klassifikators, da hier nur die Daten des „Gutfalls“ für das Training zur Verfügung stehen. Dennoch ist auch hier die Klassifikationsgenauigkeit zufriedenstellend.

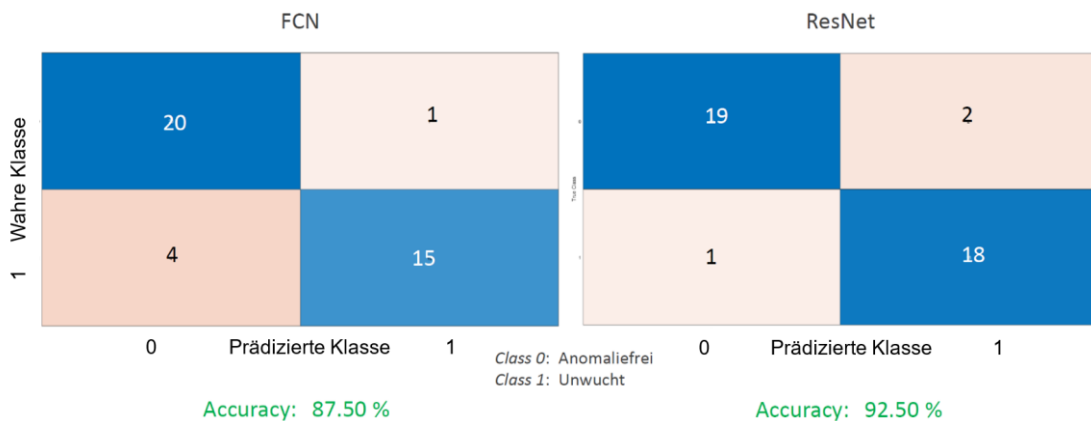
- **Klassifikation mit Convolutional Neural Networks (CNN)**

Während in den vorherigen Punkten Untersuchungen zur Klassifikation der Unwucht (341g) mit Methoden des maschinellen Lernens durch manuelle Featureextraktion durchgeführt wurden, ist in diesem Abschnitt die Unwuchtdetektion mit Deep Learning untersucht worden. Bei dem Deep Learning extrahiert ein tiefes künstliches Neuronales Netz die für die Klassifikation relevanten Features selbst. Dazu wurden die Messdaten des Ovalrundkurses (ORK) aus dem unbeschädigten Zustand und der Unwucht an der 3. Achse rechts genutzt. Es wurden die Messdaten des seriennahen Sensornetzwerkes herangezogen, das im Rahmen des Projekts IdenT entwickelt und eingebaut wurde.

Um die charakteristischen Merkmale extrahieren zu können, wurden die Daten der Achs-Beschleunigungen in x-, y- und z-Richtung verwendet. Die Zeitreihen werden in gleiche Zeitabschnitte mit der Länge von 25 Sekunden eingeteilt und anschließend in Batches von 1000 Zeitschritten (bei einer Abtastrate von 805 Hz also ca. 1,24 Sekunden) aufgeteilt. Trainiert wurden über 3000 Epochen jeweils ein Fully Convolutional Neural Network (FCN) mit drei Schichten und einer Global Average Pooling (GAP) Layer ein Convolutional Residual Neural Network (ResNet) mit drei Blöcken mit jeweils drei Faltungsschichten mit entsprechenden Zwischenverbindungen zwischen den Blöcken sowie einer abschließenden GAP Layer.

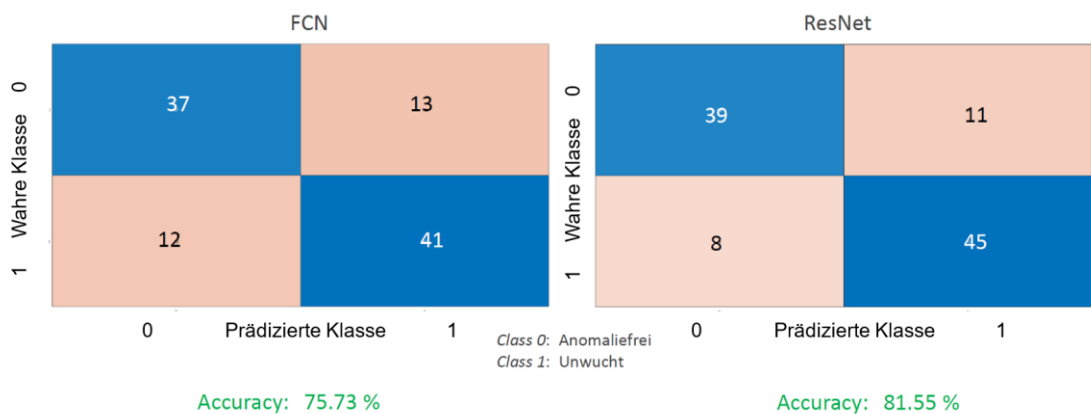
Für die Klassifikation ergeben sich zwei Klassen: Unbeschädigt (ohne Unwucht) und Beschädigt (mit Unwucht). Der Datensatz wird in einen Trainings- und einen Testdatensatz aufgeteilt. Auf Basis der Merkmale wird auf zwei verschiedenen Datensätzen trainiert: 1) Nur Daten vom OKR und 2) alle Manöver, die zur Verfügung stehen.

Die Klassifikationsergebnisse des Test-Datensatzes auf den ORK-Daten sind in Abbildung 96 dargestellt.



**Abbildung 96: Konfusionsmatrix für die Klassifikation auf ORK-Daten**

In Abbildung 97 sind die Klassifikationsergebnisse in Form der Konfusionsmatrix für alle Manöver (ORK, Lenkwinkelsprung, Slalom, Spurwechsel, gemischte querdynamische Anregung) gezeigt.



**Abbildung 97: Konfusionsmatrix für die Klassifikation auf dem gesamten Datensatz (alle Manöver)**

Hier stehen deutlich mehr Daten zum Testen zur Verfügung und eine größere Vielfalt an Fahrsituationen wird abgedeckt. Somit entspricht die verringerte Accuracy von 75,73% beim FCN bzw. 81,55% beim ResNet den Erwartungen. Auch hier stellt sich das ResNet gegenüber dem FCN als überlegen heraus. Weitere Untersuchungen zur Steigerung der Genauigkeit (Accuracy) könnte z.B. eine Hyperparameteroptimierung, veränderte Eingangsfeatures (z.B. generiertes Bild anstatt Zeitreihe), Dropout im Training oder eine stärkere L2-Regularisierung umfassen.

Abschließend muss zu diesen Ergebnissen der datengetriebenen Unwuchtdetektion jedoch festgehalten werden, dass eine direkte Übertragbarkeit der trainierten Modelle auf andere Reifen und Trailer fraglich ist. Generell sind LKW-Reifen nicht ausgewuchtet, somit finden sich in jedem Beschleunigungssignal (auch für den „Gutfall“) Unwuchtfrequenzen wieder. Ob es sich um einen Gut- oder Schlechfall handelt, lässt sich z.B. an der Amplitude der Unwuchtschwingung ausmachen. Somit ist voraussichtlich eine sehr sensitive Detektion von ungewollten Unwuchten nicht möglich. Nur größere Schädigungen, die eine Unwucht hervorrufen, können erkannt werden.



## Klassifikation der Straße und Detektion besonders beanspruchender Straßensegmente

Das Fraunhofer ITWM hat zunächst verschiedene Studien mit unterschiedlichen algorithmischen Ansätzen durchgeführt, den Straßenzustand modell- und datenbasiert bzw. hybrid zu bestimmen. Insbesondere die Inversionsmethoden basierend auf Messdaten und Viertelfahrzeugmodellen haben sich hier hinsichtlich einer idealen Modellkomplexität als hervorragend geeignet erwiesen. Dieser Ansatz vereint physikbasierte Modellierungsansätze und eine datengetriebene Abstützung auf mit vertretbarem Aufwand beobachtbare Messgrößen und ist zudem hoch-performant, insbesondere echtzeitfähig. Die mathematische Inversion beruht hierbei auf einer Formulierung der Aufgabe als zeitdiskretes Optimalsteuerungsproblem, welches dann mit einem Riccati-Ansatz numerisch effizient gelöst werden kann.

Es wurden verschiedene Studien zur Effizienz und auch zu verschiedenen Messdatenkonstellationen und der damit erzielten Genauigkeit durchgeführt (vgl. auch AP3.1), es wurde die Robustheit und Stabilität im Hinblick auf die Anwendung im Online-Zwilling mit Speisung durch Messdaten aus dem Trailersensornetzwerk analysiert. Die Inversion von Viertelfahrzeugmodellen liefert bei Bedarf Straßenprofile zur Anwendung auf den Online-Zwilling wie auch Rauigkeitskennwerte (z.B. den internationalen Rauigkeitsindex (IRI)) zur Klassifikation der Straße bzw. Detektion besonders beanspruchender Straßensegmente. Des Weiteren wurden Analysen zur Quantifizierung der Unsicherheiten in einzelnen Modellparametern durchgeführt.

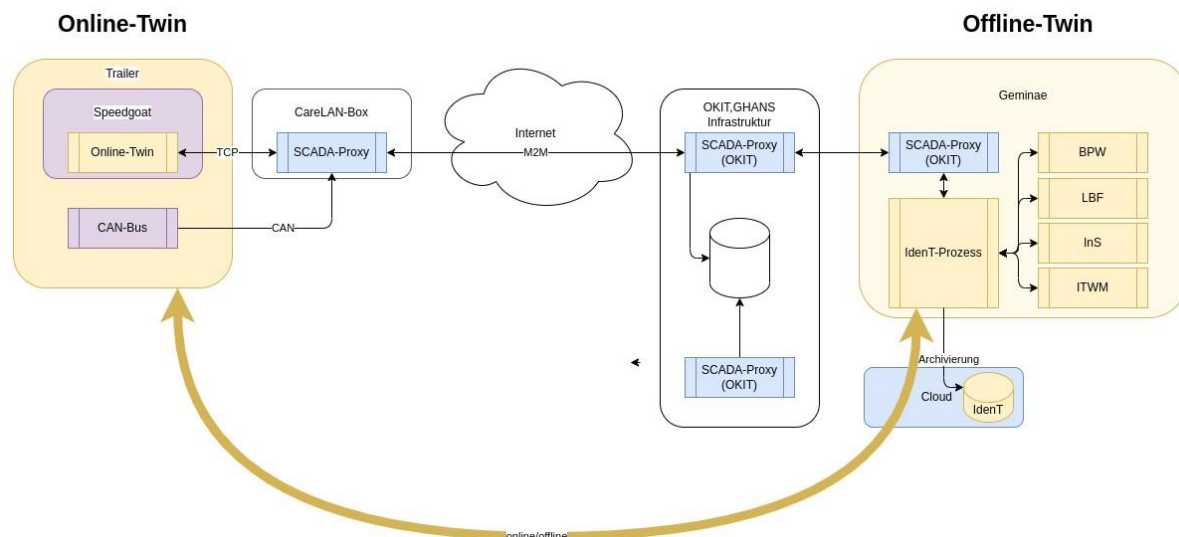
Die Straßenprofilidentifikationsmethode wurde in das übergreifende Simulink-Modell des Online-Zwillings integriert, und schließlich erfolgreich auf die Speedgoat-Hardware des Trailers aufgespielt. Das Simulink-Modell wurde erstellt und integriert, und mit Hinblick auf die erzielten Ergebnisse kontinuierlich angepasst. Tests im realen Betrieb konnten durchgeführt werden und die Vorgehensweise konnte erfolgreich validiert werden.

### 4.4. Informationsfusion

Sämtliche Ansätze zur Informationsfusion sind bereits in den vorausgegangenen Abschnitten ausführlich beschrieben. Sie werden daher an dieser Stelle nicht gesondert aufgeführt.

### 4.5. Schnittstelle digitaler On- / Offline-Zwilling

Während der Online-Zwilling auf einer Speedgoat-Hardware im Fahrzeug betrieben wird, wird der stationäre Offline in der Cloud-Infrastruktur auf einem Linux-Host betrieben. Sowohl die Ausleitung von Messdaten und Parametern vom Online- zum Offline-Zwilling (vom Fahrzeug zur Cloud), wie auch die Rückübertragung ausgewählter Parameter vom Offline- zum Online-Zwilling (von der Cloud zum Fahrzeug) wurde gewährleistet.



**Abbildung 98: Schnittstellen Online- und Offline-Zwilling**

Zu den Herausforderungen gehörte, dass der Online-Zwilling eine zuverlässige, aber möglichst einfach zu realisierende Datenschnittstelle bedienen sollte. Hier hat sich das Streaming von vordefinierten Datenstrukturen herauskristallisiert, die stark an die Datenformate der gewählten Rechnerarchitektur angelehnt waren (Integer- und Floatingpoint-Werte, etc.). Diese Form der Datenübertragung ist zudem sehr sparsam und kommt dem Anspruch entgegen, den Mobilfunk-Datenkanal möglichst effizient und Volumen-sparsam auszunutzen.

Auf dem Offline-Host wurden die eintreffenden Daten dann in eine Text-Datei überführt, eine sogenannte INP-Datei (Input-Datei). Dieses Format wiederum besitzt den Vorteil, dass die einzelnen übertragenen Werte menschenlesbar in einer Textdatei hinterlegt sind und mit konventionellen Texteditoren und Office-Programmen ausgewertet und analysiert werden können. Die INP-Datei spielt eine Zentrale Rolle beim Start des Offline-Zwilling.

Der Rückkanal verwendet als Eingang ebenfalls eine Variation der INP-Datei um relevante Parameter auszulesen und über ein sparsames, binäres Datenformat zurück an den Online-Zwilling zu senden.

Der Online-Zwilling streamt seine ausgehenden Daten zu der auf dem Fahrzeug mit geführten CareLAN-Box, welche die Daten weiter leitet an die Cloud-Infrastruktur der OKIT und letztendlich an den Linux-Host, auf dem der Offline-Zwilling läuft. Werden die Daten über den selben Weg vom Offline-Zwilling zurück übermittelt an die mobile CareLAN-Box auf dem Fahrzeug und über einen Rückkanal-Datenstream an den Speedgoat mit dem Online-Zwilling.

Ein Aspekt, der berücksichtigt wurde, war die Skalierbarkeit der Datenübertragung. Während der Online-Zwilling selbst zwar die Eigenschaften seines Fahrzeugs kennt, legt die beteiligte CareLAN-Box eine zusätzliche Identität fest. Diese Identität wird auf der Offline-Seite identifiziert und einer dort hinterlegten Startparametrierung des Offline-Prozesses zugeordnet. Diese Identität wird auch bei der Rückübertragung verwendet, um den entsprechenden Online-Zwilling mit den passenden Parameter-Daten auszustatten. Auf diese Weise können praktisch beliebig viele Online-System Daten übertragen und mit Rückübertragungen erreicht werden. Der Offline-Zwilling handelt in Namen der jeweiligen Online-Identität.

### **Trigger-Manager**

Ein wichtiges Modul in der Kommunikation zwischen Online- und Offline-Zwilling ist der Trigger-Manager, welcher von BPW in Kooperation mit dem imes aufgebaut wurde. Dieser wurde bereits in Abschnitt 3.5 erwähnt und wird an dieser Stelle näher erläutert. In Abbildung

99 ist die Funktionsweise und Notwendigkeit des Trigger-Managers dargestellt. Wenn ein Trigger von einem der beiden Module ausgelöst wird, und dieser entweder kurz hintereinander aktiviert und deaktiviert wird oder wenn es ein Trigger von dem jeweils anderen Modul gibt, synchronisiert der Trigger-Manager diese beiden Signale, sodass ein resultierendes Trigger-Signal an den Rekorder weitergegeben wird, welcher dann die Messdaten aufnimmt und abspeichert. So ist in Abbildung 99 zu erkennen, dass das ITWM-Modul und das InSc-Modul zu unterschiedlichen Zeitpunkten unterschiedlich lang triggern, der Trigger-Manager diese Trigger jedoch synchronisiert. Zusätzlich wird noch eine Pre-Buffer und Post-Buffer-Phase zu dem getriggerten Zeitraum hinzugefügt.

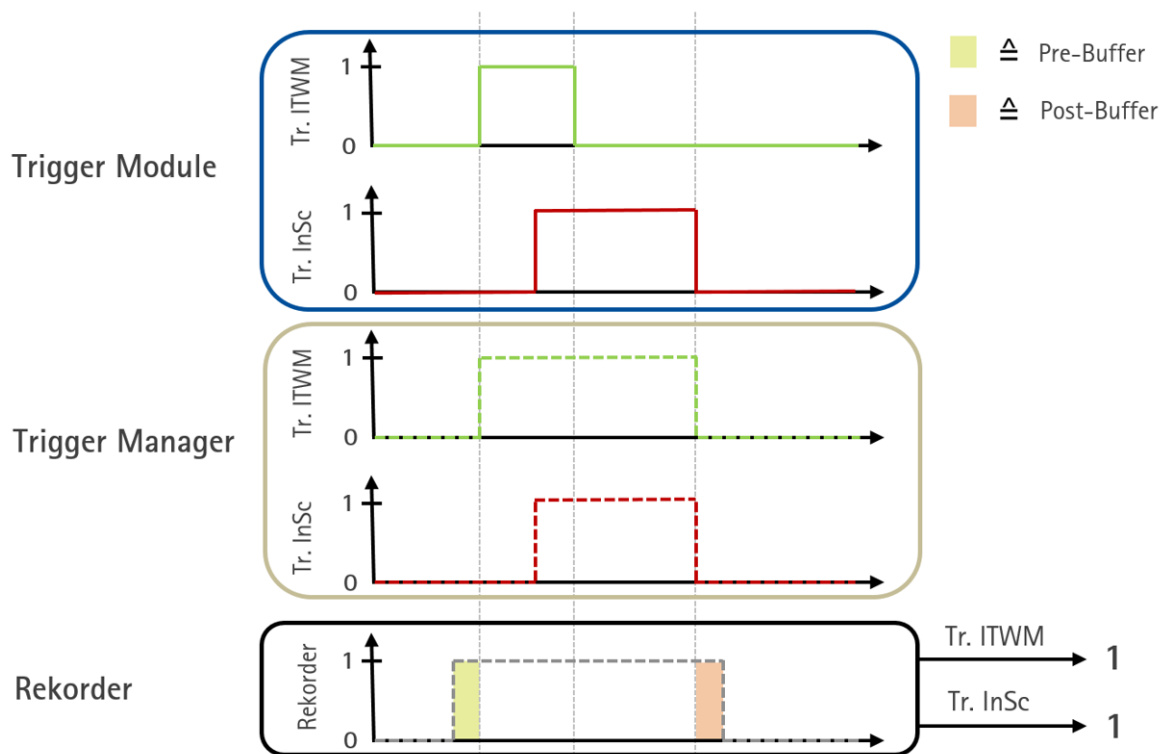


Abbildung 99: Funktionsweise des Trigger Managers

Der Pre- und Post- Buffer ist notwendig, damit sichergestellt werden kann, dass alle für die Schädigung bzw. den Verschleiß relevanten Zeitabschnitte in den Messdaten, die an den Offline-Zwilling zur weiteren Auswertung versendet werden, vorhanden sind.

Das Modul Rekorder buffert kontinuierlich die Daten aus der vergangenen Pre-Buffer Phase, damit im Falle eines Triggers die Daten noch vorhanden sind. Weiterhin zeichnet der Rekorder alle notwendigen Daten in Echtzeit auf, solange das vom Trigger-Manager ausgegebene Signal anliegt, erweitert um die Post-Buffer Phase. Zusätzlich gibt der Rekorder die binäre Information aus, welcher Trigger innerhalb der aufgezeichneten Sequenz ausgelöst wurde. Diese Information ist erforderlich, um den weiteren Prozessablauf im Offline-Zwilling zu steuern.

### INP-Datei

Die Informationen aus dem Online-Zwilling werden über die Infrastruktur von OKIT (vgl. Ehlers, S. F. G., Ziaukas, Z., Kobler, J-P., Jacob, H-G. (2022). State and Parameter Estimation in a Semitrailer for Different Loading Conditions Only Based on Trailer Signals. in Proceedings of the 2022 American Control Conference (ACC) (S. 2353-2360). (Proceedings of the American Control Conference; Band 2022-June). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.. <https://doi.org/10.23919/ACC53348.2022.9867797>) auf den Offline-Zwilling übertragen, auf dem die INP-Datei erstellt wird. In dieser Datei finden sich alle relevanten Informationen aus

dem Online-Zwilling aus dem getriggerten Streckenabschnitt wieder. Zu Beginn der Datei setzt sich der Header aus Informationen zu dem Dateinamen, dem Datum, der Uhrzeit sowie den Triggern für das entsprechende Manöver zusammen. Anschließend werden die Namen der insgesamt 87 Messkanäle vorgestellt, wozu z.B. kinematische Größen (wie Beschleunigungen, Drehraten), Balgdrücke, geschätzte Größen des Online-Zwillings sowie einige Ground-Truth Messungen (nur zu Entwicklungszwecken) gehören. Ein weiterer Kanal ist für die Zeit vorgesehen. Anschließend folgen in der Datei die formatierten Zeitreihen, die den überwiegenden Großteil der Datei ausmachen. Nach dem Zeitreihen-Abschnitt folgt der aktuelle Parametersatz der Modelle im Online-Zwilling. Die Parametrierung ist für die Initialisierung für die Modelle im Offline-Zwilling relevant. Somit wurde mit der INP-Datei eine einheitliche Beschreibung zum Datenaustausch zwischen dem Online- und dem Offline-Zwilling erarbeitet.

## 5. Demonstration und Evaluation

### 5.1. Ausrüstung Versuchsfahrzeug

Im Rahmen des AP5 wurde zu Projektbeginn umfangreiche Messdaten des Versuchsfahrzeugs (Bestandsdaten mit einer anderen Fahrwerk-Konfiguration) an die Projektpartner verteilt. Bei der Datensichtung wurde gegenübergestellt, welche Signale ausschließlich während Versuchsfahrten zur Verfügung stehen. Zudem wurde die Qualität (z.B. Abtastzeit und Auflösung) der Daten gegenübergestellt sowie Unterschiede aufgezeigt.

Zu diesem Zeitpunkt wurde das Versuchsfahrzeug (IdenT-Trailer) auf eine aktuelle Fahrwerksgeneration umgerüstet sowie zusätzliche Sensorik (u.A. auch die Kamera) installiert.

Das Versuchsfahrzeug, das im Rahmen der Validierung der Modelle des Online- und Offline-Zwillinge verwendet wird, ist ein Sattelaufleger von besonderer Ausstattung. Dieser Sattelaufleger ist mit drei luftgefederten Starrachsen ausgestattet, nämlich den BPW ECO Air von BPW Bergische Achsen KG. Um die Modelle für die Online- und Offline-Zwillinge zu verifizieren, werden umfangreiche Daten am Versuchsfahrzeug erfasst, wobei verschiedene Sensoren zum Einsatz kommen.

Zur Bereitstellung von Ground Truth-Daten sind an allen sechs Radenden des Fahrzeugs Messstellen platziert, die eine Vielzahl von Informationen erfassen, darunter Rad-Drehzahlen, Vertikal- und Seitenkräfte, Federwege, Balgdrücke der Luftfedern, Reifendrucke sowie Beschleunigungen und Drehraten in drei Raumrichtungen. Zusätzlich dazu ist eine inertielle Messeinheit am Aufbau des Fahrzeugs montiert, um die ungefederte Masse zu messen. Die Daten des elektronischen Bremssystems (EBS) werden ebenfalls auf dem CAN Bus erfasst und protokolliert. Bei Bedarf können Messräder direkt an den Rädern des Trailer-Fahrwerks installiert werden, um Lastdaten in Echtzeit zu erfassen.

Darüber hinaus verfügt das Versuchsfahrzeug über einen eigens für das IdenT-Projekt entwickelten sensierten Königszapfen, der die Koppelkräfte zwischen der Zugmaschine und dem Trailer misst. Die Datenerfassung erfolgt über ein speziell installiertes Datenerfassungssystem (DEWESoft r8, Dewesoft d.o.o.), das sich im Trailer befindet. Dieses System ermöglicht eine umfassende Erfassung und Aufzeichnung von Daten, die für die Validierung und Analyse des Versuchsfahrzeugs und seiner Leistung von entscheidender Bedeutung sind.

Im weiteren Projektverlauf wurde das Fahrzeug um zwei weitere Messeinrichtungen erweitert (s. Abbildung 100). Zum einen wurde eine hochgenaue IMU (ADMA Messeinheit, bereitgestellt vom imes) ins Versuchsfahrzeug integriert und anschließend in Betrieb genommen.

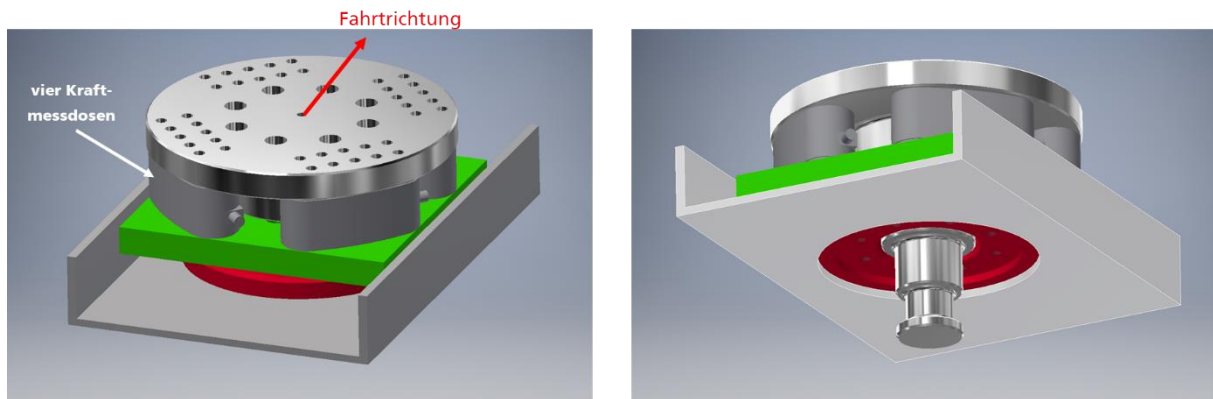


Abbildung 100: ADMA-Messeinheit auf der Trailer-Ladefläche



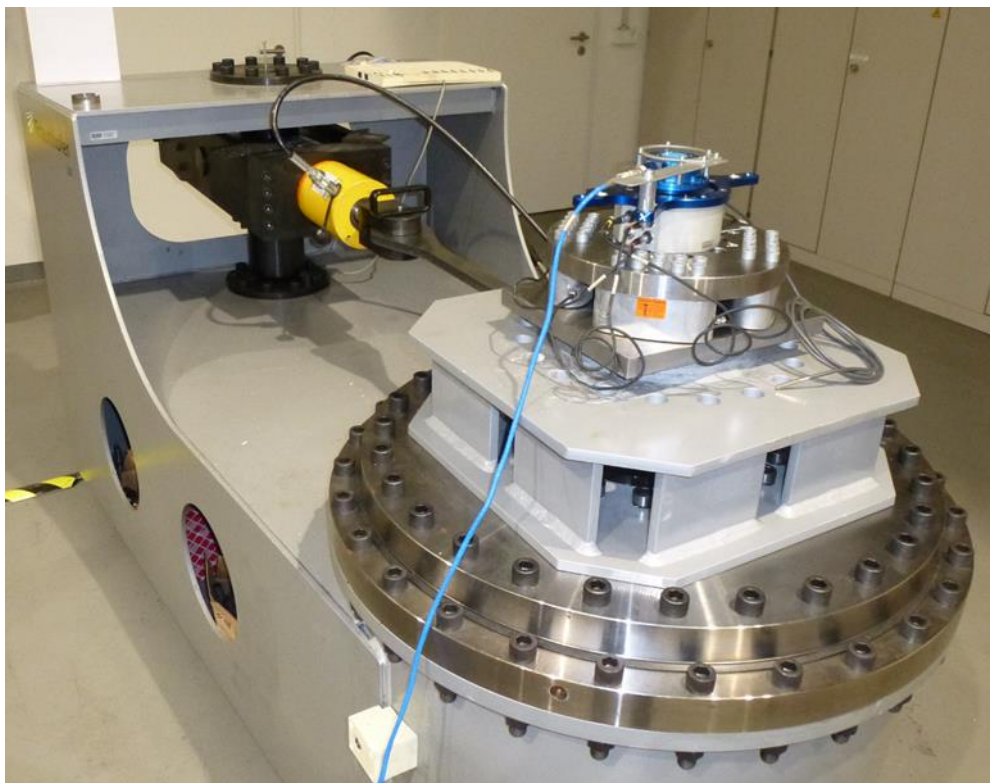
### King Pin - Messplattform

Am LBF wurde eine Messplattform aufgebaut und in den Trailer integriert, die die Kuppelkräfte zwischen Zugmaschine und Trailer am King Pin misst. Die Plattform dient nicht einer Serieninstrumentierung des Trailers, sondern liefert Datensätze zum Systemverständnis der Lastflüsse zwischen Zugmaschine und Trailer. Dieses Verständnis ist wesentlich für eine genaue Modellierung des Trailerverhaltens. Abbildung 101 zeigt das CAD-Modell der Messeinrichtung, die am LBF konzipiert und später aufgebaut wurde.



**Abbildung 101: Messplattform zur Erfassung der Königszapfen Kräfte am Ident-Trailer**

Die Messplattform wurde auf einem Prüfstand des Fraunhofer LBF kraftkalibriert (Abbildung 102). Die Kalibrierung diente auch dazu zu untersuchen, ob die Messplattform die erwarteten Betriebs- und Sonderlasten während der Messfahrten erträgt.



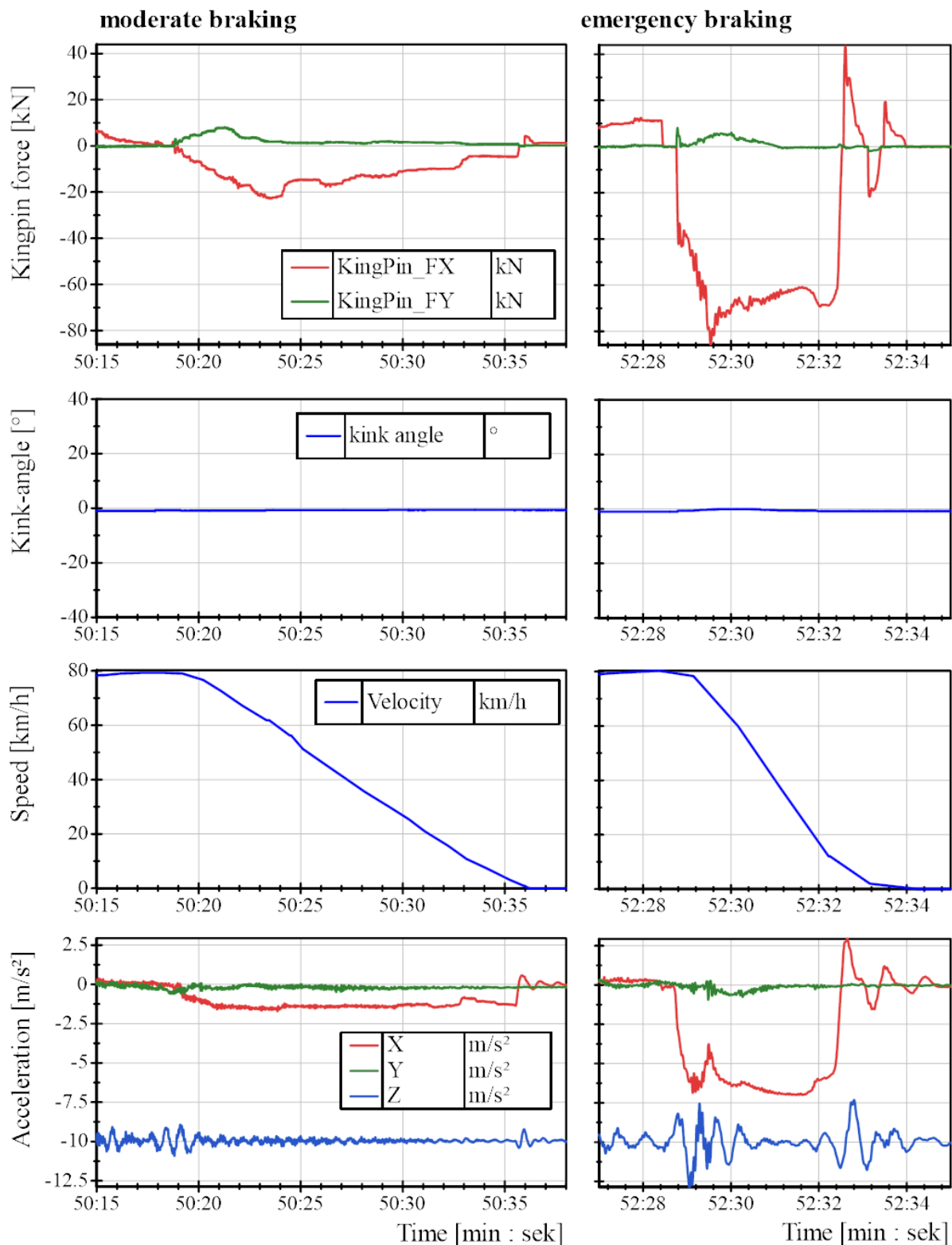
**Abbildung 102: Kraftkalibrierung der KingPin Messplattform am LBF**

Nach der Kalibrierung wurde die Messplattform in den Ident Trailer eingebaut. Abbildung 103 zeigt die Plattform nach der Integration. Die Messsignale wurden zusammen mit den Messrädern von der Messradelektronik aufbereitet und per Netzwerk an die Datenerfassung übergeben. Eine Probemessfahrt mit dem Messelement zeigt plausible Messsignale. Die

Plattform wurde bei verschiedenen Messkampagnen auf Teststrecken und öffentlichen Straßen eingesetzt und die Signale von allen Partnern für die Validierung der Simulationsmodelle verwendet. Abbildung 104 zeigt beispielhaft die Messschriebe der Kingpin-Kräfte während zwei verschiedener Bremsungen.



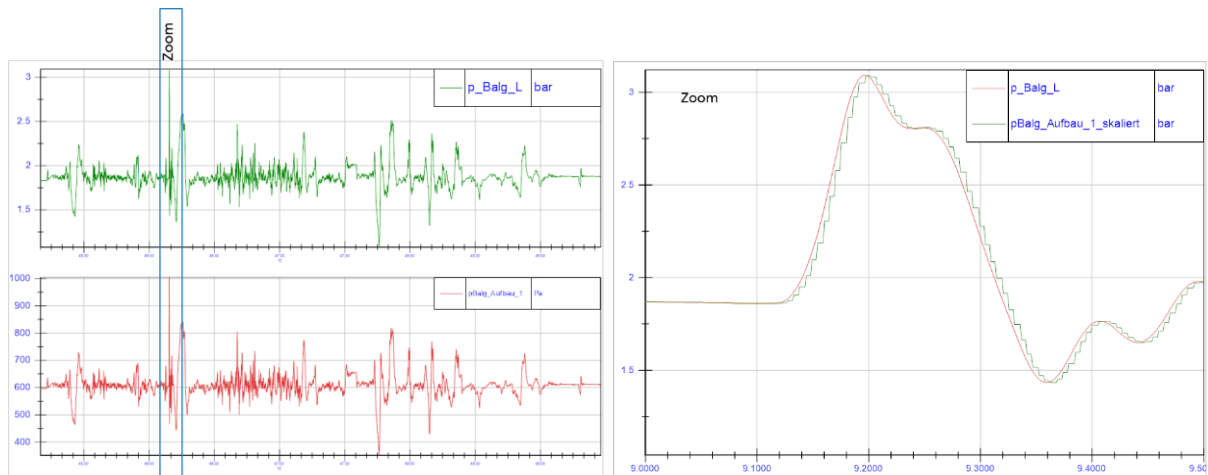
Abbildung 103: KingPin Messplattform im IdenT-Trailer



**Abbildung 104: Gemessene Kingpin-Kräfte für zwei Bremsvorgänge auf der Teststrecke ATP in Papenburg. Links: moderate Bremsung, Rechts: Vollbremsung**

Das Konzept und die Ergebnisse wurden auf der „Commercial Vehicle Technology“ Konferenz CVT 2022 in Kaiserslautern vorgestellt und im Tagungsband veröffentlicht [8].

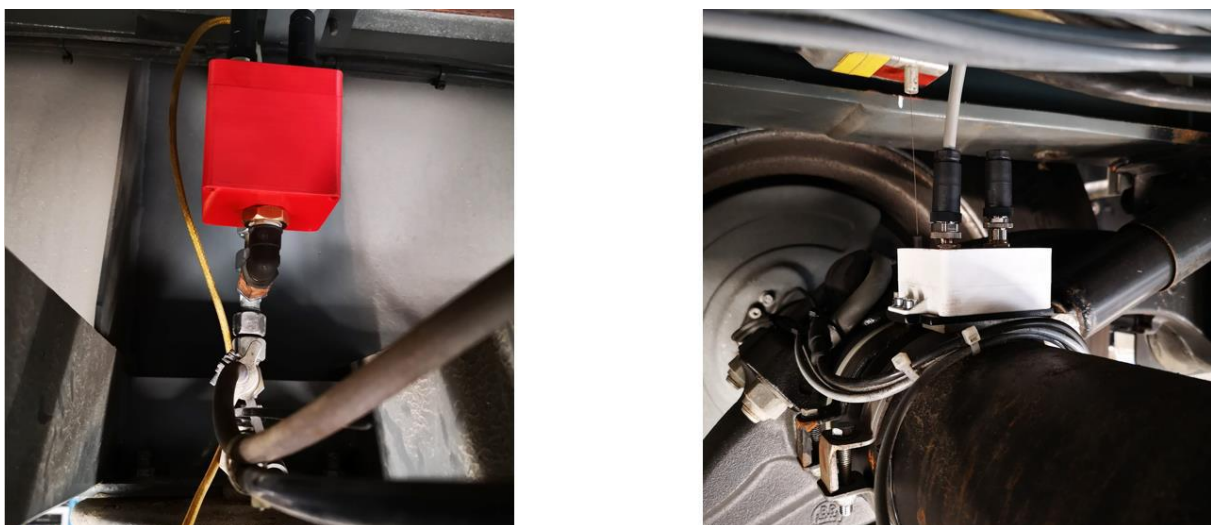
Die Sensorknoten wurden zunächst als ein Prototyp von ts3 bereitgestellt und am Trailer montiert. Es folgte die Inbetriebnahme und ein kurzer Rollout-Test zur Plausibilisierung der Messdaten.



**Abbildung 105: Druckverlauf von Sensorknoten und Referenzsensor während RollOut Test mit dem Ident Trailer**

Abbildung 105 zeigt den Druckverlauf an der Luftfeder während des RollOut-Tests. Es ist zu erkennen, dass die Skalierung des Sensorknotens im Messsystem noch nicht korrekt implementiert war. Nachdem die Skalierung nachträglich angepasst wurde, zeigen der MEMS Aufnehmer aus dem Sensornetzwerk und der Referenzsensor einen identischen Signalverlauf. Auch die Signalverläufe der Beschleunigungssensoren zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Referenzsensorik und Sensornetzwerk.

Im Anschluss wurde das komplette Sensornetzwerk bestehend aus 12 Sensorknoten durch die Kollegen von BPW und ts3 am Ident-Trailer angebracht und per CAN-Bus mit der Datenerfassung verbunden. Die prototypischen Sensoren wurden sowohl an den Achsen als auch am Fahrzeugaufbau montiert. Die Achs- und Aufbau-Sensoren messen Beschleunigungen in drei Raumrichtungen. Die Knoten am Fahrzeugaufbau messen darüber hinaus den Balgdruck an allen Luftfederbälgen sowie Drehraten in allen drei Raumrichtungen. Es wurden in mehreren Messfahrten auf dem BPW Werksgelände sowie auf der Teststrecke ATP in Papenburg Messungen durchgeführt. Die erfassten Messdaten des Sensornetzwerkes wurden vom LBF mit der Bestandssensorik abgeglichen und hinsichtlich Plausibilität und Datenqualität bewertet. Zu Beginn der Messfahrten wurden so noch einige Fehler detektiert, die für die folgenden Messfahrten erfolgreich behoben werden konnten.



**Abbildung 106: Sensorknoten am Achskörper (rechts) und am Fahrzeugaufbau (links)**

## 5.2. Versuchsfahrten

Nachdem die Arbeiten am IdenT-Trailer abgeschlossen waren, wurde am 25.11.2020 ein Rollout am Flugplatz Meinerzhagen durchgeführt. Dabei wurden definierte Fahrmanöver entsprechend der Anforderungen der Projektpartner ausgeführt. Der Fokus lag dabei auf Längs- und Querdynamikmanövern (z.B. Bremsung und Kurvenfahrt). Aus den Ergebnissen der Versuchsfahrt wurden weitere Aufgaben abgeleitet und eine weitere Messfahrten auf andere Teststrecken (ATP und DAF) geplant.

Im Projektrahmen wurden folgenden Messfahrten auf verschiedenen Teststrecken durchgeführt:

- Flugplatz Meinerzhagen: Februar 2021
- Teststrecke DAF Eindhoven: März 2021
- Flugplatz Meinerzhagen: Juli 2021
- Teststrecke ATP in Papenburg: August 2021
- "Hausstrecke" Sauerland: August 2021
- Messfahrten mit vorgeschädigtem Radlager: Oktober 2022
- Teststrecke DAF Eindhoven: November 2022

Weiterführend wurde eine umfangreiche Messkampagne mit vorgeschädigten Komponenten durchgeführt. Im Rahmen dieser Messkampagne wurde das Versuchsfahrzeug mit verschiedenen vorgeschädigten Fahrwerkskomponenten ausgestattet. Auf diese Weise sollte untersucht werden, ob und wie die Daten des IdenT-Sensornetzwerks eine Detektion der eingebrachten Defekte zulassen. Folgende Fahrten sind zu diesem Zweck durchgeführt wurden:

- Teststrecke ATP in Papenburg: März 2022 ("vorgeschädigte Komponenten", Teil 1)
- Teststrecke ATP in Papenburg: Mai 2022 ("vorgeschädigte Komponenten", Teil 2)



Folgende Komponenten und Fehlerbilder wurden dabei untersucht (siehe auch folgende Abbildungen):

- Vorgeschiedigte Reifen
- Unwucht am Rad
- Funktionsfehler Bremszylinder
- Undichtigkeit Luftfeder
- Vorgeschiedigte Elastomerlager:
- Vorgeschiedigtes Radlager
- Vorgeschiedigter Stoßdämpfer

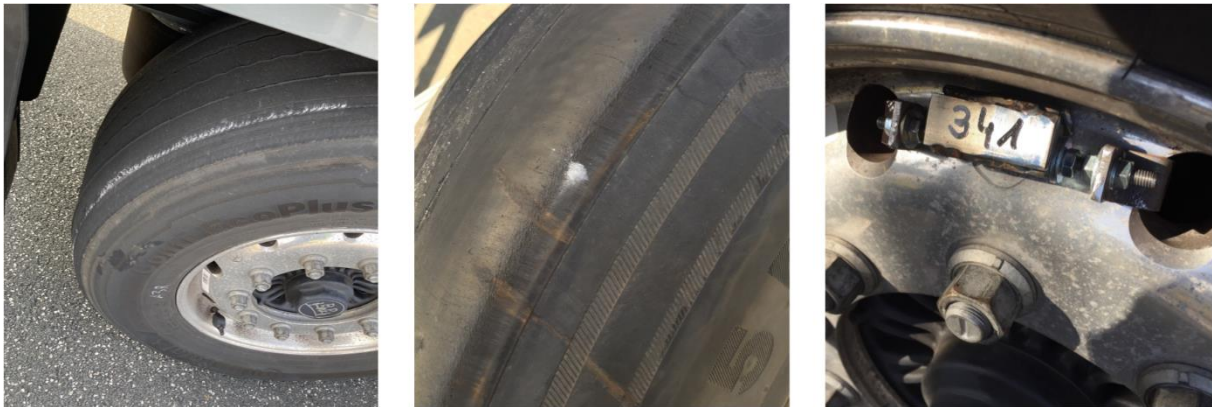


Abbildung 107: Verschlissene Reifen (links und mittig) sowie ein am Reifen angebrachtes Unwuchtgewicht (rechts)

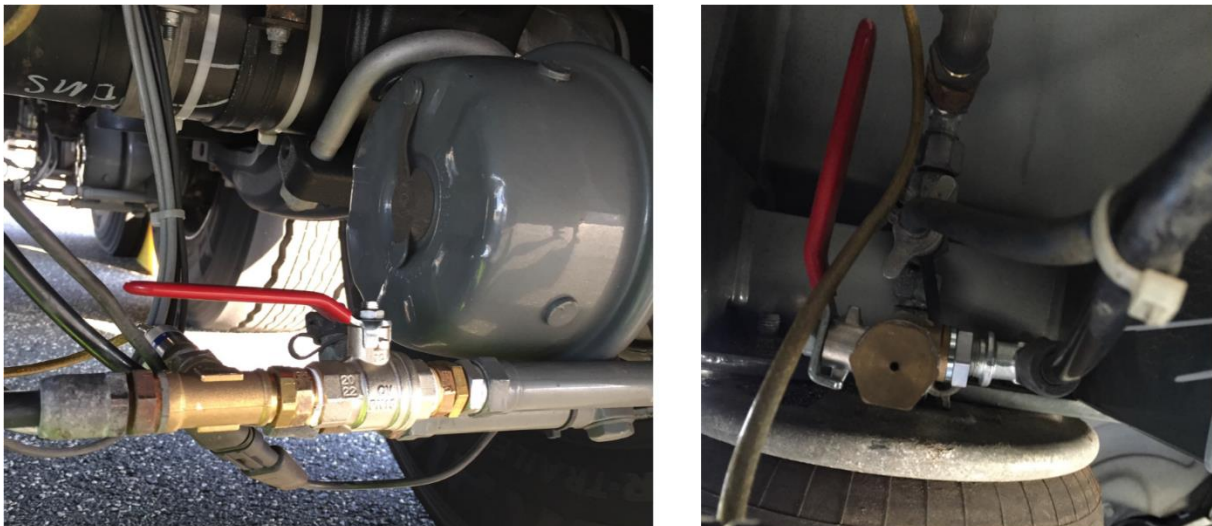


Abbildung 108: Über Absperrrahn abschaltbare Bremse (links) und zuschaltbare Undichtigkeit am Luftfederbalg (rechts)

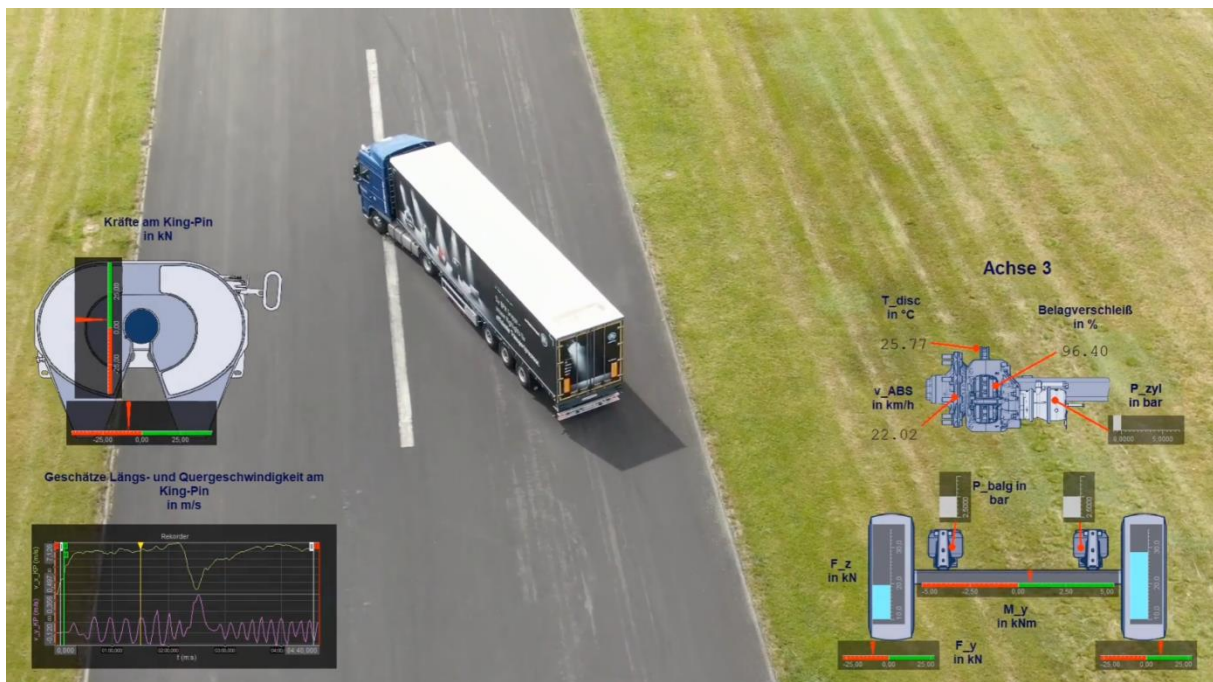


**Abbildung 109: Gezielt eingebrachter Lagerschaden am Außenring (links) und gezielt eingebrachte Undichtigkeit am Stoßdämpfer inklusive Kraft- und Wegmessung**

Im Rahmen der oben genannten Messfahrten wurden mehr als 200 GB Messdaten generiert und mit den Projektpartnern geteilt. Diese Daten wurden intensiv zur Entwicklung und Validierung der digitalen Zwillinge genutzt.

### 5.3. Vorstellung und Diskussion

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein IdenT-System für automatisiert fahrende Sattelzüge konzipiert, entwickelt und prototypisch an einem Versuchstrailer in Betrieb genommen. Die Projektergebnisse sind detailliert in diesem Abschlussbericht beschrieben. Abbildung 110 zeigt, stellvertretend für ein Gesamtergebnis, den IdenT-Trailer auf der Teststrecke inklusive Visualisierung einer Teilmenge der in diesem Projekt generierten dynamik- und sicherheitsrelevanten Komponentenzustände.



**Abbildung 110: IdenT-Trailer auf der Teststrecke. Visualisierung von Echtzeit-Daten und vom Online-Zwilling generierten Informationen zu Wheelend, Bremse, Luftfederung und Achse (rechts) sowie Königszapfen (links)**

Die wissenschaftlichen und technischen Entwicklungsarbeiten in diesem Vorhaben fanden im Kontext der extrem kostengetriebenen Nutzfahrzeug- und Transportbranche statt. Das entwickelte IdenT-System adressiert demnach die Projektziele mit möglichst kostengünstigen technischen Lösungen. Aus Sicht des Kunden (Fahrzeug-/Flottenbetreiber) ist zur Anschaffung des IdenT-Systems zunächst eine initiale Investition erforderlich. Die Höhe dieser Investition hängt maßgeblich von Art und Umfang der im Trailer benötigten Sensorik ab. Das entwickelte IdenT-System adressiert diese Hürde, indem so wenig reale Sensorik wie nötig, und so viel "kostenfreie" Soft-Sensorik (Sensordatenfusion und modellbasierte Schätzalgorithmen) wie möglich eingesetzt wird.

Solange das automatisierte Fahren von Sattelzügen noch nicht flächendeckend etabliert ist, kann das IdenT-System trotzdem bereits einen Beitrag zur Erkennung und Meldung von kritischen Fahr- und Fahrzeug- und Komponentenzuständen und auch zur Erkennung von sich entwickelndem Verschleiß oder Schädigungen leisten: Optimierung der Verfügbarkeit des Fahrzeugs, Wegfall ungeplanter Stillstandzeiten, Minimierung geplanter Stillstandzeiten, Minimierung von Wartungskosten, höhere Auslastung der Flotte, erhöhte Kostentransparenz, geringerer Bestand an "Puffer-Fahrzeugen" erforderlich.

Während der Projektlaufzeit und darüber hinaus haben alle Partner die Inhalte des IdenT-Vorhabens bei Lieferanten, Kunden und Partnern vorgestellt. Durch den Austausch über derartige Vorentwicklungsthemen hat sich weiterführender Forschungsbedarf gezeigt und es haben sich neue Kooperationsmöglichkeiten ergeben.

## 6. Projektmanagement

Im Verlauf des Projekts wurden eine Reihe von wesentlichen Aufgaben und Verantwortlichkeiten übernommen, um sicherzustellen, dass die Abläufe effizient gestaltet wurden und eine koordinierte Umsetzung gewährleistet war. Eine zentrale Aktivität bestand darin, ein agiles Kanban-Board auf der OKIT-Plattform zu pflegen. Dieses Board fungierte als dynamisches Instrument zur Aufgabenverwaltung und ermöglichte eine transparente Planung der Arbeitsabläufe. Die kontinuierliche Aktualisierung und Anpassung dieses Boards gewährleistete, dass alle Projektmitglieder stets auf dem neuesten Stand über die aktuellen Aufgaben und den Fortschritt waren.

Ein weiterer essenzieller Schwerpunkt lag auf der regelmäßigen Überprüfung der Zeitschiene und der Zielerreichung. Dies war von großer Bedeutung, um sicherzustellen, dass das Projekt gemäß den festgelegten Meilensteinen und Zeitplänen voranschreitet. Die Überwachung ermöglichte es, etwaige Abweichungen frühzeitig zu erkennen und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen. Dieser kontinuierliche Prozess der Überprüfung trug maßgeblich zur Erfüllung der Projektziele bei.

Die Organisation der monatlichen Webmeetings erwies sich als Instrument für einen fortlaufenden Austausch und eine enge Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern. Diese Meetings boten eine Plattform, um die erzielten Fortschritte zu besprechen, Herausforderungen zu identifizieren und gemeinsam Lösungsansätze zu erarbeiten. Die Interaktion in diesen Sitzungen half dabei, eine reibungslose Koordination und Ausrichtung der Bemühungen sicherzustellen.

Ein wichtiger Bereich war auch die Öffentlichkeitsarbeit, die dazu diente, die Ergebnisse des Projekts einer breiteren Öffentlichkeit bekannt zu machen. Dies beinhaltete die Veröffentlichung von Artikeln in Mitarbeitermagazinen wie "BPWiehl" und "BPWorld", die Sichtbarkeit auf dem BPW Online-Themenportal "motionist" sowie die Verbreitung einer ersten offiziellen Pressemitteilung von BPW. Zusätzlich trugen Interviews in angesehenen Fachzeitschriften wie "trans aktuell" und "Commercial Vehicle Engineer" zur Verbreitung der Projektergebnisse und -aktivitäten bei.

Die Beteiligung an bedeutenden Konferenzen und Veranstaltungen erwies sich als wichtige Plattform zur Präsentation der Forschungsergebnisse. Die Planung und Umsetzung von gemeinsamen Veröffentlichungen für das 7. Internationale Commercial Vehicle Technology Symposium in Kaiserslautern war ein bedeutender Schritt, um die Innovationen des Projekts einer fachkundigen Gemeinschaft zu präsentieren. Die Annahme dieser Veröffentlichungen und die Möglichkeit, sie während der Veranstaltung zu präsentieren, festigten die Reputation des Projekts.

Weiterer zentraler Bestandteil des Projektmanagements waren Konsortiumstreffen. Diese Treffen dienten nicht nur der Kollaboration, sondern auch der Präsentation von Zwischenergebnissen und der Diskussion von Herausforderungen. Die Vielfalt der beteiligten Partner, die diese Treffen organisierten, unterstrich die starke Vernetzung innerhalb des Konsortiums.

## Literaturverzeichnis

- [1] L. Hausmann, „Pathway to value creation - A perspective on how transportation and logistics businesses can increase their economic profit,“ McKinsey&Company, 2015.
- [2] M. Kässer, „Delivering change - The transformation of commercial transport by 2025,“ McKinsey&Company, 2016.
- [3] Ehlers, S. F. G., Ziaukas, Z., Kobler, J.-P., Busch, A., Ortmaier, T., Wielitzka, M. (2021). Nichtlineares Zweispurmodell eines LKW-Sattelaufliegers mit experimenteller Validierung der lateralen und vertikalen Reifenkräfte. in VDI Mechatronik 2021
- [4] Ehlers, S. F. G., Ziaukas, Z., Kobler, J.-P., Jacob, H-G. (2022). State and Parameter Estimation in a Semitrailer for Different Loading Conditions Only Based on Trailer Signals. in Proceedings of the 2022 American Control Conference (ACC) (S. 2353-2360). (Proceedings of the American Control Conference; Band 2022-June). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc..  
<https://doi.org/10.23919/ACC53348.2022.9867797>
- [5] Ehlers, S. F. G., Sourkounis, P., Ziaukas, Z., Kobler, J.-P., Jacob, H-G. (2022). Optimized Tuning of an EKF for State and Parameter Estimation in a Semitrailer. in 15th International Symposium on Advanced Vehicle Control - AVEC'22
- [6] Ehlers, S. F. G., Kortmann, K.-P., Kobler, J.-P. (2023). Hybrid State Estimation in a Semitrailer for Different Loading Conditions. In 22nd World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC WC 2023)
- [7] Kobler, J.-P., Brand, A., Weßel, S., Jung, T., Steidel, S., Burger, M. (2022). Online-Identifikation von Straßenrauigkeiten am LKW-Trailer für sicheres autonomes Fahren. In Proceedings of the 7th Commercial Vehicle Technology Symposium (CVT 2022), 2022
- [8] Käsgen, J., Kobler, J.-P., Möller, R. (2022). Kingpin Load Measurement of a Semi-Trailer. In Proceedings of the 7th Commercial Vehicle Technology Symposium (CVT 2022), 2022



## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Identifikation dynamik-und sicherheitsrelevanter Trailerzustände für automatisiert fahrende Lastkraftwagen (IdenT) Abschlussbericht	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Kobler, Dr. Jan-Philipp Weißel, Simon Brand, André Möller, Riccardo Bartolozzi, Riccardo Käsgen, Johannes Ehlers, Simon Wiedemann, Marcus Schulte, Marius Dietrich, Ingo Krause, Olaf Steidel, Stefan	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.04.2023
	6. Veröffentlichungsdatum Geplant
	7. Form der Publikation Gemeinsamer Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  BPW Bergische Achsen KG Ohlerhammer 51674 Wiehl  Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., München  The smart system solution GmbH, Erbach  Leibniz Universität Hannover, Hannover  Industrial Science GmbH, Darmstadt  VISCODA GmbH, Hannover	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19 19008A 19 19008B 19 19008C 19 19008D 19 19008E 19 19008F
	11. Seitenzahl 94
	12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn
13. Literaturangaben 8	
14. Tabellen 3	
15. Abbildungen 110	
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	

#### 18. Kurzfassung

Aktuelle Studien stellen für die Zukunft des Gütertransports auf der Straße eine zunehmende Automatisierung von Funktionen in Aussicht, die langfristig autonom ablaufende Transportprozesse zur Folge haben wird. Daraus resultieren neue, bis dato nicht berücksichtigte Anforderungen an zukünftige Nutzfahrzeuge und deren Komponenten. Während Zugmaschinen bereits heute über leistungsfähige Sensorsysteme zur Fahrerassistenz verfügen, ist die Anzahl elektronischer Komponenten im Trailer bislang sehr gering. Das Fehlen dieser Zustandsinformation des Trailers limitiert aktuelle und zukünftige Entwicklungen des automatisierten Fahrens im straßengebundenen Güterverkehr im Hinblick auf Ökonomie, Fahrdynamik und Sicherheit. Ziel des Vorhabens IdenT ist die Ermittlung und Bereitstellung von zuverlässigen Informationen durch den Trailer zur Unterstützung des autonomen Fahrens der Zugmaschine. Die Informationen bestehen aus den aktuellen Zuständen fahrdynamik- und sicherheitsrelevanter Komponenten, aus der aktuellen Trailerdynamik und aus den aktuellen Umgebungsinformationen „rückwärtiger Raum“ sowie „Fahrbahnbeschaffenheit“. Zuverlässige und robuste Zustandsinformationen des Trailers und seiner Umgebung werden im Vorhaben durch zwei sich ergänzende Verfahren erzielt: Erstens fusioniert ein digitaler Online-Zwilling (Simulationsmodell 1) verschiedene Sensordaten zur echtzeitfähigen Ermittlung der permanent aktualisierten Trailerinformationen. Zweitens werden die Informationen mit einem hochgenauen digitalen Offline-Zwilling (Simulationsmodell 2) abgeglichen, wodurch die Zuverlässigkeit der Informationen ebenfalls erhöht wird. Durch das Zusammenwirken dieser zwei Simulationsmodelle bietet das IdenT-Gesamtsystem eine hohe Echtzeitfähigkeit durch den reduzierten Online-Zwilling bei gleichzeitig hoher Genauigkeit durch den Offline-Zwilling. Solange das automatisierte Fahren von Sattelzügen noch nicht flächendeckend etabliert ist, kann das IdenT-System trotzdem bereits einen Beitrag zur Erkennung und Meldung von kritischen Fahr- und Fahrzeug- und Komponentenzuständen und auch zur Erkennung von sich entwickelndem Verschleiß oder Schädigungen leisten.

#### 19. Schlagwörter

LKW-Trailer, autonomes Fahren, Nutzfahrzeuge, digitaler Zwilling

#### 20. Verlag

#### 21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) report
3. title Identifikation dynamik-und sicherheitsrelevanter Trailerzustände für automatisiert fahrende Lastkraftwagen (IdenT) Abschlussbericht	
4. author(s) (family name, first name(s)) Kobler, Dr. Jan-Philipp Weißel, Simon Brand, André Möller, Riccardo Bartolozzi, Riccardo Käsgen, Johannes Ehlers, Simon Wiedemann, Marcus Schulte, Marius Dietrich, Ingo Krause, Olaf Steidel, Stefan	5. end of project 30.04.2023
	6. publication date Planned
	7. form of publication Report
8. performing organization(s) (name, address)  BPW Bergische Achsen KG Ohlerhammer 51674 Wiehl  Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., München  The smart system solution GmbH, Erbach  Leibniz Universität Hannover, Hannover  Industrial Science GmbH, Darmstadt  VISCODA GmbH, Hannover	9. originator's report no.
	10. reference no. 19 19008A 19 19008B 19 19008C 19 19008D 19 19008E 19 19008F
	11. no. of pages 94
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references 8
	14. no. of tables 3
	15. no. of figures 110
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	

18. abstract

Current studies predict an increasing automation of functions for the future of goods transport on the road, which will result in autonomous transport processes in the long term. This results in new requirements for future commercial vehicles and their components that have not yet been taken into account. While tractor units already have powerful sensor systems for driver assistance, the number of electronic components in the trailer has been very small up to now. The lack of this trailer status information limits current and future developments of automated driving in road-bound freight transport with regard to economy, driving dynamics and safety. The aim of the IdenT project is to determine and provide reliable information from the trailer to support the autonomous driving of the tractor unit. The information consists of the current conditions of components relevant to driving dynamics and safety, the current trailer dynamics and the current environmental information "rear space" and "road surface". Reliable and robust condition information of the trailer and its environment is achieved in the project by two complementary methods: Firstly, a digital online twin (simulation model 1) fuses various sensor data to determine the permanently updated trailer information in real time. Secondly, the information is matched with a highly accurate digital offline twin (simulation model 2), which also increases the reliability of the information. Through the interaction of these two simulation models, the overall IdenT system offers a high real-time capability through the reduced online twin and at the same time high accuracy through the offline twin. As long as automated driving of articulated trucks is not yet established across the board, the IdenT system can nevertheless already contribute to the detection and reporting of critical driving and vehicle and component conditions and also to the detection of developing wear or damage.

19. keywords

Trailer, autonomous driving, commercial vehicles, digital twin

20. publisher

21. price