

Sachbericht (VN) zum Verwendungsnachweis

FE-Nr.:	88.0165/2017
ZE:	Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. – ausführende Stelle: Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF
Vorhabenbezeichnung:	LiBra – Lasten in Bewegung rechtssicher aufzeichnen
Laufzeit des Vorhabens:	01.10.2017 bis 30.09.2018 (geplant – Gesamtvorhabenbeschreibung vom 24.08.2017) kostenneutral verlängert bis 31.12.2018 (Änderungsbescheid vom 22.08.2018)
Berichtszeitraum:	01.10.2017 bis 31.12.2018

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurze Darstellung zu	2
1.	Aufgabenstellung	2
2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde,	2
3.	Planung und Ablauf des Vorhabens,	3
4.	wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere	4
5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.	5
II.	Eingehende Darstellung.....	6
6.	der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele,	6
7.	der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises,	9
8.	der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit,.....	11
9.	des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans,	11
10.	des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen,	11
11.	der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses.	12

I. Kurze Darstellung zu

1. Aufgabenstellung

Die übergeordnete Aufgabenstellung zu LiBra findet sich in der Förderbekanntmachung vom 14.12.2016 wie folgt dokumentiert:

„Zur Kontrolle der Gewichte und Achslasten während der Fahrt fehlen geeichte Messsysteme, die auf BAB betrieben werden können. Diese Messsysteme sollen in der Lage sein, Überschreitungen der zulässigen Gesamtgewichte und Achslasten zu erfassen und gerichtsfest zu dokumentieren.“

„Innerhalb der Forschungsvorhaben sollen Messsysteme konzipiert, neue Verfahren zur genauen und eichfähigen Messung von Fahrzeugen während der Fahrt erforscht, entwickelt und in einer Testinstallation auf einer BAB aufgebaut und erprobt werden. Die Fahrzeuge sollen die Messstelle ohne erhebliche Beschränkungen bei der Geschwindigkeit oder Änderungen beim Fahrverhalten passieren können. Der Fokus liegt dabei auf Fahrzeugen ab 3,5 t zulässiges GG.“

Bereits auf dem Markt verfügbare Teilkomponenten wie Kamerasysteme oder Sensoren sollten bei der Systementwicklung berücksichtigt werden. Kern der Förderung ist die Zusammenführung und Weiterentwicklung der Systeme zu einem in Deutschland eichfähigen System. Dabei sollen insbesondere Verfahren entwickelt werden, die den Einfluss von dynamischen Schwingungen auf die Ermittlung der statischen Messgrößen minimieren bzw. eliminieren, so dass eine gerichtsfeste Verwägung nach deutschem Recht möglich wird.“

Passend hierzu setzte sich das Projekt LiBra folgendes Gesamtziel (s. Gesamtvorhabenbeschreibung):

„Ziel des Projektes LiBra ist eine umfassende Unsicherheitsbewertung eines Weigh-in-Motion-Systems (WIM-Systems), welches geeignet ist, eine Verwiegung von schnell überfahrenden Lasten so vorzunehmen, dass durch die Fahrdynamik entstehende Überlagerungen der Gewichtskräfte erkannt und korrigiert werden können. Diese Unsicherheitsbetrachtung wird dazu genutzt werden, Anforderungen und Lösungsansätze für ein System zu formulieren welches auch für den Betrieb auf BAB Eichfähigkeit erlangen und gerichtsfeste Beweise liefern kann.“

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde,

Der Hintergrund, vor dem Forschungsarbeiten wie die in LiBra durchgeführten ausgeschrieben wurden, ist ebenfalls in der zugehörigen Förderbekanntmachung vom 14.12.2016 dokumentiert:

„Um die Anforderungen an die Straßeninfrastruktur hinsichtlich Haltbarkeit gewährleisten zu können, dürfen die geplanten Beanspruchungen der Straßeninfrastruktur bzw. Brückenbauwerke nicht überschritten werden, wenn frühzeitige Schäden oder Zerstörungen an diesen vermieden werden sollen. Verkehrskontrollen hinsichtlich Überschreitungen der zulässigen Gesamtgewichte und Achslasten sind derzeit nur durch Anhalten und Ausleiten der Fahrzeuge an Kontrollstellen möglich, was ein sehr zeit- und personalintensives Verfahren darstellt. Eine Kontrolle rund um die Uhr, wie sie zum Beispiel zum Schutz gefährdeter oder kritischer Bauwerke erforderlich wäre, ist mit diesen Verfahren in der Praxis nicht realisierbar.“

Schon mit der Gesamtvorhabenbeschreibung im Antrag wurde klargestellt, dass „die Ziele des Projektes LiBra hinter der in der Ausschreibung geforderten Umsetzung und Demonstration des Systems zurückbleiben“. Begründet wurde dies wie folgt: „Erstens muss der gewählte Lösungsansatz unabhängig von einem Hersteller einer Messeinrichtung untersucht werden, um die Designparameter der Kraftsensorik unvoreingenommen ansetzen zu können. Mit der Beteiligung eines Messeinrichtungsherstellers wäre die Kraftsensorik „quasi gesetzt“, was für eine neutrale Bewertung kontraproduktiv erscheint. Zweitens können für die Entwicklung einer den Vorgaben entsprechenden Kraftsensorik vor Abschluss der Untersuchung keine Aufwände abgeschätzt werden, da die detaillierte Ausführung der Messeinrichtung Teil des Projektkonzepts ist. Um das Projekt LiBra trotzdem in den Rahmen der adressierten Ausschreibung einzupassen, wurde auf die Zusammenstellung eines Konsortiums verzichtet und eine kurze Projektlaufzeit mit angepasstem Projektbudget gewählt.“

3. Planung und Ablauf des Vorhabens,

- Die Förderbekanntmachung, innerhalb der der Antrag zum Projekt LiBra platziert wurde, datiert vom 14.12.2016.
- Die Planungen des Fraunhofer LBF zum Antrag für das Projekt LiBra begannen Mitte Januar 2017.
- Die erste Version des Antrags wurde am 01.03.2017 eingereicht.
- Eine nach Rückfragen korrigierte Fassung datiert vom 24.08.2017.
- Ergänzungen zum Antrag wurden am 06.09.2017, 07.09.2017 und 25.09.2017 zugestellt.
- Der Zuwendungsbescheid trägt das Datum 29.09.2017 und legt die Projektlaufzeit auf 01.10.2017 bis 30.09.2018 fest.
- Aufgrund des kurzen Zeitabstands zwischen Zustellung des Zuwendungsbescheids und Projektstart konnte ein Auftakttreffen bei der BAST erst am 09.11.2017 stattfinden.
- Mit der Bearbeitung von AP 4 wurde bereits im November 2017 begonnen. Also wesentlich früher als geplant. Grund war, dass sich gezeigt hatte, dass eine vollständig generische Simulation der Messsysteme den Umfang der Simulationen auf einen nicht im Projekt abbildbaren Umfang steigern würde. Deshalb wurden die Parameterräume auch der Messsysteme an bekannten Umsetzungen orientiert.
- Die Bearbeitung von AP 1 führte planungsgemäß zur Erreichung von Meilenstein 1.
- Früh wurde im Projekt klar, dass zur Bearbeitung von AP 2.2 die Hinzuziehung weiterer Experten aus der Fraunhofer-Gesellschaft nötig und sinnvoll umsetzbar waren. Ein entsprechender Antrag auf Mittelumwidmung wurde am 21.12.2017 gestellt, am 02.02.2018 ergänzt und per Änderungsbescheid vom 06.02.2018 positiv beschieden, so dass die Maßnahme umgesetzt werden konnte. Die eigentliche Bearbeitung von AP 2.2 verzögerte sich dadurch auf den Zeitraum bis Oktober 2018.
- Die für 2017 geplanten Mittel konnten fristgerecht abgerufen werden – jedoch erfolgt eine Verausgabung der Mittel erst binnen der sechswöchigen Frist nach Eingang der Mittel auf den Konten der Fraunhofer-Gesellschaft. Insofern war die Mittelverausgabung Anfang 2017 um ca. 4 Wochen gegenüber dem Plan verzögert.
- AP 2.3 wurde in der Zeit von Februar 2018 bis Oktober 2018 bearbeitet.
- Der Sachbericht (ZN) zum Berichtszeitraum 01.10. bis 31.12.2017 sowie der zugehörige Fachbericht wurden am 27.04.2018 zugestellt.

- Aufgrund der bis dahin aufgelaufenen Verzögerungen bei der Bearbeitung des Projektes wurde am 20.07.2018 – wie bereits im Sachbericht (ZN) avisiert – ein Antrag auf Verlängerung des Bewilligungszeitraums über den 30.09.2018 hinaus bis zum 31.12.2018 gestellt. Ein entsprechender Änderungsbescheid datiert vom 22.08.2018.
- AP 2.1 wurde aufgrund eines Personalengpasses zeitlich verzögert, nämlich von Mai 2018 bis Oktober 2018 bearbeitet.
- AP 3 wurde von Oktober 2018 bis Dezember 2018 bearbeitet.
- Meilenstein 2 wurde im Oktober 2018, also mit dreimonatiger Verzögerung, erreicht.
- Eine Präsentation und Diskussion der Projektergebnisse mit Expertinnen und Experten fand am 11.12.2018 bei der BASt in Bergisch-Gladbach statt.
- Der Verwendungsnachweis (Zahlenmäßiger Nachweis) datiert vom 20./21.03.2019.
- Zum Zeitpunkt der Zustellung dieses Sachberichtes (VN) steht der zugehöriger Fachbericht noch aus. Wir hoffen, diesen bis Mitte Juli 2019 nachreichen zu können.

4. wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere

Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden,

- lizenzierte Mehrkörper-Simulations-Software MSC.ADAMS (verwendet für AP 2.2: Analyse des lokalen Reifen-Straßensensor-Kontaktes)
- lizenziertes numerisches Reifenmodell CDTire (Fraunhofer ITWM) (verwendet für AP 2.2: Analyse des lokalen Reifen-Straßensensor-Kontaktes)
- lizenzierte Mehrkörper-Simulations-Software IPG TruckMaker (verwendet für AP 2.3: Analyse der Radlasten des Gesamtfahrzeugs)
- lizenzierte Berechnungssoftware MATLAB (MathWorks) (verwendet für AP 2.1 bis AP 2.4)

Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdiensten,

- Continental Ratgeber LKW bzw. Nutzfahrzeugreifen – Technischer Ratgeber (als download erhältlich über www.continental-reifen.de)
- Goodyear Technisches Handbuch LKW bzw. Goodyear Lkw und Busreifen – Lieferprogramm (als download erhältlich über https://www.goodyear.eu/de_de/truck/)
- DIN 1319 „Grundlagen der Messtechnik“
- DIN EN 60051 “ Direkt wirkende anzeigende elektrische Messgeräte und ihr Zubehör; Meßgeräte mit Skalenanzeige“
- BASt: Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLB), 2012.
- Untersuchung zum Aufbau eines Reibwertvorhersagesystem im fahrenden Fahrzeug, F. Klempau, TU Darmstadt, 2003.
- ASTM: Standard Specification for Highway Weigh-In-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Methods.
- Homepage von Traffic Data Systems – Abschnitt “Dynamische Achslastwaagen” <https://www.traffic-data-systems.net/dynamische-achslastwaagen.html>

- Handbuch/Voreinstellungen zur Mehrkörper-Simulations-Software IPG TruckMaker
- Iowa State University Weigh-in-Motion Handbook:
http://www.ctre.iastate.edu/research/wim_pdf/
- Evaluation of Factors Affecting WIM System Accuracy, F. Scheuter, 2000.
- Fraunhofer ITWM, CDTire User Manual Version 4.2.5, 2016.
- Yap P., Truck tire types and road contact pressures, Second International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, Kelowna, 1989.
- Kistler Instrumente AG, Planning Manual, Planning of a WIM (Weigh In Motion) Station, Type 9195E, 2004.
- B. Jacob, V. Feypell-de La Beaumelle, Improving truck safety Potential of weigh-in-motion technology, IATSS Research, 34(2010), 9-15, 2010.
- A. Znidaric, W. Baumgartner, Bridge Weigh-in-Motion systems – An overview, 2nd European Conference on Weigh-in-Motion of road vehicles, Lisbon, 1998.
- OECD, Dynamic Interaction between Vehicles and INfrastructure Experiment (DIVINE), Technical report, DSTI/DOT/RTR/IR6(98)1/FINAL, OECD, Paris, 1998.
- D.Cebon, C. B. Winkler, Multiple-Sensor Weigh-in-Motion Theory and Experiments, Transportation Research Record, 1311, 70-78, 1991.
- P. Burnos, J. Gajda, P. Piwowar, R. Sroka, M. Stencel, T. Zeglen, Accurate Weighing of Moving Vehicles, Metrology and Measurement Systems, 14(4), 507-516, 2007.
- T. Haugen, J. R. Levy, E. Aakre, M. E Palma Tello, Weigh-in-Motion equipment – experiences and challenges, Transportation Research Procedia, 14(2016), 1423-1432, 2016.
- Advanced Safety and Driver Support for Essential Road Transport (ASSET), Project Deliverables, <http://www.project-asset.com/> , 2010.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

Das Projekt LiBra wurde in enger Abstimmung mit dem entsprechenden Fachexperten aus Referat V5 „Verkehrsbeeinflussung, Straßenbetrieb“ des Zuwendungsgebers durchgeführt. Dieser Austausch diente dem ZE zur Beschaffung von Informationen und der Einbindung der Erfahrungen und Vorstellungen des Zuwendungsgebers. Weiterhin wurde ihm Rahmen einer ausgedehnten Telefonkonferenz zur Projektmitte der Fachbericht zum Sachbericht (ZN) diskutiert und vor allem dessen Anhang und damit die Definition des Simulationsumfangs abgestimmt und freigegeben.

Im Rahmen von AP 1 fanden Gespräche mit der juristischen Fachabteilung der Fraunhofer-Gesellschaft sowie mit der Firma Vitronic statt. Letztere verfügt aufgrund ihres Produktportfolios eine ausgewiesene Expertise im Bereich des Zulassungsprozesses des PTB.

Die in AP 4 durchgeführte Marktrecherche beinhaltete zum Teil intensiven Austausch mit bestehenden Kontakten aus der Messtechnik-Branche und gezieltes Aufsuchen der Stände entsprechender Fachfirmen im Rahmen von Messe-Besuchen.

Nicht zustande kamen ein intensiver Austausch mit der PTB und dem parallel im Rahmen der gleichen Förderbekanntmachung laufenden Projekt. Letzteres geschah auf Wunsch des Zuwendungsgebers und wurde im Rahmen der Auftaktveranstaltung abgestimmt. Grund war, dass das Parallelprojekt in seiner Anfangsphase (vor dem Einstieg in eine Umsetzung und Erprobung) ähnliche Analysen betreiben wollte wie das Fraunhofer LBF in LiBra und dass hier ein durch gegenseitige Beeinflussung verminderte Ergebnisbreite vermieden werden sollte.

Der angedachte Austausch mit der PTB gestaltete sich in der Umsetzung als organisatorisch schwierig. Im Auftakttreffen wurde abgestimmt, dass der dafür nötige Rahmen aus einem die bundespolitischen Resorts übergreifenden Treffen zwischen PTB (BMWi) und BASt (BMVI) bestehen muss, an dem auch das Fraunhofer LBF teilnimmt. Mit dieser Festlegung lag die Terminfindung für ein solches Treffen nicht mehr in der Hand des ZE.

II. Eingehende Darstellung

6. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele,

Planungsgemäß erfolgte die Verwendung der Zuwendung zum aller größten Teil im Bereich der Personalkosten. Durch die direkte Beschäftigung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des Fraunhofer LBF mit der Aufgabenstellung wurde – aufbauend auf dem Vorwissen, den verfügbaren Kompetenzen und bisherigen Erfahrungen – als Lösung eine Kette von Analysemethoden geschaffen, erprobt und genutzt.

Als Ergebnisse lassen sich auflisten:

AP 1 – Definition und Anforderungen an ein WIM-System

- Für die Erarbeitung der Ergebnisse des Projektes LiBra sind Verfahren dann »gerichtsfest«, wenn sie nach einem Zulassungsverfahren der PTB geprüft wurde, die Zulassung erhalten haben und somit als standardisiertes Messverfahren anerkannt sind.
- Voraussetzungen für eine Zulassung durch die PTB wurden zusammengestellt.
- Einflussfaktoren bzgl. der Zulassungsfähigkeit eines Messsystems wurden (inkl. entsprechende Parameterräume für die weiteren Untersuchungen) zusammengestellt.
- Über die obigen Punkte hinausgehende Anforderungen wurden in Abstimmung mit dem fachlich zuständigen Personal der BASt zusammengestellt.
- Es wurde eine Parameterliste erstellt, die die Eigenschaften eines straßenintegrierten Sensors, des Reifen-Straße-Kontaktes und Ganzfahrzeuges beschreibt. Für die Parameter wurde ein realistischer Parameterraum abgeschätzt und Standardwerte definiert.

AP 2.1 – Analyse der Sensoreigenschaften

- Grundsätzliche Überlegungen zur Modellierung der straßenintegrierten Sensorik wurden angestellt.
- Für den Sensor wurde ein virtuelles Modell bestehend aus einem dynamischen Ersatzmodell (Simulink) und einem Signalverarbeitungsmodell (Matlab) erstellt.
- In einer Simulation wurden die Lastverläufe aus dem lokalen Reifen-Straßen-Kontakt (AP 2.2) mit dem virtuellen Sensormodell verrechnet. Dabei wurden die Parametereigenschaften des Sensors in dem definierten Parameterraum variiert. Ergebnis dieser Simulation ist die Messunsicherheit des Sensors in Abhängigkeit der gewählten Parameter. Der Einfluss jeden Parameters auf die Messunsicherheit wurde herausgearbeitet.

AP 2.2 – Analyse des lokalen Reifen-Straßensensor-Kontaktes

- Randbedingungen der numerischen Simulation für die Analyse des lokalen Reifen-Straßensensor-Kontaktes wurden definiert
- Ein parametrisches Mehrkörpermodell eines „Viertelfahrzeugs“, das das lokale detaillierte Verhalten eines Rades mit Reifen in Kontakt mit der Fahrbahn darstellt, wurde in der Software MSC-Adams aufgebaut. Dabei sind die im AP 1.1 definierten Einflussfaktoren als Modellparameter editierbar.
- Durch einen automatisierten Prozess wurden ca. 8000 Simulationen mit unterschiedlichen Kombinationen der Einflussfaktoren durchgeführt
- Es wurden verschiedene Methoden untersucht, um die aus der Mehrkörpersimulation resultierenden einzelnen Kontaktkräfte der Knoten des Reifenmodells auszuwerten und sie als Gesamtkontaktkraft auf dem Sensor zu kombinieren. Eine Methode wurde final ausgewählt und damit die Zeitverläufe der Gesamtkontaktkraft auf dem Sensor für alle Simulationen ermittelt und an AP 2.1 für die weitere Verarbeitung weitergeleitet

AP 2.3 – Analyse der Radlasten des Gesamtfahrzeugs

- Ein Gesamtfahrzeugmodell als reduziertes MKS-Modell mit gefederten und ungefederten Massen und elastokinematischer Modellierung des Fahrwerks inkl. Fahrermodell, 3D-Straßenmodell und Umgebungsmodell wurde mit der Software IPG-TruckMaker erstellt. Das Modell ist in seinen Parametern anpassbar, um die im AP 1.1 definierten Einflussfaktoren zu untersuchen
- Es wurden neun Fahrzeugtypen identifiziert und entsprechend modelliert
- Ein Skript in Matlab wurde erstellt, um automatisiert einen Simulationsplan mit ca. 64000 Simulationen mit Variation der Einflussfaktoren durchzuführen.
- Die Simulationsauswertung wurde über Matlab-Skripts programmiert, die die aus der Fahrzeugsimulation resultierenden Zeitverläufe der einzelnen Radlasten auf Basis der Architektur des WIM-Systems auswerten und die Fehler der Schätzung des Gesamtgewichts und der Achslasten als finales Output liefern.

AP 2.4 – Modellierung der gesamten Messunsicherheit

- Die Ergebnisse der Parametereinflüsse aus den drei Einzelmodellen (Gesamtfahrzeug, Reifen-Straße-Kontakt, Sensormodell) wurden in einer Gesamtbetrachtung bewertet.
- Hieraus lassen sich die Messunsicherheiten des Messsystems abschätzen.

AP 3 – Entwicklung und Bewertung Lösungsansätze

- Es wurde herausgearbeitet, welcher Parameter den größten Einfluss hat. Daraus lassen sich Schlüsse ziehen, an welcher Stelle des Messsystems die größten Potentiale zur Reduzierung der Messunsicherheit bestehen.
- Für verschiedene Systementwürfe wurden die zu erwarteten Messunsicherheiten berechnet. Hierzu zählen auch die Architekturen bestehender Systeme.
- Es wurde bewertet welchen Einfluss der Fahrer darauf hat die Messergebnisse zu verfälschen (Brems oder Ausweichmanöver).

AP 4 – Marktrecherche Kraftmesseinrichtungen

- Eine Marktrecherche zu verfügbaren Kraftmesseinrichtungen wurde durchgeführt.
- Es zeigte sich, dass viele der benötigten Informationen zur Definition der Parameter nicht in den Datenblättern angegeben sind. Eine Nachfrage bei den Herstellern ergab, dass viele dieser Parametereigenschaften von den Herstellern nicht ermittelt wurden (z.B. Eigenfrequenz, Übersprechen, Temperaturabhängigkeit, ...)

Diese Ergebnisse lassen sich den gesetzten Zielen wie folgt gegenüberstellen:

„Das Hauptarbeitsziel des Projektes LiBra besteht in der fundierten Zusammenstellung einer detaillierten Unsicherheitsbetrachtung eines WIM-Ansatzes, der unserer Meinung nach geeignet sein könnte, Eichfähigkeit und Gerichtsfestigkeit zu erlangen. Diese Unsicherheitsbetrachtung wird folgende Elemente / Parameter des WIM-Systems mit einbeziehen:

- Unsicherheiten der Kraftmesseinrichtung (Sensorik) resultierend aus ...
 - ... Breite (im Vergleich zur Radaufstandsfläche)
 - ... Nachgiebigkeit / Steifigkeit (im Vergleich zu umgebenden Fahrbahn)
 - ... Eigenschwingverhalten
 - ... Temperaturverhalten
 - ... Zuverlässigkeit der Sensorik
- Unsicherheiten aus dem der Kraftmesseinrichtung vorangehende Straßenstück, resultierend aus:
 - ... Fahrbahnunebenheiten
 - ... Fahrbahnrauigkeit
 - ... Fahrbahnverlauf (im Sinne des Kurven- und Höhenprofils)
- Unsicherheiten aus den Fahrzeugparametern, resultierend z. B. aus ...
 - ... Eigenschwingverhalten verschiedener Fahrzeuge
 - ... Reifengeometrie und -druck (Aufstandsfläche, Tragverhalten, ...)
- Unsicherheiten aus Fahrmanövern, resultierend z. B. aus ...
 - ... Brems- und Beschleunigungsmanöver vor oder bei der Überfahrt
 - ... Lenkmanövern vor oder bei der Überfahrt
 - ... durch Seitenwind und überholende Fahrzeuge veränderte Lastverteilung
- Unsicherheiten aus der Verrechnung der Messsignale, z. B. resultierend aus ...
 - ... dem gewählten Korrekturansatz
 - ... der Verteilung mehrerer Kraftmesseinrichtungen“

Sämtliche der im Hauptziel definierten Elemente der Unsicherheitsbetrachtung wurden berücksichtigt, sinnvolle Parameterräume wurden mit der BASt diskutiert, abgesteckt und dokumentiert. Die Elemente wurden in die Analyseketten mit aufgenommen und in die Studien in AP 2 mit einbezogen. Damit wurde eine fundierte Unsicherheitsbetrachtung verschiedenster WIM-Ansätze ermöglicht. Allerdings ergab sich in AP 1 die Erkenntnis, dass diese Unsicherheitsanalyse nicht genutzt werden kann, um Aussagen über Eichfähigkeit und Gerichtsfestigkeit zu erlangen. Grund dafür ist, dass Eichfähigkeit und Gerichtsfestigkeit durch das Durchlaufen eines Zulassungsverfahrens bei der PTB erlangt werden und ein solches Verfahren noch nicht existiert. Zu einem Einstieg in die Diskussion der Definition eines solchen Zulassungsverfahrens kam es im Rahmen des Projektes leider nicht, wir sind jedoch der Meinung, mit der zusammengestellten Methode zu einer solchen Diskussion/Definition einen wertvollen Beitrag leisten zu können.

Das „Hauptziel flankierend sollen folgende Ergebnisse erreicht werden:

- vor der Erarbeitung des Hauptziels:
 - Zusammenstellung der bzgl. der Eichfähigkeit und Gerichtsfestigkeit resultierenden Anforderungen an Messgenauigkeit / max. Unsicherheit eines WIM-Systems“

Das Nebenziel vor der Erarbeitung des Hauptziels wurde in AP 1 erarbeitet und bereits mit Meilenstein 1 erreicht (siehe „Fachbericht zum Sachbericht (ZN)“)

Das „Hauptziel flankierend sollen folgende Ergebnisse erreicht werden:

- nach der Erarbeitung des Hauptziels:
 - Detaillierte Zusammenstellung mindestens eines Lösungsansatzes für ein eichfähiges, gerichtsfestes WIM-System im Sinne eines detaillierten Systemkonzeptes (inkl. eines Anforderungskatalogs für die einzelnen Systemkomponenten)
 - Bewertung der zusammengestellten Lösungsansätze im Sinne einer Unsicherheitssummierung“

Die Nebenziele nach der Erarbeitung des Hauptziels wurden in AP 3 erarbeitet (s. o.). Eine detailliertere Beschreibung erfolgt im Fachbericht zum Sachbericht (VN).

7. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises,

		Gesamtvorkalkulation per 22.08.2018	Nachkalkulation vom 20.03.2019	Abweichung	Bemerkung
Positionen		Werte in €			
0813	Material	0,00	0,00	-/-	
0823	FE-Fremdleistungen	0,00	0,00	-/-	
0837	Personalkosten	299.846,62	308.953,99	+ 3 %	
0838	Reisekosten	2.314,80	431,81	- 71 %	1*)
0847	vorhabenspez. Abschreibungen	0,00	0,00	-/-	
0848	sonstige Abschreibungen	0,00	0,00	-/-	
0850	sonstige unmittelbare Vorhabenkosten	6.468,35	49,14	- 99 %	2*)
0856	Kosten innerbetrieblicher Leistungen	12.166,00	12.166,00	-/-	
0860	Verwaltungskosten	0,00	0,00	-/-	

0881	Selbstkosten des Vorhabens	320.795,77	321.600,94	+ 0,25 %	3 *)
0882	Eigenmittel	0,00	805,17	neu	3 *)
0883	Mittel Dritter / Einnahme	0,00	0,00	-/-	
0884	Zuwendung	320.795,77	320.795,77	-/-	
	Kassenmäßige Bereitstellung 2017	85.500,00	85.500,00	-/-	
	Kassenmäßige Bereitstellung 2018	235.295,77	235.295,77	-/-	

Bemerkung 1 *)

Bzgl. der Reisetätigkeiten ergaben sich einige Änderungen ggü. der Planung:

So wurde für einen Austausch mit der PTB kein Termin gefunden (siehe Kapitel 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.)

Den Besuchen bei den Firmen TDS in Hamburg und Kistler in der Schweiz war in der Planung noch ein deutlicher Erkenntnisgewinn zugemessene worden. Im Verlauf des Projektes zeigte sich jedoch, dass sich die gesuchten Informationen gut über Telefonate abrufen ließen, so dass auf die kostenintensiven Reisen verzichtet wurde.

Das Aufsuchen verschiedener Firmen auf der Messe in Stuttgart übernahm ein Kollege, der aus einem anderen Projekt heraus finanziert wurde die Messe besuchte.

Schließlich wurden die Reisen nach Bergisch-Gladbach leicht anders als geplant durchgeführt, so dass zunächst angesetzte Hotelkosten nicht anfielen.

Bemerkung 2 *)

In Position 0850 „sonstige unmittelbare Vorhabenkosten“ waren ca. 5.800,00 € für „Rechnernutzung“ geplant worden. Zum Start des Projektes ergab sich dann die Situation, dass Kapazitäten und die benötigten Lizenzen in ausreichender Menge für die Projektlaufzeit zur Verfügung stehen würden, so dass eine Verausgabung der Mittel dem Grundsatz der sparsamen Mittelbewirtschaftung widersprochen hätte.

Weiterhin waren unter der genannten Position ca. 600,00 € für die Beschaffung von Normen und Richtlinien geplant worden. Im Verlauf des Vorhabens zeigte sich aber, dass nicht so viele Normschriften wie gedacht käuflich erworben werden mussten, so dass die Mittel nur in sehr geringem Umfang benötigt wurden.

Bemerkung 3 *)

Im Rahmen der Schlussabrechnung des Projektes ergab sich, dass die bewilligte Zuwendung um ca. 0,25 % überzogen wurde. Die entsprechenden Mehrkosten wurden aus Eigenmitteln getragen.

8. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit,

Bzgl. der Notwendigkeit der Arbeiten hat sich unsere Einschätzung gegenüber der im Antrag formulierten Einschätzung nichts verändert: „Am Markt verfügbare WIM-Systeme erfüllen aktuell nicht die Vorgaben, die für eine Eichfähigkeit oder gar die gerichtliche Verwertbarkeit der Messergebnisse erlauben. Das Fraunhofer LBF möchte sich im Projekt LiBra den dafür verantwortlichen Herausforderungen aus dem fahrzeugseitigen, fahrdynamischen Blickwinkel nähern. Eine solche Untersuchung muss unabhängig von Herstellern der Kraftmesssysteme erfolgen – erstens da deren Hauptaugenmerk meist auf den Sensoreigenschaften liegt und zweitens, da eine Kooperation mit einem Sensorhersteller den verfügbaren Lösungsraum einschränken würde. Dem entsprechend ist die Verwertbarkeit der Ergebnisse des Projektes LiBra für einzelne Hersteller nicht a priori abschätzbar, so dass ein direkter Auftrag einer Herstellerfirma an das Fraunhofer LBF unwahrscheinlich ist. Zur Lösung der die Allgemeinheit betreffenden und in der Ausschreibung adressierten Herausforderung allerdings werden die herstellerunabhängigen Ergebnisse des Projektes LiBra sehr wohl beitragen, was in unseren Augen eine Zuwendung von staatlicher Seite rechtfertigt.“

Den Umfang der erreichten Ergebnisse und die geleistete Arbeit halten wir, vor allem vor dem Hintergrund, dass LiBra ein lediglich 15 Monate dauerndes Projekt mit einer Ausstattung von geplant knapp 22 Personenmonaten Personalmitteln war, für angemessen.

9. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans,

Die im Projekt LiBra aufgezeigte Analyseketten ist geeignet, Entwicklungen neuer WIM-Systeme in Rahmen der Optimierung zu unterstützen und Diskussionen im Rahmen der Einführung eines Zulassungsverfahrens in Richtung Lösungsfindung zu unterstützen. Auch können mit der Analyseketten bestehende System detaillierter untersucht/optimiert werden bzw. es können die für Optimierungen sinnvoll anzugreifenden Komponenten identifiziert werden.

10. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen,

Während der Durchführung des Vorhabens wurden dem ZE Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt. Auch von Seiten der betreuenden Fachabteilung des Zuwendungsgebers, mit der ein kontinuierlicher Austausch gepflegt wurde, wurden der ZE keine entsprechenden Fortschritte angezeigt.

11. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses.

- Dem Projekt LiBra ist eine Unterseite des Internetauftritts des Fraunhofer LBF gewidmet: (<https://www.lbf.fraunhofer.de/de/projekte-produkte/verkehrslasten-in-bewegung-aufzeichnen.html>).
- Über die oben genannte Seite kann der Fachbericht zum Sachbericht (ZN) 2017 abgerufen werden.
- Im Rahmen des Projektes fand am 11.12.2018 bei der BAST in Bergisch-Gladbach eine Präsentation und Diskussion der Projektergebnisse statt, zu der auch Institutionen abseits des Zuwendungsgebers und des ZE eingeladen worden waren.
- Ein Beitrag zum Projekt LiBra fand Eingang in den als Printversion erhältlichen und auch online lesbaren Jahresbericht 2018 des Fraunhofer LBF
(<https://www.lbf-jahresbericht.de/leistungen/uebersicht-projekte/zuverlaessigkeit/hoehere-zuverlaessigkeit-bei-der-gewichtskontrolle-fahrender-lkw/>)
- Nach Fertigstellung und Freigabe des Zuwendungsgebers sollen auch der Sachbericht (VN) und der zugehörige Fachbericht über den Internetauftritt des Fraunhofer LBF der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Evtl. wird diese Veröffentlichung mit einer Pressemitteilung zum Projekt und Hinweisschreiben an Institutionen, die sich an den Projektergebnissen interessiert gezeigt haben, flankiert.

Fachbericht

(Fachbericht als Teil des Sachberichtes (VN) –
Berichtszeitraum: 01.10.-31.12.2018)

zu dem Vorhaben

LiBra – Lasten in Bewegung rechtssicher aufzeichnen

der Forschungsstelle



Das Vorhaben „LiBra – Lasten in Bewegung rechtssicher aufzeichnen“ wurde im Rahmen des von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) betriebenen

„Innovationsprogramm Straße“

mit Bezug zu dessen

11. Förderbekanntmachung „Eichfähiges Wiegen von Fahrzeugen während der Fahrt“
vom 14.12.2016

beantragt und bewilligt.

Riccardo Bartolozzi, Felix Fischer, Andreas Friedmann, Johannes Käsgen

Darmstadt, 15.07.2019

Ort, Datum

Andreas Friedmann

Name und Unterschrift des Projektleiters
an der (ggf. federführenden) Forschungsstelle

1. Inhaltsverzeichnis

1. Inhaltsverzeichnis	2
2. Einleitung	2
3. Arbeitspaket 1 "Definition und Anforderungen an ein WIM-System"	2
4. Zusammenfassung Arbeitspaket 2 „Unsicherheitsanalyse“	5
5. Arbeitspaket 2.1 „Unsicherheitsanalyse – Analyse der Sensoreigenschaften“	7
6. Arbeitspaket 2.2 „Unsicherheitsanalyse – Analyse des lokalen Reifen-Straßensensor-Kontaktes“	15
7. Arbeitspaket 2.3 „Unsicherheitsanalyse – Analyse der Radlasten des Gesamtfahrzeugs“	23
8. Arbeitspaket 2.4 „Unsicherheitsanalyse – Modellierung der gesamten Messunsicherheit“	36
9. Arbeitspaket 3 „Entwicklung und Bewertung von Lösungsansätzen“	41
10. Arbeitspaket 4 „Marktrecherche Kraftmesseinrichtungen“	45

2. Einleitung

Dieser Fachbericht ist Teil des Sachberichtes (VN) (siehe entsprechenden Verweis auch dort). Diese Aufteilung wurde beim KickOff-Treffen in Bergisch-Gladbach am 09.11.2017 zwischen der BASt als Bewilligungsbehörde, dem TÜV Rheinland als zuständigem Projektträger und dem Fraunhofer LBF als ausführenden Stelle abgestimmt.

In seiner Gesamtheit deckt dieser Fachbericht den Berichtszeitraum vom 01.10. bis zum 31.12.2018 – also die gesamte Projektlaufzeit – ab. Insofern wiederholt er auch Inhalte, die bereits in den Fachbericht als Teil des Sachberichtes (ZN) 2017 Eingang gefunden hatten.

Entsprechend einer Vereinbarung aus dem oben genannten KickOff-Treffen bzgl. der engen Zusammenarbeit der entsprechenden Fachabteilung der Bewilligungsbehörde ging dieser Fachbericht zur Information und insbesondere zur Ergänzung bzgl. der Anforderungen (Abschnitt „Sammlung von Anforderungen“ am Ende von Kapitel 3) am 23.03.2018 in digitaler Form an die entsprechenden Ansprechpartner Hr. Meschede und Hr. Dierke und wurde von diesen durchgesehen. Die aus dieser Durchsicht resultierenden Ergänzungs- und Korrekturwünsche wurden umgesetzt.

3. Arbeitspaket 1 "Definition und Anforderungen an ein WIM-System"

AP1 beinhaltet die Zusammenstellung der bzgl. der Eichfähigkeit und Gerichtsfestigkeit resultierenden Anforderungen an die Messgenauigkeit bzw. maximale Unsicherheit eines WIM-Systems. Ziel ist die Bestimmung der erforderlichen Rahmenbedingungen für die Durchführung der Gewichtsmessung, die als Basis für die folgende Unsicherheitsanalyse im AP 2 verwendet werden. Hierzu zählt auch die Klärung der Frage, unter welchen Randbedingungen eine Radlastmessung vor Gericht Bestand haben kann.

Faktoren, die die einzelne Radlastmessung sowie die globale Abschätzung der Achslasten und des Gesamtgewichtes beeinflussen, wie z. B. die Abmessungen der Messelemente oder die Fahrzeuggeschwindigkeit, werden im Rahmen dieses Arbeitspaketes berücksichtigt und deren Grenzwerte festgelegt.

Als Informationsquellen für die Erarbeitung wurden genutzt: inhaltlicher Austausch beim KickOff-Treffen bei der BASt (09.11.2017), Austausch bei einem Treffen mit VITRONIC am 29.11.2017 in Wiesbaden, von der BASt zur Verfügung gestellte Literatur, eigenständig recherchierte Literatur.

Glossar/Definitionen:

Von zentralem Interesse für die BASt ist es, dass Messsysteme verfügbar gemacht werden, die in der Lage sind, „Überschreitungen der zulässigen Gesamtgewichte und Achslasten zu erfassen und gerichtsfest zu dokumentieren“ (vgl. oben angeführte Förderbekanntmachung). Zur Bearbeitung des Projektes ist zunächst also von zentralem Interesse, wie sich zwischen der „Gerichtsfestigkeit“ und quantifizierbaren Parametern technischer Systeme eine Verbindung herstellen lässt.

„Gerichtsfest“ im Zusammenhang mit Verstößen gegen Vorgaben des Straßenverkehrsrechtes kann im vorliegenden Zusammenhang so gedeutet werden, dass eine Vollstreckung (enforcement) zugehöriger Strafen durch die Ordnungsbehörden derart abgesichert ist, dass Klagen gegen entsprechende Strafbescheide (Bußgeldbescheid, Verlust der Fahrerlaubnis) nur sehr wenig Aussicht auf Erfolg haben. Dies muss auf folgendem Weg erreicht werden: Richterinnen und Richter an deutschen Gerichten müssen ihre Urteile anhand von Tatsachen fällen. Im Fall von Verkehrsdelikten ist dies nun in zweierlei Hinsicht schwierig: die Tatsachen liegen in der Vergangenheit und zur Feststellung der Beweise reicht eine direkte Bezeugung nicht aus (vielmehr muss eine Quantifizierung durch eine Art von Technologie zum Einsatz kommen). In solchen Fällen (wenn Beweise also durch Technologien geliefert werden) bedienen sich Richterinnen und Richter externer Gutachterinnen und Gutachter. Diese verhelfen den Richterinnen und Richtern dazu, dass diese eine Einschätzung bzgl. der Verlässlichkeit der technologisch gelieferten Beweise bekommen und diese damit für ihre Urteilsfindung würdigen können. Nun ist z. B. im Bereich der Verkehrsgerichtsbarkeit ein solches auf Gutachterinnen und Gutachtern basierendes Vorgehen nicht praktikabel, da die Vielzahl der Fälle nicht zu bewältigen wäre. Hier kommen als Ersatzkonstruktion für die Gutachten „Standardisierte Messverfahren“ zum Einsatz. Solche gerichtsverwertbaren, standardisierten Messverfahren haben ein Zulassungsverfahren der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) durchlaufen und bestanden. Durch dieses Zulassungsverfahren gelten die mit diesen Verfahren gelieferten Beweise im Rahmen der Zulassung als „antizipierte Sachverständigen-Gutachten“. Wird nun ein Strafverfahren, das auf Basis eines durch ein standardisiertes Messverfahren gelieferten Beweises eingeleitet wurde, angefochten, dann ist es zunächst Aufgabe von Richterinnen und Richtern zu prüfen, ob begründete Zweifel an dem Beweis vorgebracht werden können. (Bei Klage müssen die begründeten Zweifel vor Gericht zuverlässig ausgeräumt werden. Ansonsten ist das Messverfahren sehr bald hinfällig.) Ist dies der Fall, dann muss in einem Verfahren von Richterinnen und Richtern unter Zuhilfenahme von Gutachten geklärt werden, ob die in der Zulassung festgelegten Randbedingungen für den Einsatz des standardisierten Messverfahrens eingehalten wurden (z. B. bzgl. der Umweltbedingung während der Messung, Beschilderungen, Auswertung, Ausbildung der Messbeamtinnen und -beamten, Gültigkeit der Eichprotokolle, Einhaltung von Fristen etc.). Darüber hinaus könnte nicht nur die einzelne Messung angezweifelt werden, sondern auch die Erteilung der Zulassung des verwendeten Gerätes oder gar das zu Grunde liegende Zulassungsverfahren selbst.

Zusammenfassend kann man sagen, dass für die Erarbeitung der Ergebnisse des Projektes LiBra ein Verfahren dann „gerichtsfest“ ist, wenn es nach einem Zulassungsverfahren der PTB geprüft wurde, die Zulassung erhalten hat und somit als standardisiertes Messverfahren anerkannt ist.

Von dieser Festlegung ausgehend, werden nun Voraussetzungen für die Zulassung durch die PTB zusammengestellt:

- Es muss ein passendes Zulassungsverfahren geben (sollte dies nicht der Fall sein, so ist es möglich und durchaus hilfreich, der PTB einen Vorschlag für ein solches Verfahren zu unterbreiten).
- Das Messverfahren muss eichfähig sein, das heißt, es muss ein Verfahren geben, mit dem die Messwerterfassung auf Messnormale rückführbar überprüft werden kann.
- Das Messverfahren muss eine gewisse Manipulationssicherheit aufweisen.
 - o z. B. technisch lückenlos im IT-Sinne
 - o z. B. gegen Manipulation durch Umwelteinflüsse
 - o z. B. gegen Vermeidungsverfahren

Inhalt eines passenden Zulassungsverfahrens sowie der Zulassung sind dann:

- Angaben zur Genauigkeit/Toleranzklasse und zugehörige Vorgaben aus entsprechenden OIML-Standards
- Definition, wie die Eignung einzelner Komponenten des Messverfahrens nachgewiesen werden kann
 - o z. B. über analytische Betrachtung und damit dem Nachweis, ob Konstruktion und Auslegung generell geeignet sind (White Box Test)
 - o z. B. über statistische Absicherung (Black Box Test)

- Definition der für einen zugelassenen Betrieb einzuhaltenden Randbedingungen:
 - o z. B. bzgl. Baulichkeit (Eignung der die Sensoren umgebenden Straße, ...), deren Dauerhaftigkeit und der Verfahren, wie und wie oft diese zu überprüfen sind
 - o z. B. bzgl. Ausführung des Einbaus, deren Dokumentation und Nachweis der Eignung der ausführenden Firmen
 - o z. B. bzgl. der Umweltbedingungen im Betrieb (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Sichtweite, Fahrbahnzustand, ...) und Verfahren, wie und wie oft diese zu überprüfen sind

Einflussfaktoren bzgl. der Zulassungsfähigkeit eines Messverfahrens → zu untersuchende Parameter:

Faktoren, die eine Zulassung als standardisiertes Messverfahren beeinflussen, wurden in die folgenden Kategorien unterteilt:

- Einflussfaktoren auf lokaler Ebene (d. h. Kontakt zwischen einem Reifen und einem Messelement):
 - o Rad und Reifen
 - o Sensorelement
 - o Umgebung
- Einflussfaktoren auf globaler Ebene (d. h. Interaktion zw. einem Fahrzeug und einem Messsystem)
 - o Messsystem
 - o Straße
 - o Fahrzeug
 - o Umgebung
 - o Fahrmanöver

Die Liste der gesammelten Einflussfaktoren befindet sich in Anhang A dieses Berichtes.

Im weiteren Verlauf des Projektes ist vorgesehen, dass die Einflussfaktoren auf lokaler Ebene in AP 2.2 einer Analyse unterzogen werden. Die Einflussfaktoren auf globaler Ebene werden in AP 2.3 betrachtet.

Abschätzung der Parameterräume:

Für die gesammelten Einflussfaktoren werden anhand verschiedenster Quellen Wertebereiche abgeschätzt, in deren Grenzen die für die folgenden Projektschritte geplanten Analysen vorgenommen werden sollen. Diese Bereiche sind an einigen Stellen deutlich breiter, als die akzeptierten Variationen der Faktoren bei bestehenden WIM-Systemen festgelegt worden sind. Dies dient dazu, die Einflüsse der Faktoren auf den Messfehler des Systems ausführlich zu untersuchen.

Die in Anhang A dieses Berichtes wiedergegebene Liste der gesammelten Einflussfaktoren enthält auch die festgelegten Wertebereiche sowie Angaben bzgl. der jeweiligen Quellen und/oder den der Abschätzung zu Grunde liegenden Überlegungen.

Sammlung von Anforderungen:

Anforderungen im Sinne dieses Abschnitts beziehen sich nicht auf das Messverfahren an sich, sondern auf die Möglichkeiten, die ein System nach Wünschen der BAST im späteren Betrieb erfüllen soll:

- Erste Anforderungen bzgl. eines zu entwickelnden Systems können aus der auf der Titelseite dieses Fachberichtes angeführten Förderbekanntmachung entnommen werden:
 - o „Die Fahrzeuge sollen die Messstelle ohne erhebliche Beschränkungen bei der Geschwindigkeit oder Änderungen beim Fahrverhalten passieren können.“
 - o „Der Fokus liegt dabei auf Fahrzeugen ab 3,5t zulässiges GG.“
 - o „Zusammenführung und Weiterentwicklung der Systeme zu einem in Deutschland eichfähigen System. [...] Erreichen der Eichfähigkeit durch die Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB)“
 - o Eine „gerichtsfeste Verwägung nach deutschem Recht“ soll möglich gemacht werden.
 - o „Messungen von Achslasten und Fahrzeuggewichten“
 - o „Eichung und Rückführbarkeit der Messtechnik auf metrologische Standards“
 - o „Einsatzfähigkeit unter realistischen Rahmenbedingungen auf Bundesfernstraßen/BAB“

- weitere, durch die Aufgabenstellung noch nicht definierte Anforderungen
 - o Welcher Toleranzklasse nach OIML muss ein System genügen?
 - o Welche Fahrzeugklassen muss das System erkennen?
 - o Gibt es Witterungsbedingungen, bei denen eine Verriegelung wenig Sinn macht und für die also ein Betrieb des Systems nicht zugelassen sein muss?
- denkbare weitere Anforderungskategorien:
 - o Erkennbarkeit
(Wie auffällig darf bzw. unauffällig muss ein System sein – z. B. um ein Vermeidungsverhalten der Straßennutzer zu verhindern?)
 - o Mobilität
(Macht ein System Sinn, dass – evtl. in Teilen – an verschiedenen Orten kurzfristig aufgebaut, verwendet, anschließend wieder abgebaut und an einen anderen Ort verlegt werden kann?)
 - o max. Investitionskosten (Beschaffung, Einbau, Inbetriebnahme, Schulungen, ...)
 - o max. laufende Kosten (Energiebedarf, Personalbedarf, Wartungskosten, ...)

4. Zusammenfassung Arbeitspaket 2 „Unsicherheitsanalyse“

Arbeitspaket 2 wurde in 4 Unterarbeitspakete (AP 2.1 bis AP 2.4) gegliedert. Deren Durchführung und die erreichten Ergebnisse sind in den Kapiteln 5 bis 8 beschrieben. Abbildung 1 stellt die Struktur der Unterarbeitspakete dar. Nachdem die Einflussfaktoren und deren Wertebereiche in AP 1 festgelegt wurden, wurde die Unsicherheitsanalyse auf zwei Ebenen durchgeführt:

- Lokale Analyse: Die Sensoreigenschaften wurden in AP 2.1 analysiert und ein Sensormodell für die weiteren Untersuchungen erstellt. Die Interaktion zwischen einem Sensor, der Straße und einem Rad mit Reifen wurde in AP 2.2 im Detail numerisch untersucht, um die Genauigkeit einzelner Lastmessungen zu analysieren.
- Globale Analyse: In AP 2.3 wurde das gesamte Messsystem mit dem vollständigen Fahrzeug anhand verschiedener Fahrmanöver numerisch simuliert und analysiert.

Schließlich wurden die Ergebnisse beider Analysen in ein Modell der gesamten Messunsicherheit in AP 2.4 zusammengefasst.

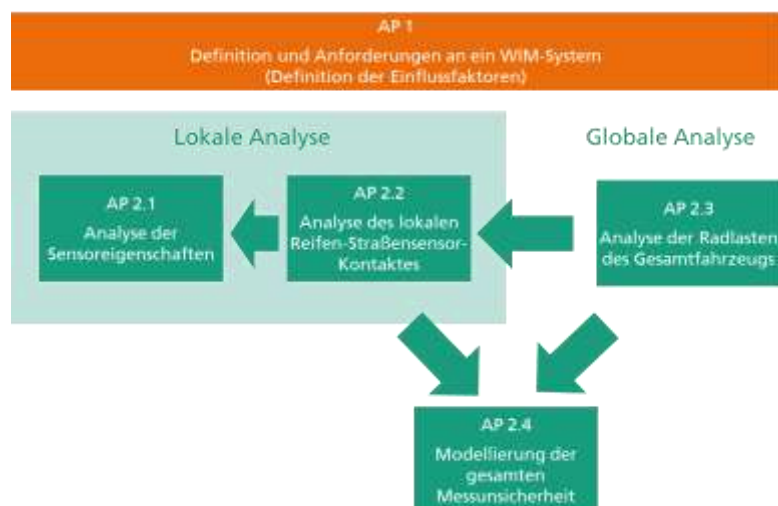


Abbildung 1: Struktur der Unsicherheitsanalyse.

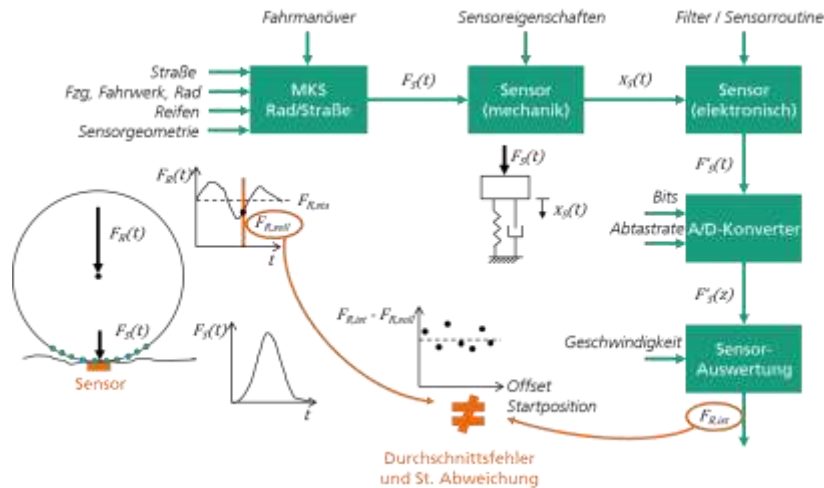


Abbildung 2: Simulation des lokalen Reifen-Sensor-Kontaktes.

Abbildung 2 dargestellt. Betrachtet wird hier der Fehler zwischen der dynamischen vertikalen Radlast $F_{R,soll}$ bei Überfahrt eines Sensors und dem final gemessenen Wert $F_{R,ist}$. Die Kraft $F_s(t)$, die auf den Sensor wirkt, ist mit einem typischen Zeitverlauf dargestellt. Das Bild zeigt die modellierten Schritte der Messkette ausgehend vom Rad-Sensor-Kontakt in der Mehrkörpersimulation, durch ein mechanisches Sensormodell, ein Modell der Sensorelektronik, die A/D-Konversion bis hin zum finalen Schritt, der Sensor-Auswertung, die den gemessenen Wert generiert. Bei jedem Schritt sind die wesentlichen Einflussfaktoren dargestellt, die die Messgenauigkeit beeinflussen. Sind diese Faktoren für einen gewissen simulierten Fall mit festen Werten definiert, variiert der Fehler aufgrund verschiedener Offsets in der Startposition, bzw. in dem initialen Abstand zwischen Rad und Sensor, so dass eine statistische Betrachtung basierend auf Durchschnittswert und Standard-Abweichung notwendig ist.

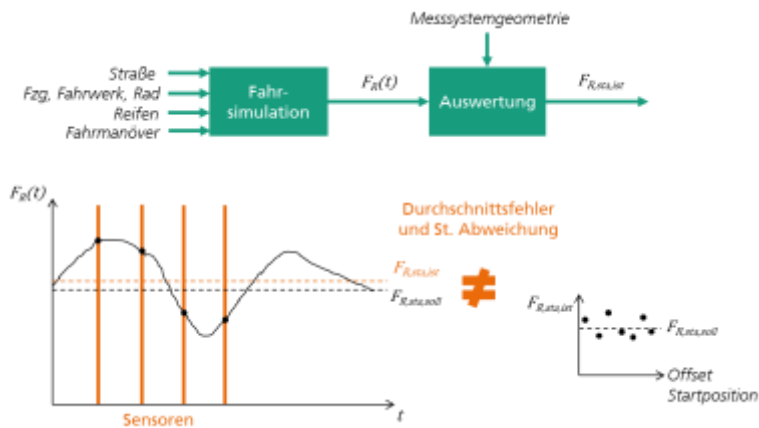


Abbildung 3: Simulation der globalen Fahrzeugdynamik.

In Abbildung 3 ist das Konzept der globalen Analyse, d. h. der Simulation der globalen Fahrzeugdynamik, dargestellt. Hier liegt der Fokus auf dem Fehler zwischen den tatsächlichen statischen Werten der Achslasten (und des Gesamtgewichts) und den ermittelten statischen Werten aus einzelnen Messungen der dynamischen Achslasten ($F_{R,sta,soll}$ gegen $F_{Rsta,ist}$). Das Bild zeigt beispielsweise eine dynamische Radlast F_R über der Zeit. Die Sensoren (orange Stellen) messen die vier markierten Werte, aus denen die statische Radlast $F_{R,sta,soll}$ geschätzt werden kann (z. B. und wie im Projekt angenommen mit dem Durchschnittswert der einzelnen Messungen). Der Vergleich mit dem bekannten realen Wert $F_{Rsta,ist}$ ergibt den Messfehler auf System-Ebene. Das beschriebene Konzept wurde im Rahmen der globalen Analyse mit der Hypothese umgesetzt, dass die einzelnen Sensoren die dynamische Radlast exakt erfassen können, da der Fehler der einzelnen Lastmessungen bereits in der lokalen Analyse adressiert wurde. Das Bild zeigt die zwei modellierten Schritte (Fahr-simulation und Auswertung), die die Messkette darstellen, sowie die wesentlichen Faktoren, die die Messung beeinflussen. Ähnlich wie in der lokalen Analyse variiert der Fehler nicht nur

aufgrund dieser Faktoren, sondern auch bei verschiedenen Offsets in der relativen Startposition zwischen Fahrzeug und Messsystem. Das führt zu einer statistischen Betrachtung der Ergebnisse auf Basis von Durchschnittswert und Standard-Abweichung.

In allen drei durchgeführten Unsicherheitsanalysen (Sensor, Rad-Sensor-Kontakt und Fahrzeug-Messsystem) sind die im AP 1 definierten Einflussfaktoren einzeln variiert, wobei die anderen bei ihrem jeweiligen festgelegten Standard-Wert bleiben. Grund dafür ist die große Anzahl an notwendigen Simulationen und deshalb die hohe Rechenzeit, falls viele Faktoren miteinander kombiniert würden. Ausnahme sind die sogenannten Streuungsfaktoren, die bei jedem berechneten Fall mit allen Werten aus ihrem Variationsbereich komplett kombiniert wurden. Diese Streuungsfaktoren sind:

- Startposition bzw. Offset
- Reifen-Typ (für die lokale Analyse);
- Fahrzeug-Typ (für die globale Analyse).

Die Ergebnisse einer typischen Auswertung eines Einflussfaktors sind in Abbildung 4 dargestellt. Auf der x-Achse ist der untersuchte Faktor aufgetragen, während auf der y-Achse der Fehler aufgetragen ist. Bei jedem Wert des Faktors sind viele Punkte aufgetragen, die die Variation aufgrund der Streuungsfaktoren darstellen (hier im Beispiel: Offset und Reifen-Typ). Der Mittelwert dieser Variation sowie der 2 σ -Bereich und der maximale Wert sind als Funktion des untersuchten Faktors ebenso im Diagramm dargestellt.

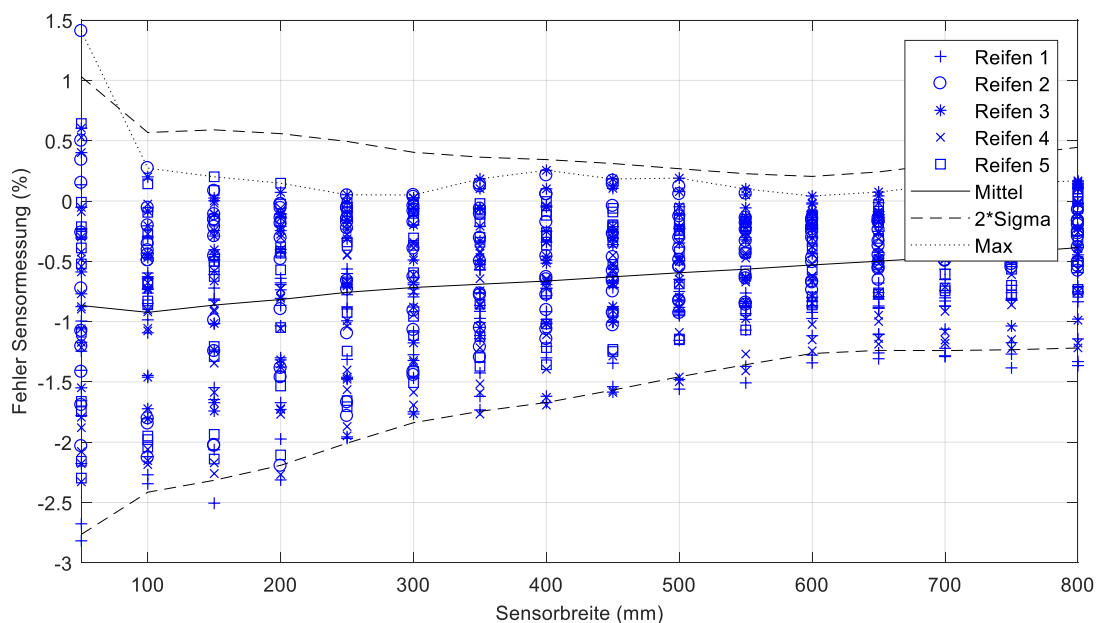


Abbildung 4: Beispiel der Unsicherheitsanalyse für einen Einflussfaktor.

5. Arbeitspaket 2.1 „Unsicherheitsanalyse – Analyse der Sensoreigenschaften“

Ziel von Arbeitspaket 2.1 ist es, die Sensoreigenschaften zu analysieren und ein Sensormodell für die weiteren Untersuchungen zu erstellen. Das Modell soll in Kombination mit AP 2.2 die Interaktion zwischen Sensor, Straße und Reifen abbilden und typische Sensoreigenschaften hinsichtlich ihres Einflusses auf die Messgenauigkeit berücksichtigen. Die ersten Bearbeitungsschritte von AP 2.1 beinhalteten die grundsätzlichen Überlegungen zur Modellierung der straßenintegrierten Sensorik: Recherche bzgl. unterschiedlicher Aufbauarten für eine solche Sensorik, Analyse der Funktionsprinzipien, mechanische Ersatzmodelle, Nachbildung der Kraftübertragung vom bewegten Reifen auf den Sensor und Einfluss von Unterbau und umgebender Straße.

Nachfolgend wird das aufgebaute Sensormodell näher beschrieben und die Ergebnisse der verschiedenen Einflussfaktoren dargestellt.

Mechanisches Ersatzmodell

Allen Kraftmessprinzipien ist gemein, dass eine Kraft keine direkte Messgröße ist, die durch eine Recheneinheit erfasst werden kann. Die Kraft muss zu ihrer Messung zunächst in eine elektrische Größe gewandelt werden. Dies geschieht bei Kraftmesselementen basierend auf Dehnungsmessstreifen (DMS) dadurch, dass die wirkende Kraft eine „Feder“ im Kraftmessquerschnitt dehnt oder staucht. Auf der Feder ist ein Widerstandsdraht (DMS) appliziert, der sich durch diese Dehnung in seiner Länge minimal ändert. Diese Längenänderung bewirkt eine Widerstandsänderung des Drahtes die nun über eine Brückenschaltung in eine elektrische Spannung gewandelt werden kann. Diese elektrische Spannung lässt sich wiederum durch einen Analog-Digital-Wandler in ein binäres Signal wandeln und rechnergestützt weiterverarbeiten. Ähnlich ist es auch bei piezoelektrischen Kraftmesszellen, nur wird hier die Dehnung des Materials nicht per Widerstandsänderung erfasst, sondern das Material selber erzeugt durch die Dehnung über den piezoelektrischen Effekt eine elektrische Ladung, deren Abfließen gemessen werden kann. Die Kraftmessung geht also immer mit der Dehnung eines Messelementes einher.

Um die zu messenden Radlasten in das federnde Messelement einzuleiten ist ein Element zur Krafteinleitung erforderlich, also z. B. ein Stück Fahrweg, dass die Kräfte bündelt und durch das Messelement leitet. Dieses Element hat eine gewisse Masse, die je nach Aufbau größer oder kleiner ausfallen kann. Abbildung 5 zeigt typische Messelemente auf Piezo-basis (links) und auf DMS-basis (rechts).

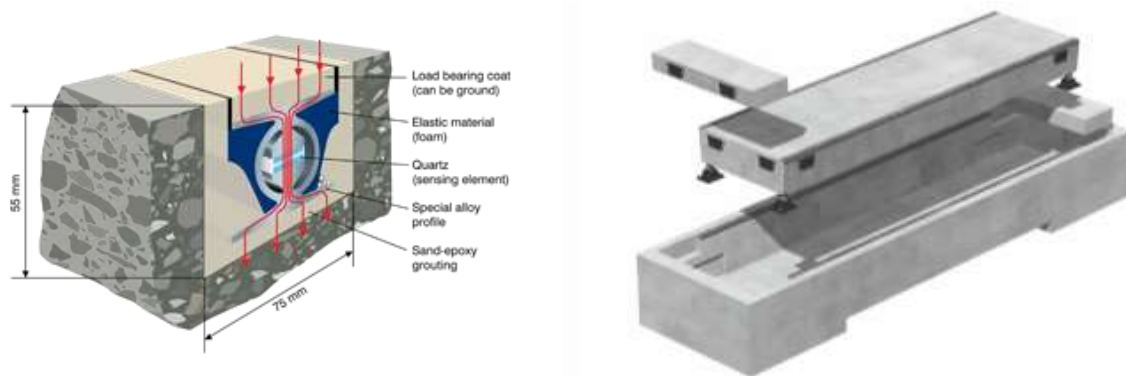


Abbildung 5: Straßenintegrierte Messelemente zur Radlastmessung, links: Piezobasiert Fa. Kistler (Bildquelle: Kistler), rechts: DMS-basiert Fa. Schenk Process (Bildquelle: Schenk Process)

Aufgrund des beschriebenen mechanischen Aufbaus wurde in dieser Untersuchung das mechanische Ersatzmodell des Ein-Massen-Schwingers für den Modellaufbau gewählt. Abbildung 6 zeigt den prinzipiellen mechanischen Aufbau und das in Matlab Simulink umgesetzte Simulationsmodell. Notwendige Größen für die Parametrierung des Modells sind Federsteifigkeit, Masse und Dämpfung. Die Straße wurde für die Simulation als steif angenommen; der Radlastsensor stützt sich also ohne weitere Nachgiebigkeit am Untergrund ab.

Die dynamische Eigenschaft eines Ein-Massen-Schwingers ist seine Schwingfähigkeit. Wirkt ein Kraftimpuls $F(t)$ auf die Masse ein, so überträgt sich die Energie des Impulses auf die Masse. Die Masse wird dadurch beschleunigt, legt einen Weg zurück und die Energie des Impulses überträgt sich auf die Feder. In der Folge entsteht eine Schwingung indem die Impulsenergie zwischen Masse und Feder immer wieder ausgetauscht wird. Durch Wandlung der mechanischen Energie im Dämpfer in Wärme klingt die Schwingung langsam aus.

Es gilt zu beachten, dass eine Schwingung sich nur dann ausbildet, wenn der Kraftimpuls $F(t)$ die Eigenfrequenz des Schwingers anregt. Eine Anregungsfrequenz unterhalb der Eigenfrequenz führt nur zu einer quasistatischen Verschiebung der Masse. Typischerweise sollten Messelemente immer deutlich unterhalb ihrer Eigenfrequenz betrieben werden, da ansonsten Fehler in der gemessenen Amplitude unvermeidbar sind.

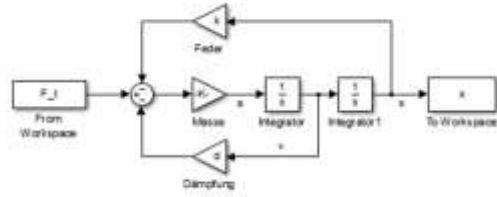
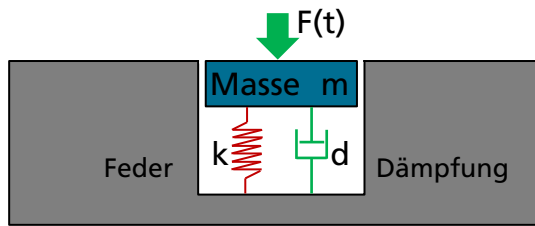


Abbildung 6: Ersatzmodell - links: mechanisches Sensor Ersatzmodell (Ein-Massen-Schwinger) rechts: Simulationsmodell in Matlab Simulink

Während der Simulation der Sensoreigenschaften wurde der Sensor in Simulink mit berechnen Kraftverläufen aus der MKS Simulation in Arbeitspaket 2.2 beaufschlagt. Abbildung 7 zeigt einen solchen Kraftverlauf. Das Ausgangssignal des Sensors ist wie eingangs beschrieben proportional zur Dehnung der Feder, die als Zeitsignal des mechanischen Ersatzmodells ausgegeben wurde. Bei dem simulierten Signalverlauf in Abbildung 7 ist zu erkennen, dass Sensor zum Schwingen angeregt wird. Die Amplitudenüberhöhung durch die überlagerte Schwingung ist hier deutlich sichtbar.

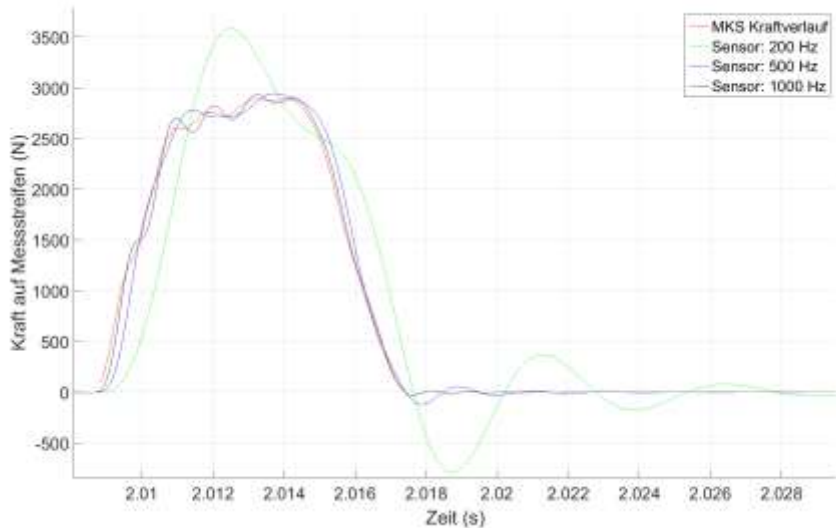


Abbildung 7: Kraftsignal einer simulierten Sensorüberfahrt bei verschiedenen Eigenfrequenzen des Sensors

Parametervariation und Simulation

Neben den mechanischen Sensoreigenschaften wurden weitere elektrische Eigenschaften und Eigenschaften der Signalverarbeitung betrachtet und simuliert. Tabelle 1 listet die Parameter und deren Parameterraum für die Analyse der Sensoreigenschaften auf. Bei der Simulation wurde so vorgegangen, dass ein Parameter durchvariiert wurde, während die restlichen Parameter auf ihrem Standardwert eingestellt waren. Hierdurch lässt sich direkt der Einfluss des einzelnen Parameters veranschaulichen. Als Eingangsgrößen für die Simulation dienten die Kraftverläufe aus der MKS Simulation in Arbeitspaket 2.2, die einen Gesamtumfang von 8305 Simulationen beinhaltete. Die Kraftverläufe wurden zuerst mit dem mechanischen Ersatzmodell in Matlab Simulink verrechnet, wo die Dynamik des Sensorelementes (Eigenfrequenz) berücksichtigt wurde. Anschließend wurden die Signale durch ein Matlab Skript weiterverarbeitet, um die restlichen Parameter anzuwenden. Für jeden Kraftverlauf aus der MKS Simulation wurden 38 Parametervariationen berechnet, was eine Gesamtzahl von 315590 Simulationsrechnungen ergibt, die für die Einflussermittlung verwendet wurden.

Nachfolgend folgt eine Erklärung zu den einzelnen Parametern und deren Variation während der Simulation. Die dargestellten Fehler beziehen sich nur auf den und die Signalverarbeitung. Fehler des Rad-Reifen Kontaktes AP 2.2 sind nicht mit berücksichtigt.

Tabelle 1: Simulierte Parameter und Wertebereich bei Betrachtung der Sensorunsicherheiten

Nr.	Einflussfaktoren	Standard	Variation	Einheit
Faktoren Sensor:				
1	Eigenfrequenz f (Steifigkeit, Masse)	5.000 Hz	[200,500,1000,2000,5000,1000]	Hz
	→ Steifigkeit k	$k = f^2 \cdot m \cdot 75$	Ergibt sich aus Eigenfrequenz	N/mm
	→ Masse m	$m = 75.000 / (f^2 \cdot \pi)$	Ergibt sich aus Eigenfrequenz	kg
3	CrossTalk (Übersprechen)	0%	[-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3]	%
4	Empfindlichkeitsänderung durch Temperatur	20°C	$[-20, 0, 20, 40, 60] \cdot 0,02 \% / ^\circ\text{C}$ (Ansatz als Normalverteilung)	% / °C
5	Genauigkeitsklasse	%	[Min:0,1% Typ:1% Max:5%] Variation nicht in Simulationsmodell berücksichtigt	%
Faktoren Messsystem & Auswertung:				
7	Abtastrate & Filter	10.000	[100,200,300,400,500,1000,2000,5000,10000]	Hz
8	Auflösung	24	[12,14,16,24]	bit
9	Geschwindigkeitsmessung	0	[-3,-2,-1,0,1,2,3] Messfehler (Ansatz als Normalverteilung)	%
10	Auswertalgorithmus	Integral	[Integral, Peak]	

Auswertalgorithmus

Es gibt verschiedene Methoden den gemessenen Signalverlauf auszuwerten und einen einzelnen Kraft- bzw. Gewichtswert zu bestimmen. In unserer Untersuchung haben wir die beiden Methoden „PeakLoad“ und „Integral“ betrachtet. Hierbei haben wir jeweils nur die Basisvariante der Methoden umgesetzt, also auf Optimierungen verzichtet. Abbildung 8 zeigt einen berechneten MKS Kraftverlauf und die Anwendung der beiden Methoden.

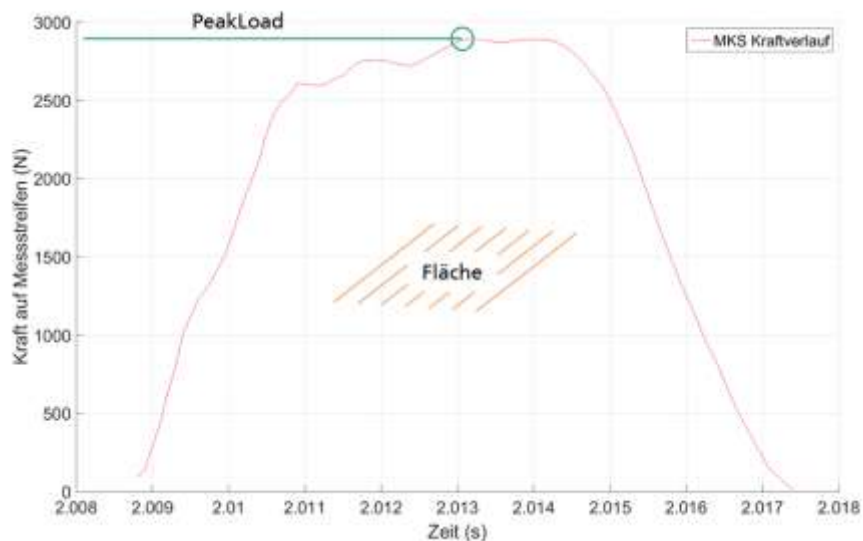


Abbildung 8: Auswertalgorithmus

Bei der PeakLoad Methode wird der Maximalwert der Kraft F ermittelt und als singulärer Messwert verwendet. Dieses Vorgehen ist ähnlich einer klassischen Waage, wobei man natürlich nicht abwarten kann bis sich die Waage ausgependelt hat. Es ist offensichtlich, dass jeder „Überschwinger“ den Messwert verfälscht.

$$Kraft_{PeakLoad} = \text{Maximalwert}(F)$$

Die **Integral Methode** wertet die „Fläche“ unter dem Signalverlauf aus. Sie findet z. B. Anwendung bei Wägeeinrichtungen in Förderbändern, die einen kontinuierlichen Massestrom verwiegen sollen. Diese Auswertemethode wird z. B. durch die Kistler Lineas Sensoren angewandt [3].

$$Kraft_{Integral} = \frac{\int F dt * Geschwindigkeit}{Messstreifenbreite}$$

Die Integral Methode zeigt in der Regel deutlich bessere Ergebnisse hinsichtlich der Messgenauigkeit. In den nachfolgenden Ergebnissen wird die **PeakLoad Methode** daher nur exemplarisch dargestellt. Alle Ergebnisse finden sich in Anhang B.

Eigenfrequenz, Masse, Steifigkeit

Aus Sicht der Simulation ist es nicht zielführend, die beiden Parameter Steifigkeit und Masse getrennt voneinander zu variieren. Hierdurch würde ein viel zu großer, unrealistischer Bereich an Kombinationen abgedeckt. Als Vorgehen wurde daher gewählt, dass ein Parameterbereich an Eigenfrequenzen von 100 Hz bis 5000 Hz definiert wurde. Bei einem ungedämpften Ein-Massen-Schwinger steht die Eigenfrequenzen f in dem einfachen Zusammenhang zu Steifigkeit k und Masse m :

$$f = \sqrt{\frac{k}{m * 4 * \pi^2}}$$

Für jede simulierte Eigenfrequenz wurde eine möglichst realistische Kombination aus Masse und Steifigkeit gewählt. So betrug die Masse bei 5000 Hz Eigenfrequenz z. B. 2,3 kg während sie bei einer Eigenfrequenz von 100 Hz 119 kg betrug. Die Formeln zur Berechnung von Masse und Steifigkeit können Tabelle 1 entnommen werden. Die Dämpfung war bei allen Rechnungen auf den konstanten Wert von $d = 35.000$ eingestellt.

Abbildung 9 zeigt den Einfluss der Eigenfrequenz auf die Messgenauigkeit. Die Auswertung nach der Integral Methode zeigt keinen Einfluss der Eigenfrequenz. Die Fehler liegen bei allen Frequenzen auf einem gleichbleibenden, sehr niedrigen Niveau. Die Auswertung nach PeakLoad Methode zeigt bei Eigenfrequenzen < 2000 Hz eine große Messunsicherheit.

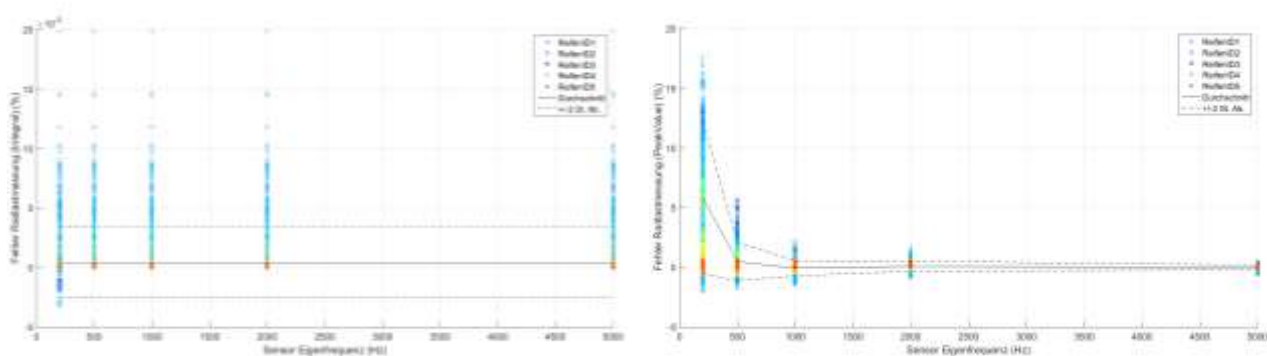


Abbildung 9: Einfluss der Eigenfrequenz auf die Messgenauigkeit
(links: Integral Methode, rechts: PeakLoad Methode)

Temperatureinfluss

Mit der Temperatur ändern sich die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Sensorik. So fällt mit steigender Temperatur z. B. der Elastizitätsmodul von Stahl ab, so dass die Feder im Messelement bei gleicher Last eine größere Dehnung erfährt. Das Messsystem interpretiert dies als größere Belastung und zeigt entsprechend eine zu hohe Last an. Grundsätzlich können solche Effekte kompensiert werden, jedoch steigt der Aufwand je genauer eine solche Kompensation sein soll. Für diese Untersuchung wurde eine Empfindlichkeitsänderung der Messelemente über der Temperatur angenommen. Die Empfindlichkeitsänderung ist dabei normalverteilt mit $\mu = 0$ und $2 \sigma = 0,02 \% / ^\circ\text{C}$ bei einem simulierten Temperaturbereich von $-20\text{ }^\circ\text{C}$ bis $+60\text{ }^\circ\text{C}$. Der Wert von $0,02 \% / ^\circ\text{C}$ wurde dem Datenblatt der Kistler Lineas Sensoren entnommen, wird aber laut Datenblatt nicht als Normalverteilung, sondern als linear Faktor angesetzt.

Angaben anderer Hersteller wurden nicht gefunden. Lineare Einflussfaktoren lassen sich theoretisch vollständig kompensieren, allerdings zeigt die praktische Erfahrung, dass dies nur selten vollumfänglich gelingt. Aus diesem Grund wurde hier von einer Kompensation ($\mu = 0$) ausgegangen, der Einflussfaktor aber als Streubereich angesetzt.

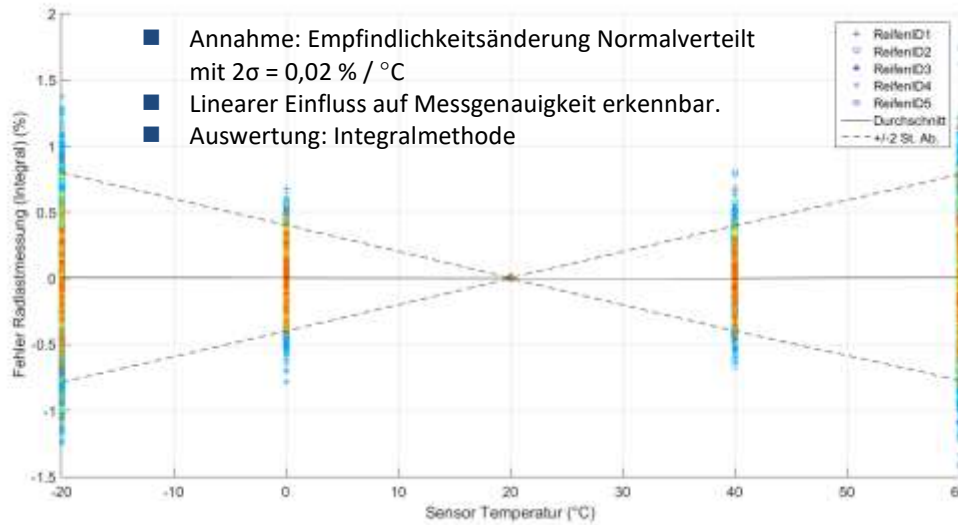


Abbildung 10: Temperatureinfluss

Übersprechen

Kraftsensoren werden so aufgebaut, das möglichst nur aus einer Richtung kommende Kräfte zu einer Messwertanzeige führen. In der Praxis ist es jedoch zu beobachten, dass Querkräfte, die über die Messelemente geleitet werden, ebenfalls zu einer Anzeige führen. Im Falle von straßenintegrierten Sensoren wären diese Querkräfte z. B. Brems- oder Antriebskräfte oder Seitenführungskräfte beim Lenken. Typische Übersprechwerte von multiaxial messenden Sensoren liegen im Bereich +/- 3 % und hängen sehr stark von der Qualität der Sensorik ab. Monoaxial messende Sensoren wie sie in straßenintegrierten Sensoren Einsatz finden, zeigen in der Regel ein günstigeres Übersprechverhalten. Betrachtet wurde ein Wertebereich von +/- 3 %. Die Querkräfte wurden ebenfalls in der MKS Simulation aus Arbeitspaket 2.2 berechnet. Hinweis: Das Übersprechen wurde als linearer Faktor auf Querkräfte modelliert. In der Realität ist diese Annahme ggf. nicht immer zutreffend. Das Ergebnis spiegelt eine generelle Tendenz wieder welchen Einfluss Übersprechen auf die Messgenauigkeit hat.

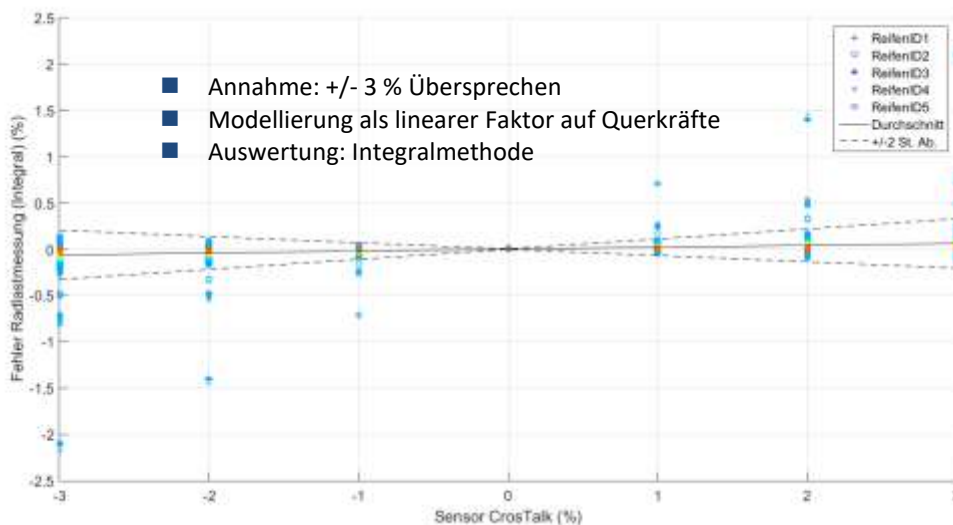


Abbildung 11: Einfluss des Übersprechens

Abtastrate und Filter

Die Abtastrate gibt an, wie häufig das Kraftsignal pro Sekunde abgetastet wird. Je höher die Abtastrate, desto exakter folgt das abgetastete Signal dem tatsächlichen Signalverlauf. Allerdings steigt hiermit auch die zu verarbeitende Datenmenge und die Anforderungen an die Signalverarbeitung steigen. In der Simulation wurden Abtastraten zwischen 200 Hz und 10 kHz betrachtet. Vor der Abtastung muss das Signal mit einem analogen Filter kleiner als die halbe Abtastrate gefiltert werden, um Aliasing Effekte im Signal zu vermeiden. Dieser Filter wurde durch ein Filter vom Typ „Butterworth“, 4. Ordnung mit einer Filtereckfrequenz der halben Abtastrate realisiert. Abbildung 12 stellt den Einfluss der Abtastrate auf den Signalverlauf dar und zeigt den Messfehler in Abhängigkeit der gewählten Abtastrate. Nennenswerte Messfehler treten nur bei Abtastraten kleiner 1000 Hz auf.

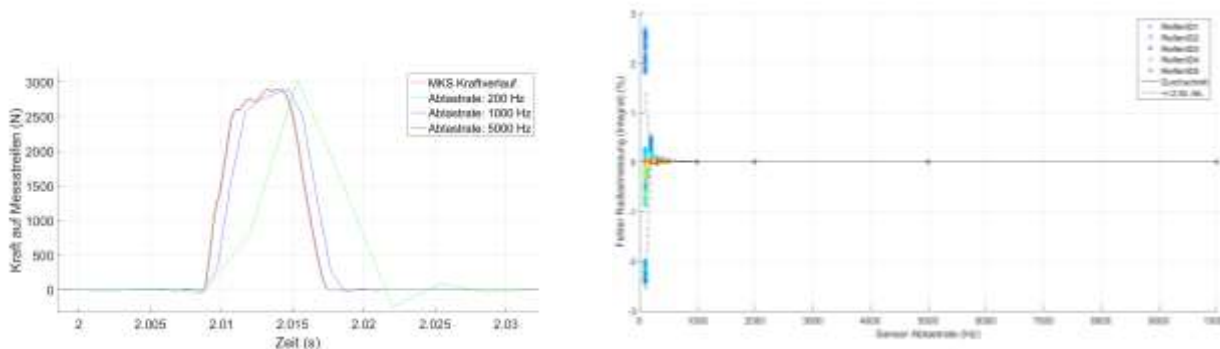


Abbildung 12: Einfluss der Abtastrate auf den Signalverlauf (links) und den Messfehler (rechts)

Signalauflösung

Die Auflösung ist ein Maß, wie viele unterschiedliche digitale Werte ein Messsignal annehmen kann. Die Auflösung wird in bit angegeben und ist eine Eigenschaft des Analog-Digital-Wandlers der Messelektronik, nicht des Sensors selber. Die Werteanzahl die ein Signal annehmen kann, berechnet sich aus 2^{bit} . Ein 12 bit A/D-Wandler kann demnach 4096 verschiedene Werte auflösen. A/D-Wandler von 16 bit oder mehr sind heutzutage die Regel. In der Simulation wurde ein Wertebereich von 12 bis 24 bit untersucht. Der Einfluss der Signalauflösung ist eher gering und zeigt oberhalb 16 bit keine nennenswerte Änderung mehr.

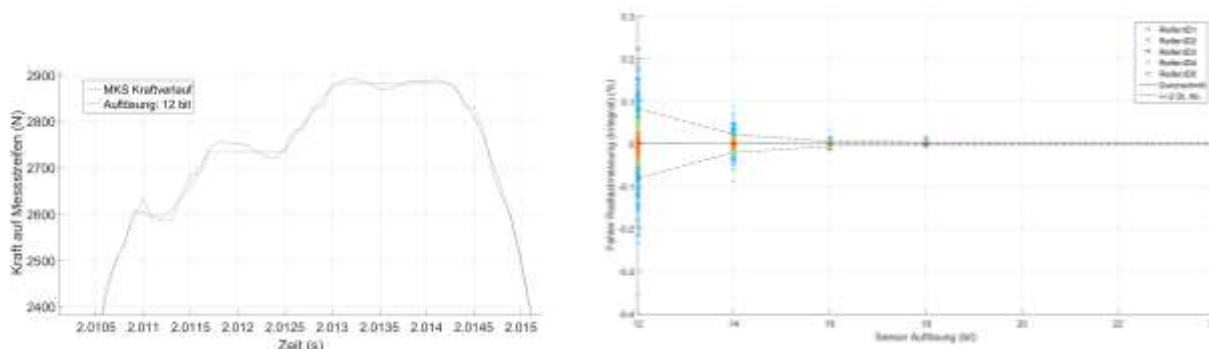


Abbildung 13: Einfluss der Signalauflösung auf das Signal (links) und den Messfehler (rechts)

Geschwindigkeitsmessfehler

Die Geschwindigkeit ist Bestandteil der Auswertung nach der Integral Methode. Nach der Berechnungsformel ist ein linearer Einfluss eines Geschwindigkeitsmessfehlers auf die Messgenauigkeit zu erwarten. In der Parametervariation wurde der Parameter Geschwindigkeit mit einer Ungenauigkeit im Bereich von $\pm 3\%$ angesetzt. Der Messfehler wurde dabei als Normalverteilt angenommen mit $\mu = 0$ und $2\sigma = x\%$. Abbildung 14 zeigt den Einfluss und bestätigt die erwartete lineare Zunahme der Streuung mit größer werdendem Messfehler. Auf die PeakLoad Methode hat die Geschwindigkeitsmessung keinen Einfluss.

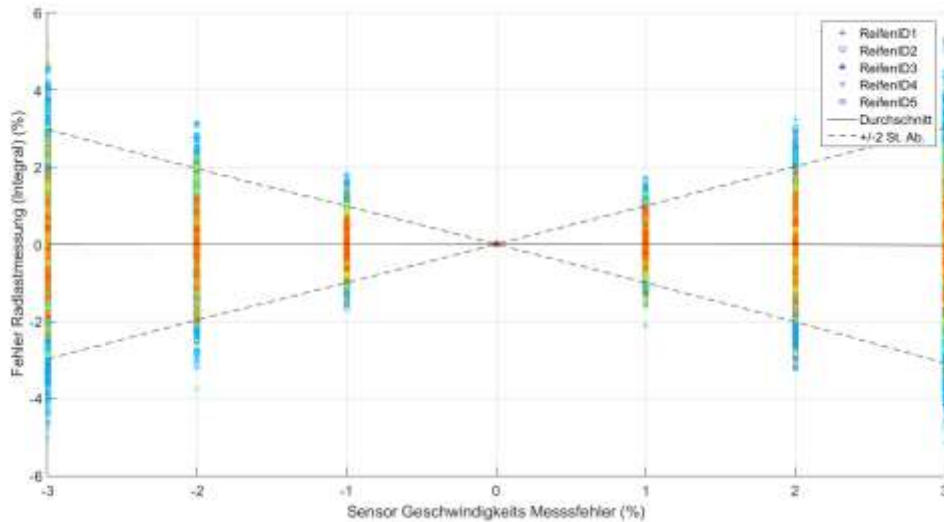
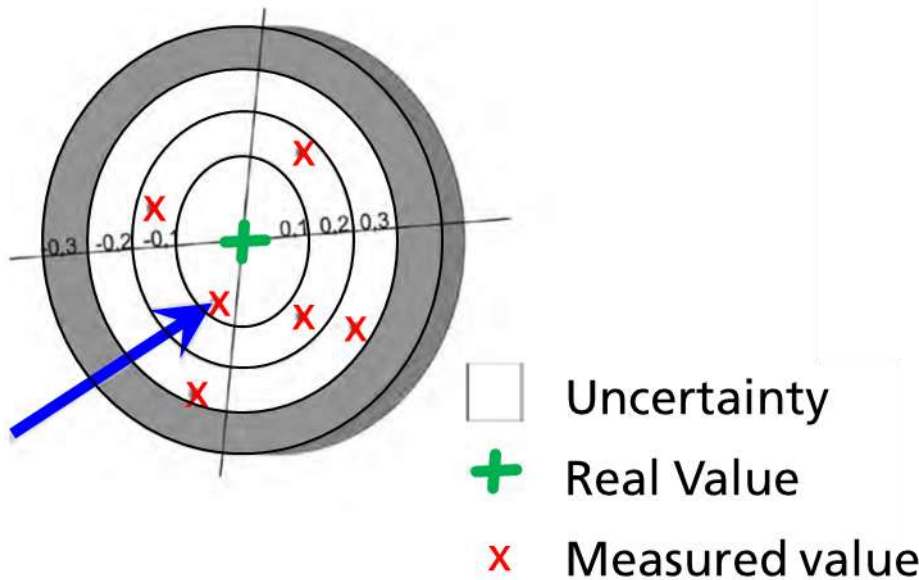


Abbildung 14: Einfluss von Geschwindigkeitsmessfehlern auf die Messgenauigkeit der Integral Methode

Genauigkeitsklasse

Die Genauigkeitsklasse ist ein typischer Wert, der in Sensordatenblättern angegeben wird. Er fasst verschiedene Sensoreigenschaften zusammen wie Linearitätsabweichungen, Hysterese, Wiederholbarkeit und Temperatureffekte. Die Genauigkeitsklasse wurde in den Simulationen nicht explizit berücksichtigt, da die Datenblattwerte bereits einen Streubereich, in der Regel 2σ , beziffern.



Zusammenfassung und Diskussion

Die Balkendiagramme in Abbildung 15 zeigen jeweils die Minima und Maxima der 2σ Streubereiche der einzelnen Parameter. Je größer der Unterschied zwischen Minima und Maxima, desto größer ist das Potential, dass mit Optimierung dieses Parameters eine Steigerung der Messgenauigkeit erzielt werden kann.

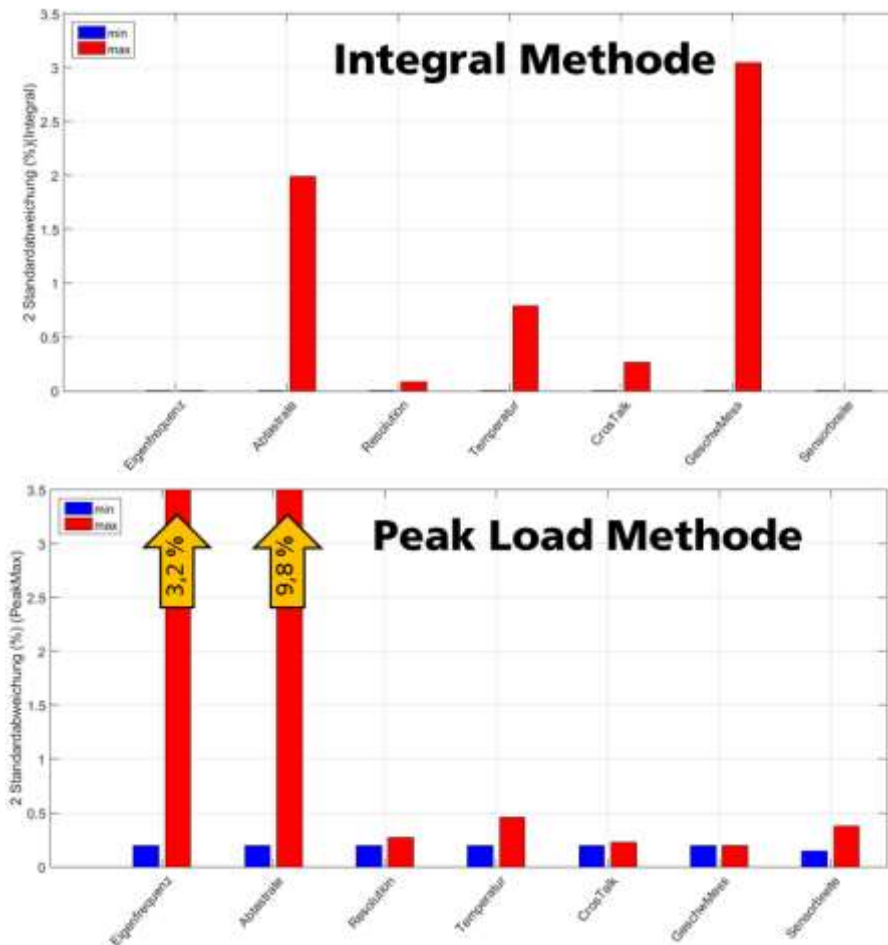


Abbildung 15: Vergleich der Parametereinflüsse auf die 2σ Messgenauigkeit

Die beiden Parameter Abstraktion und Sensorauflösung (Resolution) sind zwei recht einfach zu erreichende Ziele, da heutige Messsysteme die hohen Anforderungen schon standardmäßig erfüllen.

Die Parameter Eigenfrequenz, CrossTalk (Übersprechen) und Temperatur sind Parameter, die dem Sensor konstruktionsbedingt aufgeprägt sind. Hier zählt auch noch die Genauigkeitsklasse hinzu, die bei den Simulationen nicht explizit berücksichtigt wurde. Bei all diesen Parametern besteht erhebliches Potential zur Steigerung der Genauigkeit. Besonders sind hier die beiden Parameter Temperaturstabilität, Übersprechen und die Genauigkeitsklasse von Relevanz.

Einen sehr großen Einfluss auf die Messgenauigkeit nach der Integral Methode hat auch die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung, die für die Auswerteformel benötigt wird.

Die Integral Methode zeigt gegenüber der PeakLoad Methode eine insgesamt geringere Messunsicherheit und sollte daher für die Auswertung präferiert werden.

6. Arbeitspaket 2.2 „Unsicherheitsanalyse – Analyse des lokalen Reifen-Straßensensor-Kontaktes“

Um die Einflüsse der verschiedenen Faktoren auf die Genauigkeit der Lastmessung eines einzelnen Sensors zu untersuchen, werden in AP 2.2 Detailanalysen des lokalen Reifen-Straßensensor-Kontaktes im Rahmen durchgeführt. Aufbauend auf den Ergebnissen von Arbeitspaket 1 wurden die Randbedingungen der numerischen Simulation für die Analyse des lokalen Reifen-Straßensensor-Kontaktes definiert. Die virtuelle Umgebung wird in der kommerziellen Mehrkörpersimulationssoftware MSC.Adams modelliert.

Reifenmodell und Modellaufbau in MSC Adams

Als Reifen wird das CDTire-Reifenmodell (Comfort and Durability Tire) verwendet, das eine detaillierte dreidimensionale Beschreibung des dynamischen Verhaltens des Reifens und dessen Kontaktes mit der Straße ermöglicht (siehe Abbildung 16).

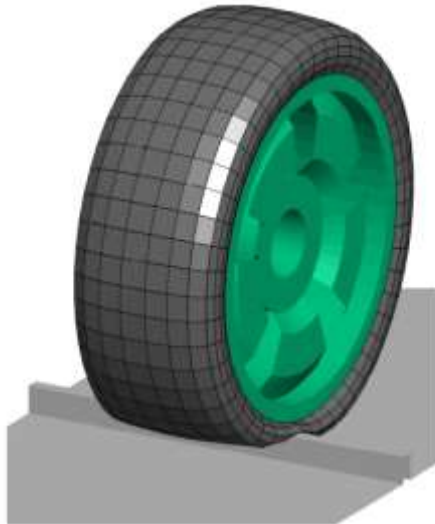


Abbildung 16: Reifenmodell CDTire [1].

Das CDTire-Reifenmodell besteht aus einer Vielzahl von diskreten Massepunkten, die mit Steifigkeits- und Dämpfungselementen untereinander verbunden sind. Über Kontaktformulierungen wird die Interaktion mit einem dreidimensionalen Straßenprofil berücksichtigt (siehe Abbildung 17).

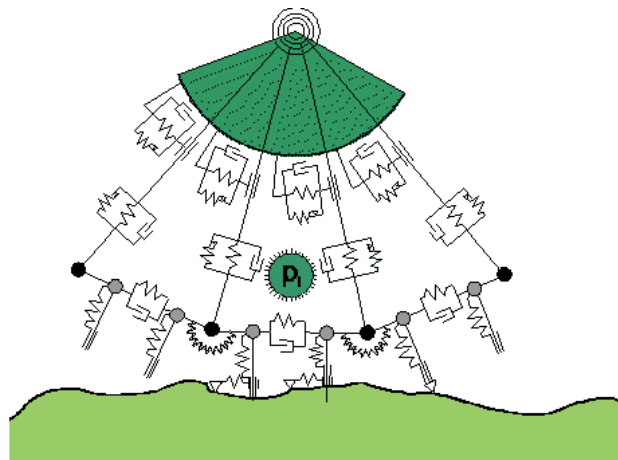


Abbildung 17: schematischer Aufbau CDTire-Reifenmodell

Zwischen den Massepunkten verfügt das Reifenmodell über eine einstellbare Anzahl von (masselosen) Sensorpunkten. Die resultierenden, lokalen Kontaktkräfte an Masse- und Sensorpunkten in Kontakt ergeben in Summe die dynamische Kontaktlast für den momentanen Zeitschritt. Die Anzahl der diskreten Punkte kann für die gewünschte Detaillierung der Modellierung je nach Bedarf angepasst werden. Die möglicherweise signifikante Zunahme der erforderlichen Simulationsdauer bei einer Erhöhung der Punktzahl ist hierbei zu berücksichtigen. Masse- und Sensorpunkte des CDTire-Reifenmodells werden im Folgenden als Reifenknoten bezeichnet.

Auf Basis eines Referenzreifens erlaubt die Anwendung eines Morphing-Tools die Erzeugung ähnlicher Reifendimensionen.

Abbildung 18 zeigt den prinzipiellen, mechanischen Aufbau des für die durchzuführenden Untersuchungen erstellen Viertelfahrzeug-Modells sowie die Umsetzung in MSC.Adams inklusive des CDTire-Reifenmodells.

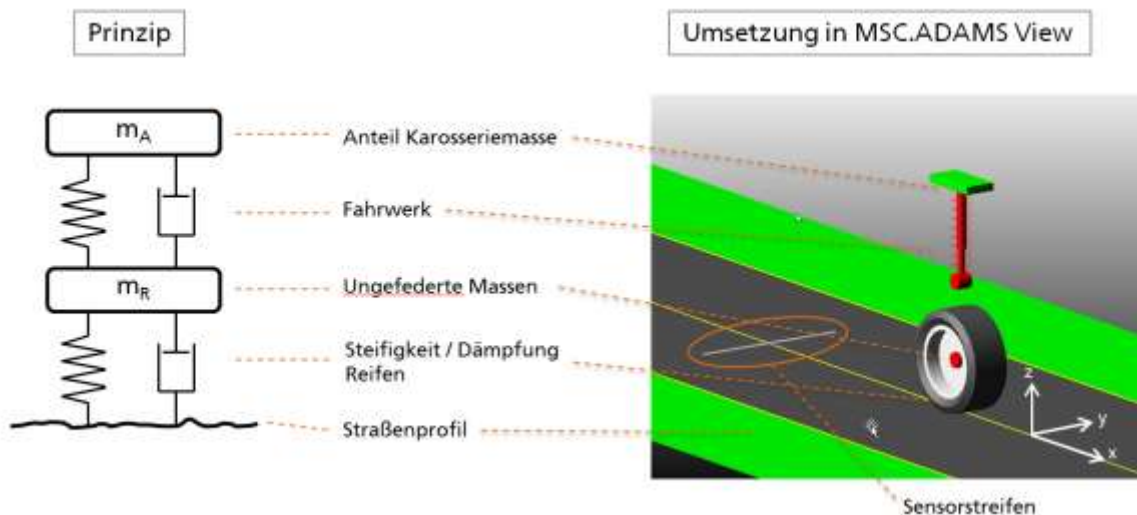


Abbildung 18: schematische Aufbau eines Viertelfahrzeugmodells und Umsetzung in MSC.Adams

Neben dem Reifenmodell beinhaltet das Viertelfahrzeugmodell eine dem untersuchten Fahrzeug entsprechende, anteilige Karosseriemasse, die Feder- und Dämpfereigenschaften des Fahrwerks sowie rotierende und nichtrotierende, ungefederte Massen. Ohne Berücksichtigung der Reifenknoten verfügt das Modell über drei Freiheitsgrade: x-Translation, z-Translation sowie y-Rotation des Reifens.

Untersuchte Einflussfaktoren und Simulationsdurchführung

In Tabelle 2 sind die Einflussfaktoren und die zugehörigen Variationsintervalle aufgelistet, die in den lokalen Simulationen, jeweils für 5 verschiedene Reifentypen untersucht werden.

Tabelle 2: Einflussfaktoren und Wertebereiche für die lokale Analyse

Nr.	Einflussfaktoren	Standard	Variation	Einheit
Allgemeine Faktoren:				
1	Geschwindigkeit	90	[5, 20, 40, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120]	km/h
2	Schlupfwinkel	0	[-2, -1, 0, 1, 2]	°
3	Sturzwinkel	0	[-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5]	°
4	Schlupf	0	[-10, -8, -6, -4, -2, 0, 2, 4, 6, 8, 10]	%
5	Faktor Aufbaumasse	1	[0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8, 2,0, 2,2, 2,4, 2,6]	-
6	Faktor Vertikalsteifigkeit Fahrwerk	1	[0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8, 2,0, 2,2, 2,4, 2,6]	-
Faktoren Sensor:				
7	Sensorwinkel	0	[-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5]	°
8	Sensorhöhe	0	[-10, -8, -6, -4, -2, 0, 2, 4, 6, 8, 10]	mm
9	Sensorbreite in x-Richtung	50	[50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800]	mm
Faktoren Reifen:				
10	Faktor Luftdruck	1	[0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0, 1,1, 1,2]	-
11	Radialer Versatz Reifenschwerpunkt	0	[0, 1, 2, 3, 4, 5]	mm
12	Radialer Versatz Rotationsachse	0	[0, 1, 2, 3, 4, 5]	mm
Faktoren Straße:				
13	Reibungskoeffizient	0,9	[0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0, 1,1]	-
14	Straßensteigung x-Richtung	0	[0,0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5]	°
15	Straßenneigung y-Richtung	0	[0,0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5]	°
16	Horizontaler Radius	inf	[1,7, 3, 5, 10, 20, inf]	km
17	Rauheit (Amplitude)	1	[0, 0,5, 1, pi, 2pi, 3pi, 4pi]	m/rad

Zusätzliche Faktoren stellen die Sensorstreifenposition (Sensoroffset) in Fahrtrichtung und der Reifentyp dar. Die Variation des Sensoroffsets erfordert allerdings keine eigenen Simulationen, sondern kann in der

Datenauswertung erfolgen. Eine Ausnahme ist hierbei die Variation der Sensorhöhe gegenüber dem Fahrprofil. Variationen des Sensoroffsets erfordern im Fall einer unterschiedlichen Sensorhöhe eigene Simulationen. Die Sensorstreifenposition wird zwischen 0 mm und 500 mm mit der Schrittweite 50 mm variiert, um Einflüsse der Reifendiskretisierung und der Positionierung des Sensorstreifens im Straßenprofil zu berücksichtigen. Sensoroffset und Reifentyp werden für alle Einflussfaktoren simuliert und stellen die Streuparameter dar.

In Tabelle 3 werden die verwendeten Reifentypen sowie ihre Position bzgl. des Fahrzeugs (entsprechend der Analyse der Radlasten des Gesamtfahrzeugs, AP 2.3) aufgelistet.

Tabelle 3: Reifentypen der lokalen Analyse

Reifen-Nr.	Bezeichnung	Position
1	225 / 65 R 16	Zugmaschine Vorderachse
2	215 / 75 R 17.5	Zugmaschine Vorderachse
3	265 / 70 R 19.5	Trailer hintere Achse
4	315 / 70 R 22.5	Zugmaschine Vorderachse
5	385 / 65 R 22.5	Trailer mittlere Achse

Die Gesamtanzahl an durchzuführenden Simulationen ergibt sich zu 1305. Mit 11 verschiedenen Sensoroffsets erhält man nach der Simulationsauswertung 8305 Datensätze als Eingangsgrößen des Sensormodells.

Voruntersuchungen, Erkenntnisse und Auswertemethodik

Zur Beurteilung der benötigten Anzahl der Reifenknoten in Quer- und Umfangsrichtung des CDTire-Reifenmodells wurde eine Konvergenzanalyse durchgeführt. Diese hat gezeigt, dass die resultierende z-Kraft (als Summe aller Knotenpunkte) ab einem Wert von 50 Massepunkten (entspricht dem empfohlenen Wert) in Reifenumfangsrichtung konvergiert. Die Anzahl der Massepunkte in Querrichtung hat einen vernachlässigbaren Einfluss. Gleiches gilt für die Anzahl der Sensorknoten in Umfangs- und Querrichtung. Für diese werden die Standardwerte beibehalten, so dass sich zwischen zwei Massepunkten 4 Sensorknoten in Umfangs-, und 2 Sensorknoten in Querrichtung befinden.

Abbildung 19 zeigt die dynamische Kontaktkraft (z-Kräfte, berechnet durch Summation aller Reifenknoten) in Abhängigkeit der Anzahl der Massepunkte (NCS). Die Anzahl der Sensorknoten in Umfangs- (NSEN_X) und Querrichtung (NSEN_Y) beträgt 5 bzw. 3. Hierbei wird jeweils ein angrenzender Massepunkt mitgezählt, so dass sich die bereits beschriebene Anzahl von Sensorknoten zwischen den Massepunkten befindet. Die Kontaktkraft konvergiert ab einem Wert von 50 Massepunkten. Die Analyse wurde für eine glatte, ideale Straße durchgeführt.

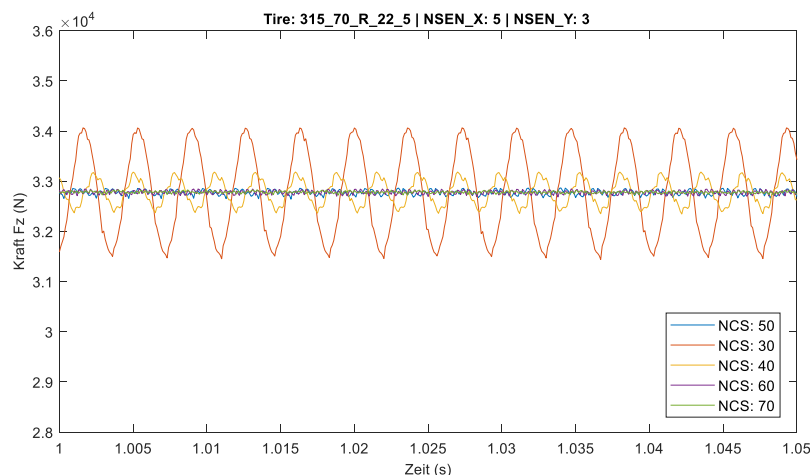


Abbildung 19: Kontaktkraft in Abhängigkeit der CDTire-Massepunkte (ideale Straße)

Äquivalente Ergebnisse erhält man für die identische Analyse mit einer Straßenanregung, was in Abbildung 20 deutlich wird. Das Unebenheitsmaß der Straße entspricht für diese Untersuchung dem Standardwert ($AUN = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{rad}$, ISO-Klasse A). Für eine detaillierte Beschreibung zur Generierung verschiedener Straßenprofile sei auf Abschnitt „Straßenprofil“ in Kapitel 7 verwiesen

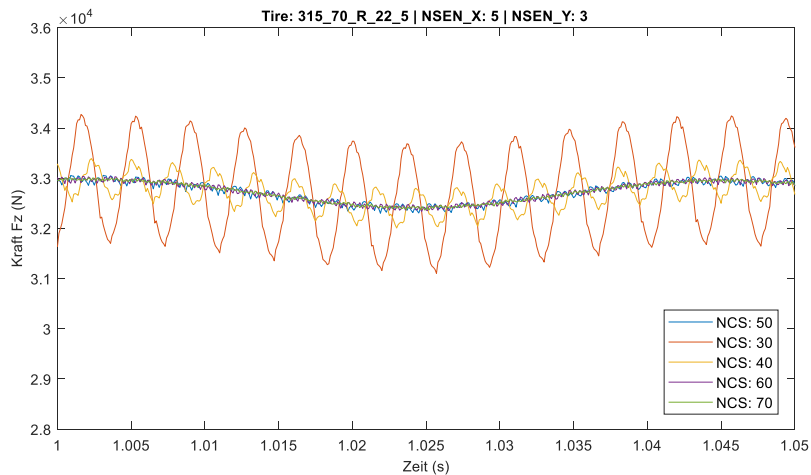


Abbildung 20: Kontaktkraft in Abhängigkeit der CDTire-Massepunkte (reale Straße)

Zur Berechnung des dynamischen Kraftanteils auf einen Sensorstreifen bei Überfahrt wurde zunächst folgende Berechnungsmethode vorgesehen: Summation der Kräfte aller Reifenknoten in Bodenkontakt innerhalb der Grenzen des Sensorstreifens für jeden Zeitschritt.

Erste Simulationsergebnisse zeigten, dass es bei Überfahrt eines Sensorstreifens (mit Standardbreite: 50 mm) zu Schwankungen des Kraftanteils auf dem Sensor kommt. Ursache hierfür ist der Abstand der Reifenknoten des CDTire in Umfangsrichtung, der je nach Reifendurchmesser im Bereich von 10 mm liegt. Die Anzahl der Reifenknoten, die mit dem Sensorstreifen in Kontakt treten, schwankt entsprechend in Fahrtrichtung in Abhängigkeit des Sensoroffsets, was zu Schwankungen der Kontaktkraft im Bereich von 20 % führen kann.

Als alternative Auswertemethode wurden die Kraftwerte auf ein feineres Gitter mit einer Auflösung von 1 mm interpoliert und die resultierende Sensorkraft durch Integration ermittelt. In Abbildung 21 werden die Kräfte der Reifenknoten als strichpunktierte, rote Linien, die Interpolation der Kraftwerte auf ein feineres sowie ein 50 mm breiter Sensorstreifen für einen Zeitschritt dargestellt

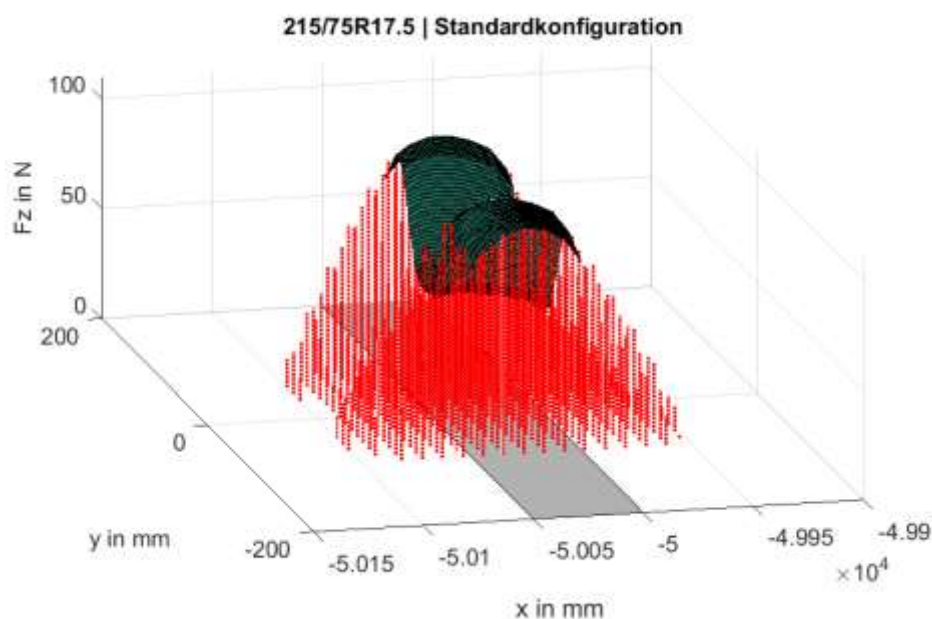


Abbildung 21: Kräfte der CDT-Reifenknoten und Interpolation

Das Vorgehen verringert die Schwankungen in der Kontaktkraft deutlich, wirkt sich allerdings signifikant auf die benötigte Berechnungszeit aus und wurde daher als alternative Auswertemethode verworfen. Eine einfache Erhöhung der CDTire-Knotenanzahl führt zu einer noch deutlicheren Erhöhung des zeitlichen Aufwandes und ist ebenfalls nicht umsetzbar.

Im Folgenden wurden verschiedene Auswertemethoden analysiert, um Ursachen der beschriebenen Problematik zu identifizieren und ein geeignetes Vorgehen zu entwickeln, welches mit moderatem Berechnungsaufwand umsetzbar ist.

Methode 1: einfache Summation

- Summation der Kräfte der Reifenknoten in Kontakt
- Kein Flächenbezug, sondern lediglich Feststellung, ob sich die Reifenknoten innerhalb der Sensorgrenzen befinden

Methode 2: globales Druckprofil

- Berechnung des Druckprofils aus Summe aller Reifenknoten und Latschfläche
- Kraftberechnung durch Multiplikation des Druckprofils mit der Schnittfläche zwischen Sensorstreifen und Reifenlatsch

Methode 3: lokales Druckprofil

- Äquivalent zu Methode 2, allerdings werden diejenigen Reifenknoten, die Kontakt mit dem Sensorstreifen haben und der zugehörige Latschflächenanteil zur Druckprofilberechnung verwendet

Methode 4: CDT-Elemente als Flächenbezug

- Das Verhältnis zwischen allen Reifenknoten in Kontakt und der gesamten Latschfläche entspricht der durchschnittlichen CDTire-Elementfläche
- Die Druckprofilberechnung erfolgt mit dieser als Bezugsfläche

Methode 5: zeilenweise Berechnung

- Die Latschpunkte werden in Zeilen (in Fahrtrichtung) unterteilt
- In Abhängigkeit des Schnittpunktes zweier Punkte einer Zeile mit dem Rand des Sensorstreifens werden die Kraftanteile auf den Sensor linear interpoliert

In Abbildung 22 werden die Berechnungsergebnisse für alle Methoden für unterschiedliche Straßenrauigkeiten jeweils für alle berücksichtigten Sensoroffsets dargestellt. Der Referenzwert für die Messfehlerberechnung (Mittelwert FRsoll) ist ebenfalls in der Abbildung enthalten. Dieser stellt das zeitliche Mittel (Zeitintervall der Überfahrt) der Summe aller Reifenknotenkräfte in Kontakt mit dem Sensorstreifen dar. Der Wert stimmt nicht mit der statischen Radlast überein, sondern beinhaltet auch die dynamischen Kraftanteile des Systems und ist abhängig von Sensoroffset und Straßenprofil.

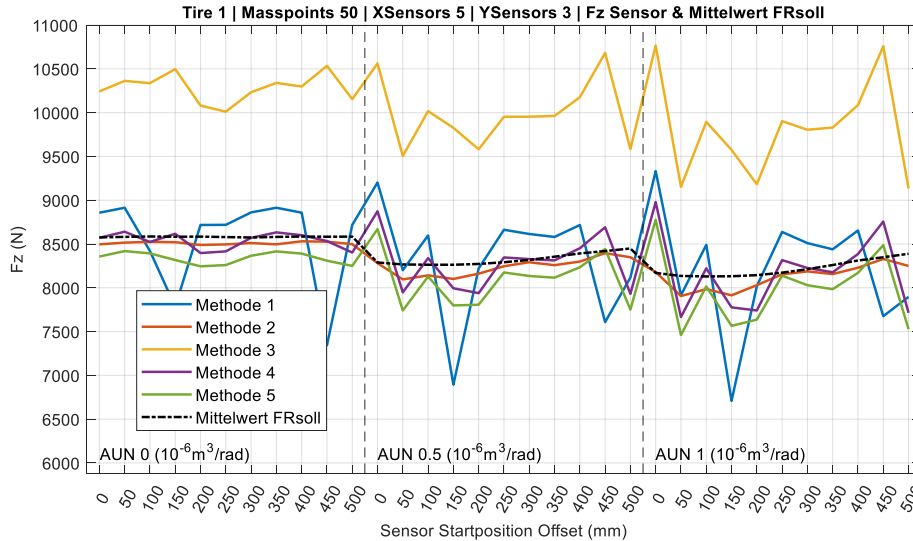


Abbildung 22: Sensorkräfte in Abhängigkeit der Auswertemethode und Referenzkraft FRsoll

Wie aus der Abbildung deutlich wird, sind die Schwankungen der berechneten Sensorkräfte im Vergleich zum Referenzwert maßgeblich für die Berechnung des Verhältnisses bzw. des Messfehlers. Die Anzahl der Reifenknoten entspricht den Standardwerten (50 Massepunkte, 5 Sensorpunkte in Umfangsrichtung, 3 Sensorpunkte in Querrichtung).

Für Methode 3 kommt es beim „Auffahren“ des Reifenlatschs auf den Sensorstreifen zu rechnerisch sehr kleinen Bezugsflächen. Aufgrund der hierdurch bedingten, fehlerhaften Berechnungsergebnisse wurde die Methode 3 verworfen.

In Abbildung 23 werden die Fehler (nach Integral-Methode, siehe 0) für die verbleibenden Auswertemethoden (Methode 1, 2, 4 und 5) und unterschiedliche Straßenrauhigkeiten sowie eine unterschiedliche Anzahl an CDTire-Sensorelementen (in Umfangsrichtung) dargestellt. Die im Folgenden diskutierten Ergebnisse beziehen sich nur auf das Modell des lokalen Kontaktes zwischen CDTire-Reifenmodell und Straßenoberfläche. Es wird ein idealer Sensor angenommen.

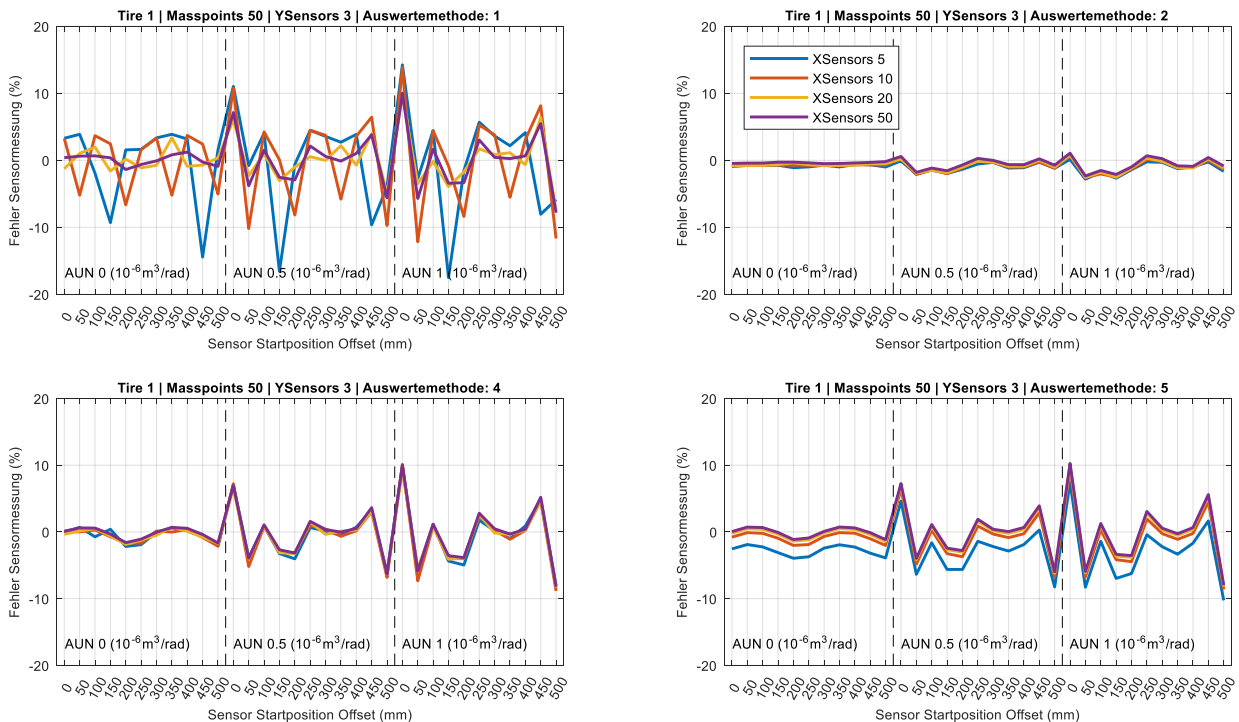


Abbildung 23: Messfehler der lokalen Analyse in Abhängigkeit von Auswertemethode, Straßenrauhigkeit und Sensoroffset

Wie bereits angemerkt, wird ersichtlich, dass für Simulationen mit realer Straße (AUN ungleich 0) die CDT-Sensoranzahl sich nicht oder nur geringfügig auf die Fehlerberechnung auswirkt. Für Methode 2 und 4 ist der Einfluss vernachlässigbar. Bei Methode 5 führt eine Erhöhung der Sensoranzahl zu einem Offset im Fehlerverlauf, nicht aber zu einer Reduzierung der Amplitude. Der größte Einfluss ergibt sich für Methode 1, allerdings erhält man auch hier bei einer Sensoranzahl von 50 unrealistisch hohe Schwankungen im Bereich von 15 %.

Für alle Methoden zeigt sich, dass die Anregung durch das Straßenprofil einen signifikanten Einfluss auf die Schwankungsamplitude hat und für eine reale Straße (Standardwert: $AUN = 1 \cdot 10^{-6} m^3 / rad$) Werte im Bereich von 20 % erreichen kann. Die Erzeugung der finalen Ergebnisse der lokalen Analyse erfolgt mit Auswertemethode 2. Bzgl. des Einflusses des Sensoroffsets auf die gemessenen Kräfte bei Sensorstreifen-Überfahrt erhält man bei Anwendung dieser Methode plausible Werte.

Zur Beurteilung der beschriebenen Effekte wären die Anwendung eines FE-Reifenmodells sowie ein Ergebnisvergleich hilfreich. Übliche Anwendungen in der Betriebsfestigkeit konzentrieren sich auf die Radlasten und weniger auf einzelne Reifenknotenkräfte. Ferner wird ein deutlich niedrigerer Frequenzbereich fokussiert. Bei der vorliegenden Untersuchung liegt dieser bedingt durch Fahrgeschwindigkeit und Reifenknotenanzahl mindestens eine Größenordnung über den typischen Werten einer Betriebsfestigkeitsanalyse (ca. 100 Hz).

Allerdings ist bei Einsatz eines FE-Modells mit signifikant höherem Zeitaufwand zu rechnen.

Ergebnisse AP 2.2:

In Abbildung 24 werden die Messfehler (nach Integral-Methode) über dem gewählten Variationsbereich der Geschwindigkeit dargestellt. Für einen Wert der Geschwindigkeit enthält die Grafik die Fehler für alle Streuparameter (11 Sensoroffsets jeweils für 5 Reifen). Ferner zeigt die Abbildung zu jedem Geschwindigkeitswert die doppelte Standardabweichung, Mittelwert und Maxima.

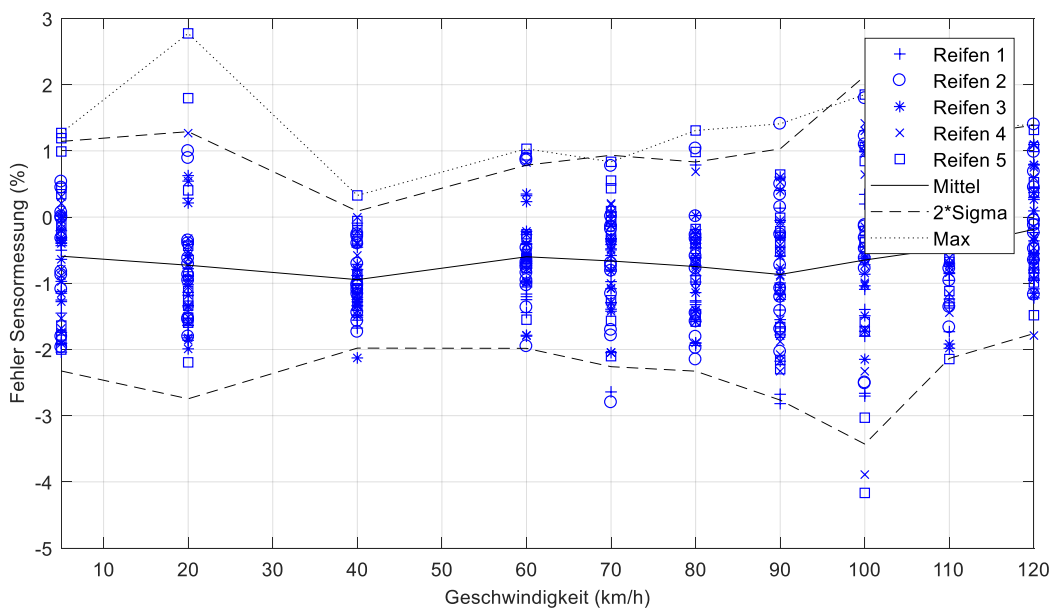


Abbildung 24: Messfehler der lokalen Analyse für den Einflussfaktor Geschwindigkeit

Für alle Geschwindigkeitswerte ergibt sich ein negativer Mittelwert. Somit werden die dynamischen Lasten für alle Variationswerte unterschätzt. Dies ist auf die Dynamik des CDTire-Reifenmodells sowie auf das Straßenprofil zurückzuführen. Effekte wie Auftrieb (globale Analyse) werden in der lokalen Untersuchung nicht berücksichtigt.

Für die analogen Darstellungen für die übrigen Einflussfaktoren aus AP 2.2 sei auf Anhang B verwiesen.

Minima und Maxima der doppelten Standardabweichung für alle Einflussfaktoren werden in Abbildung 25 dargestellt.

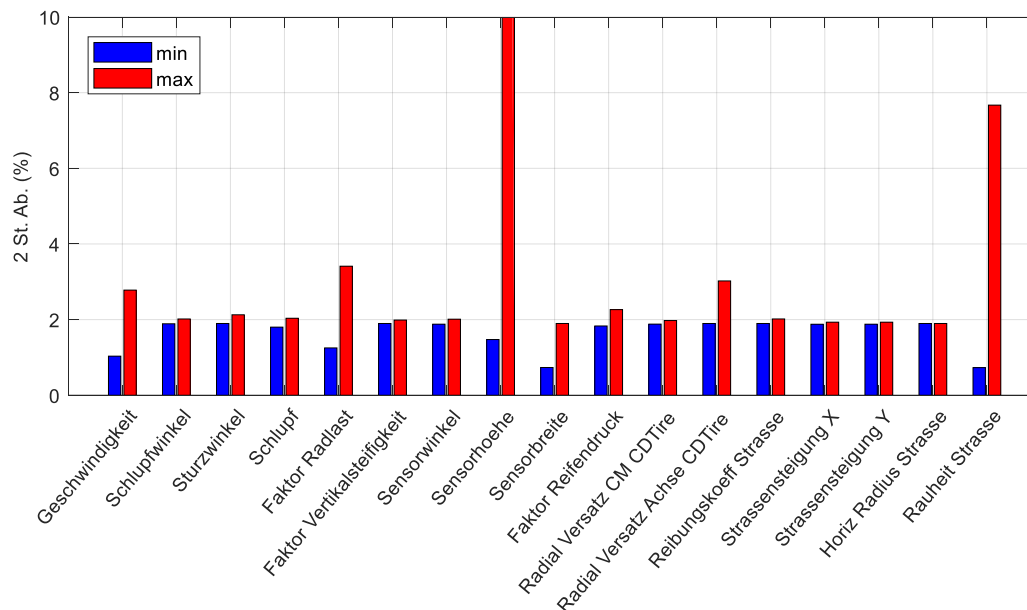


Abbildung 25: Minima und Maxima der doppelten Standardabweichung der Messfehler aller Einflussfaktoren der lokalen Analyse

Einflussfaktoren, für die es zu relativ großen Unterschieden zwischen minimaler und maximaler, doppelter Standardabweichung kommt, sind die Geschwindigkeit, der Radlastfaktor, der radiale Versatz der Radachse sowie besonders die Rauheit der Straße. Letzteres ist allerdings bedingt durch die Wahl der Variationswerte. Für die übrigen Einflussfaktoren liegen Minima und Maxima der doppelten Standardabweichung im Bereich von 2 %.

Für die Variation der Sensorhöhe ergeben sich sehr große Werte für die obere Grenze der doppelten Standardabweichung. Dies liegt am Auswerteverfahren, das für diesen Einflussfaktor keine plausiblen Werte generiert. Bei sprunghaften Änderungen der Fahrbahnhöhe entstehen Bereiche innerhalb der Latschfläche ohne Kontakt, was vom Auswertalgorithmus nicht abgedeckt wird.

Die Sensorbreite ist einziger Parameter der lokalen Analyse, auf den bei Auslegung eines WIM-Systems aktiv Einfluss genommen werden kann.

7. Arbeitspaket 2.3 „Unsicherheitsanalyse – Analyse der Radlasten des Gesamtfahrzeugs“

Inhalt dieses Teilarbeitspaketes ist die Untersuchung der wesentlichen Einflussfaktoren am Gesamtsystem, die auf der „makroskopischen“ Ebene die Genauigkeit der Messung beeinflussen, sowie die quantitative Auswertung der einzelnen Fehlerquellen der Gewichtsabschätzung. Dafür wird ein dynamisches Simulationsmodell des gesamten Fahrzeugs inkl. Reifenmodell und virtueller Straße verwendet.

Simulationsmodell

Die Simulation des fahrdynamischen Verhaltens des Fahrzeugs ermöglicht die Ermittlung der dynamischen Radlasten unter unterschiedlichen Bedingungen der komplexen Interaktion zwischen Fahrzeug, Fahrer und Umgebung. Die Einflüsse der relevanten Faktoren, die eine Rolle in dieser Interaktion spielen, können mittels solcher Simulationen untersucht und ermittelt werden. Wie in dem vorgeschlagenen Lösungsansatz in der Gesamtvorhabenbeschreibung bereits erwähnt, wurde die Fahrdynamik-Simulationssoftware IPG TruckMaker für die Analyse der Einflussfaktoren auf der „makroskopischer“ Ebene des Ganzfahrzeugs und des kompletten Messsystems verwendet. Abbildung 26 zeigt die graphische 3D-Visualisierung während einer simulierten Fahrt in der Software mit einem klassischen LKW mit Zugmaschine und Sattelaufleger.



Abbildung 26: Gesamtfahrzeugmodell in der Software IPG TruckMaker.

Das Gesamtfahrzeugmodell in IPG TruckMaker besteht aus verschiedenen parametrierbaren Submodellen, die wiederum unterschiedliche Modellvarianten aufweisen. Das Haupt-Submodell des Fahrzeugs basiert auf einem reduzierten Mehrkörpersimulationsmodell mit gefederten und ungefederten Massen und elastokinematischer Modellierung des Fahrwerks. Als Reifenmodell wird das Pacejka Handling-Reifen verwendet. Der Antriebsstrang wird mit einem 1D-Torsionsmodell dargestellt. Das Submodell des Fahrers unterscheidet sich in zwei wesentlichen Varianten: zum einem können vorgegebene Inputsignale für die Steuergrößen (Gaspedal, Bremspedal usw.) direkt eingegeben werden, zum anderen kann ein Closed-Loop-Fahrermodell die Stellgrößen so regeln, dass eine definierte Trajektorie und ein definiertes Geschwindigkeitsprofil verfolgt werden. Das Submodell der Straße bietet die Möglichkeit an, ein 3D-Straßenprofil mit beliebiger Geometrie zu simulieren, sowie vordefinierten diskreten Hindernisse (wie Schwellen, Schlaglöcher usw.).

Die Software beinhaltet eine Bibliothek von vorhandenen bereits voll parametrierten Fahrzeugen unterschiedlicher Typologien und Klassen. Die Parameter dieser Modelle können editiert werden, um Fahrzeugvarianten zu simulieren.

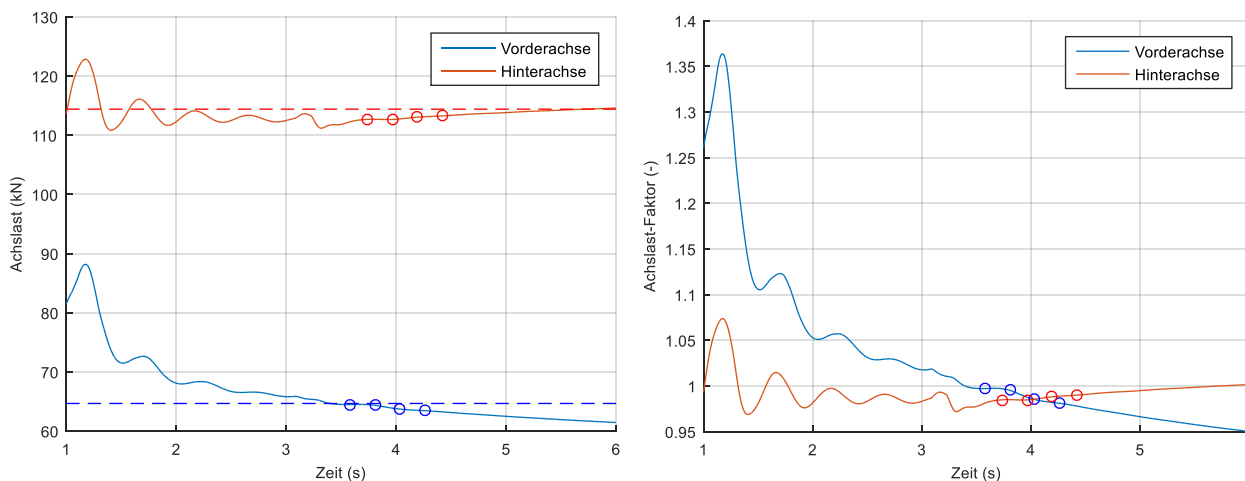


Abbildung 27: Achslasten der Zugmaschine als Zeitverläufe und Messpunkte bei einem simulierten Bremsmanöver.

Wie die Software für die Simulation einer Überfahrt eines LKW auf einem WIM-System verwendet sein kann, ist in den Diagrammen der Abbildung 27 gezeigt. Als Beispiel wird hier ein Lieferwagen mit zwei Achsen simuliert, der über einem WIM-System mit vier Messstellen (Messstreifen) fährt. Die Kreise in den Diagrammen markieren die Vertikallasten, die von den vier Sensoren gemessen werden. Aufgrund der Fahrdynamik (der LKW beschleunigt leicht während der Überfahrt auf dem System), weichen die gemessenen Werten von den statischen Lasten (gestrichelten Linien) ab.

Fahrzeugtypologien

Um eine realistische Variation der Fahrzeuge zu simulieren, die auf einem untersuchten Messsystem fahren, wurden unterschiedliche Fahrzeugtypologien für das Projekt definiert, die als simulierter Referenzverkehr für die Untersuchung aller anderen Einflussfaktoren verwendet wurden.

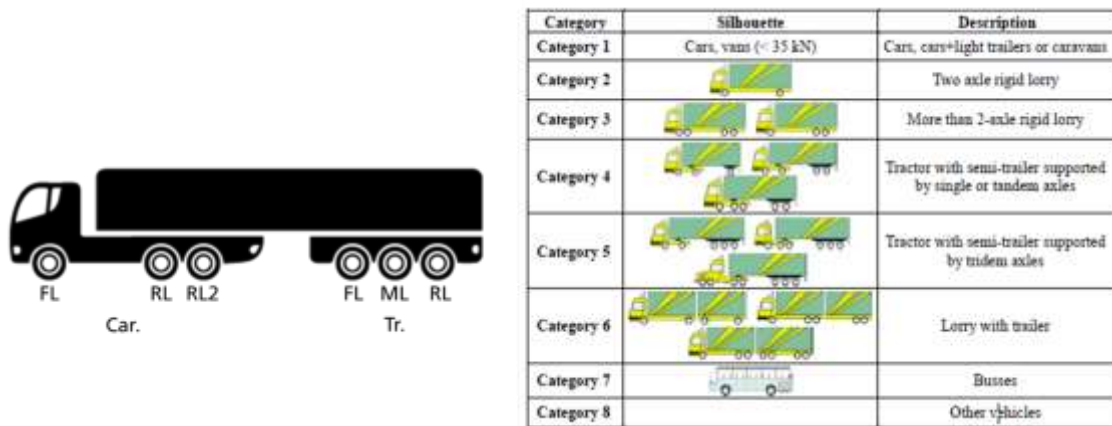


Abbildung 28: Bezeichnung der Achsen (links) und Klassifizierung der Fahrzeugtypologien nach EU COST 323 (rechts).

Die verwendete Nomenklatur für die Fahrzeugachsen ist in Abbildung 28 dargestellt. Auf der rechten Seite des Bilds ist die Klassifizierung nach EU COST 323 gezeigt, die als Basis für die Definition der Fahrzeuge berücksichtigt wurde.

Die Abbildung zeigt oben drei 3D-Modelle von Fahrzeugen: ein dunkles Sprinter-Fahrzeug (1), ein gelber Eurotech-LKW (2) und ein dunkler Atego-LKW (3). Darunter befindet sich eine Tabelle mit den technischen Daten dieser Fahrzeuge.

Fzg id	1	2	3
Name	Sprinter	Eurotech	Atego
Kat. EU COST	1	2	3
Bereifung Car	225/65 R16	215/75 R17,5	315/70 R22,5
Bereifung Tr			
Achslast Car F	1,75	3,04	10,13
Achslast Car R	1,75	3,70	9,58
Achslast Car R2			5,76
Achslast Tr F			
Achslast Tr M			
Achslast Tr R			
Gewicht	3,50	6,74	25,47

Abbildung 29: Simulierte Fahrzeuge. Die Achslasten und die Gewichte sind in Tonnen angegeben. (1/2)



Fzg id	4	5	6
Name	Actros – SemiTr 1	Actros – SemiTr 2	Actros – SemiTr 3
Kat. EU COST	4	4	5
Bereifung Car	315/70 R22,5	315/70 R22,5	315/70 R22,5
Bereifung Tr	385/65 R22,5	385/65 R22,5	385/65 R22,5
Achslast Car F	5,48	6,08	6,68
Achslast Car R	5,42	8,51	11,76
Achslast Car R2			
Achslast Tr F	6,76	6,97	8,03
Achslast Tr M			7,02
Achslast Tr R		6,58	6,03
Gewicht	17,66	28,14	39,52



Fzg id	7	8	9
Name	Classic – SemiTr 3	Eurotech – CenterTr 2	Atego – DrawTr 2
Kat. EU COST	5	6	6
Bereifung Car	315/70 R22,5	215/70 R17,5	315/70 R22,5
Bereifung Tr	385/65 R22,5	265/70 R19,5	385/65 R22,5
Achslast Car F	6,51	3,02	10,12
Achslast Car R	9,50	3,76	9,60
Achslast Car R2	8,41		5,77
Achslast Tr F	7,29	5,10	9,04
Achslast Tr M	6,96		
Achslast Tr R	6,64	5,60	8,98
Gewicht	45,32	17,48	43,52

Abbildung 30: Simulierte Fahrzeuge. Die Achslasten und die Gewichte sind in Tonnen angegeben. (2/2)

Die für das Projekt definierten Fahrzeuge sind in Abbildung 29 und Abbildung 30 mit deren wesentlichen Eigenschaften dargestellt. Varianten von diesen neun LKW wurden im Rahmen der Unsicherheitsanalyse erstellt, in der einige fahrzeugspezifische Einflussfaktoren (wie z. B. die Fahrwerksteifigkeit) variiert wurden.

Straßenprofil

Die Qualität der Fahrbahnoberfläche hat eine wesentliche Rolle auf die dynamischen Radlasten und deshalb auch auf die Genauigkeit eines WIM-Messsystems. Um realistische Straßenprofile mit unterschiedlichen Qualitäten zu simulieren, wurde die ISO-Formulierung implementiert [4] [5]. Sie basiert auf der folgenden Gleichung:

$$\Phi_h(\Omega) = \Phi_h(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-w},$$

wobei Φ_h die spektrale Unebenheitsdichte darstellt, $\Phi_h(\Omega_0)$ das sogenannte Unebenheitsmaß (AUN), Ω die Wegkreisfrequenz und w die Welligkeit. Die Parameter sind graphisch auf dem linken Diagramm in Abbildung 31 dargestellt.

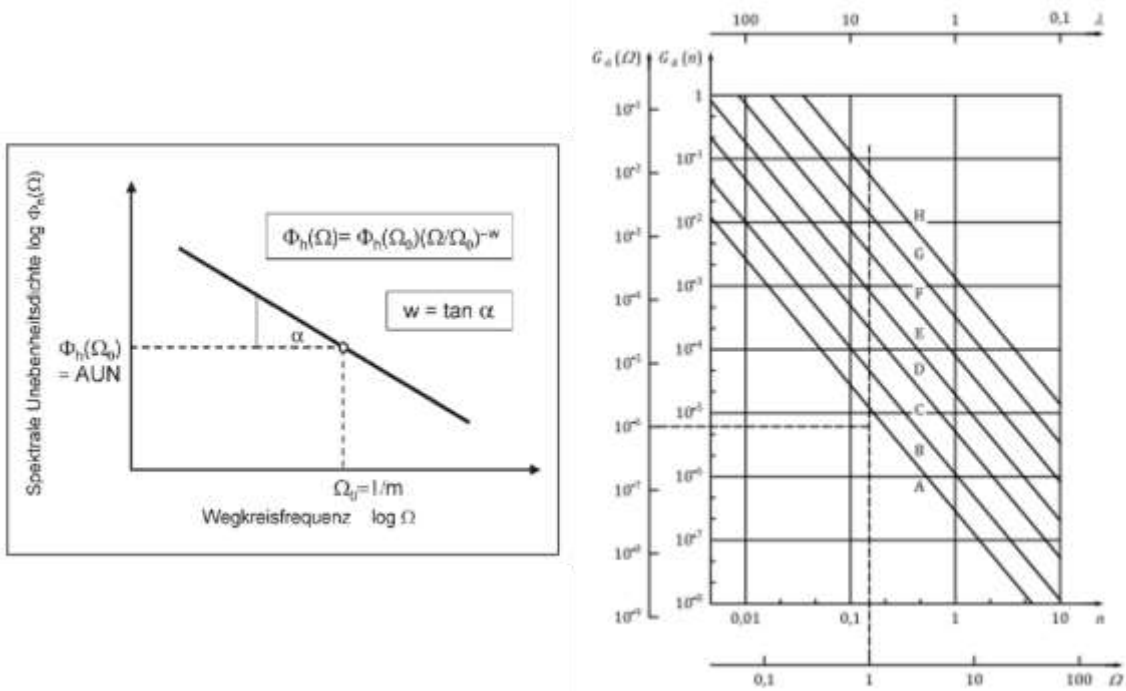


Abbildung 31: Graphische Definition der spektralen Unebenheitsdichte [4] (links) und Klassen der Straßenunebenheit nach ISO 8608:2016 [5] (rechts).

In der ISO 8608:2016 sind acht Klassen (von A bis H) der Straßenunebenheit definiert, die die selbe Welligkeit ($w = 2$) aber unterschiedliche Werte für das Unebenheitsmaß aufweisen (siehe rechtes Diagramm in Abbildung 31).

Um Straßenprofile mit unterschiedlichen Unebenheitsmaßen für die Fahrzeugsimulation zu erstellen, wurde eine Prozedur entwickelt, die auf einem Tool für die Generierung von Straßenprofilen laut der ISO-Formulierung in der Software MSC Adams basiert (siehe Abbildung 32). Die damit generierten Straßendateien werden in Matlab eingelesen und mit Hilfe der Funktionen der Toolbox für das digitale Straßenformat Open CRG in dieses Format umgewandelt und für den Import in IPG TruckMaker bereitgestellt.

Die Straßenprofile wurden mit einer Diskretisierung von 0,1 m abgetastet und, wie in [4] vorgeschlagen, mit gleitendem Mittelwert gefiltert. Dieser Schritt wird benötigt, um das Straßenprofil in Kombination mit einem auf einem Kontaktpunkt basierten Reifenmodell (Handling-Reifen) zu simulieren. Das nähert die sonst vernachlässigten Effekte des „geometrischen Filter“ des Radradius an. Dieser Aspekt ist exemplarisch für ein Straßenprofil der ISO-Klasse A in Abbildung 33 dargestellt.



Abbildung 32: Prozedur für Erstellung des Straßenprofils.

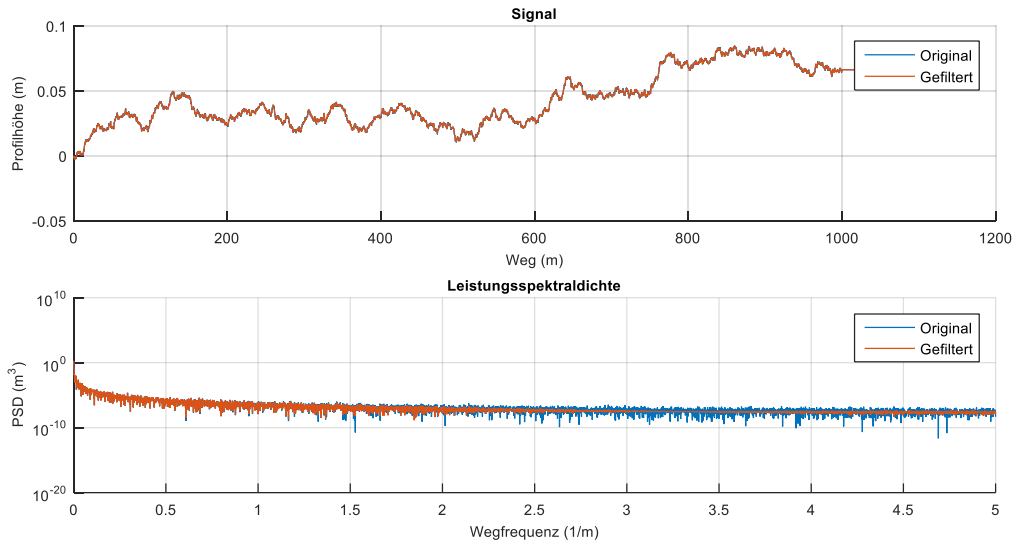


Abbildung 33: Beispiel eines generierten Straßenprofils (Klasse A nach ISO 8608:2016).

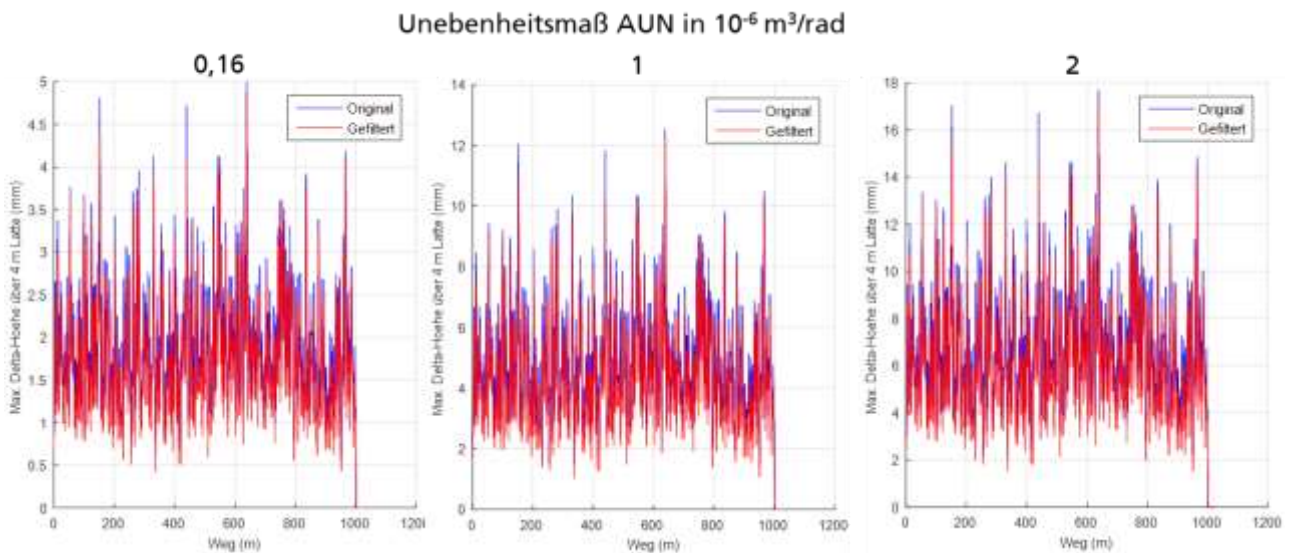


Abbildung 34: Analyse des Straßenprofils auf Basis der Vorgabe der BASt für WIM-Systeme.

Für die Untersuchung des Einflussfaktors der Straßenunebenheit und für die Festlegung eines Standard-Profils für alle anderen Simulationen wurden generierte Profile mit unterschiedlichen Unebenheitsmaßen der ISO-Klasse A auf Basis der Angabe der BASt für die Straßenunebenheit im Bereich der WIM-Systeme ausgewertet. Laut [6] sollte das Straßenprofil im Bereich 45 m vor bis 20 m nach der Messstelle angegeben als Profiltiefe der Straßenoberfläche in Quer- und Längsrichtung unter einer 4 m langen Messlatte unter 4 mm liegen. Die Ergebnisse in Abbildung 34 zeigen, wie diese Vorgabe für den Wert des Unebenheitsmaßes von $0,16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{rad}$ bis auf wenige leichte Überschreitungen über eine Straßenlänge von 1 km erfüllt ist. Die anderen untersuchten Profile mit dem Durchschnittswert ($1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{rad}$) und mit dem oberen Grenzwert ($2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{rad}$) des Unebenheitsmaßes der ISO Klasse A liegen deutlich über der Grenze der Vorgabe.

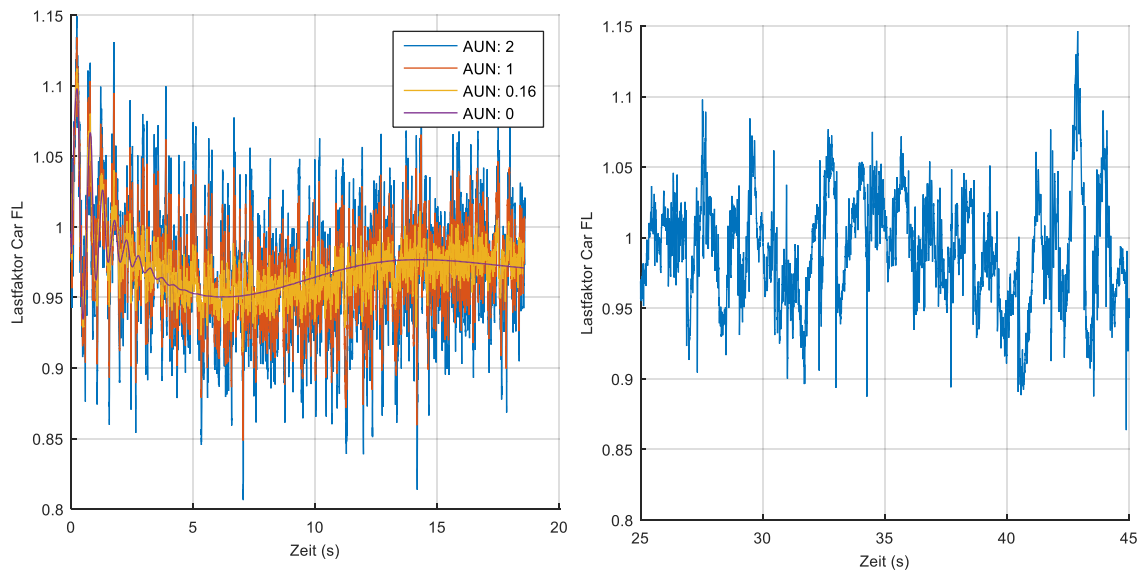


Abbildung 35: Simulierte Radlast mit verschiedenen AUN-Werten (links) und gemessene Radlast (rechts).

Die Einflüsse der Straßenunebenheit auf die dynamischen vertikalen Radlasten sind in Abbildung 35 dargestellt. Um diese Ergebnisse zu plausibilisieren ist ein gemessenes Signal auf der rechten Seite als qualitativer Vergleich dargestellt. Es handelt sich um ein vergleichbares Fahrzeug, das mit derselben Geschwindigkeit (80 km/h) auf einer Autobahn mit unterdurchschnittlicher Fahrbahnqualität gefahren wurde. Die hochfrequenten Signalinhalte sind mit den Simulationsergebnissen mit AUN=1 qualitativ vergleichbar.

Analyse der Einflussfaktoren

Auf Basis der im AP 1 definierten „globalen“ Einflussfaktoren (d. h. die Faktoren, die die Interaktion zwischen einem Fahrzeug und einem Messsystem beeinflussen, siehe Anhang A) wurde ein Simulationsplan erstellt. Wie bereits erwähnt wurden, um die Anzahl der Simulationen in Grenze zu halten, die Einflussfaktoren einzeln variiert, wobei die restlichen bei ihren jeweiligen Standard-Werten festgehalten wurden. Nur die Einflussfaktoren „Offset Messstellen“ und „Fahrzeug-Typ“ wurden als Streuungsfaktoren berücksichtigt, die in allen Fällen vollständig durchkombiniert wurden. Der Einflussfaktor „Geschwindigkeit“ wurde auch durchkombiniert um Ergebnisse für die Plausibilisierung des Unsicherheitsmodells zu ermitteln (siehe AP 2.4). Die Tabelle 4 zeigt eine Zusammenfassung der Einflussfaktoren und deren Wertebereiche sowie deren Standard-Werte. In der Implementierung der Simulationen wurden leichte Änderungen zum Abschlussstand vom AP1 durchgeführt.

Es wurden 23 Einflussfaktoren untersucht und ca. 64.000 einzelne Simulationen durchgeführt, wobei für die Variation einiger Faktoren (wie z. B. „Anzahl und Abstand der Messstellen“) keine neue komplette fahrdynamische Simulation in IPG TruckMaker notwendig war, sondern eine angepasste Auswertung der Ergebnisse der simulierten Radlasten ausreichte. Das Management und die automatisierte Durchführung des ganzen Simulationsplans wurden in einem Matlab-Skript programmiert. Die automatisierte Auswertung der Ergebnisse der IPG TruckMaker Simulationen wurde ebenfalls in Matlab programmiert.

Tabelle 4: Einflussfaktoren und Wertebereiche auf Ganzfahrzeugebene.

Nr.	Einflussfaktoren	Standard	Variation	Einheit
Messsystem				
1	Abstand Messstellen	4	1 – 10 (Step 1)	m
2	Anzahl Messstellen	3	1 – 8 (Step 1)	-
3	Layout Messstellen	1 (konst.)	4 Layouts	-
4	Höhe / Tiefe des Sensors	0	-5; -2; -1; 0; 1; 2; 5	mm
5	Übersprechen	0	-3; -2; -1; 0; 1; 2; 3	%
6	Offset Messstellen	(durchkombiniert)	0 – 200 (Step 20)	m
Straße				
7	Neigung	0	-2; -1; 0; 1; 2	%
8	Steigung	0	-2; -1; 0; 1; 2	%
9	Rauigkeit (Straßenunebenheit)	0,16	0; 0,08; 0,16; 0,5; 1; 2	m ³ /rad
10	Reibwert	1	0,4; 0,6; 0,8; 1	-
Fahrzeug				
11	Typ	(durchkombiniert)	1 - 9	-
12	Variation der Beladung	0	-30; -20; -10; 0; 10; 20; 30	%
13	Variation der vertikalen Fahrwerk-Steifigkeit	0	-20; -10; 0; 10; 20	%
14	Variation der vertikalen Fahrwerk-Dämpfung	0	-20; -10; 0; 10; 20	%
15	Variation des Reifenluftdrucks (vert. Steifigkeit)	0	-30; -20; -10; 0; 10; 20	%
Umgebung (Wind)				
16	Wind-Geschwindigkeit	0 (10)	0; 5; 10; 15; 20	m/s
17	Wind-Winkel (Bei Wind-Geschwindigkeit 10 m/s)	90	0; 45; 90; 135; 180	deg
18	Wind-Bö	0	0; 5; 10; 15; 20	m/s
Fahrmanöver				
19	Bremsung	0	0; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5	m/s ²
20	Beschleunigung (bei Geschwindigkeit 60 km/h)	0	0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4	m/s ²
21	Lenkradwinkel beim Lenkstoß	0	0; 10; 20; 30; 40	deg
22	Lenkradwinkel beim Wedeln (0,2 Hz)	0	0; 2,5; 5; 7,5; 10	deg
23	Geschwindigkeit	80 (60)	5; 20; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 110; 120	km/h

Die Zusammenfassung der Ergebnisse aller Einflussfaktoren ist in Abbildung 36 für den Fehler in der Schätzung des Gesamtgewichts und in Abbildung 37 für den Fehler in den Achslasten dargestellt. Wie in der Einleitung zum AP 2 beschrieben, werden zwei Standard-Abweichungen des Messfehlers als Referenzergebnis für jeden simulierten Fall herangezogen, wobei die Variation aus den unterschiedlichen Kombinationen von den Einflussfaktoren „Offset Messstellen“ und „Fahrzeug-Typ“ resultiert. Abbildung 36 und Abbildung 37 zeigen die minimalen und maximalen Werte der zwei Standard-Abweichungen, die in der Analyse der Variation der jeweiligen Einflussfaktoren ermittelt wurden. Ein großer Unterschied in den zwei Balken bedeutet, dass dieser Faktor einen wesentlichen Einfluss auf den Messfehler hat. Der 2σ -Wert des Fehlers für den Standard-Fall (d. h. die Kombination aller Standard-Werte für alle Einflussfaktoren) beträgt 1,34 % für das Gesamtgewicht und 3,59 % für die Achslasten.

In den nächsten Absätzen folgt eine Erklärung zu den einzelnen Faktoren, die, zu einem, relevant für die Auslegung des WIM-Systems sind und, zum anderen, die einen wesentlichen Einfluss auf den Messfehler in der durchgeführten Untersuchung gezeigt haben. Die quantitativen Ergebnisse sind natürlich von den vorgegebenen Variationsbereichen der Faktoren beeinflusst. Bei einigen Faktoren, wie z. B. „Sensorhöhe“, wurde ein sehr breiter Bereich mit extremen Werten definiert, die zu sehr hohen Werten des Fehlers führen kann.

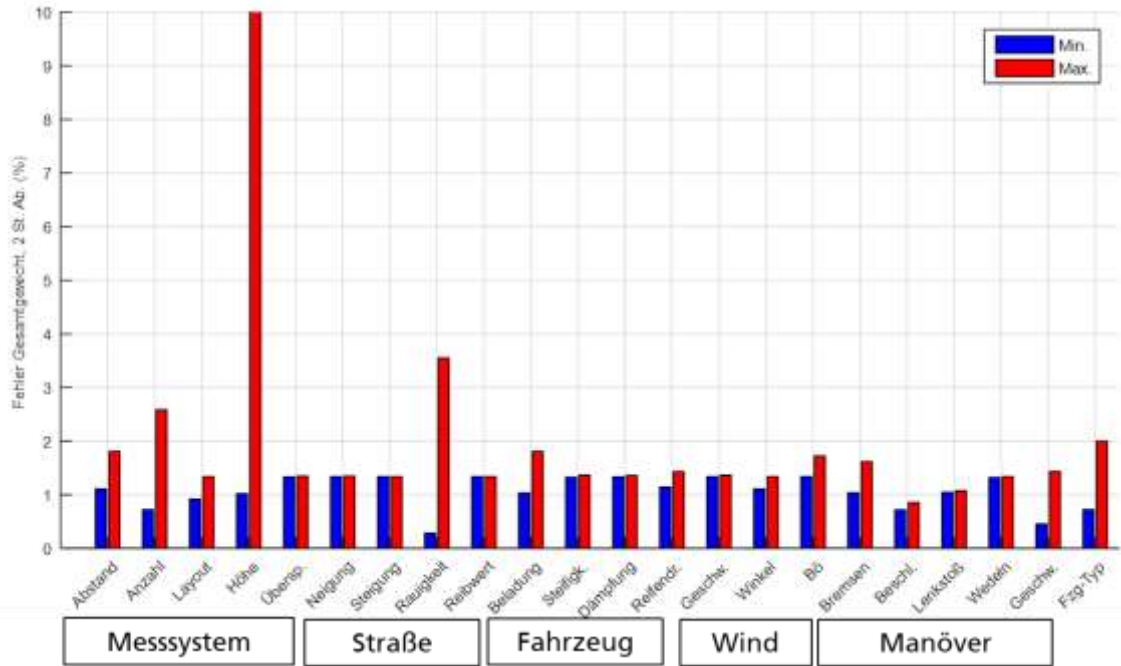


Abbildung 36: Zwei Standard-Abweichungen des Fehlers des Gesamtgewichts.

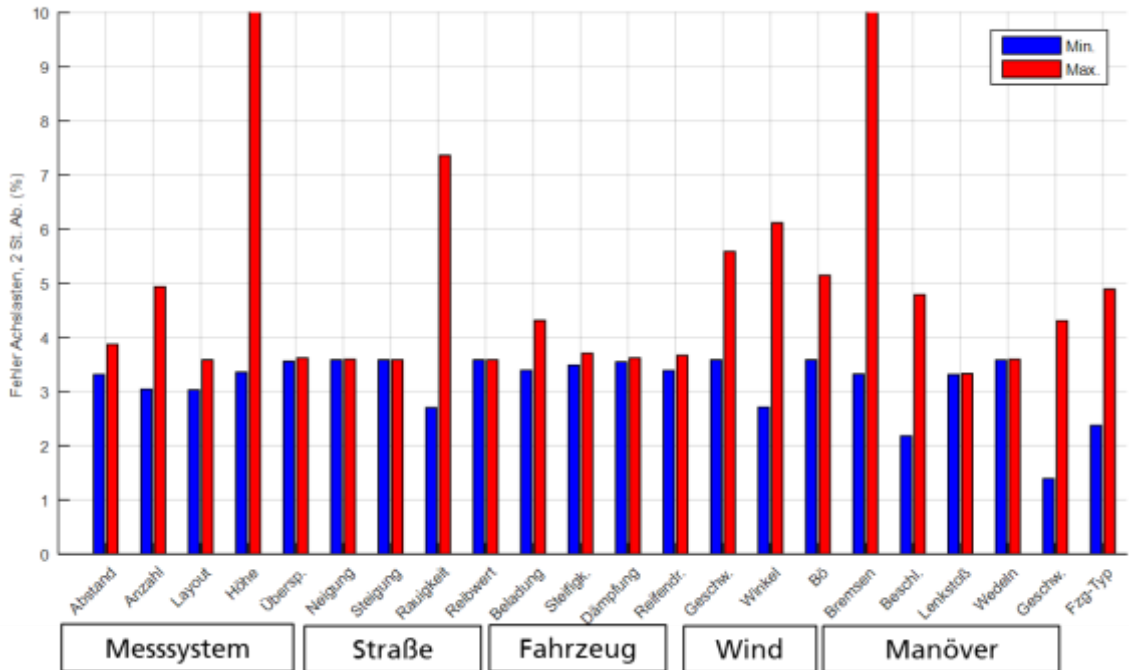


Abbildung 37: Zwei Standard-Abweichungen des Fehlers der Achslasten.

Nachfolgend sind die Ergebnisse als Diagramme der 2σ -Werte des Fehlers für das Gesamtgewicht und die Achslasten als Funktion des untersuchten Faktors gezeigt. Die kompletten Diagramme, die die einzelnen Simulationsfälle und damit auch den Durchschnittsfehler und den maximalen Fehler darstellen, sind im Anhang D für alle Einflussfaktoren zu finden.

Abstand der Messstellen

In Abbildung 38 sind die Ergebnisse des Einflussfaktors „Abstand Messstellen“ dargestellt. Weder die Kurve des Gesamtgewichts noch die Kurve der Achslasten zeigen eine klare Tendenz oder ein gut definiertes Minimum. Werte zwischen 3 und 6 m weisen leicht kleinere Fehler auf. Dieser Faktor ist im engen Zusammenhang mit den dominierenden vertikalen Eigenfrequenzen der Fahrwerke der Fahrzeuge. Aufgrund der unterschiedlichen dynamischen Eigenschaften der Fahrzeuge, die simuliert wurden, und wiederum der unterschiedlichen resultierenden Eigenfrequenzen, zeigt sich kein allgemein optimaler Wert.

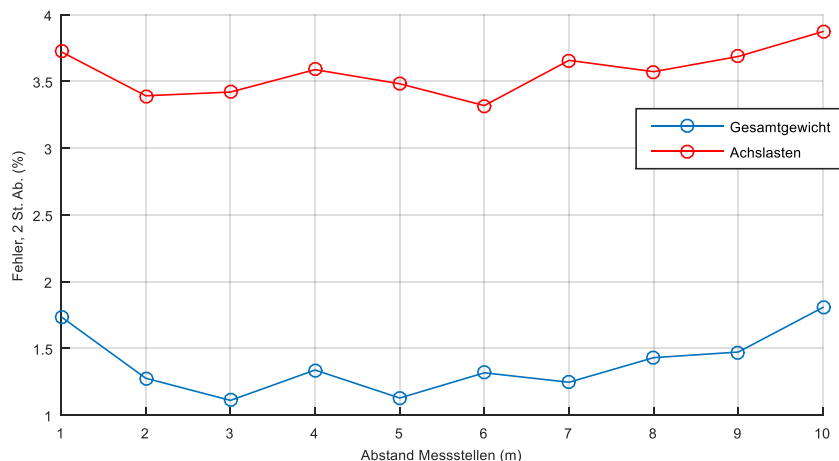


Abbildung 38: 2σ-Werte des Fehlers für das Gesamtgewicht und die Achslasten als Funktion des Abstands der Messstellen.

Anzahl der Messstellen

In Abbildung 39 sind die Ergebnisse des Einflussfaktors „Anzahl Messstellen“ dargestellt. Wie erwartet, je höher die Anzahl der Sensoren ist, desto genauer wird die Messung des Gesamtgewichts und der Achslasten. Die Tendenz der Verbesserung wird aber mit mehr Sensoren immer niedriger, so dass ab einer gewissen Anzahl und unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Aspekte kein Vorteil mehr resultiert.

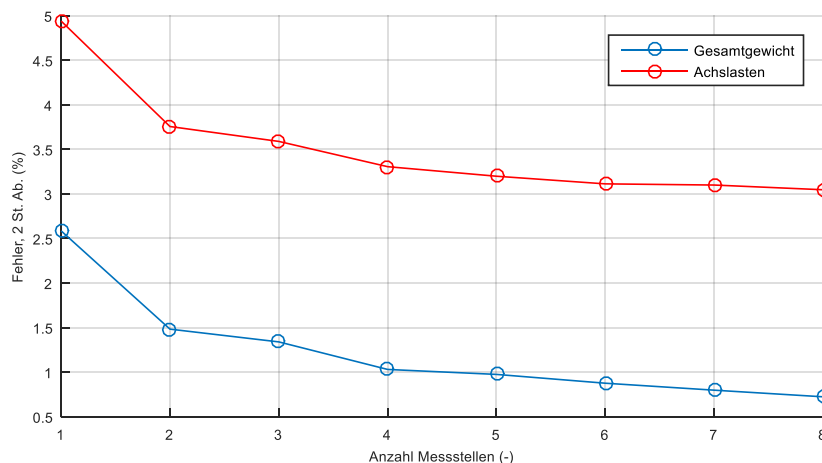


Abbildung 39: 2σ-Werte des Fehlers für das Gesamtgewicht und die Achslasten als Funktion der Anzahl der Messstellen.

Layout der Messstellen

Im Rahmen des Projekts wurden vier verschiedene Layouts des Messsystems untersucht. Diese Varianten, die aus Literaturrecherchen entstanden, sind in Abbildung 40 dargestellt. Für die Layouts 3 und 4 wurde ein Faktor 1,5 für die Progression der Abstände festgelegt.

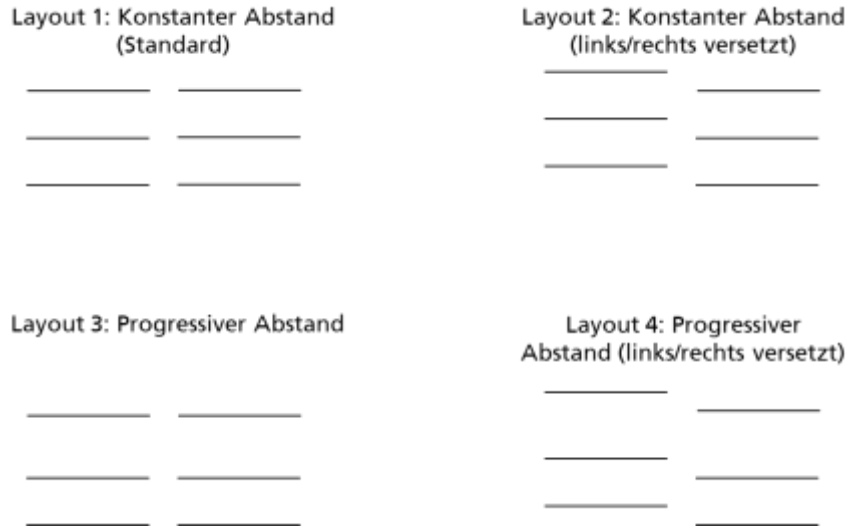


Abbildung 40: Untersuchte Layouts des Messsystems.

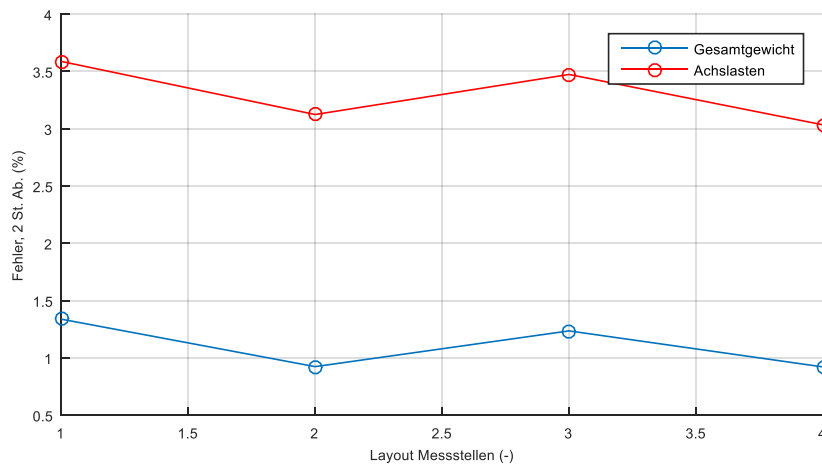


Abbildung 41: 2σ -Werte des Fehlers für das Gesamtgewicht und die Achslasten als Funktion des Layouts der Messstellen.

In Abbildung 41 sind die Ergebnisse dieses Einflussfaktors dargestellt. Die versetzten Layouts (2 und 4) zeigen bessere Ergebnisse sowohl für das Gesamtgewicht als auch für die Achslasten. Die Untersuchung dieses Einflussfaktors könnte prinzipiell mit Berücksichtigung weiterer Layouts beliebig erweitert werden. Aufgrund des Einflusses auf den Messfehler sollte das tiefer im Rahmen zukünftiger Analyse untersucht werden.

Geschwindigkeit

In Abbildung 42 sind die Ergebnisse des Einflussfaktors „Geschwindigkeit“ dargestellt. Hier handelt sich nicht um einen Auslegungsfaktor, wobei der Wert durch vorgegebene Geschwindigkeitsbegrenzungen in einem gewissen Bereich gehalten werden könnte. Die Ergebnisse zeigen eine klare Tendenz bis ca. 80 km/h, wobei der Fehler mit der Geschwindigkeit zunimmt. Ab 80 km/h ist diese Tendenz nicht mehr so deutlich. Das hängt von den untersuchten Fahrzeugen ab: Einige davon sind aufgrund der Motorisierung nicht in der Lage schneller als 90 km/h zu fahren und damit entfallen gewisse Simulationsfälle bei den höheren Geschwindigkeiten. Das führt dazu, dass die zur Grunde gelegten Stichproben für die Berechnung der Standard-Abweichung ab 90 km/h nicht genau den Stichproben bei Geschwindigkeiten niedriger als 90 km/h entsprechen. Deshalb sind die Fehlerwerte ab 90 km/h nicht direkt vergleichbar mit denen bei Geschwindigkeiten niedriger als 90 km/h. Dennoch ist der Messfehler bei hohen Geschwindigkeiten deutlich höher als bei niedrigen Geschwindigkeiten, was die Schwierigkeit der aktuellen sogenannten „High-Speed-WIM-Systeme“ bzgl. der Durchführung genauer Gewichts- und Achslastmessungen bestätigt.

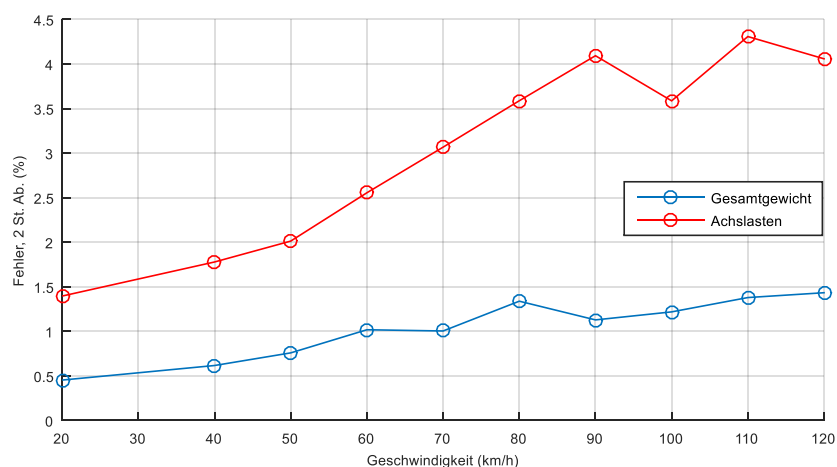


Abbildung 42: 2 σ -Werte des Fehlers für das Gesamtgewicht und die Achslasten als Funktion der Geschwindigkeit.

Die detaillierten Ergebnisse im Anhang C zeigen zusätzlich den Effekt der Geschwindigkeit auf den Durchschnittswert des Fehlers, der bei höheren Geschwindigkeiten, aufgrund der zunehmenden Auftriebskraft, abnimmt.

Sensorhöhe

In Abbildung 43 sind die Ergebnisse des Einflussfaktors „Sensorhöhe“ dargestellt. Es handelt sich um einen Faktor, der einen sehr hohen Einfluss auf den Fehler gezeigt hat. Hauptgrund dafür ist der weite Bereich, der für die Untersuchung definiert wurde, besonders für die positive Richtung. Im Fall eines Lochs (negative Sensorhöhe) sind die Einflüsse auf die Radlasten relevant, aber sie weisen keine extremen Werte auf. Andererseits, im Fall einer Schwelle (positive Sensorhöhe), wird das Rad sehr hoch belastet, auch bei wenigen Millimetern. Der maximale untersuchte Wert von 5 mm liegt deshalb deutlich über den dargestellten Grenzwerten des Diagramms.

Diese Ergebnisse zeigen die Notwendigkeit, einen glatten Übergang von der Fahrbahn zur Sensorfläche zu haben.

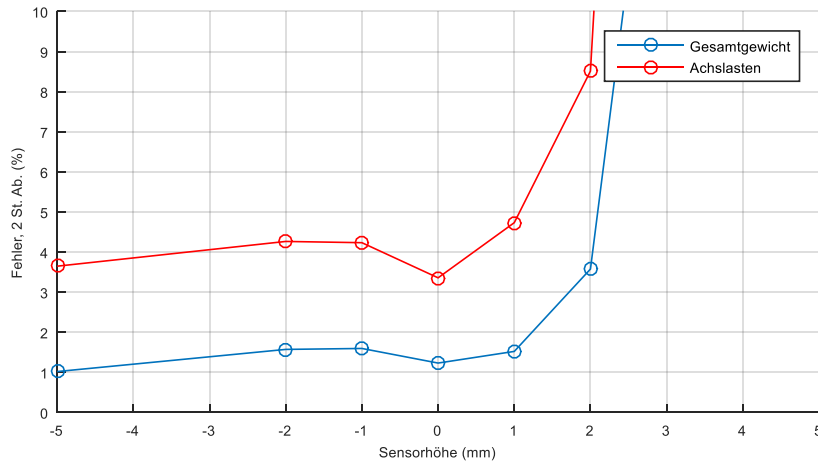


Abbildung 43: 2σ-Werte des Fehlers für das Gesamtgewicht und die Achslasten als Funktion der Sensorhöhe.

Rauigkeit der Straße (Straßenunebenheit)

In Abbildung 44 sind die Ergebnisse des Einflussfaktors „Rauigkeit der Straße“ (d. h. Straßenunebenheit) dargestellt. Wie erwartet und wie bereits erwähnt, ist der Einfluss der Qualität der Fahrbahn für die Dynamik der vertikalen Radlasten und deshalb für den Fehler der Messung des Gewichts und der Achslasten sehr relevant. Enge Vorgaben bzgl. der Straßenunebenheit vor und bei den Messstellen werden deshalb für die Auslegung eines WIM-Systems bereits definiert.

Bei dem durchschnittlichen Wert des Unebenheitsmaßes für die ISO-Klasse A (d.h. $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{rad}$) wurden bei dem simulierten Standard-Fall 2σ-Werte des Fehlers für das Gesamtgewicht von ca. 3 % und für die Achslasten von knapp 6 % ermittelt, die auf noch idealen Sensoren basieren (d. h. ohne Berücksichtigung des lokalen Messfehlers).

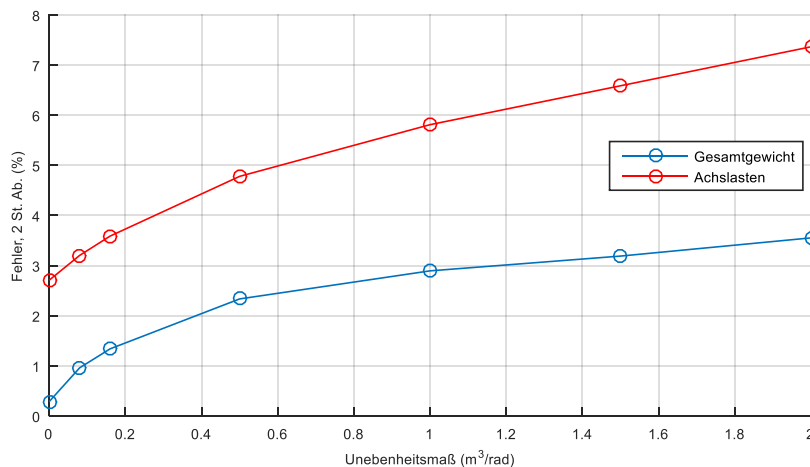


Abbildung 44: 2σ-Werte des Fehlers für das Gesamtgewicht und die Achslasten als Funktion des Unebenheitsmaßes.

Bremsbeschleunigung

In Abbildung 45 sind die Ergebnisse des Einflussfaktors „Bremsbeschleunigung“ dargestellt. Unter den Fahrmanöver-Faktoren zeigt die Bremsbeschleunigung den höchsten Einfluss auf den Messfehler, besonders für die Achslasten. Die Ergebnisse des Gesamtgewichts werden deutlich weniger beeinflusst, da die Längsbeschleunigung während eines Bremsmanövers zu einer Lastübertragung von der Hinter- zu der Vorderachse führt. Bremsst man genau während der Überfahrt auf dem WIM-System, wird auch die Messung des Gesamtgewichts stark betroffen, wobei das in den durchgeführten Simulationen nur bei wenigen Werten des Faktors „Offset Messstellen“ stattfindet.

Aufgrund der höheren Bremsleistung eines LKW im Vergleich zu der Antriebsleistung, wurden die Wertebereiche für die positive Beschleunigung und die Bremsbeschleunigung sehr unterschiedlich definiert. Der untersuchte Wertebereich der Bremsbeschleunigung (bis 5 m/s²) weist deshalb deutlich höhere Werte des Messfehlers, besonders ab 1 m/s².

Die Ergebnisse zeigen wie relevant das Thema der Ausweichmanöver für die Genauigkeit eines WIM-Systems ist. Schon eine moderate Bremsung kann die Messgenauigkeit der Achslasten extrem verschlechtern. Es ist deshalb notwendig, solche Manöver rechtzeitig zu identifizieren, z. B. aus dem gemessenen Geschwindigkeitsprofil. Um die Messung bei diesen Fällen eventuell zu korrigieren, sind Annahmen zur Schwerpunktshöhe notwendig, wobei die longitudinalen Abstände der Achsen aus den einzelnen Lastmessungen und der Geschwindigkeit abgeleitet werden könnten. Das würde letztendlich natürlich zu einer erhöhten Unsicherheit der Messung führen.

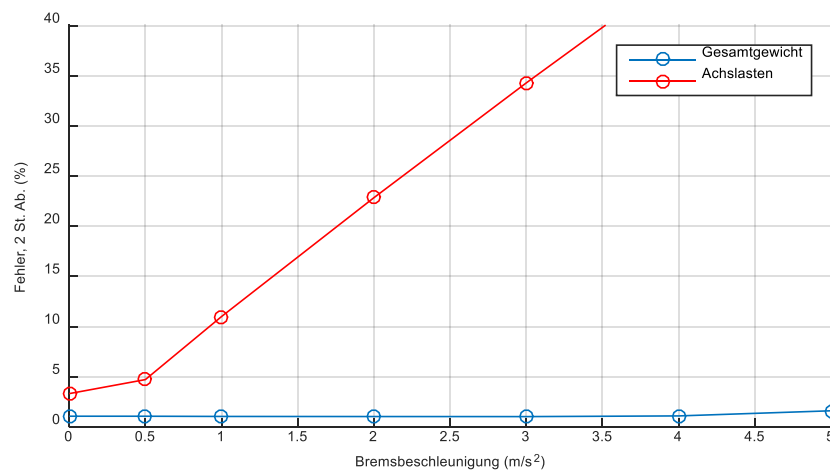


Abbildung 45: 2 σ -Werte des Fehlers für das Gesamtgewicht und die Achslasten als Funktion der Bremsbeschleunigung.

8. Arbeitspaket 2.4 „Unsicherheitsanalyse – Modellierung der gesamten Messunsicherheit“

In AP 2.4 wird ein Modell entwickelt, mit dem die Ergebnisse aus AP 2.1, 2.2 und 2.3 zusammengefasst werden, so dass die Unsicherheiten aller Teilsysteme in Abhängigkeit ihrer Einflussparameter berücksichtigt werden können. Hierzu wird zunächst ein Messunsicherheitsbudget betrachtet. Anschließend wird gezeigt wie die Unsicherheitsbeiträge in dem Modell miteinander verkettet werden. Das Modell dient als Arbeitswerkzeug für AP 3.

Definition Messunsicherheitsbudget

Im Rahmen von AP 1 wurde diskutiert, welche Sicherheiten ein System haben muss, damit es als gerichtsfest gilt. Eine fehlerhafte Verurteilung muss ausgeschlossen sein. Ein üblicher Ansatz, dies zu gewährleisten ist es, eine hohe Sicherheitsmarge auf die Messung aufzuschlagen. Jede Messung unterliegt einer Streuung um den realen Wert bzw. den Erwartungswert μ . Diese Streuung kann bei Zufallsprozessen in der Regel als Normalverteilung (Gauß-Verteilung) angesetzt werden. Der Vorteil der Normalverteilung ist, dass es sehr elegante Rechenregeln für diese Funktion gibt, die einen das Arbeiten mit dieser Funktion erleichtern.

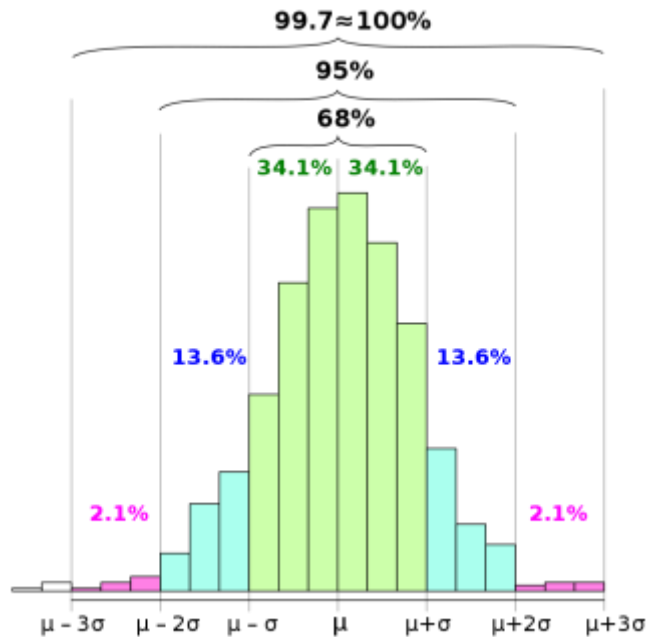


Abbildung 46: Normalverteilung mit Konfidenzintervallen (Bildquelle: Wikipedia).

Abbildung 46 zeigt eine Normalverteilungsfunktion mit Erwartungswert μ und den Konfidenzintervallen, die in Vielfachen von σ angegeben werden. Tabelle 5 listet auf, wie viele Werte der gesamten Stichprobe in dem Intervall $\pm n \cdot \sigma$ liegen.

Tabelle 5: Konfidenzintervalle einer Normalverteilung

Intervall	Werte im Konfidenzintervall in %	Überschreitung bei jedem n-ten Wert
$\mu \pm \sigma$	68,268949 %	3,15
$\mu \pm 2\sigma$	95,449973 %	21,97
$\mu \pm 3\sigma$	99,730020 %	370,39
$\mu \pm 4\sigma$	99,993665 %	15.787,19
$\mu \pm 5\sigma$	99,999942 %	1.744.277,89

In unserer Darstellung der Messunsicherheiten der einzelnen Parameter haben wir den 2σ Bereich verwendet. Dies bedeutet, dass 95 % aller Simulationsergebnisse in angegebenen Intervall liegen.

Eine mögliche Systemauslegung eines Messsystems zur gerichtsfesten Messung könnte nach Gesprächen mit Vitronic z. B. ein 5σ Abstand vom Erwartungswert sein. In der Praxis würde dies bedeuten, dass, nach Aufbau des Messsystems und Ermittlung dessen Streubereich σ , von jeder Messung 5σ abgezogen würde. Dieser so korrigierte Wert wäre dann als Messwert anzusetzen und den gesetzlichen Regularien gegenüberzustellen.

Überlegung: Ein 40 t LKW ist um 10 % überladenen und fährt über eine Wägeeinrichtung. Unser Messsystem erfasst genau den Erwartungswert von 44 t. Es würde auslösen, wenn der 5σ -Wert kleiner als 4 t wäre, also $1\sigma < 0,8$ t. Bei Sensorsystemen werden die Messunsicherheiten in % häufig im 2σ Intervall angegeben. Unser Messsystem bräuchte im 2σ Intervall also eine Genauigkeit besser als 4 %, sofern man 40 t als Messbereichsendwert ansetzt, auf den die prozentuale Angabe immer bezogen ist. Dimensioniert man das System auf einen 60 t Messbereich, wäre die geforderte Genauigkeit besser als 3 %.

Nach dieser Überlegung sind die 3 % an geforderter Genauigkeit das Budget das das komplettes Messsystem an Unsicherheiten zur Verfügung hat, um die Anforderung (gerichtsfeste Messung von 10 % Überladung) zu erfüllen.

Modellierung der gesamten Messunsicherheit

Als Vorbereitung für die Gesamtmodellierung wurde ein einheitliches Simulationsschema entwickelt, das in den einzelnen Arbeitspaketen bereits umgesetzt wurde. So wurde in AP 1 für jeden zu untersuchenden Einflussfaktor (Parameter) ein Wertebereich festgelegt und ein Standardwert definiert. Bei den folgenden Simulationen wurde immer nur ein Parameter variiert, alle anderen Parameter waren auf Standardeinstellung. Darüber hinaus gab es noch die Streuparameter „Offset“ und „Fahrzeugtyp“ (für AP 2.3) und „Reifen“ (für AP 2.2). Diese Parameter wurden bei allen Simulationen in ihrem ganzen Bereich variiert und bekamen keinen Standardwert zugewiesen. Dieses Schema erlaubt eine schnelle Aussage über den Einfluss eines Parameters in Abhängigkeit der Streuparameter. Beliebige Parameterkombinationen werden mit dem Simulationsschema jedoch nicht berechnet. Eine volle Rekombination aller 48 Parameter mit durchschnittlich 5 Werten hätte $\sim 10^{33}$ Kombinationen ergeben – eine Anzahl an Simulationen, die in angemessener Zeit nicht lösbar gewesen wäre.

Die Aufgabe war nun, diese Rekombinationen dennoch mit sinnvollen Werten abzuschätzen, um den Lösungsraum möglichst komplett abzudecken. Der umgesetzte pragmatische Ansatz basiert auf der Annahme, dass sich die Parameter gegenseitig nicht beeinflussen. Weiterhin wird die Annahme getroffen, dass die Messunsicherheiten nur durch ihren Streubereich Sigma beschrieben werden können. Dies impliziert, dass lineare Einflüsse des Parameters auf den Erwartungswert nicht existieren oder technisch kompensiert werden. Folglich wird also nur betrachtet, für welche Streuung ein Parameter verantwortlich ist.

Abbildung 47 verdeutlicht beispielhaft die Problemstellung der Rekombination und die umgesetzte Lösung. Dargestellt sind hier nur zwei der insgesamt 48 Parameter. Die farbigen Matrixpunkte wurden durch Simulation gelöst. Ausgehend vom Standardfall wurde nun für jeden Parameter die Änderung der Streuung $\Delta\sigma$ berechnet. Unbekannte Punkte der Matrix werden nun durch einfache Addition der $\Delta\sigma$ Werte berechnet.

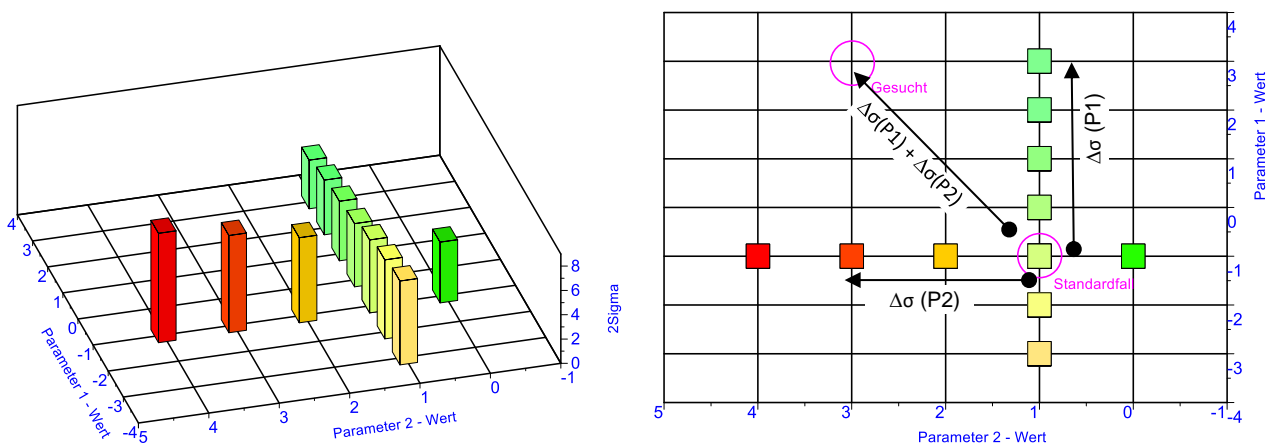


Abbildung 47: Rekombinationsabschätzung am Beispiel eines zweidimensionalen Problems.

Die Rekombinationen der einzelnen Parameter lassen sich durch diese Vereinfachung deutlich schneller berechnen, da keine Simulation mehr erforderlich ist, sondern nur Additionen von skalaren Werten. Eine komplette Rekombination aller Parameter ist dadurch trotzdem noch nicht möglich, aber es lassen sich abgeschlossene Teilsysteme berechnen, wie z. B. das globale Fahrzeugmodell aus AP2.3. Hier wurden pro ausgewertetes Messsystem ca. 100 Millionen Rekombinationen berechnet und mit einer resultierenden Messunsicherheit bewertet.

Die folgende Abbildung 48 bis Abbildung 51 zeigten für einzelne Kombinationen von zwei Einflussfaktoren exemplarisch die Qualität des Ansatzes. Für diese Parametervariationen wurde der komplette Matrixbereich berechnet. Gleichzeitig wurde die Matrix auch auf Basis des Unsicherheitsmodells abgeschätzt. Die Abbildungen zeigen, dass die Form der Fläche und ihre Amplituden in einem vergleichbaren Bereich liegen.

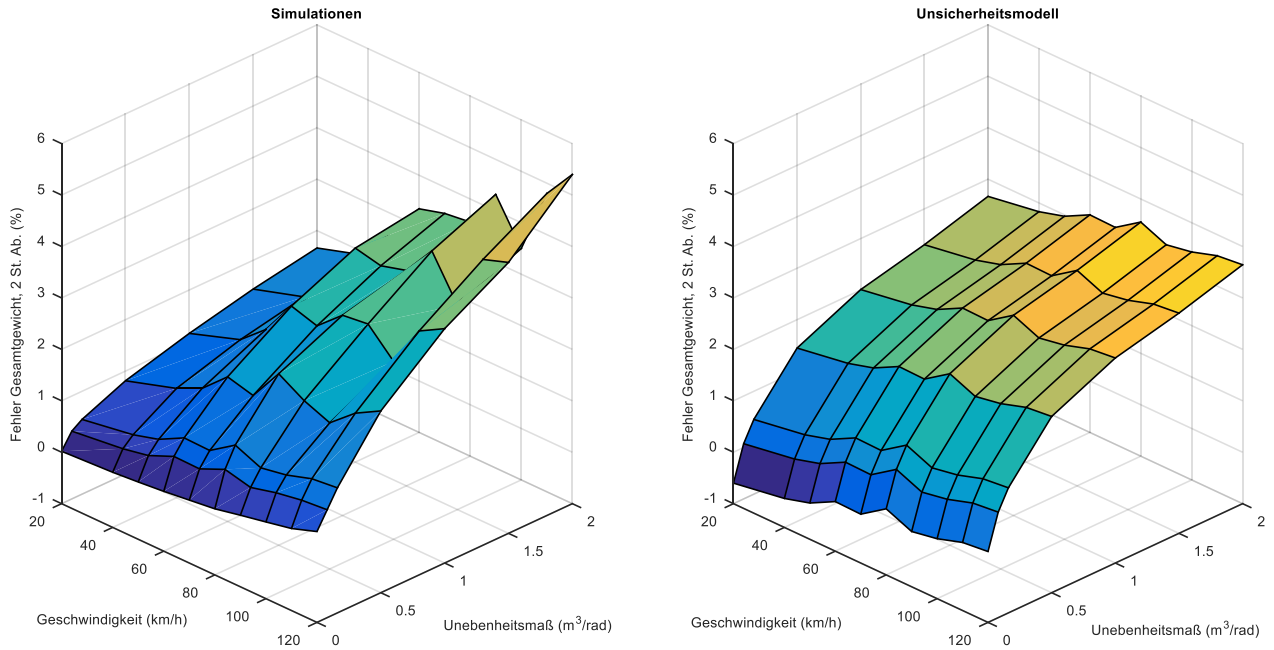


Abbildung 48: Modellverifikation am Beispiel der Parameter Geschwindigkeit vs. Straßenrauigkeit.

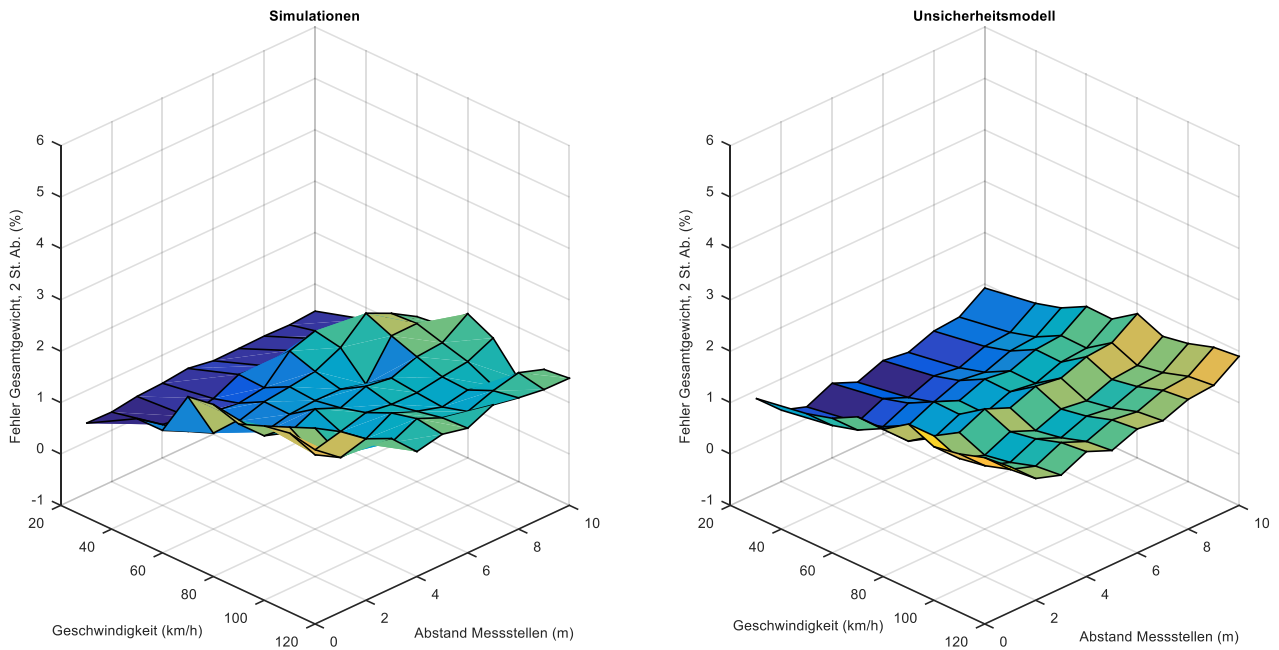


Abbildung 49: Modellverifikation am Beispiel der Parameter Geschwindigkeit vs. Abstand der Messstellen.

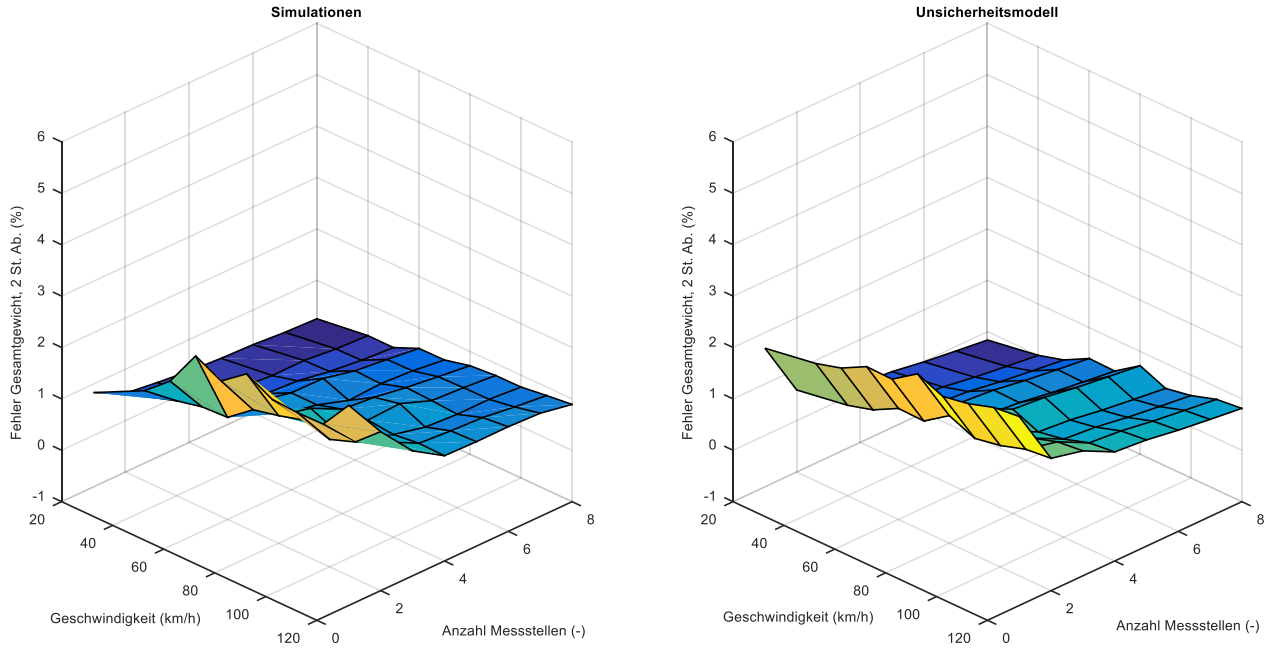


Abbildung 50: Modellverifikation am Beispiel der Parameter Geschwindigkeit vs. Anzahl der Messstellen.

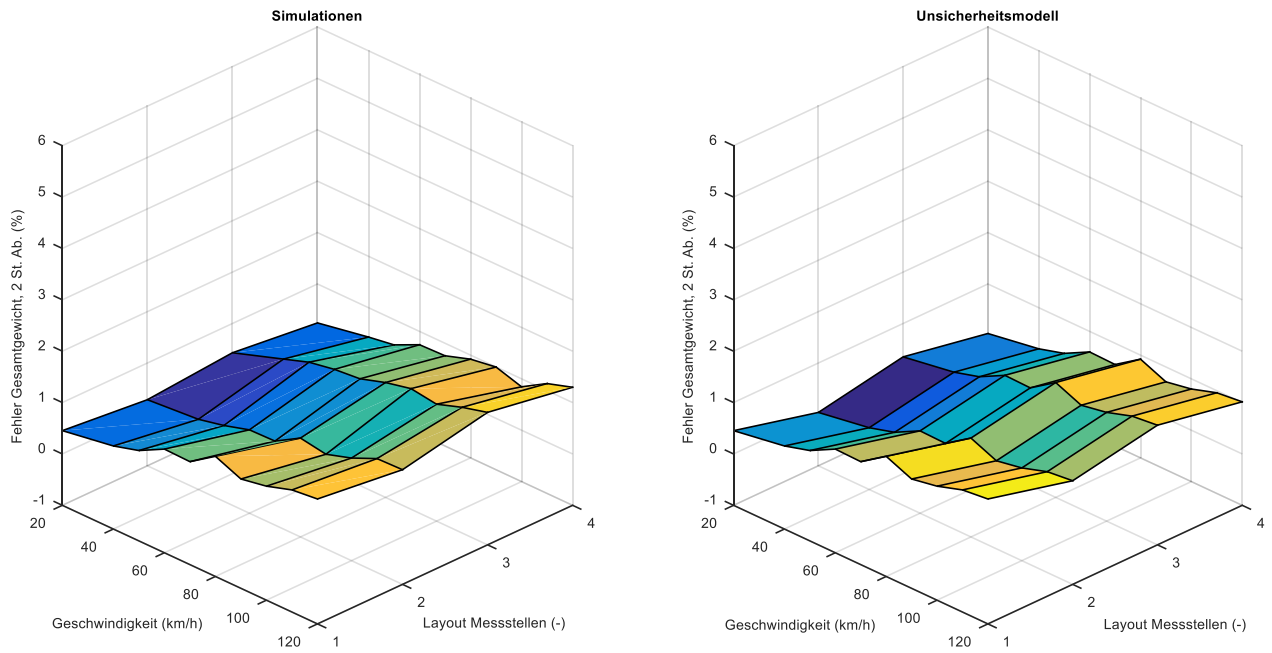


Abbildung 51: Modellverifikation am Beispiel der Parameter Geschwindigkeit vs. Layout der Messstellen.

9. Arbeitspaket 3 „Entwicklung und Bewertung von Lösungsansätzen“

Für die Entwicklung und die Bewertung der Lösungsansätze von WIM-Systemen wurden die Ergebnisse aus der Unsicherheitsanalyse (AP 2) verwendet (insbesondere das Unsicherheitsmodell aus AP 2.4).

Unabhängig von den tatsächlich durchgeführten Simulationen bietet das Unsicherheitsmodell die Möglichkeit, den 2σ -Wert des Messfehlers für alle mögliche Kombinationen von Einflussfaktoren mit einer gewissen Approximation zu ermitteln. Damit lassen sich WIM-Systeme nicht nur auf Basis des im Projekt definierten Standard-Falls bewerten und vergleichen, sondern mit einer Prognose der Ergebnisse aus einer Vielzahl an Kombinationen der wesentlichen variablen Einflussfaktoren.

Aus der Prospektive der Auslegung sind gewisse **beeinflussbare Faktoren** festgelegt und im Betrieb nicht mehr variabel. Unter dieser Kategorie befinden sich die folgenden Faktoren, die direkt in der Auslegung definiert werden, oder von dem ausgewählten Streckenabschnitt abhängig sind:

- Architektur und Layout Messsystem;
- Verwendete Sensoren, Datenverarbeitung und Auswertung;
- Straßenbeschaffenheit (Rauheit, Ebenheit, Neigung, etc.).

Die **nicht beeinflussbaren Faktoren** unterteilen sich in zwei Subkategorien. Zum einen gibt es Faktoren, die direkt gemessen oder ermittelt werden können, wie z. B.:

- Witterungsbedingungen (Wind, Temperatur, Nässe);
- Fahrmanöver (Lenken, Bremsen, Geschwindigkeit): wobei eine Erkennung in gewissen Toleranzbereichen möglich ist.

Nicht messbar ist die zweite Subkategorie an Fahrzeugeigenschaften, die während des Betriebs des WIM-Systems unbekannt bleiben, wie z. B.

- Beladung,
- Reifendruck,
- Fahrwerkseigenschaften

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden vier Systemvarianten aus dem Lösungsraum betrachtet und verglichen:

1. Standard: basiert auf den Standard-Werten der Faktoren, die im AP 1 definiert wurden;
2. BAST: aktuelles WIM-System bei der BAST
3. Option A:
basiert auf Layout 4 (d. h. progressiver Abstand, versetzte Messstellen, siehe Abbildung 40), eng;
4. Option B:
basiert auf Layout 4 (d. h. progressiver Abstand, versetzte Messstellen, siehe Abbildung 40), weit;

Die Optionen A und B resultieren aus den Ergebnissen mit niedrigem Messfehler, die im Rahmen des AP 2.3 für die Ganzfahrzeugsimulation ermittelt wurden (siehe Abbildung 38, Abbildung 39 und Abbildung 41, sowie die Diskussion der Einflussfaktoren des Messsystems im AP 2.1).

Die Tabelle 6 zeigt, wie die sogenannten globalen Faktoren für die folgende Analyse festgelegt wurden. Die Messsystem-Faktoren und die Straßen-Faktoren haben feste Werte, bis auf den Offset, der immer als Streuung berücksichtigt wird. Die vier untersuchten Systeme unterscheiden sich anhand der Faktoren: Abstand, Anzahl und Layout der Messstellen, die die wesentlichen Auslegungsparameter darstellen. Die nicht beeinflussbaren Faktoren (d. h. die Fahrzeug-, Wind- und Manöver-Faktoren) bleiben wie in der vorherigen Unsicherheitsanalyse mit identischem Variationsbereich variabel. Wie bereits erwähnt und anders als bei den Simulationen für die Unsicherheitsanalyse wurden hier die ganzen Kombinationen anhand des Unsicherheitsmodells berücksichtigt. Um nicht plausible Kombinationen zu vermeiden, wurden die Einflussfaktoren „Bremsen“ und „Beschleunigung“ in eine einzelne Variabel zusammengefasst, die die Längsbeschleunigung darstellt. Die Faktoren „Lenkstoß“ und „Wedeln“ wurden ebenso zusammengefasst.

Tabelle 6: Übersicht der berücksichtigten globalen Faktoren und deren Werte für die Analyse vier Messsysteme.

Nr.	Einflussfaktoren	Werte				Einheit
		Standard	BAST	Option A	Option B	
	Messsystem					
1	Abstand Messstellen	4	6	3	6	m
2	Anzahl Messstellen	3	2	4	4	-
3	Layout Messstellen	1	1	4	4	-
4	Höhe / Tiefe des Sensors		0			mm
5	Übersprechen		0			%
6	Offset Messstellen		0 – 200 (Step 20)			m
	Straße					
7	Neigung		0			%
8	Steigung		0			%
9	Rauigkeit (Straßenunebenheit)		0,16			m ³ /rad
10	Reibwert		1			-
	Fahrzeug					
11	Typ		1 - 9			-
12	Variation der Beladung		-30; -20; -10; 0; 10; 20; 30			%
13	Variation der vertikalen Fahrwerk-Steifigkeit		-20; -10; 0; 10; 20			%
14	Variation der vertikalen Fahrwerk-Dämpfung		-20; -10; 0; 10; 20			%
15	Variation des Reifenluftdrucks (vert. Steifigkeit)		-30; -20; -10; 0; 10; 20			%
	Umgebung (Wind)					
16	Wind-Geschwindigkeit		0; 5; 10; 15; 20			m/s
17	Wind-Winkel (Bei Wind-Geschwindigkeit 10 m/s)		0; 45; 90; 135; 180			deg
18	Wind-Bö		0; 5; 10; 15; 20			m/s
	Fahrmanöver					
19	Bremsung / Beschleunigung		-5; -4; -3; -2; -1; -0,5; 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4			m/s ²
20	Lenkradwinkel beim Lenkstoß / Wedeln		0; 10; 20; 30; 40 / 2,5; 5; 7,5; 10			deg
21	Geschwindigkeit		5; 20; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 110; 120			km/h

Für jedes der vier untersuchten Messsysteme ergeben sich ca. 100 Millionen Kombinationen der variablen Faktoren. Bei jeder Kombination können die 2σ -Werte des Fehlers des Gesamtgewichts und der Achslasten aus dem Unsicherheitsmodell ermittelt werden. Die Standard-Abweichung für jede Kombination berücksichtigt nach wie vor die Variation des Offsets und des Fahrzeug-Typs. Alle 2σ -Werte können dann zusammengeführt werden, um einen globalen 2σ -Wert (einmal für Gesamtgewicht und einmal für die Achslasten) für ein bestimmtes Messsystem zu ermitteln. Das Zusammenführen der 2σ -Werte wurde mit der Hypothese durchgeführt, dass die einzelnen Kombinationen dieselbe Wahrscheinlichkeit aufweisen. Das ist natürlich nicht verifizierbar und sicherlich nicht korrekt, da z. B. Fälle mit Geschwindigkeit um die 80 km/h häufiger als Fälle mit 5 oder 20 km/h zu erwarten sind. Aufgrund fehlender Informationen, wie die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der variablen Faktoren in der Realität aussehen, wurde erstmal die Grundhypothese der gleichmäßigen Verteilung angenommen. Für den relativen Vergleich zwischen den vier untersuchten Messsystemen wurde diese Annahme als plausibel betrachtet.

Da sich die wesentlichen einstellbaren Faktoren für die Auslegung eines WIM-Systems auf globaler Ebene befinden und um die Anzahl der betrachteten Kombinationen und deshalb die Rechenzeit in Grenze zu halten, wurde aus der lokalen Unsicherheitsanalyse ein fester 2σ -Wert des Messfehlers berücksichtigt. Dieser Wert resultiert aus den Standard-Faktoren für den Kontakt Reifen/Sensor (MKS), den dynamischen Sensoreigenschaften (Sensormodell), der Genauigkeitsklasse der Messelemente und der Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung. Tabelle 7 zeigt, wie die einzelnen Beiträge angenommen wurden.

Tabelle 7: Fester 2σ –Wert des Messfehlers aus der lokalen Unsicherheitsanalyse.

Unsicherheitsquelle	2σ-Wert des Messfehlers (%)
Kontakt Reifen/Sensor und dynamischen Sensoreigenschaften	1,897
Genauigkeitsklasse der Messelemente	1
Genauigkeitsklasse der Geschwindigkeitsmessung	0,5
Summe	3,397

In Summe ergibt sich eine Genauigkeit von ~3,4 % im 2σ Konfidenzintervall. Dieser Wert wurde für die folgenden Balkendarstellungen verwendet. Sollen abweichende Genauigkeitsklassen angesetzt werden, so können die Differenzen in den Balken einfach hinzugerechnet bzw. abgezogen werden.

Die Ergebnisse der durchgeführten Analyse sind in Abbildung 52 dargestellt. Die Ergebnisse des Gesamtgewichts zeigen, wie die vorgeschlagenen Systeme eine potentielle Verbesserung von knapp 1 % (als 2σ-Wert des Messfehlers) im Vergleich zum BAST-System aufweisen. Die Ergebnisse der Achslasten liegen für alle System deutlich über der dargestellten 14 %-Grenze. Grund dafür sind die sehr hohen Werte der Bremsbeschleunigung, die berücksichtigt wurden (siehe auch Abbildung 45).

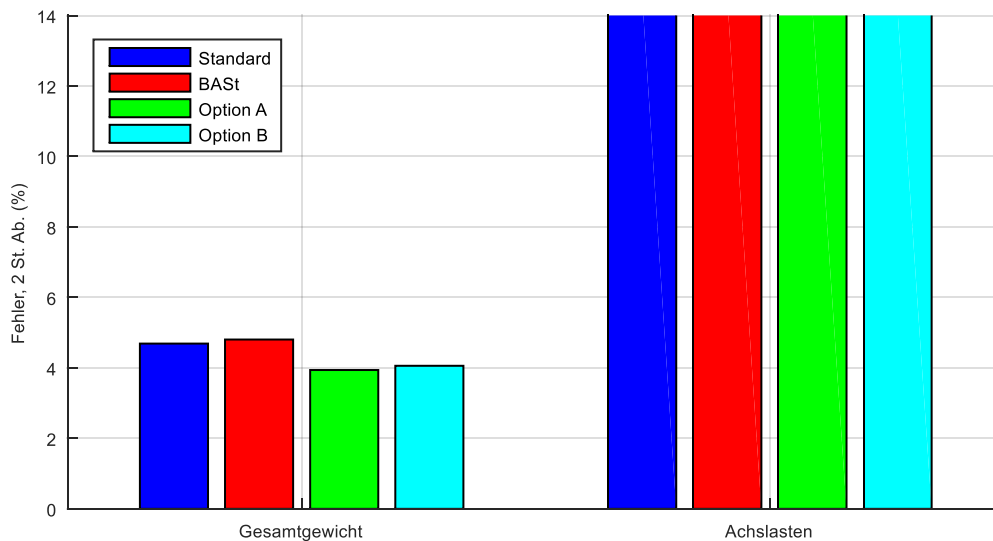


Abbildung 52: 2σ-Werte des Fehlers für das Gesamtgewicht und die Achslasten für die vier berücksichtigten Systeme.

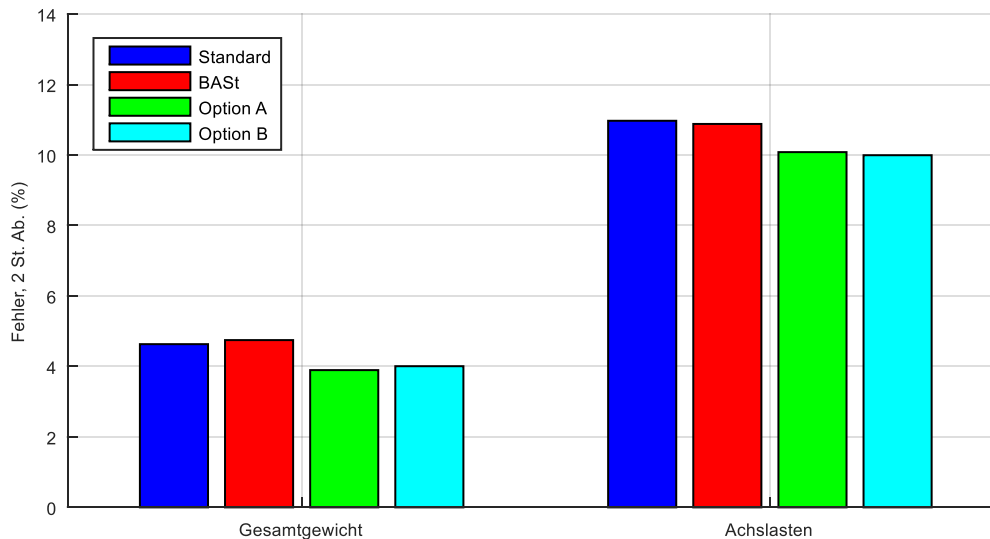


Abbildung 53: 2 σ -Werte des Fehlers für das Gesamtgewicht und die Achslasten für die vier berücksichtigten Systeme (mit reduziertem Wertebereich für den Einflussfaktor „Bremsbeschleunigung“).

Die Analyse wurde deshalb mit einem reduzierten Wertebereich der Bremsbeschleunigung durchgeführt. Die gestrichelten Werte sind in der Tabelle 6 in Kursiv dargestellt. Um eine vergleichbare Anzahl an Fällen mit positiver und negativer Beschleunigung zu haben, wurden auch zwei Werte der positiven Beschleunigung gestrichen. Die resultierenden Ergebnisse sind in Abbildung 53 dargestellt. Das Gesamtgewicht wird von der Änderung kaum beeinflusst, während die Achslasten deutlich niedrigere Werte des Messfehlers zeigen, die jedoch noch relativ hoch für eine genaue Messung bleiben. Die Einflussfaktoren der Fahrmanöver spielen hier noch eine wesentliche Rolle und da sie immer mit den anderen durchkombiniert sind, haben die meisten Kombinationen keine konstante Geschwindigkeit, sondern weisen sie eine Längs- und eine Querbeschleunigung größer als null auf.

Die Ausweichmanöver zeigen sich als die relevanteste Fehlerquelle für die Messung der Achslasten. Die vorgeschlagenen Systeme „Option A“ und „Option B“ zeigen ähnlich wie beim Gesamtgewicht eine Verbesserung von ca. 1 % als 2 σ -Wert des Messfehlers.

Eine letzte Analyse wurde mit einem konstanten Wert der Geschwindigkeit durchgeführt (80 km/h). In der bisherigen Analysen wurde der gesamte Wertebereich der Geschwindigkeit (von 5 bis 120 km/h) durchkombiniert, wobei mehr Werte sich im niedrigen Geschwindigkeitsbereich befinden und deshalb die Ergebnisse des Messfehlers leicht überschätzen (siehe Einfluss des Faktors Geschwindigkeit in Abbildung 42). Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abbildung 54 dargestellt.

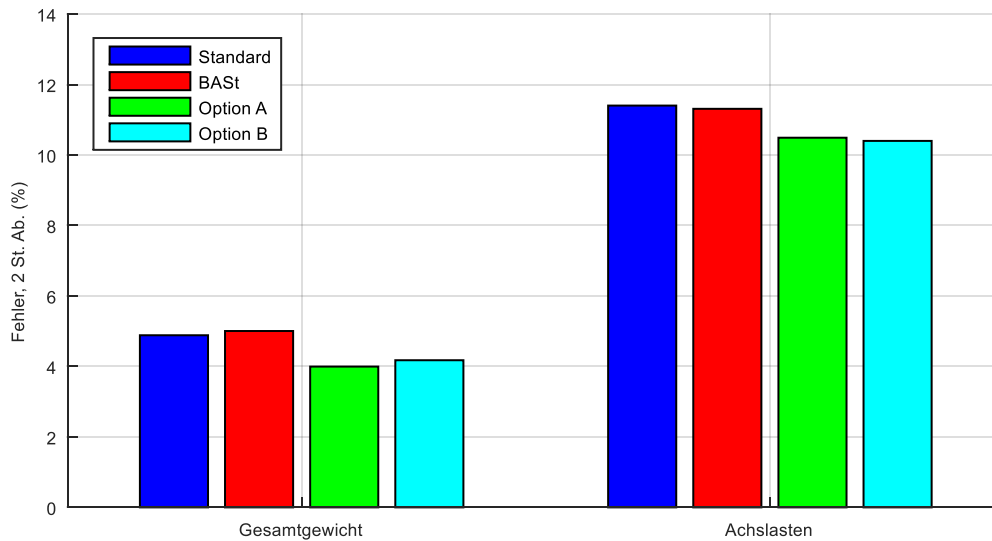


Abbildung 54: 2 σ -Werte des Fehlers für das Gesamtgewicht und die Achslasten für die vier berücksichtigten Systeme (mit reduziertem Wertebereich für den Einflussfaktor „Bremsbeschleunigung“ und nur mit Geschwindigkeit 80 km/h).

Die durchgeführten Analysen zeigen, wie man verschiedene WIM-Systeme vergleichen kann. Die absoluten Werte der Messgenauigkeit hängen stark davon ab, welche Bereiche für die variablen Einflussfaktoren berücksichtigt werden und welche relative Gewichtung (d. h. Wahrscheinlichkeit) die einzelnen Fälle haben (uniforme Wahrscheinlichkeitsverteilung in den durchgeführten Analysen). Diese Methodik ermöglicht die Auswertung der Einflüsse solcher Bereiche und die Festlegung der maximalen erlaubten Werte bestimmter Faktoren, um unter einem maximalen Wert des Fehlers zu bleiben.

10. Arbeitspaket 4 „Marktrecherche Kraftmesseinrichtungen“

Am Markt existiert eine ganze Reihe an Firmen die Wägeeinrichtungen für den Straßeneinbau im Produktportfolio haben. Die Mehrheit der Systeme ist jedoch nicht für WIM Anwendungen gedacht, sondern für die stationäre Verwiegung. Die folgende Tabelle 8 zeigt eine Übersicht über Hersteller.

Tabelle 8: Hersteller von Wägeeinrichtungen für den Straßeneinbau

Hersteller	Produkt, Bemerkung	Lösung für Straßeneinbau vorhanden
Kistler	Bezeichnung: Lineas Sensoren https://www.kistler.com/de/anwendungen/sensor-technology/weigh-in-motion/ Ein Entwicklungsfeld für Kistler ist das Angleichen der Genauigkeit der Sensoren in Richtung der Fahrbahnbreite (Länge der Sensoren)	Ja

Schenk Process	Verschiedene Wägetechnologien für Bahn und Straße https://www.schenckprocess.com/products/ALS-axle-load-scales	Ja
METTLER TOLEDO	Verschiedene Wägeeinrichtungen für die Straße. WIM System	Ja
ME-Meßsysteme GmbH	https://www.me-systeme.de/ keine passende Technologie	Nein
Zemic Europe B.V.	https://www.zemiceurope.com/de Zemic bietet Sensoren für die Verwiegung auch für große Gewichte mit DMS. Produkte in Richtung WIM-System gibt es noch nicht.	Nein
Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH	https://www.hbm.com/de/ HBM hat noch kein passendes Produkt, arbeitet aber interessiert an passenden F&E-Projekten	Nein
disynet GmbH (deutscher Vertrieb für Sensoren von DYTRAN Instruments Inc.)	https://www.sensoren.de/ https://www.dytran.com/ keine passende Technologie	Nein
Dr. Brandt GmbH	https://dr-brandt-gmbh.de Die Dr. Brandt GmbH entwickelt und vertreibt Messsysteme für große Kräfte und die Verwiegung großer Massen. Produkte in Richtung WIM-System gibt es noch nicht.	Nein
Bitzer GmbH	https://www.bitzer-waage.de Bieten Achslastwaagen, aber nur für langsame Überfahrgeschwindigkeiten.	Ja

Bei der Durchsicht der Datenblätter und teilweise auch Rückfragen an die Hersteller zeigte sich, dass viele der zur Bewertung notwendigen Informationen in den Datenblättern nicht aufgeführt sind und von den Herstellern auch nicht ermittelt wurden. Eine vergleichende Darstellung verschiedenen Systeme kann daher nicht sinnvoll durchgeführt werden. Stattdessen werden nachfolgend die Anforderungen und Eigenschaften an einen straßenintegrierten WIM Sensor beschrieben.

Übersprechen

Das Übersprechen von Längs- oder Querkräften kann das Messsignal deutlich verfälschen. Daher ist es wichtig, dass die straßenintegrierten Kraftsensoren besonders wenig übersprechen zeigen. Abbildung 11 zeigt die Simulationsergebnisse des lokalen Sensormodells, die die Auswirkungen des Übersprechens auf die Messgenauigkeit beziffern. Ein fixer Limitwert für das Übersprechen kann nicht genannt werden, da der Fehler linear mit dem Übersprechen zunimmt.

In unseren Simulationen zeigt sich, dass ein Übersprechen von 1 % ($F_x, F_y \rightarrow F_z$) eine 2σ Messunsicherheit von 0,2 % bewirkt.

Temperaturverhalten

Das Temperaturverhalten des Sensors äußert sich im Wesentlichen durch die temperaturabhängige Empfindlichkeitsänderung. Nullpunktdrift wie sie bei DMS Sensoren häufig unter Temperaturänderungen zu beobachten sind, spielen keine Rolle, da diese mit einem Hochpassfilter entfernt werden können. Sofern die Empfindlichkeitsänderung über der Temperatur einen linearen Einfluss hat, sollte diese als linearer Korrekturfaktor recht zuverlässig entfernbar sein. Dies muss bei der Systemauslegung aber entsprechend berücksichtigt werden. Lässt sich der Temperatureinfluss auf die Sensorempfindlichkeit nicht korrigieren, so muss von einer deutlichen Erhöhung der Messunsicherheit ausgegangen werden.

Genauigkeitsklasse

Die Genauigkeitsklasse ist ein typischer Wert der in Datenblättern angegeben wird. Er fasst verschiedene Sensoreigenschaften zusammen wie Linearitätsabweichungen, Hysterese, Wiederholbarkeit und Temperatureffekte. Wie die Genauigkeitsklasse definiert ist muss dem entsprechenden Kalibrierverfahren entnommen werden. Für verschiedenen Sensortypen und Messprinzipien gibt es verschiedene Kalibrierverfahren, die in ihren Definitionen voneinander abweichen. Wenn man die Messunsicherheit intensiv betrachten will, ist dem angegebenen Prozentwert der Genauigkeitsklasse daher nicht uneingeschränkt zu vertrauen. Für WIM Systeme gibt es mit der „International Recommendation OIML R 134“ eine Empfehlung „Automatic instruments for weighing road vehicles“ wie die Genauigkeit von WIM Sensoren zu bestimmen ist.

Eigenfrequenz

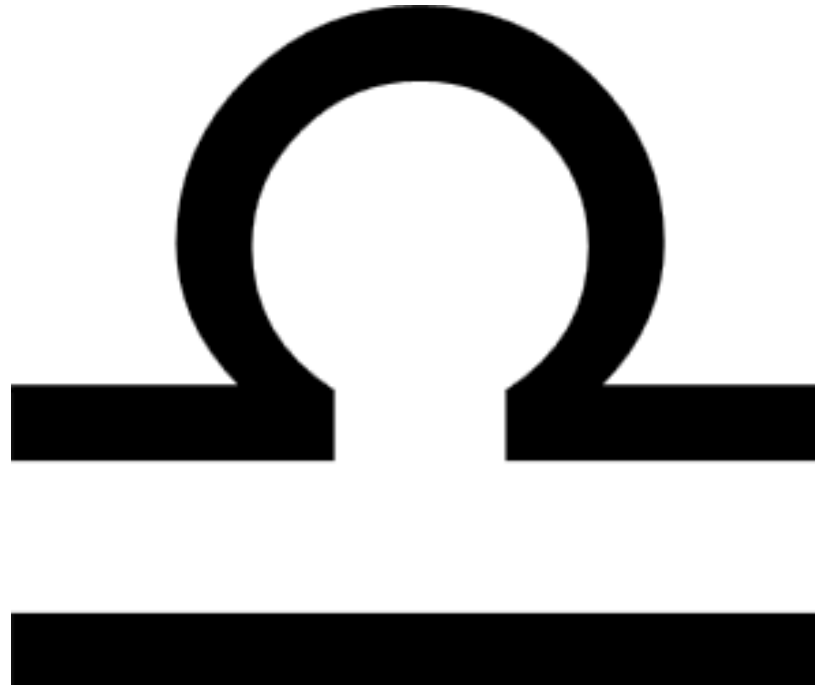
Ist die Eigenfrequenz eines Sensors zu niedrig, kann dieser durch den Kraftimpuls des überrollenden Reifens zu Schwingungen angeregt werden. Im Messsignal zeigt sich dies durch ein charakteristisches Überschwingen und Nachschwingen. Die Simulationen haben gezeigt, dass bei der Auswertungsmethode nach dem Integralverfahren keine negativen Einflüsse aus niedrigen Eigenfrequenzen zu erwarten sind. Auf die PeakLoad Auswertungsmethode hat die Eigenfrequenz durch den Überschwinger jedoch einen gravierenden Einfluss. Es gilt zu beachten, dass in unserer Simulation Straße und Sensor als nicht nachgiebig modelliert waren. Tatsächlich ist es aber so, dass bei niedrigen Eigenfrequenzen auch die Steifigkeit der Sensorelemente niedrig ist und diese Annahme nicht mehr zutrifft. Durch die Nachgiebigkeit ist zu erwarten, dass die Messergebnisse verfälscht werden und so die Genauigkeit sinkt. Weiterhin sind bei Doppelachsen erhöhte Messunsicherheiten zu erwarten, da das Messelement evtl. noch nachschwingt, wenn die nächste Achse schon aufrollt.

Aus diesen Gründen sollte die Eigenfrequenz der Sensorelemente nicht zu niedrig sein. Eine Eigenfrequenz von mindestens 1000 Hz scheint auf Basis der Simulationsergebnisse ratsam.

- [1] Fraunhofer ITWM, CDTire User Manual Version 4.2.5, 2016.
- [2] Yap P., Truck tire types and road contact pressures, Second International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, Kelowna, 1989.
- [3] Kistler Instrumente AG, Planning Manual, Planning of a WIM (Weigh In Motion) Station, Type 9195E, 2004.
- [4] BASt, Längsebenenheitsauswerteverfahren „Bewertetes Längsprofil“ – Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2011.
- [5] ISO 8608:2016, Measurement and Evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures. Standard International Organization for Standardization, 2016.
- [6] BASt, Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLB), 2012.

ANHANG A DES FACHBERICHTS ZUM VORHABEN LIBRA – LASTEN IN BEWEGUNG RECHTSSICHER AUFZEICHNEN

Einflussfaktoren bzgl. der Zulassungsfähigkeit eines Messverfahrens
Abschätzung der Parameterräume



Einflussfaktoren: Kategorien (gleichzeitig Struktur des Anhangs A)

- Lokale Einflussfaktoren
(d. h. Kontakt zwischen einem Reifen und einem Messelement)
 - Rad und Reifen - Seite 3
 - Sensorelement - Seite 4
 - Umgebung - Seite 5
- Globale Einflussfaktoren
(d. h. Interaktion zwischen einem Fahrzeug und einem Messsystem)
 - Messsystem - Seite 6
 - Straße - Seite 7
 - Fahrzeug - Seiten 8
 - Umgebung - Seite 9
 - Fahrmanöver - Seite 10

Lokale Einflussfaktoren – Rad und Reifen

Faktor	Beschreibung / Kommentar	Standard-Wert	Min.	Max.	Quelle
Durchmesser	Es werden einige am Markt verfügbare Reifen simuliert.	22,5"	15"	22,5"	Continental Ratgeber LKW Goodyear Technisches Handbuch LKW
Breite	Es werden einige am Markt verfügbare Reifen simuliert.	315 mm	205 mm	495 mm	Continental Ratgeber LKW Goodyear Technisches Handbuch LKW
Flankenhöhe (Anteil der Breite)	Es werden einige am Markt verfügbare Reifen simuliert.	80 %	45 %	80 %	Continental Ratgeber LKW Goodyear Technisches Handbuch LKW
Reifentyp	Reifentyp in Anhängigkeit der Fahrzeugkategorie				
Luftdruck	Im Reifenmodell variierbar	8,5 bar	4,5 bar	9,0 bar	Continental Ratgeber LKW Goodyear Technisches Handbuch LKW
Lenkwinkel (Schlupfwinkel)		0 deg	-2 deg	2 deg	
Sensorwinkel (für Sturzwinkel 0 deg)	Winkel zwischen Sensorlängsachse und Radmittelebene	0 deg	-5 deg	5 deg	
Radialer Versatz des Schwerpunkts		0 mm	0 mm	5 mm	
Radialer Versatz der Rotationsachse		0 mm	0 mm	5 mm	
Sturzwinkel		0 deg	-5 deg	5 deg	
Radlast	Abhängig von Reifendimension	40 kN	5 kN	80 kN	Continental Ratgeber LKW Goodyear Technisches Handbuch LKW
Geschwindigkeit		80 km/h	5 km/h	120 km/h	
Längsschlupf		0 %	-10 %	+10 %	
Eigenfrequenz Aufbau-Vertikalbewegung	Für Modellierung eines Viertelfahrzeugmodell	2,0 Hz	1,0 Hz	4,5 Hz	Multiple-Sensor WIM Theory and Experiments

Lokale Einflussfaktoren – Sensorelement

Faktor	Beschreibung / Kommentar	Standard-Wert	Min.	Max.	Quelle
Breite (in Fahrtrichtung)		50 mm	50 mm	800 mm	https://www.kistler.com/?type=669&fid=59924&model=document&callee=frontend
Höhe / Tiefe	Änderung im Straßenprofil	0 mm	-10 mm	+10 mm	
Abtastrate		1 kHz	0,1 kHz	10 kHz	
Eigenfrequenz	(abhängig von Masse und Steifigkeit)		100 Hz	1000 Hz	LKW Überfahrt ~ 30 Hz PKW Überfahrt ~ 100 Hz
Masse	Gewicht Koppелеlement Reifen zu Kraftmesselement		1 kg	150 kg	Datenblätter Sensorik, Schätzwerte
Steifigkeit	Sensornachgiebigkeit bei Überfahrt		2 kN/mm (100 Hz, 5 kg)	20.000 kN/mm (1000 Hz, 500 kg)	Berechnet aus Masse und Eigenfrequenz
Temperatur	Drift und Empfindlichkeit	-0,02 %/°C	-	-	https://www.kistler.com/?type=669&fid=59924&model=document&callee=frontend
Übersprechen	Längs- und Seitenkraftempfindlichkeit	1 %	0 %	3 %	
Genauigkeitsklasse	% vom Endwert	1	0,1	5	Definition: DIN 1319, EN 60051
Sensorauflösung	Digitalisierung durch AD-Wandler	16 Bit	12 Bit	24 Bit	

Lokale Einflussfaktoren – Umgebung

Faktor	Beschreibung / Kommentar	Standard-Wert	Min.	Max.	Quelle
Temperatur (Asphalt)	... als Einflussgröße für Sensorik und Reifen-Straße-Kontakt	20 °C	-20 °C	+60 °C	COST 323 „Weigh-in-Motion of Road Vehicles“ Final Report, 2002, S. 19 BAST: Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLB), 2012, (S. 57)
Reibungsbeiwert der Straße (μ) (steht in Zusammenhang mit der Rauigkeit, also der Korngröße des Asphalts)	(beinhaltet auch eine Abschätzung des Einfluss von Wasserfilmen und der Temperatur)	0,9	0,2 0,5	1,1	Untersuchung zum Aufbau eines Reibwertvorhersagesystem im fahrenden Fahrzeug, F. Klempau, TU Darmstadt, 2003, (S. 16ff) BAST: TLB, 2012, (S. 126) COST 323 „Weigh-in-Motion of Road Vehicles“ Final Report, 2002, S. 19
Straßensteigung	Längsneigung / Querneigung im Bereich 45 m vor bis 20 m nach der Messstelle (nach BAST)	0%	0 %	2,0 % (betragsmäßig)	BAST: TLB, 2012, (S. 57)
Ebenheit	... im Bereich 45 m vor bis 20 m nach der Messstelle (nach BAST) – angegeben als Profiltiefe der Straßenoberfläche in Quer- und Längsrichtung unter einer 4 m langen Messlatte	2 mm	0 mm	4 mm	BAST: TLB, 2012, (S. 57) ASTM: Standard Specification for Highway Weigh-In-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Methods (S.6-7) COST 323 „Weigh-in-Motion of Road Vehicles“ Final Report, 2002, S. 15
Horizontale Krümmung (Kurvenradius)	... im Bereich 60 m vor bis 30 m nach der Messstelle (nach ASTM) – angegeben als Radius	$\geq 1,7$ km	1,7 km	∞	BAST: TLB, 2012, (S. 57) ASTM: Standard Specification for Highway Weigh-In-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Methods (S.6)

Globale Einflussfaktoren – Messsystem

Faktor	Beschreibung / Kommentar	Standard-Wert	Min.	Max.	Quelle
Abstand Messstellen	Angaben abhängig von der erwarteten, durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeit	4 m	0,1 m	5 m	Kistler: Planning of a WIM Station (S. 17-23)
Anzahl Messstellen	Vogelperspektive auf Fahrbahn (horizontal): 4 Reihen, 2 Spalten vertikal ausgerichteter Sensoren; d. h. vier der Länge nach aneinandergereihte Sensoren entsprechen min. der Fahrbahnbreite	3	1	8	Kistler: Planning of a WIM Station (S. 17-23) Traffic Data Systems: Weigh-in-Motion Systems
Layout Messstellen	(noch zu definieren)				
Höhe / Tiefe des Sensors	Änderung im Straßenprofil	0 mm	-10 mm	+10 mm	

Globale Einflussfaktoren – Straße

Faktor	Beschreibung / Kommentar	Standard-Wert	Min.	Max.	Quelle
Neigung	... im Bereich 45 m vor bis 20 m nach der Messstelle	$\leq 2 \%$	0 %	2 % (betragsmäßig)	BAST: Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, 2012, (S. 57)
Steigung	... im Bereich 45 m vor bis 20 m nach der Messstelle	$\leq 2 \%$	0 %	2 % (betragsmäßig)	BAST: Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, 2012, (S. 57)
Neigungswechsel	„kein Wechsel von Quer- und Längsneigung oder größerer Unebenheiten (Kanten, unebene Brückenübergänge,..) innerhalb von 300 m vor und 20 m nach der Messstelle...“	keine	-	-	BAST: Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, 2012, (S. 57)
Rauigkeit	... im Bereich 45 m vor bis 20 m nach der Messstelle (nach BAST) – angegeben als Profiltiefe der Straßenoberfläche in Quer- und Längsrichtung unter einer 4 m langen Messlatte	2 mm	0 mm	4 mm	BAST: Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, 2012, (S. 57) ASTM: Standard Specification for Highway Weigh-In-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Methods (S.6-7) COST 323 „Weigh-in-Motion of Road Vehicles“ Final Report, 2002, S. 15
Horizontale Krümmung	... im Bereich 60 m vor bis 30 m nach der Messstelle (nach ASTM) – angegeben als Radius	$\geq 1,7 \text{ km}$	1,7 km	∞	BAST: Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, 2012, (S. 57) ASTM: Standard Specification for Highway Weigh-In-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Methods (S.6)

Globale Einflussfaktoren – Fahrzeug

Faktor	Beschreibung / Kommentar	Standard-Wert	Min.	Max.	Quelle
Typ	Es werden ca. 7 Varianten von Fahrzeugen für die Analyse berücksichtigt (von Klasse 1 bis 7 der COST 323 Klassifizierung) – siehe Seite 9 dieses Anhangs	Klasse 5 COST 323	Klasse 1 COST 323	Klasse 6 und 7 COST 323	COST 323 – Weigh in Motion of road vehicles IPG TruckMaker
Achszahl	vom Fahrzeugtyp abhängig – siehe Seite 9 dieses Anhangs	2+3	2+0	3+3	COST 323 – Weigh in Motion of road vehicles IPG TruckMaker
Bereifung	z. B. Single, Zwilling, Supersingle – vom Fahrzeugtyp abhängig	-	-	-	IPG TruckMaker
Gesamtgewicht	vom Fahrzeugtyp abhängig	30 t	3,5 t	40 t	IPG TruckMaker
Variation der Beladung		0 %	-30 %	+30 %	
vertikale Fahrwerksteifigkeit		Basiswert aus LKW-Modell	-20 %	+20 %	IPG TruckMaker
vertikale Fahrwerksdämpfung		Basiswert aus LKW-Modell	-20 %	+20 %	IPG TruckMaker
Reifenluftdruck	von Fahrzeugtyp und Beladung abhängig	Basiswert aus LKW-Modell	-30 %	+20 %	IPG TruckMaker

Archivierungsangaben

Globale Einflussfaktoren – Umgebung

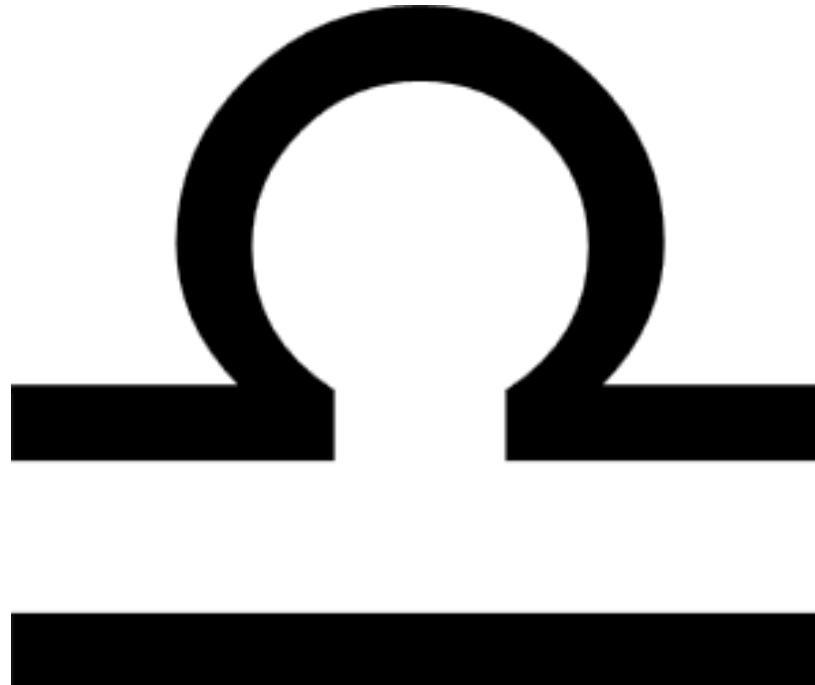
Faktor	Beschreibung / Kommentar	Standard-Wert	Min.	Max.	Quelle
Reibungsbeiwert der Straße (μ)	(beinhaltet auch eine Abschätzung des Einfluss von Wasserfilmen und der Temperatur)	0,9	0,2	1,1	<p>Untersuchung zum Aufbau eines Reibwertvorhersagesystem im fahrenden Fahrzeug, F. Klempau, TU Darmstadt, 2003, (S. 16ff)</p> <p>BAS: Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, 2012, (S. 126)</p> <p>COST 323 „Weigh-in-Motion of Road Vehicles“ Final Report, 2002, S. 19</p>
Wind-Intensität	konstant (abhängig von Faktoren wie Fahrzeuggewicht, Schwerpunktlage, Windangriffsfläche etc. – ab 40 % Abweichung zwischen linker und rechter Radlast ist Messung ungültig)	0 m/s	0 m/s	Windstärke 8	<p>Iowa State University Weigh-in-Motion Handbook: http://www.ctre.iastate.edu/research/wim_pdf/</p>
Wind-Winkel	konstant	0 deg	0 deg	359 deg	<p>BAS: Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, 2012, (S. 64)</p>

Globale Einflussfaktoren – Fahrmanöver

Faktor	Beschreibung / Kommentar	Standard-Wert	Min.	Max.	Quelle
Geschwindigkeit		80 km/h	5 km/h	120 km/h	BAS: Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, 2012, (S. 56)
Längsbeschleunigung	Angabe in Quelle für Bremsen und Beschleunigen, für die eine Messung gültig ist: $< 0,6 \text{ m/s}^2$	0,0 m/s ²	-5 m/s ²	1,5 m/s ²	ASTM: Standard Specification for Highway Weigh-In-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Methods (S.6)
Querbeschleunigung		0,0 m/s ²	-2,0 m/s ²	2,0 m/s ²	Evaluation of Factors Affecting WIM System Accuracy, F. Scheuter, 2000
Instationäre Manöver	<p>... ergeben sich aus Zusammensetzungen der oben beschriebenen Fahrzustände. Vorgesehen sind:</p> <p><u>Bremsen</u> (Variation von Geschwindigkeit, Intensität Längsbeschleunigung und Startpunkt)</p> <p><u>Beschleunigen</u> (Variation von Geschwindigkeit, Intensität Längsbeschleunigung und Startpunkt)</p> <p><u>Spurwechsel</u> (Variation von Geschwindigkeit, Intensität Querbeschleunigung)</p>				

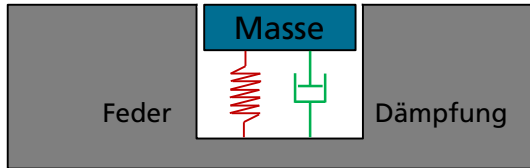
ANHANG B DES FACHBERICHTS ZUM VORHABEN LIBRA – LASTEN IN BEWEGUNG RECHTSSICHER AUFZEICHNEN

Ergebnisse der Einflussfaktoren der Sensorsimulation (AP 2.1)

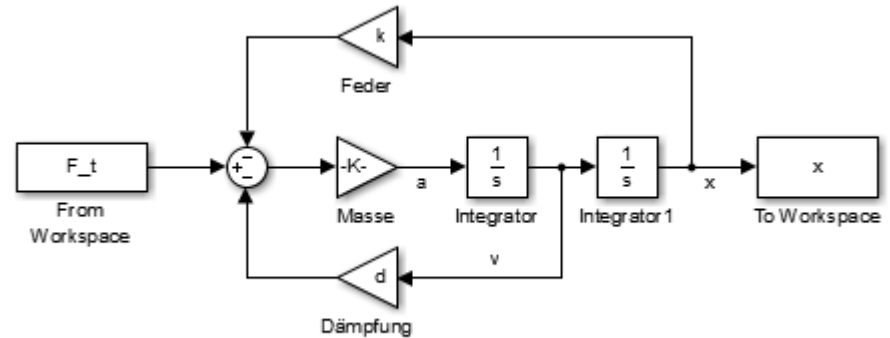


Grundlagen Sensormodell

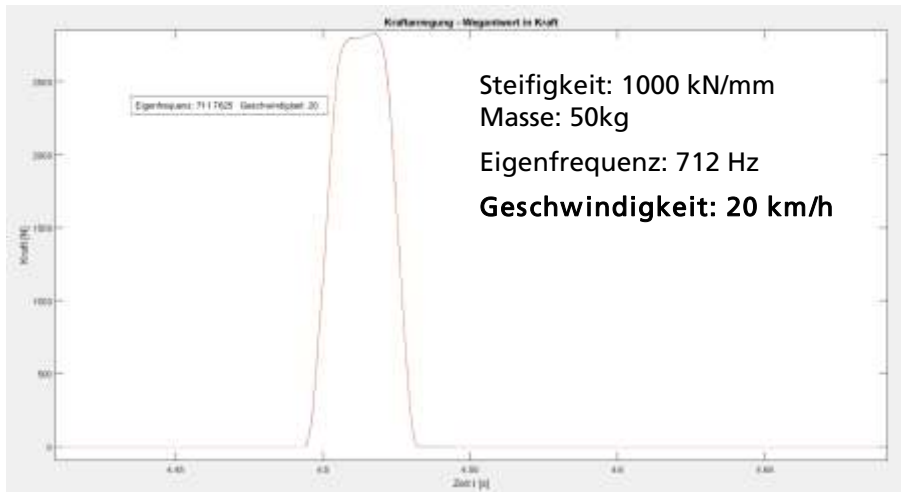
Mechanisches Ersatzmodell



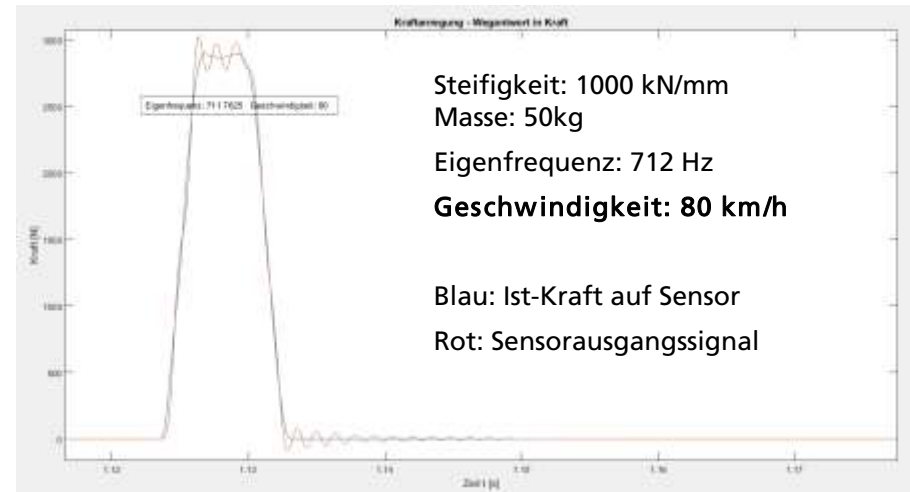
Simulationsmodell Simulink



Kraftverlauf Sensorüberfahrt: 20 km/h



Kraftverlauf Sensorüberfahrt: 80 km/h



Anhang B des Fachberichts zum Vorhaben LiBra – Lasten in Bewegung rechtssicher aufzeichnen – Seite 12

AP 2.1: Sensormodell Simulationsplan

Nr.	Einflussfaktoren	Standard	Variation	Einheit
	Faktoren Sensor:			
1	Eigenfrequenz f (Steifigkeit, Masse)	5.000 Hz	[200,500,1000,2000,5000,1000]	Hz
	→ Steifigkeit k	$k = f \cdot 2\pi \cdot 75$	Ergibt sich aus Eigenfrequenz	N/mm
	→ Masse m	$m = 75.000 / (f \cdot 2\pi)$	Ergibt sich aus Eigenfrequenz	kg
3	CrossTalk (Übersprechen)	0%	[-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3]	%
4	Empfindlichkeitsänderung durch Temperatur	20°C	[-20, 0, 20, 40, 60] * 0,02 % / °C (Ansatz als Normalverteilung)	% / °C
5	Genauigkeitsklasse	%	[Min:0.1% Typ:1% Max:5%] Variation nicht in Simulationsmodell berücksichtigt	%
	Faktoren Messsystem & Auswertung:			
7	Abtastrate & Filter	10.000	[100,200,300,400,500,1000,2000,5000,10000]	Hz
8	Auflösung	24	[12,14,16,24]	bit
9	Geschwindigkeitsmessung	0	[-3,-2,-1,0,1,2,3] Messfehler (Ansatz als Normalverteilung)	%
10	Auswertealgorithmus	Integral	[Integral, Peak]	

Auswertelgorithmen

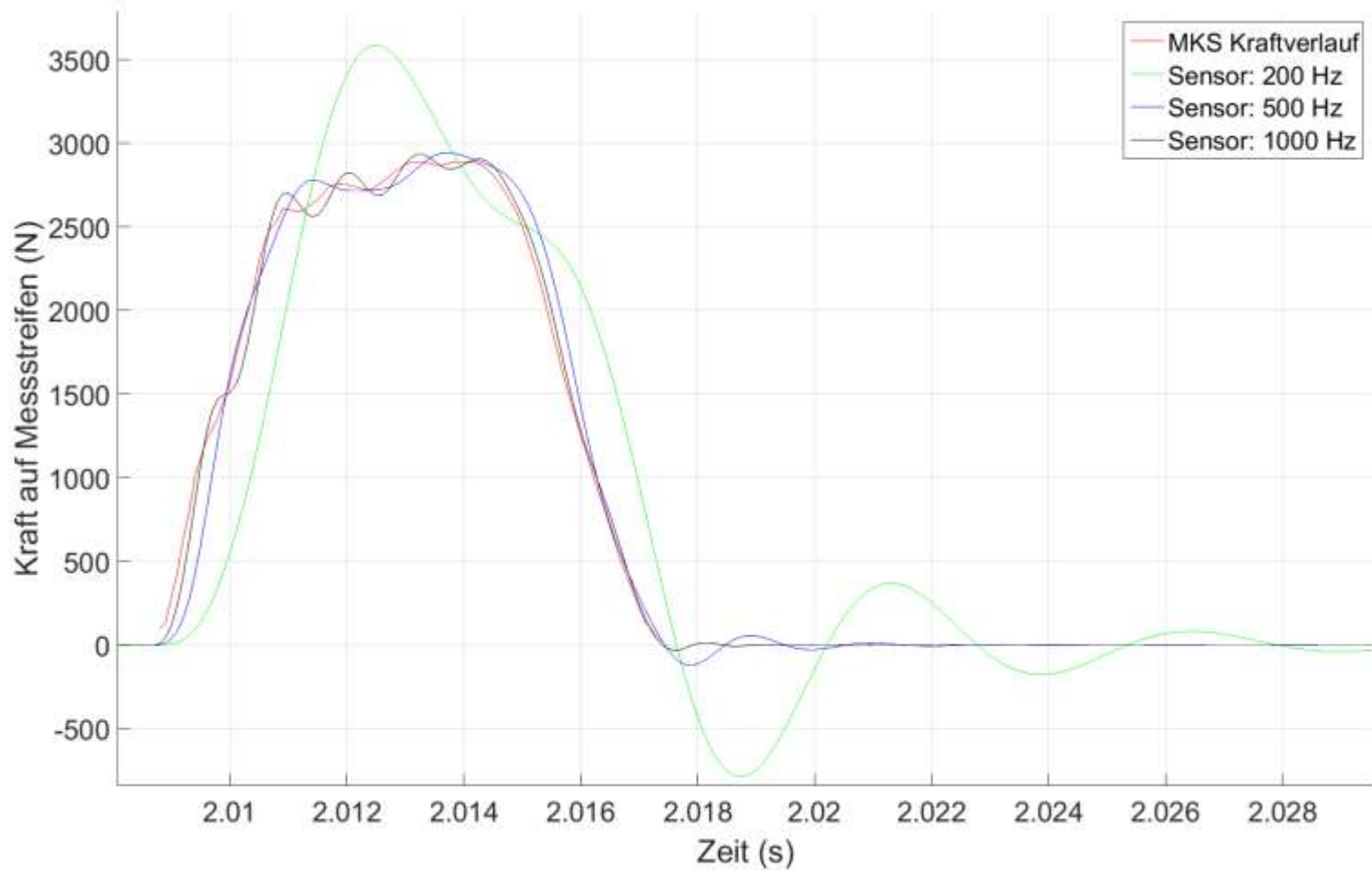


Auswertelgorithmen:

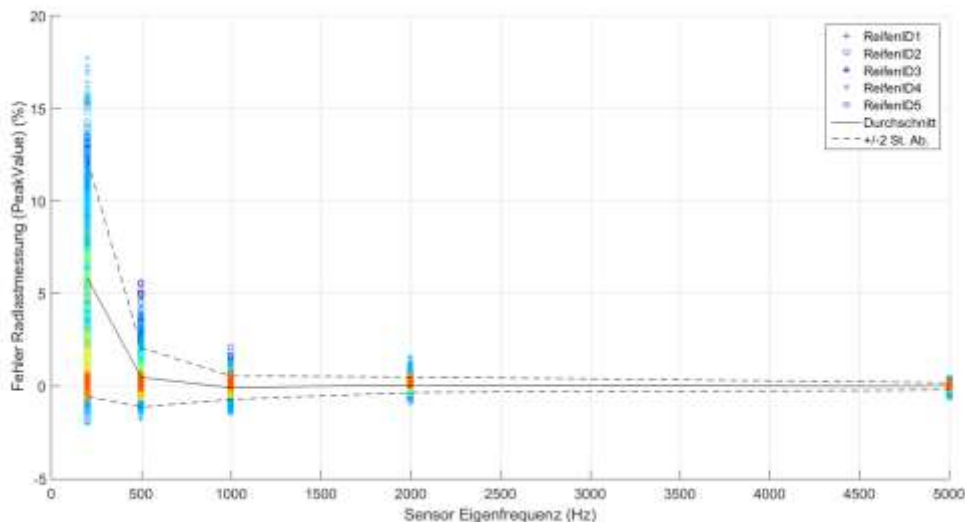
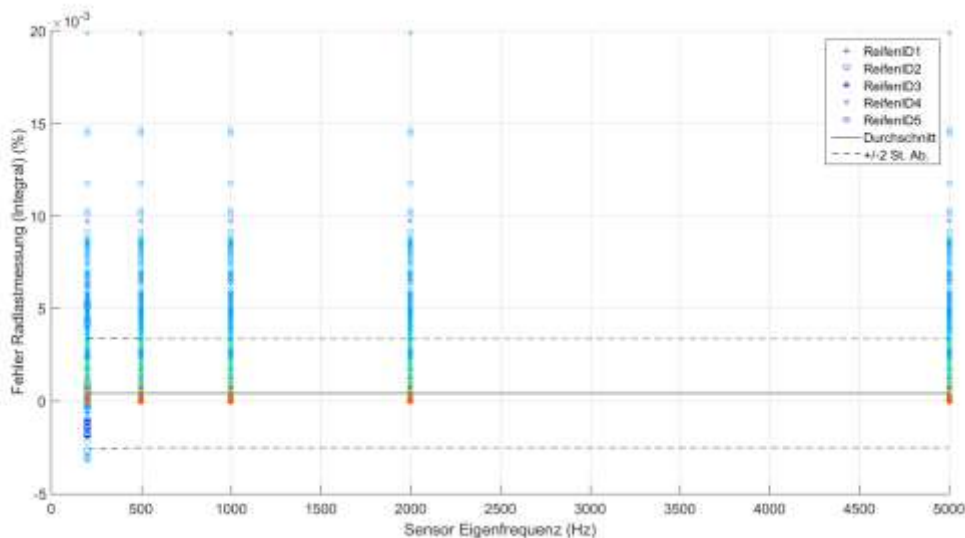
- Peak Load
→ Ähnlich einer klassischen Waage
- Integral = Fläche * Geschwindigkeit / Messstreifenbreite
→ z.B. Auswertung der Kistler Lineas Sensoren

Anhang B des Fachberichts zum Vorhaben LiBra – Lasten in Bewegung rechtssicher aufzeichnen – Seite 14

Eigenfrequenz



Eigenfrequenz



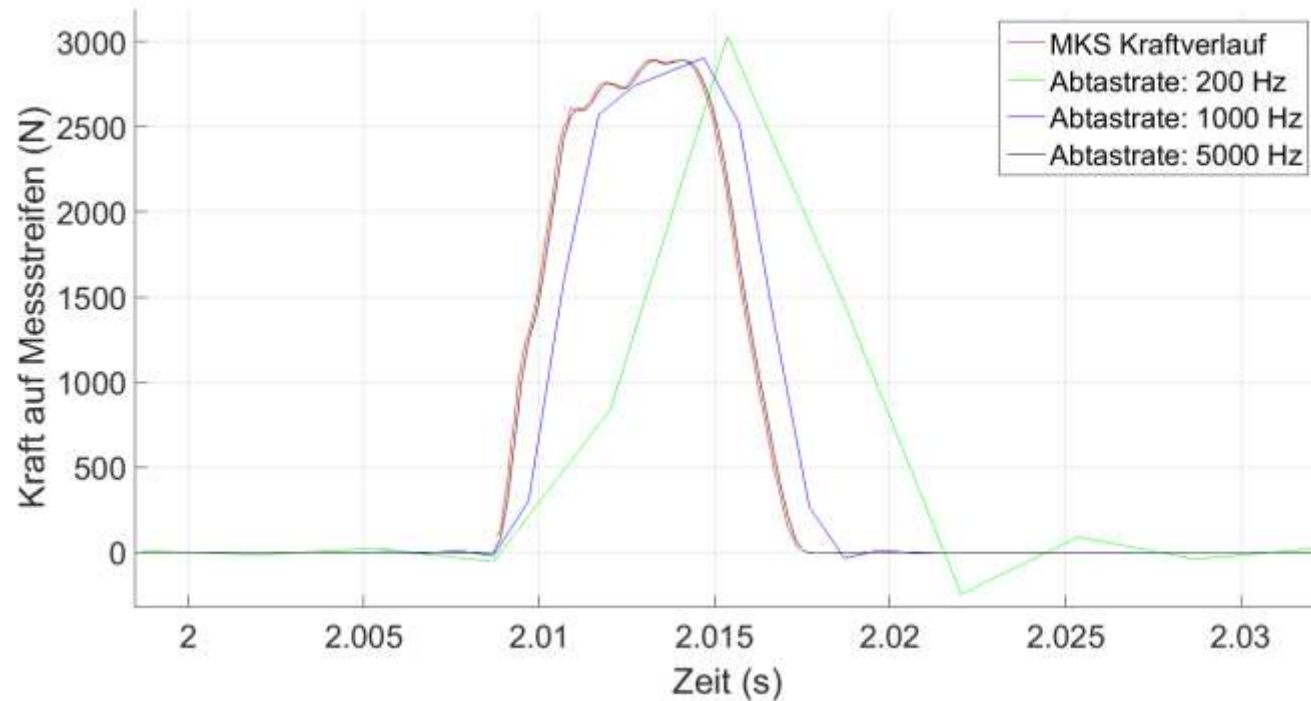
Integral:

- Kein Einfluss der Eigenfrequenz auf die Messgenauigkeit erkennbar.
- Achtung: Sensor und Straße sind nicht nachgiebig modelliert. Bei großen Verformungen des Sensors ist mit einer Verfälschung der Lasten zu rechnen.

Peak Load:

- Deutlicher Einfluss der Eigenfrequenz ersichtlich.
- Sehr großer Fehlereinfluss bei niedrigen Eigenfrequenzen

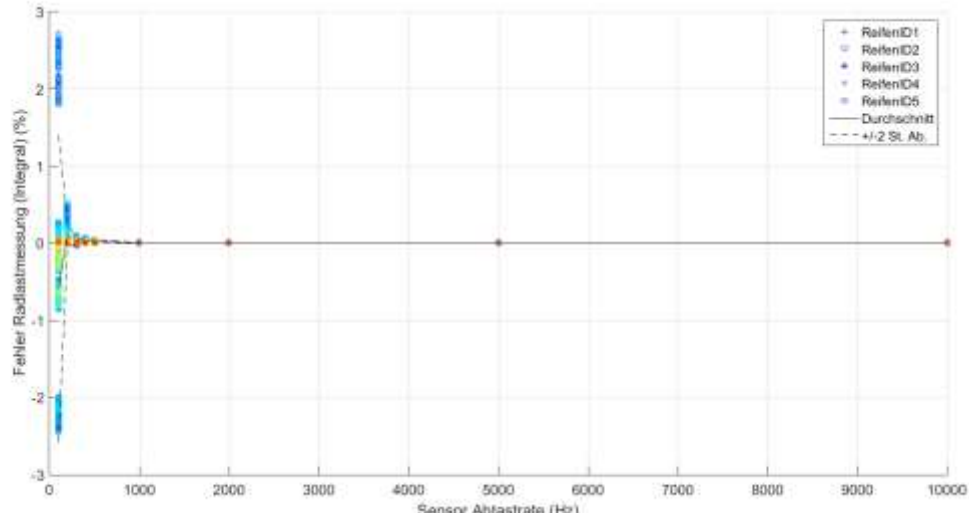
Abtastrate und Filter



Abtastrate und Filter:

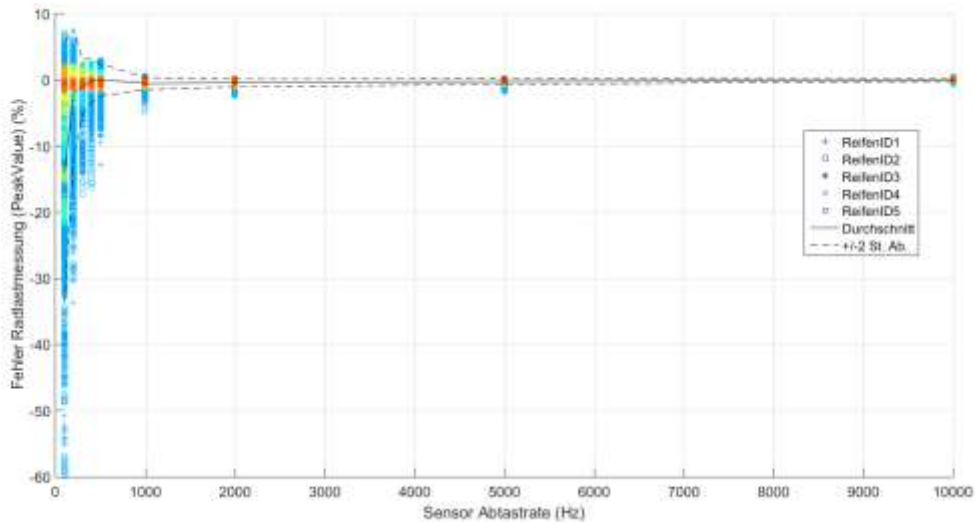
- In der Simulation wurden Abtastraten im Bereich von 100Hz - 10.000Hz untersucht.
- Zusammen mit der Abtastrate wurde ein Anti Aliasing Filter vom Typ „Butterworth“, 4. Ordnung mit einer Filtereckfrequenz der halben Abtastrate angewendet.

Abtastrate und Filter < 1000Hz



Integral:

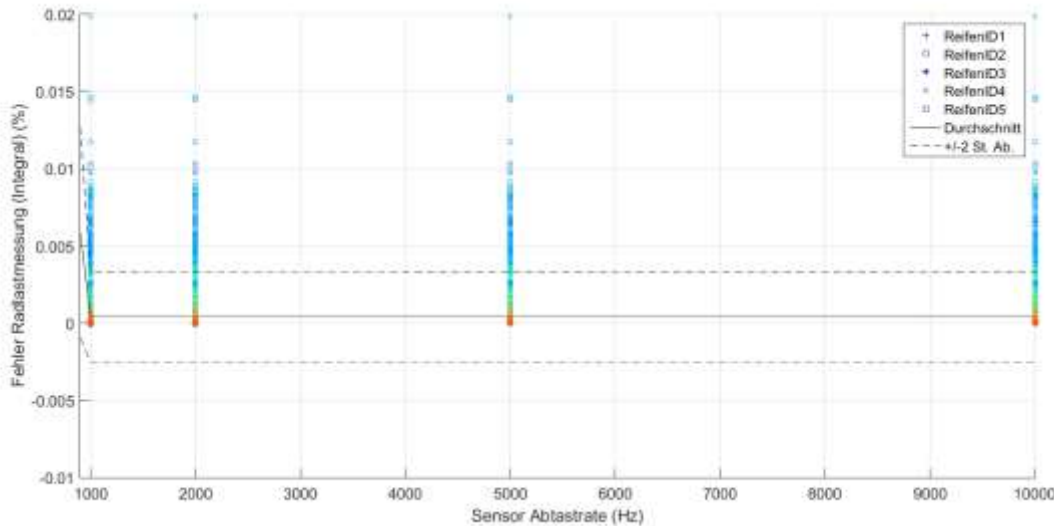
- Bei niedrigen Abtastraten <1000Hz steigt der Fehler der Radlastmessung deutlich an.



Peak Load:

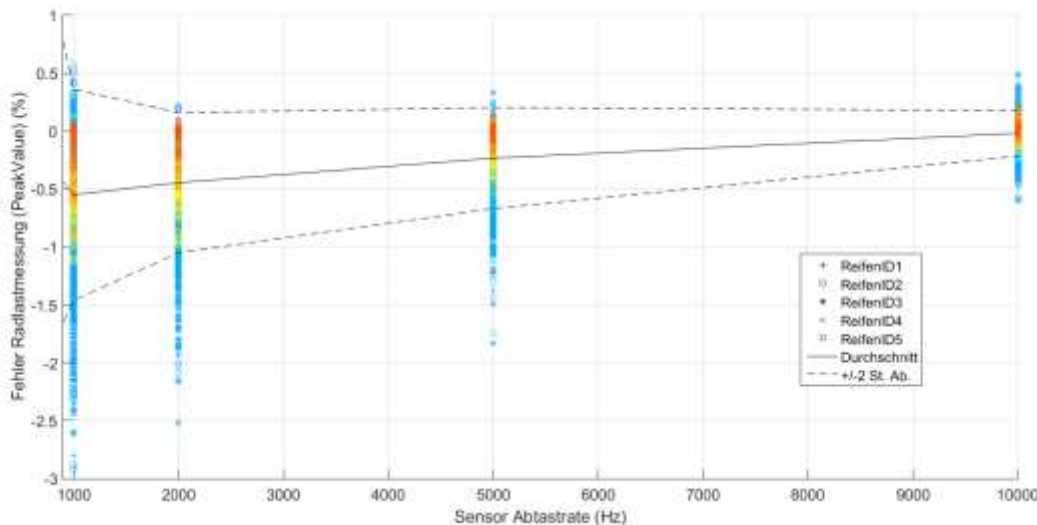
- Sehr großer Einfluss bei niedriger Abtastrate < 1000Hz.

Abtastrate und Filter >1000Hz



Integral:

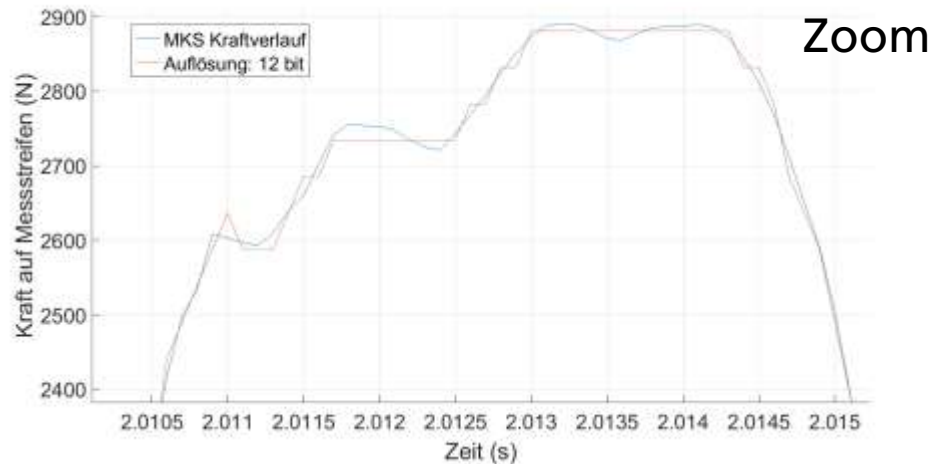
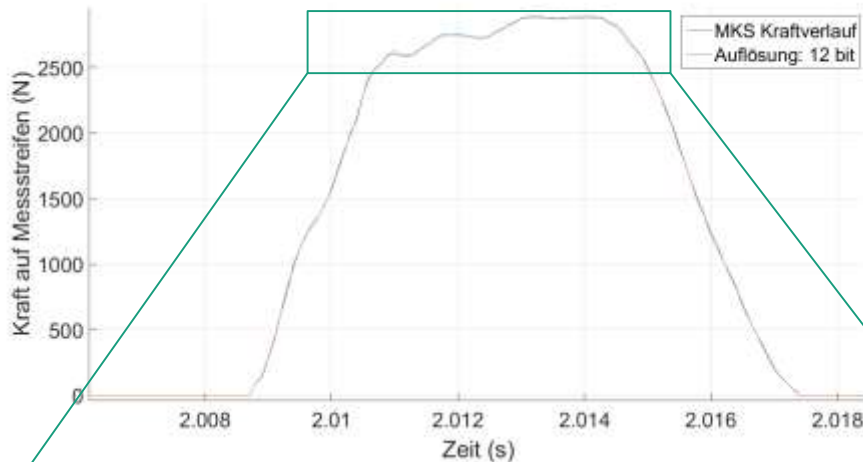
- Bei Abtastraten >1000Hz praktisch kein Einfluss der Abtastrate mehr erkennbar.



Peak Load:

- Einfluss der Abtastrate größer als bei Integral Auswertung. Fehlereinfluss nimmt mit steigender Abtastrate kontinuierlich ab.

Auflösung



Archivierungsangaben

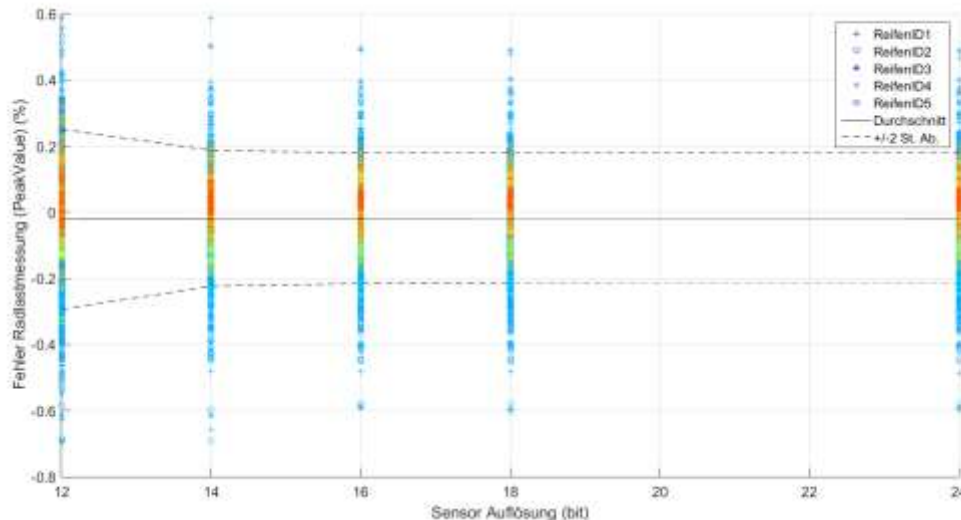
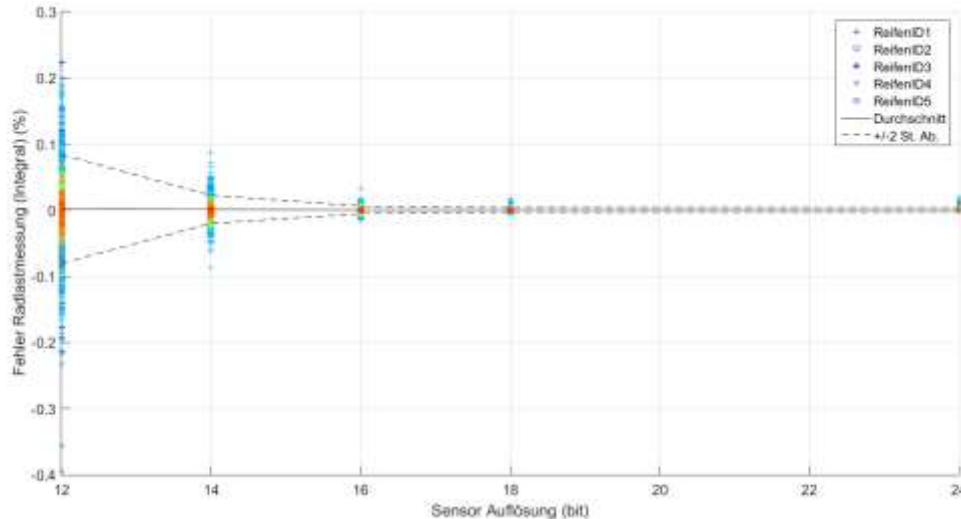
Integral:

- Die Analog-Digital Wandler der Messsysteme haben verschiedene Auflösungen. Die Auflösung ist ein Maß wie viele unterschiedliche Werte ein Messsignal annehmen kann.
- Die Auflösung wird in bit angegeben
Wertzahl = 2^{bit}
12 bit \rightarrow 4096 Werte

Annahmen:

- Signalbereich Messverstärker:
+/- 100 kN
 \rightarrow z.B. bei 12 bit kleinste Wertunterteilung 48N

Auflösung



Integral:

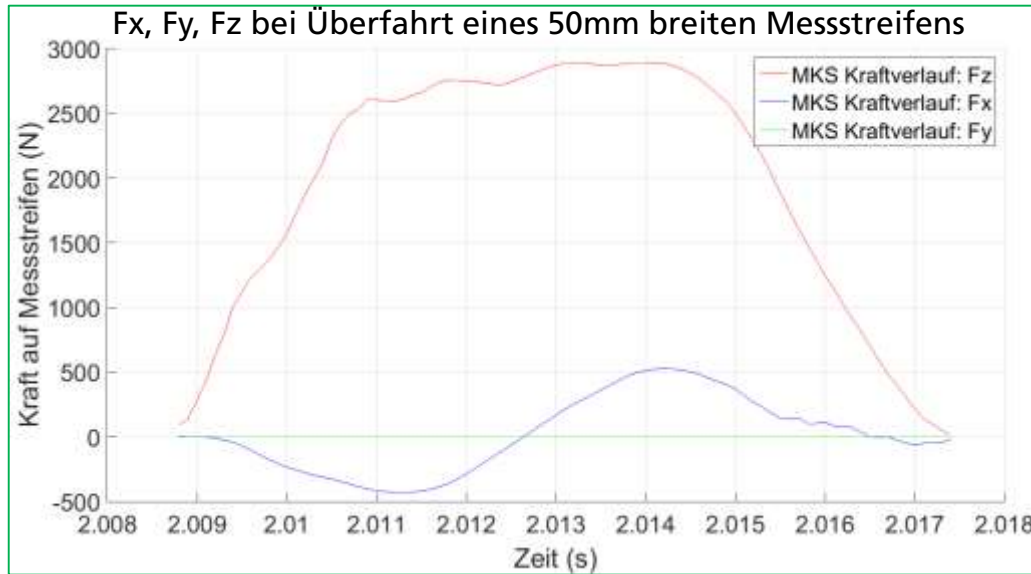
- Der Einfluss der Auflösung auf den Messfehler ist eher gering.
- Bei Auflösungen <16 bit ist ein Anstieg des Messfehlers zu erkennen.

Peak Load:

- Der Einfluss der Auflösung ist etwas geringer als bei der Integral Auswertung.

Übersprechen

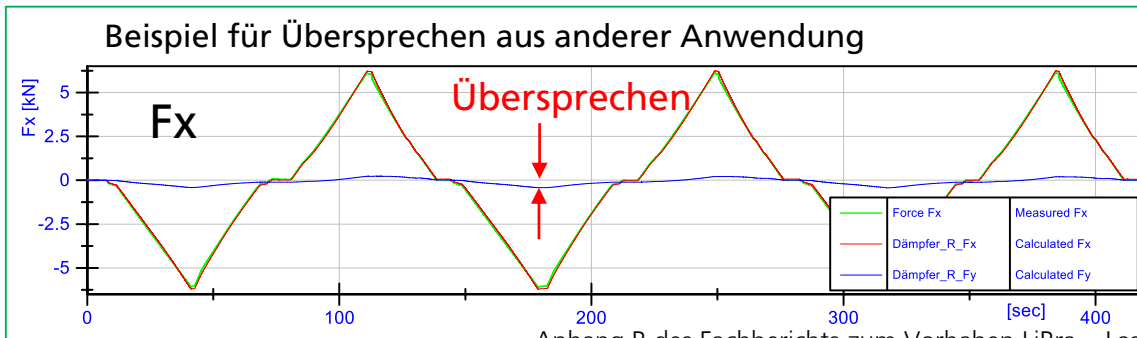
Signalverfälschung durch Querkräfte



Technische Daten Typ 9027C, 9028C

Bereich	F_x, F_y	kN	-4 ... 4	¹⁾
	F_z	kN	-8 ... 8	¹⁾
	F_z	kN	0 ... 28	²⁾
Überlast	F_x, F_y	kN	-5/5	¹⁾
	F_z	kN	-10/10	¹⁾
Kalibrierter Bereich	F_x	kN	0 ... 4	¹⁾
	F_y	kN	0 ... 4	¹⁾
	F_z	kN	0 ... 8	¹⁾
	F_z	kN	0 ... 28	²⁾
Zulässige Momentbelastung	M_x, M_y	N-m	-22/22	¹⁾
	M_z	N-m	-23/23	¹⁾
Ansprechschwelle		N	<0,01	
Empfindlichkeit	F_x, F_y	pC/N	-7,8	¹⁾
	F_z	pC/N	-3,8	¹⁾
Linearität, jede Achse		%FSO	≤±0,25	¹⁾
Hysterese, jede Achse		%FSO	≤±0,25	¹⁾
Übersprechen	$F_z \rightarrow F_x, F_y$	%	≤±0,5	¹⁾
	$F_x \leftrightarrow F_y$	%	≤±2	¹⁾
	$F_x, F_y \rightarrow F_z$	%	≤±3	¹⁾
Betriebstemperaturbereich		°C	-40 ... 120	

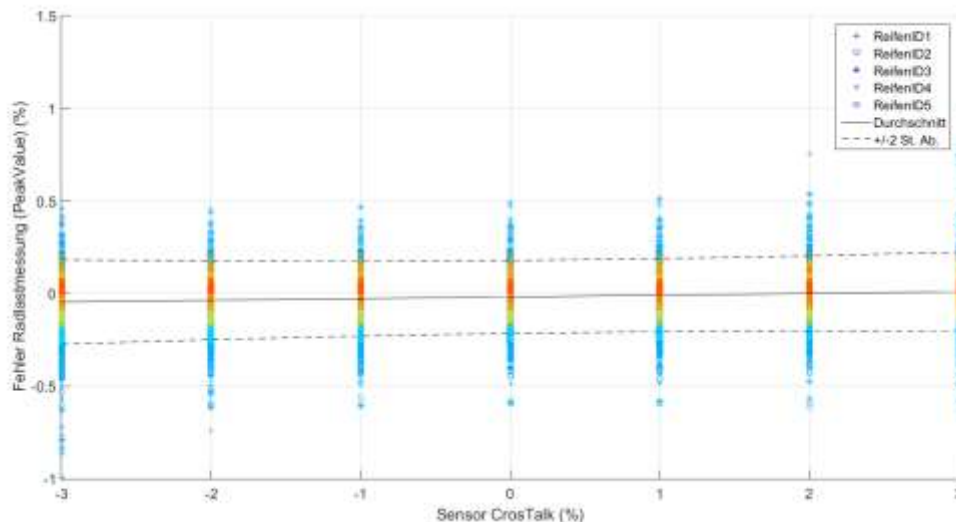
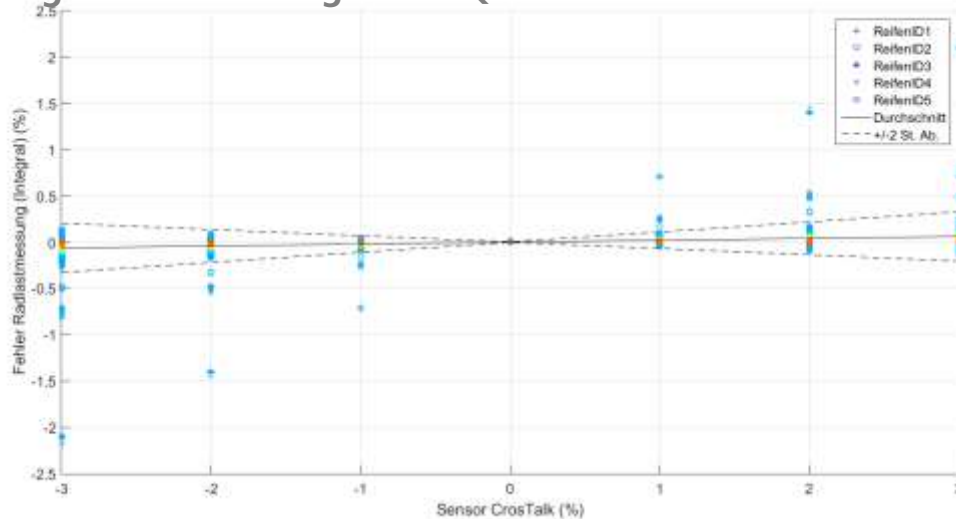
Archivierungsangaben



Anhang B des Fachberichts zum Vorhaben LiBra – Lasten in Bewegung rechtssicher aufzeichnen – Seite 22

Übersprechen

Signalverfälschung durch Querkräfte



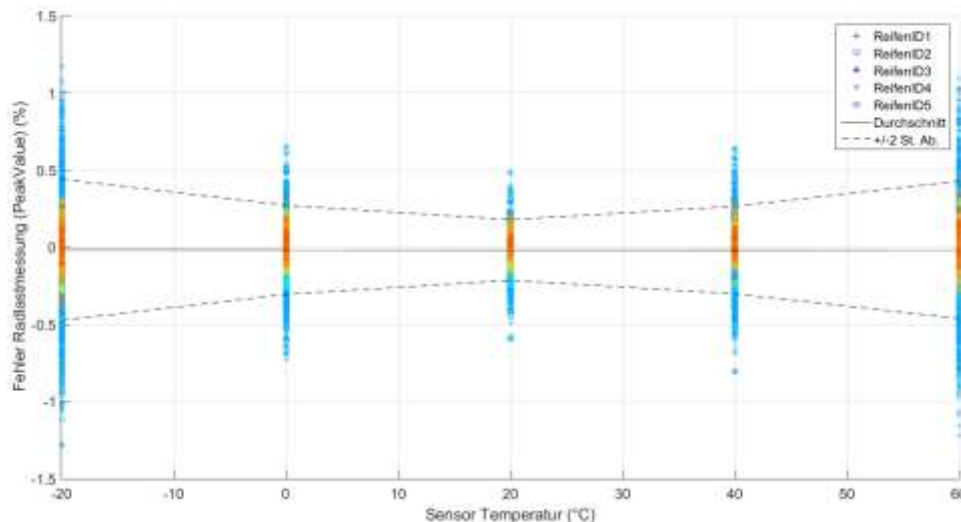
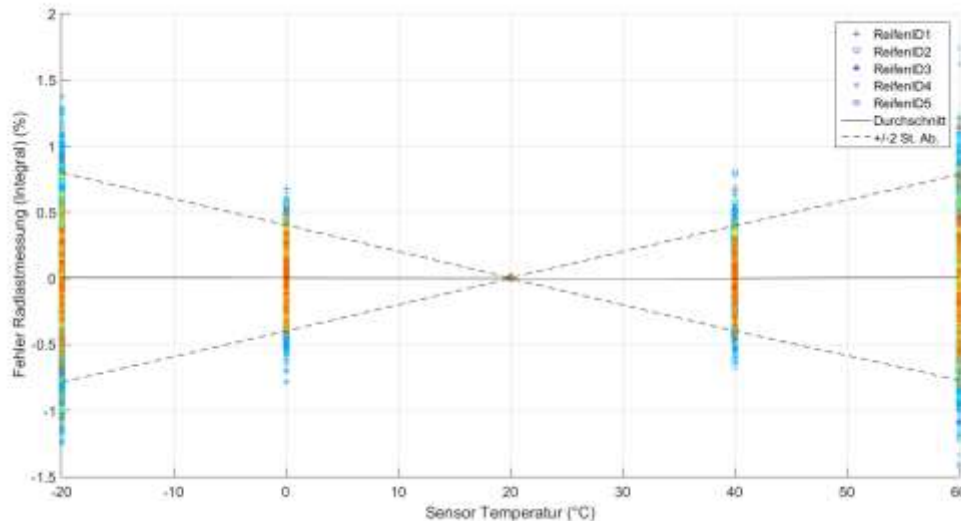
Integral:

- Mit dem Übersprechen steigt der Einfluss auf die Messgenauigkeit linear.
- Achtung: Übersprechen wurde als linearer Faktor auf Querkräfte modelliert. In der Realität ist diese Annahme häufig nicht zutreffend.

Peak Load:

- Einfluss auf Messgenauigkeit kleiner als bei Integral Auswertung.

Empfindlichkeitsänderung durch Temperatur



Integral:

- Annahme: Empfindlichkeitsänderung ist Normalverteilt mit $\mu=0$ und $2\sigma= 0,02 \% / ^\circ\text{C}$
- Linearer Einfluss auf Messgenauigkeit erkennbar.

Peak Load:

- Annahme: Empfindlichkeitsänderung ist Normalverteilt mit $\mu=0$ und $\sigma= 0,02 \% / ^\circ\text{C}$
- Einfluss auf die Messgenauigkeit geringer als bei Integral Auswertung.

Geschwindigkeitsmessung

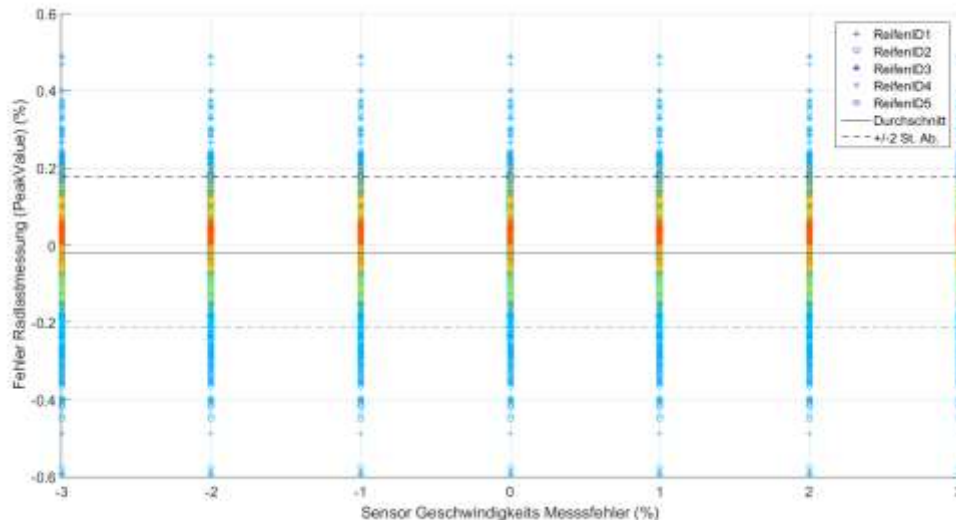
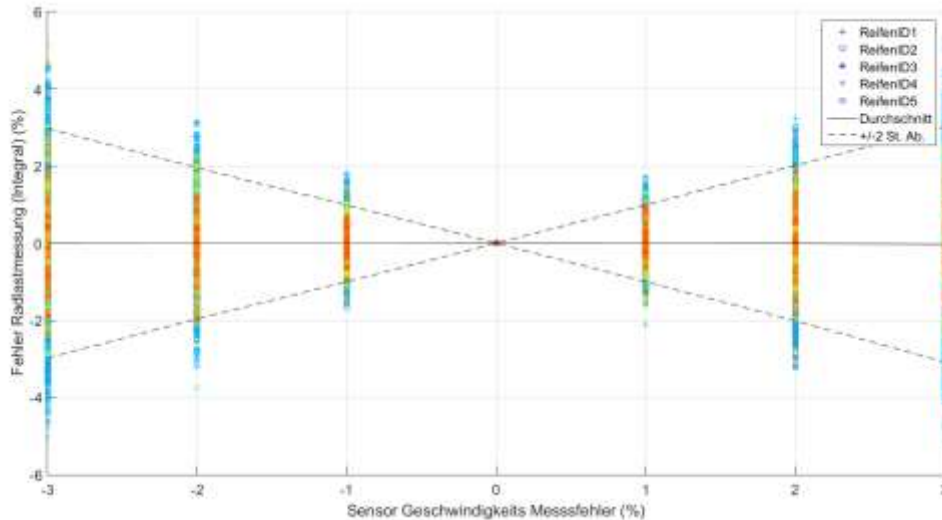


Auswertelgorithmen:

- Peak Load
→ Ähnlich einer klassischen Waage
- Integral = Fläche * **Geschwindigkeit** / Messstreifenbreite
→ z.B. Auswertung der Kistler Lineas Sensoren

Anhang B des Fachberichts zum Vorhaben LiBra – Lasten in Bewegung rechtssicher aufzeichnen – Seite 25

Geschwindigkeitsmessung



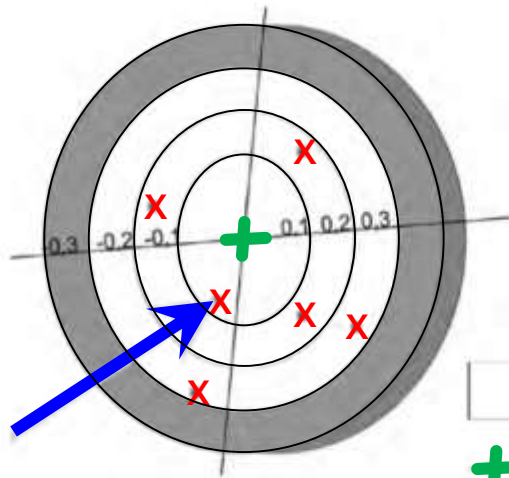
Integral:

- Annahme: Der Geschwindigkeitsmessfehler ist Normalverteilt mit $\mu=0$ und $\sigma=xx\%$
- Die Geschwindigkeitsmessung zeigt den erwarteten linearer Einfluss auf den Streubereich der Messgenauigkeit.

Peak Load:

- Kein Einfluss der Geschwindigkeitsmessung auf die Peak Load Auswertung.

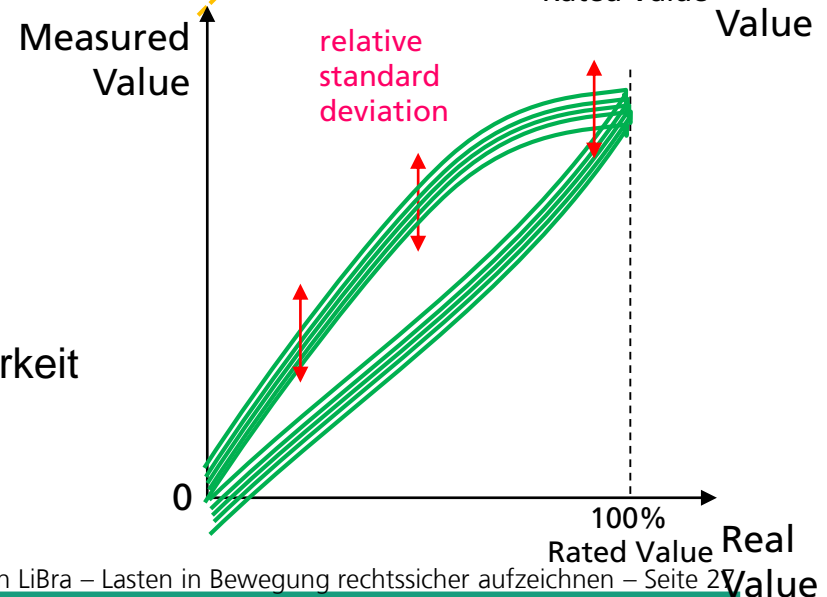
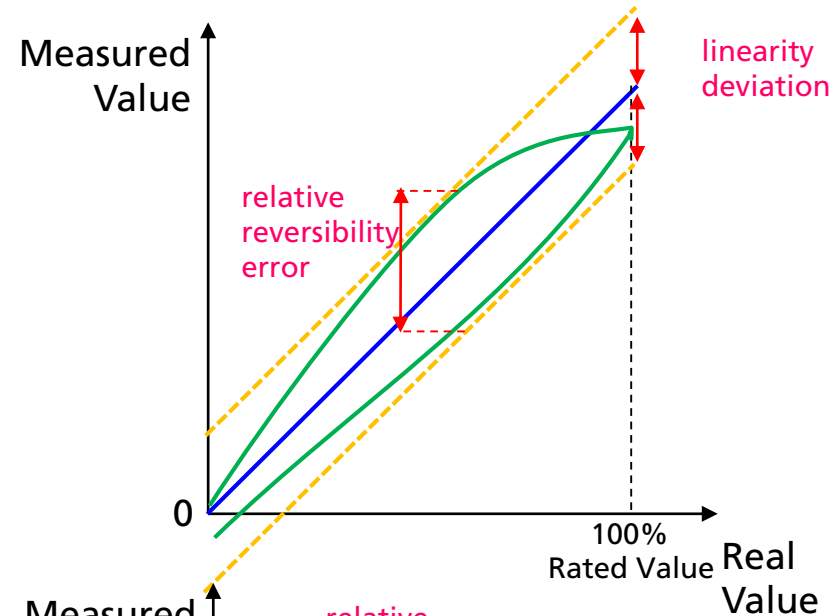
Genauigkeitsklasse



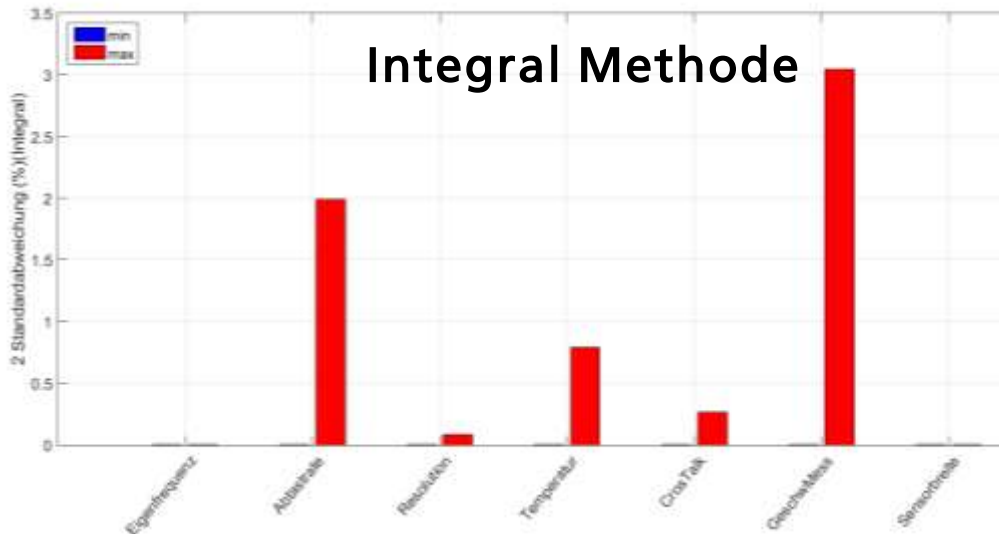
- Uncertainty
- ⊕ Real Value
- × Measured value

Die Genauigkeitsklasse beinhaltet die folgenden messtechnischen Kenngrößen:

- Linearitätsabweichung inklusive Hysterese
- Relative Standard Abweichung der Wiederholbarkeit
- Temperatur Effekte auf das Nullsignal und die Sensitivität



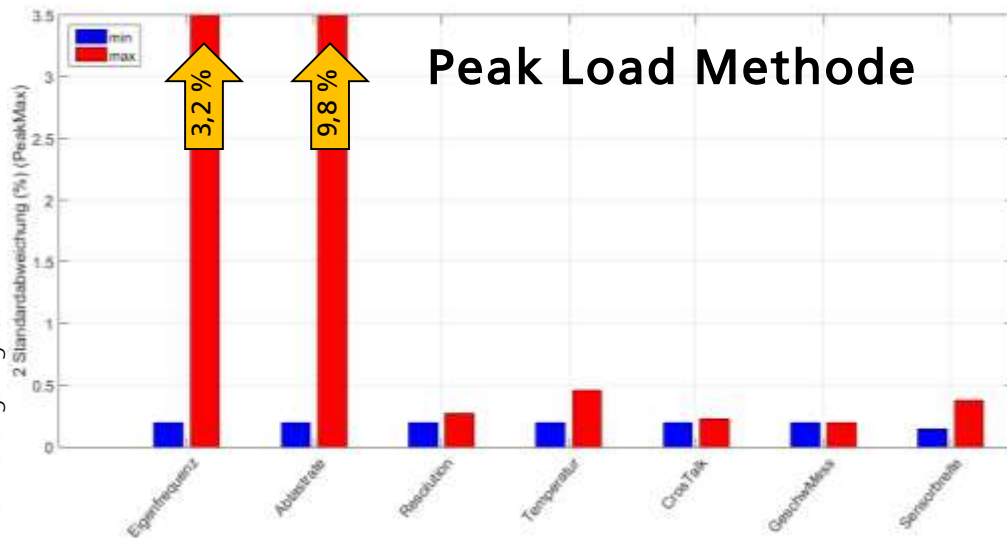
Vergleich der Einflüsse auf die Messgenauigkeit



Erklärung:

Die Balken zeigen jeweils die Minima und Maxima der 2σ Streubereiche, der einzelnen Parameter. Je größer der Unterschied zwischen Minima und Maxima, desto größer ist das Potential, dass mit Optimierung dieses Parameters eine Steigerung der Messgenauigkeit erzielt werden kann.

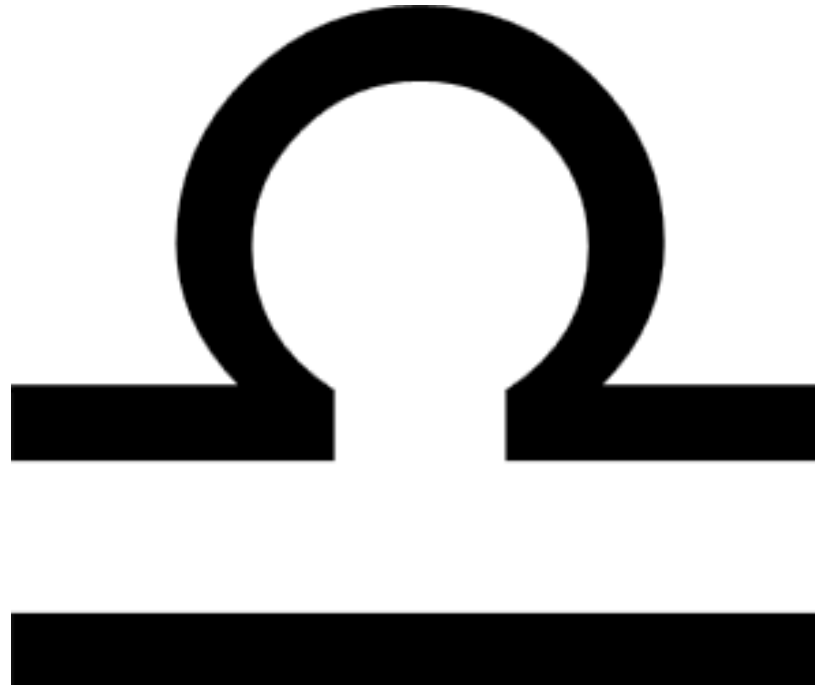
Archivierungsangaben



Anhang B des Fachberichts zum Vorhaben LiBra – Lasten in Bewegung rechtssicher aufzeichnen – Seite 28

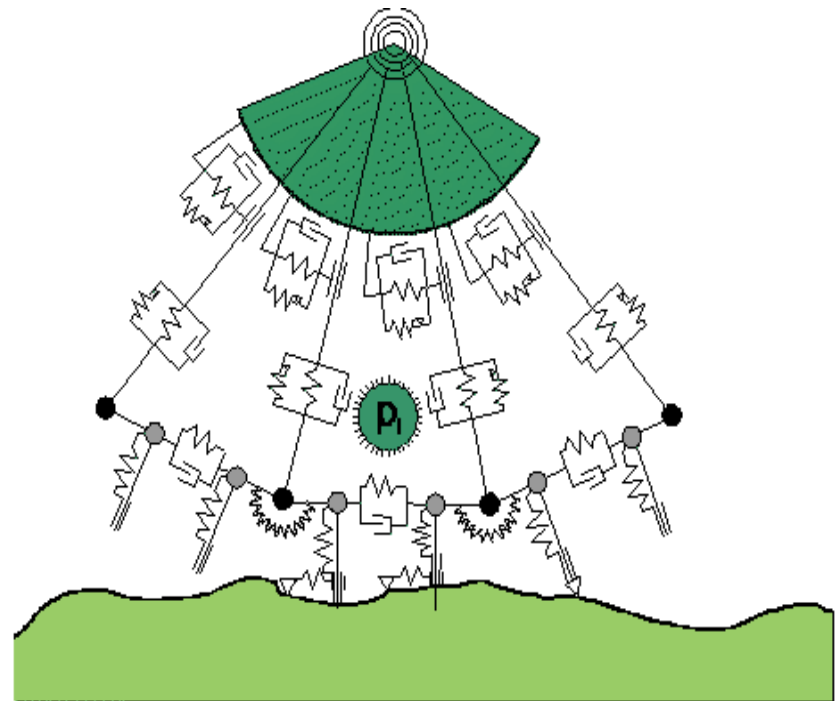
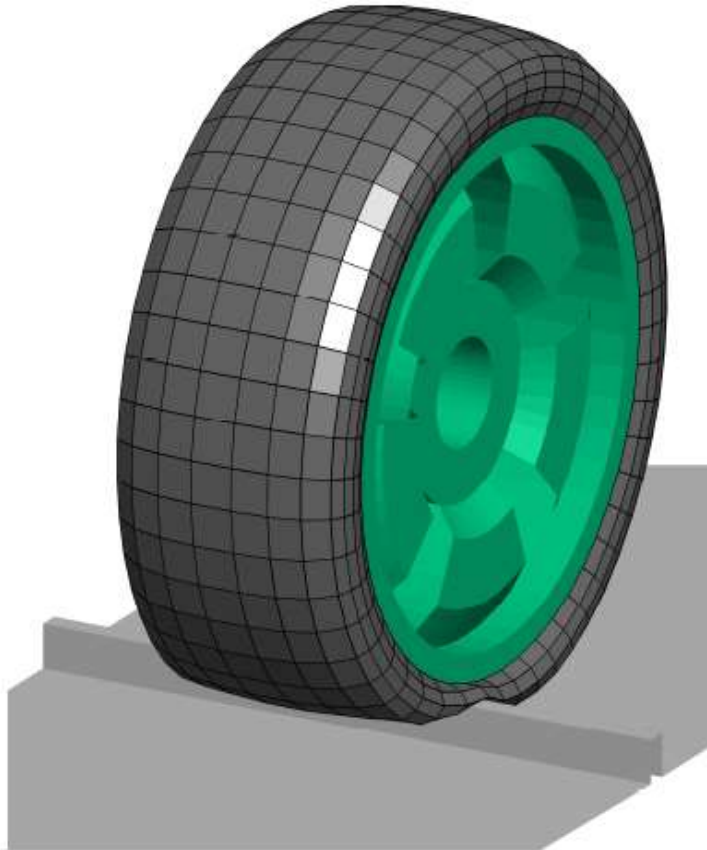
ANHANG B DES FACHBERICHTS ZUM VORHABEN LIBRA – LASTEN IN BEWEGUNG RECHTSSICHER AUFZEICHNEN

Ergebnisse der Einflussfaktoren der MKS des lokalen Sensor-Reifen-Kontaktes (AP 2.2)



CDTire-Reifenmodell

3D-Ansicht und schematischer Aufbau

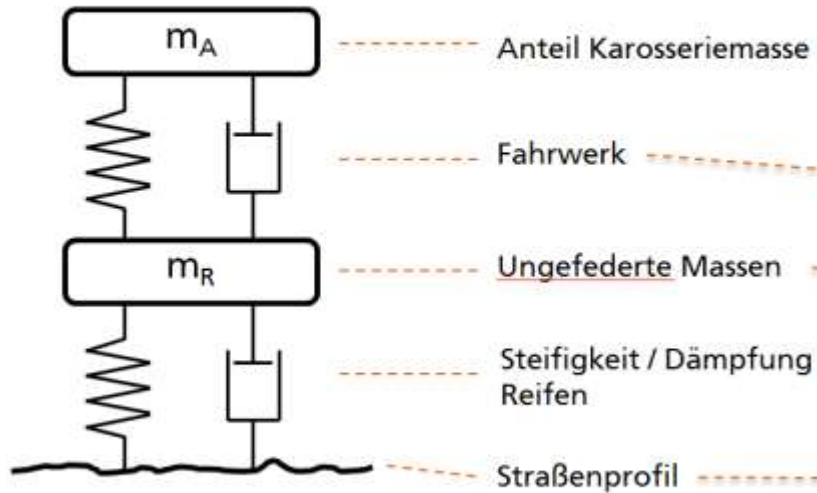


Archivierungsangaben

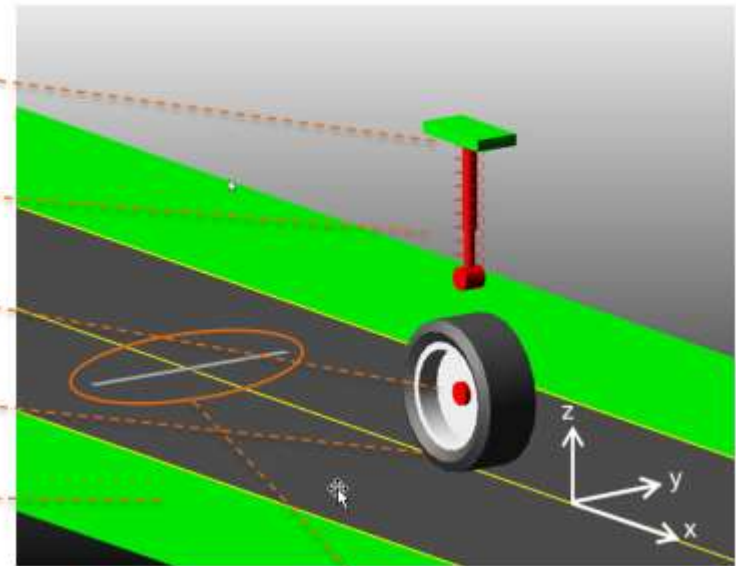
Viertelfahrzeugmodell

Realisierung in MSC.Adams und analoges 2-Massen-Model

Prinzip



Umsetzung in MSC.ADAMS View



Sensorstreifen

Einflussfaktoren und Wertebereiche für die lokale Analyse

Nr.	Einflussfaktoren	Standard	Variation	Einheit
Allgemeine Faktoren:				
1	Geschwindigkeit	90	[5, 20, 40, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120]	km/h
2	Schlupfwinkel	0	[-2, -1, 0, 1, 2]	°
3	Sturzwinkel	0	[-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5]	°
4	Schlupf	0	[-10, -8, -6, -4, -2, 0, 2, 4, 6, 8, 10]	%
5	Faktor Aufbaumasse	1	[0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6]	-
6	Faktor Vertikalsteifigkeit Fahrwerk	1	[0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6]	-
Faktoren Sensor:				
7	Sensorwinkel	0	[-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5]	°
8	Sensorhöhe	0	[-10, -8, -6, -4, -2, 0, 2, 4, 6, 8, 10]	mm
9	Sensorbreite in x-Richtung	50	[50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800]	mm
Faktoren Reifen:				
10	Faktor Luftdruck	1	[0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2]	-
11	Radialer Versatz Reifenschwerpunkt	0	[0, 1, 2, 3, 4, 5]	mm
12	Radialer Versatz Rotationsachse	0	[0, 1, 2, 3, 4, 5]	mm
Faktoren Straße:				
13	Reibungskoeffizient	0.9	[0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1]	-
14	Straßensteigung x-Richtung	0	[0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5]	°
15	Straßenneigung y-Richtung	0	[0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5]	°
16	Horizontaler Radius	inf	[1.7, 3, 5, 10, 20, inf]	km
17	Rauheit (Amplitude)	1	[0, 0.5, 1, pi, 2pi, 3pi, 4pi]	m/rad

Anhang C des Fachberichts zum Vorhaben LiBra – Lasten in Bewegung rechtssicher aufzeichnen – Seite 32

Reifentypen der lokalen Analyse

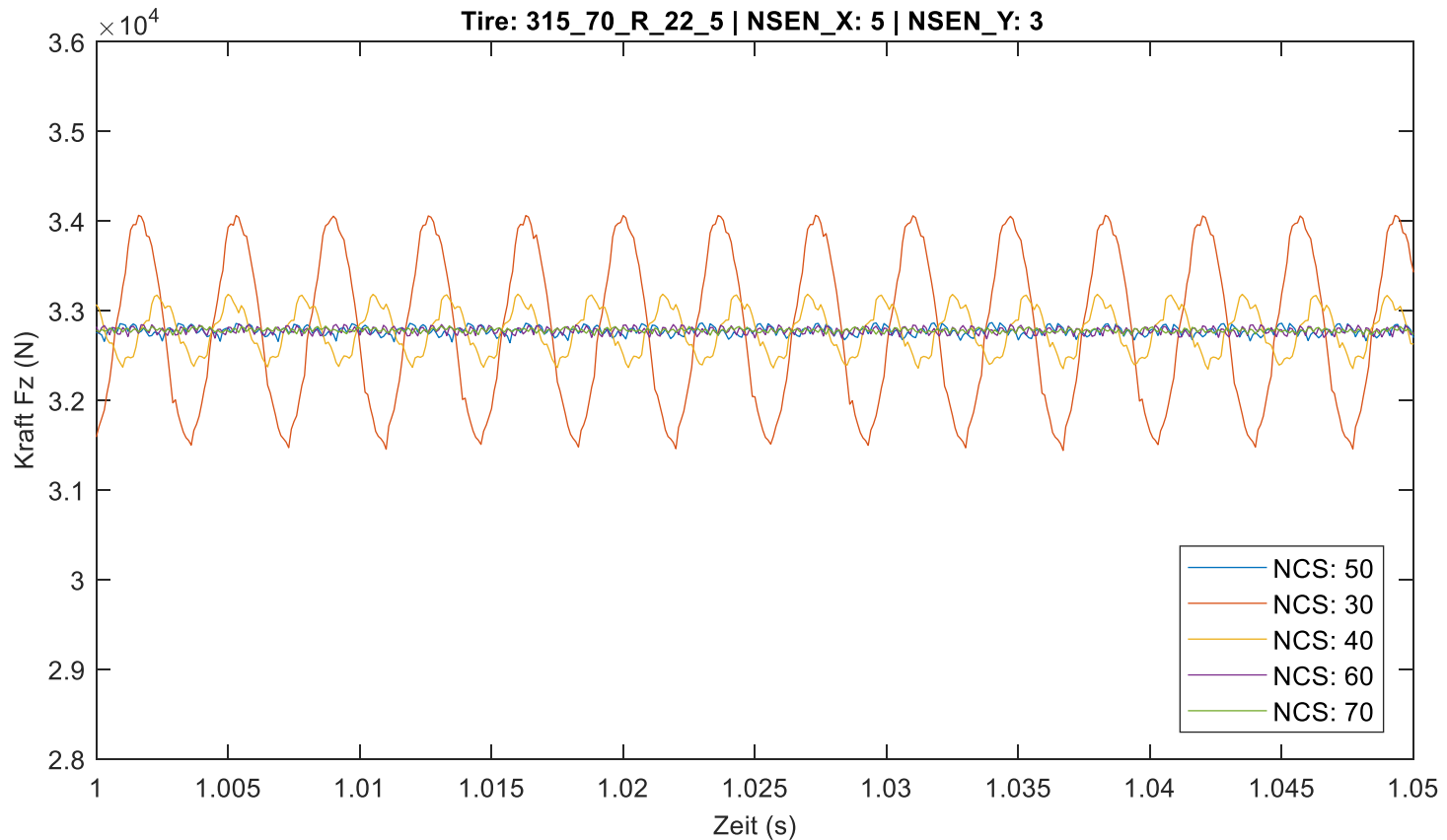
Reifenbezeichnungen und Positionen am Fahrzeug

Reifen-Nr.	Bezeichnung	Position
1	225 / 65 R 16	Zugmaschine Vorderachse
2	215 / 75 R 17.5	Zugmaschine Vorderachse
3	265 / 70 R 19.5	Trailer hintere Achse
4	315 / 70 R 22.5	Zugmaschine Vorderachse
5	385 / 65 R 22.5	Trailer mittlere Achse

Konvergenzanalyse CDTire-Reifenmodell

Kontaktkraft in Abhängigkeit der CDTire-Massepunkte, ideale Straße

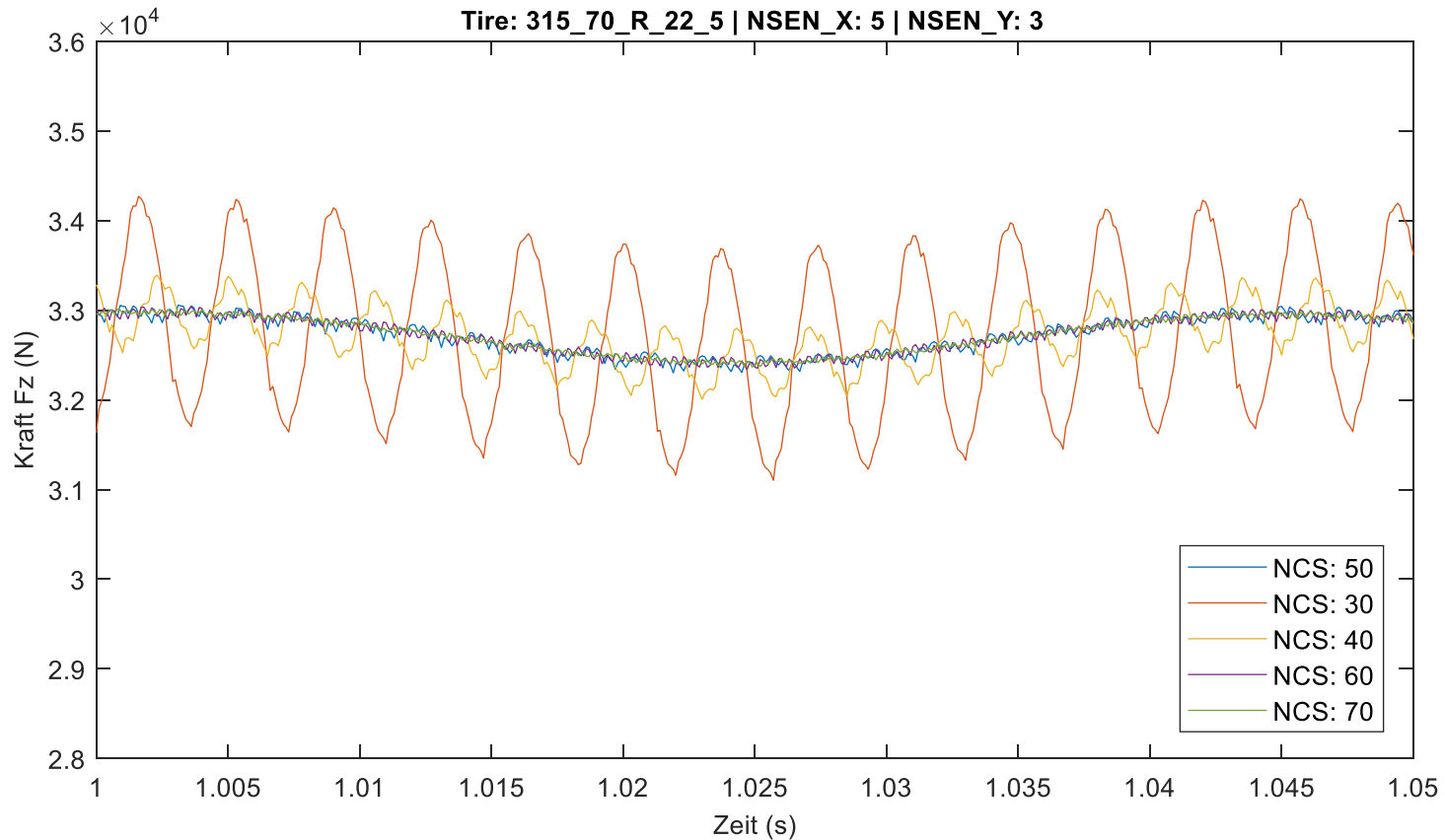
$$AUN = 0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{rad}$$



Konvergenzanalyse CDTire-Reifenmodell

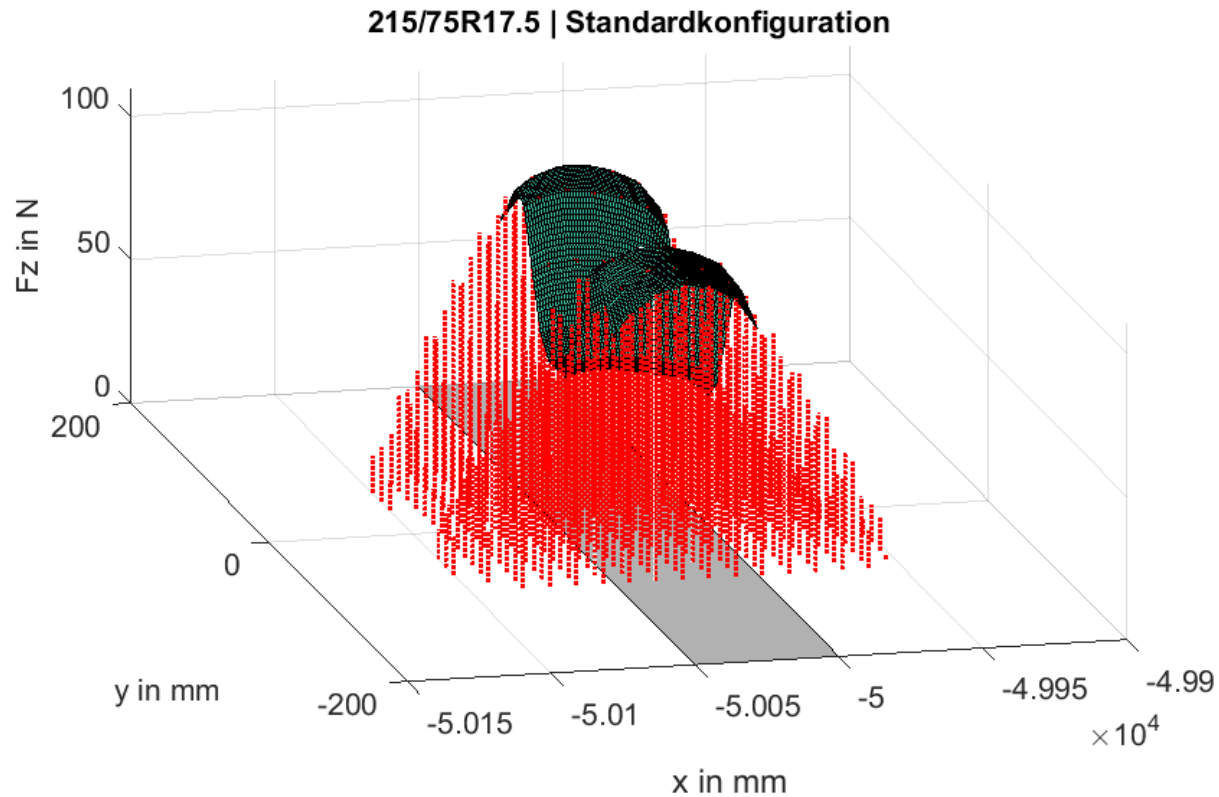
Kontaktkraft in Abhängigkeit der CDTire-Massepunkte, reale Straße

$$AUN = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{rad}$$



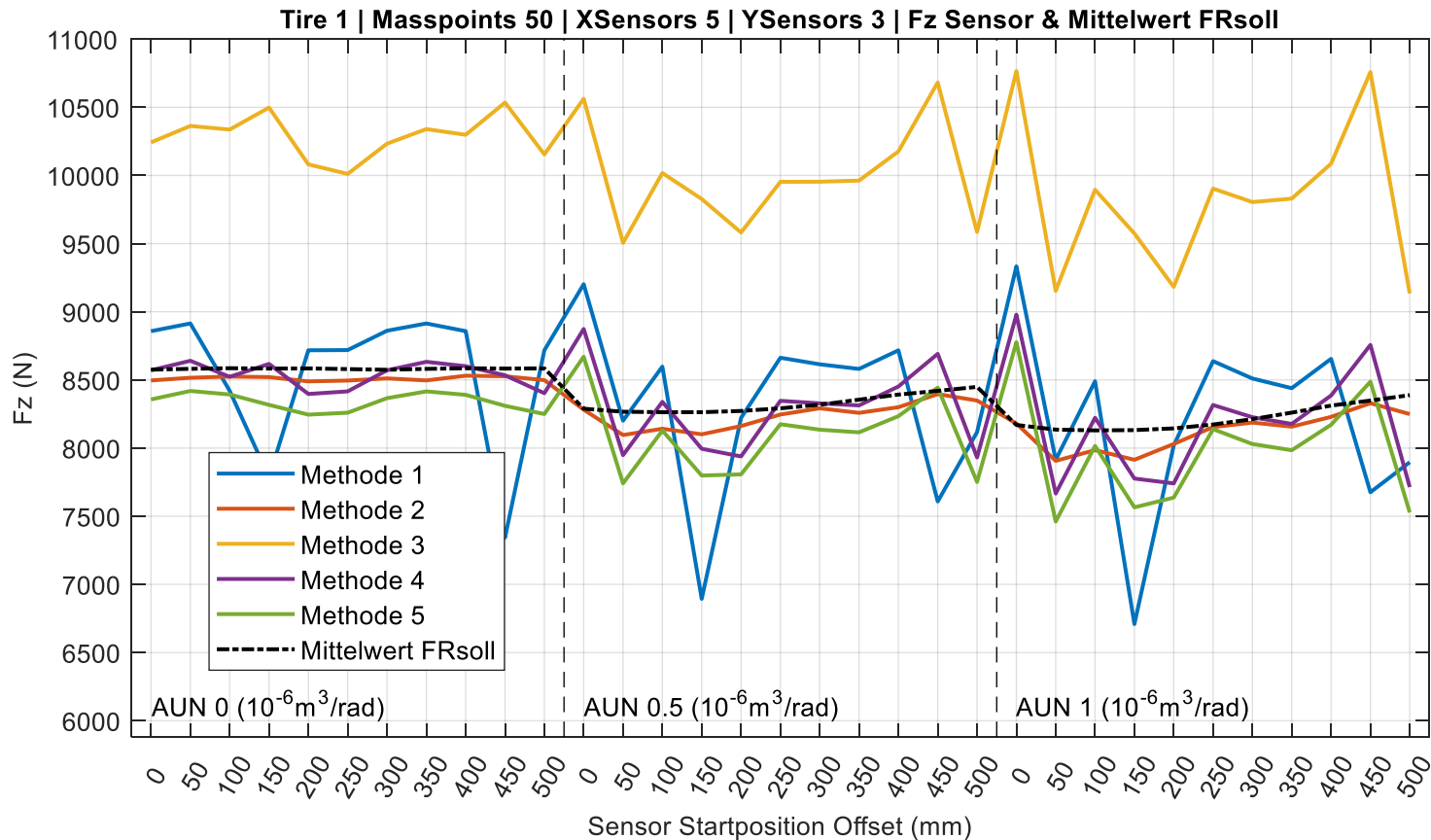
Kräfte CDTire-Reifenknoten

Interpolation auf Gitter (1mm Schrittweite)



Kräfte auf den Sensorstreifen

In Abhängigkeit von Auswertemethode, Straßenrauheit und Sensoroffset

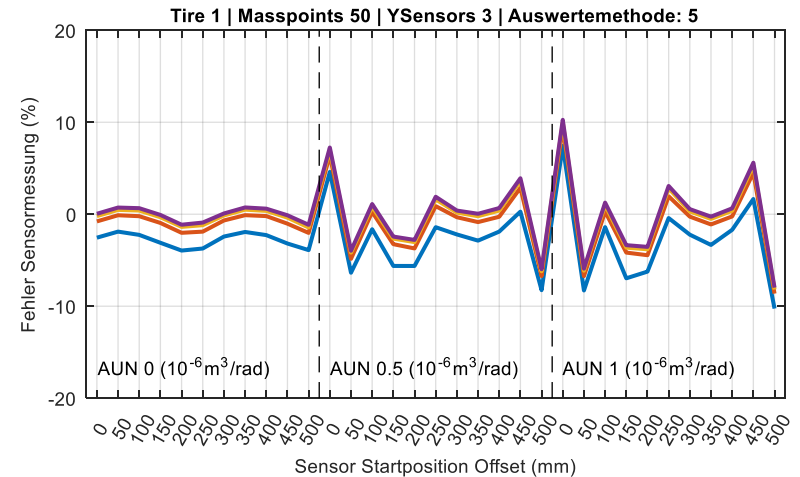
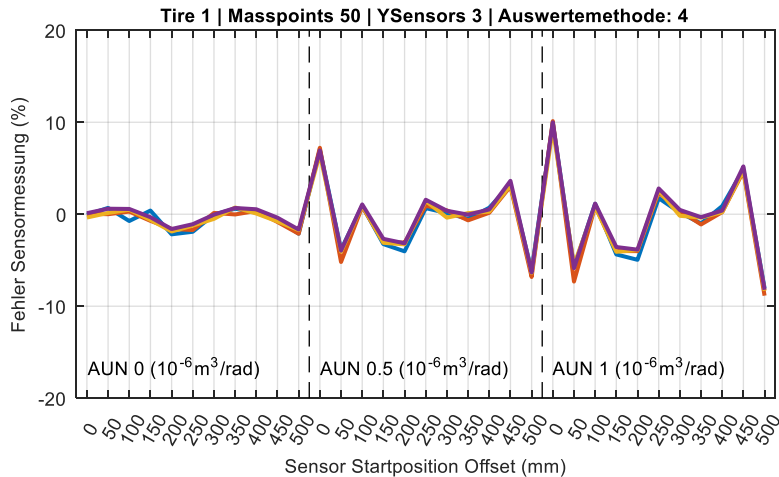
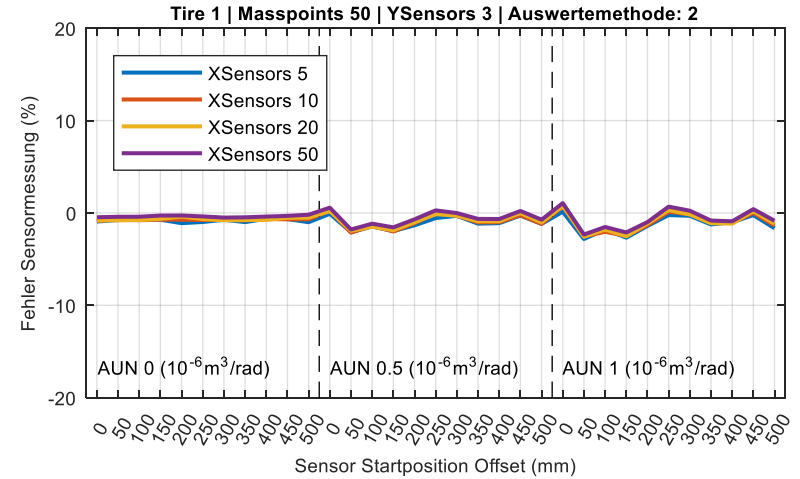
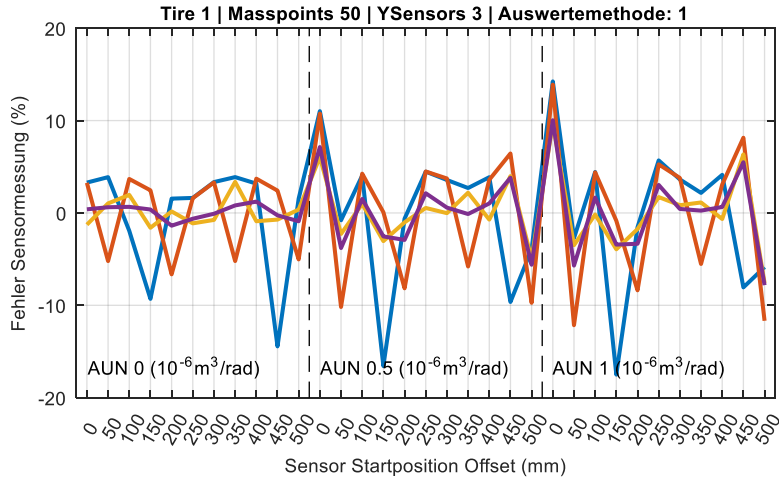


Archivierungsangaben

Messfehler der lokalen Analyse

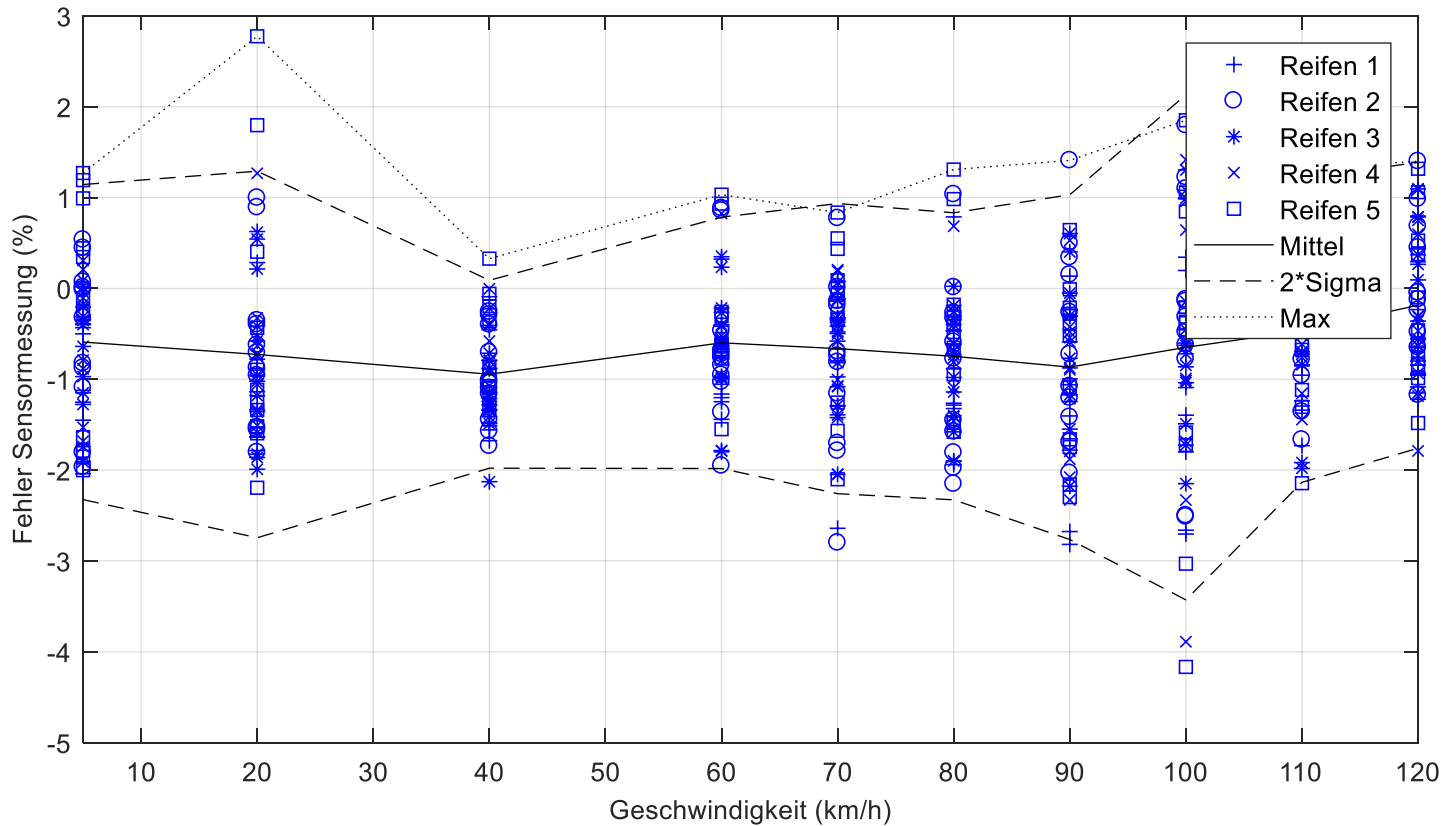
In Abhängigkeit von CDT-Sensoranzahl in Umfangsrichtung, Auswertemethode, Straßenrauheit und Sensoroffset

Archivierungsangaben



Messfehler der lokalen Analyse

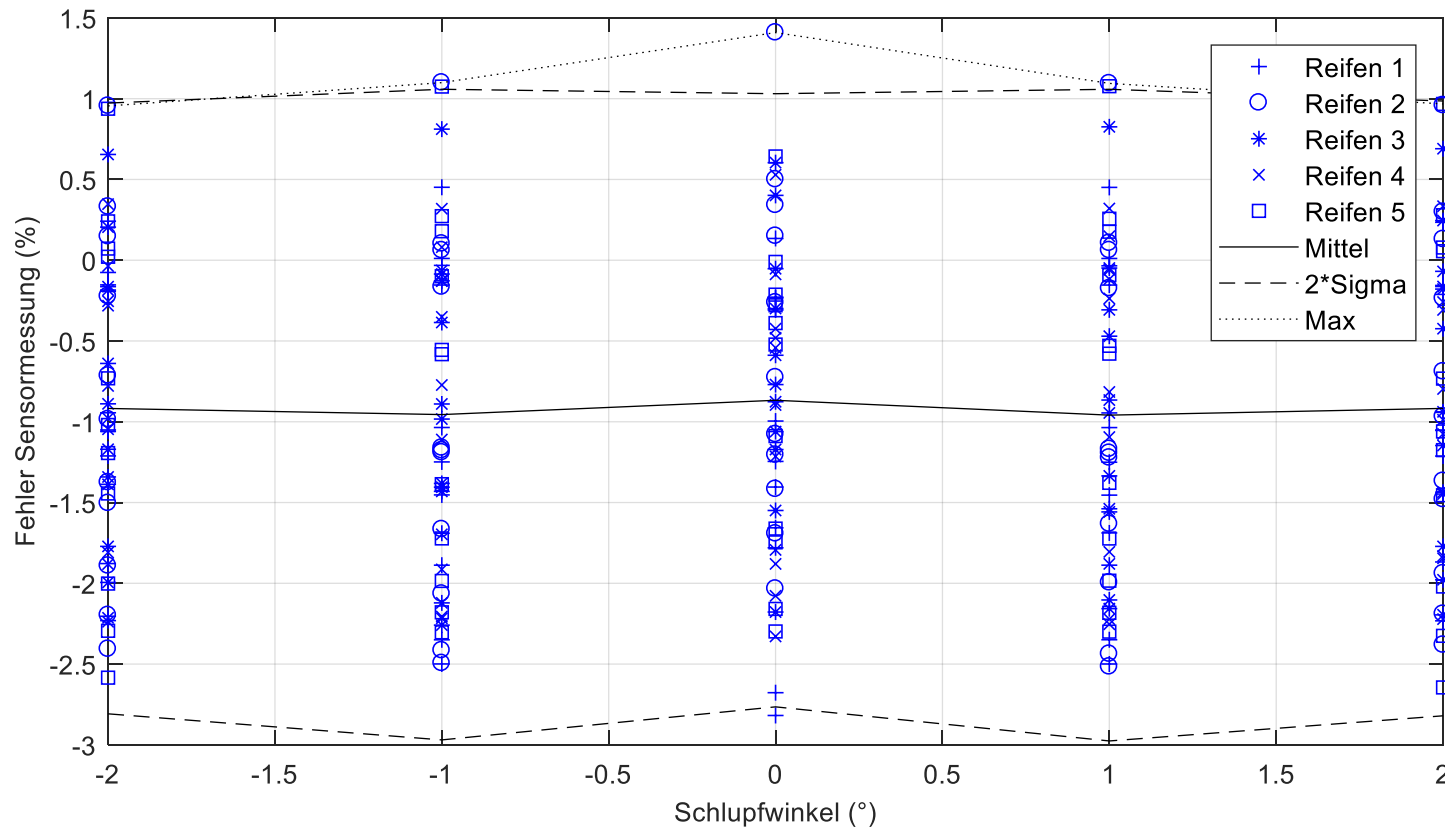
Variation Geschwindigkeit, Auswertemethode 2, Standarddiskretisierung



Archivierungsangaben

Messfehler der lokalen Analyse

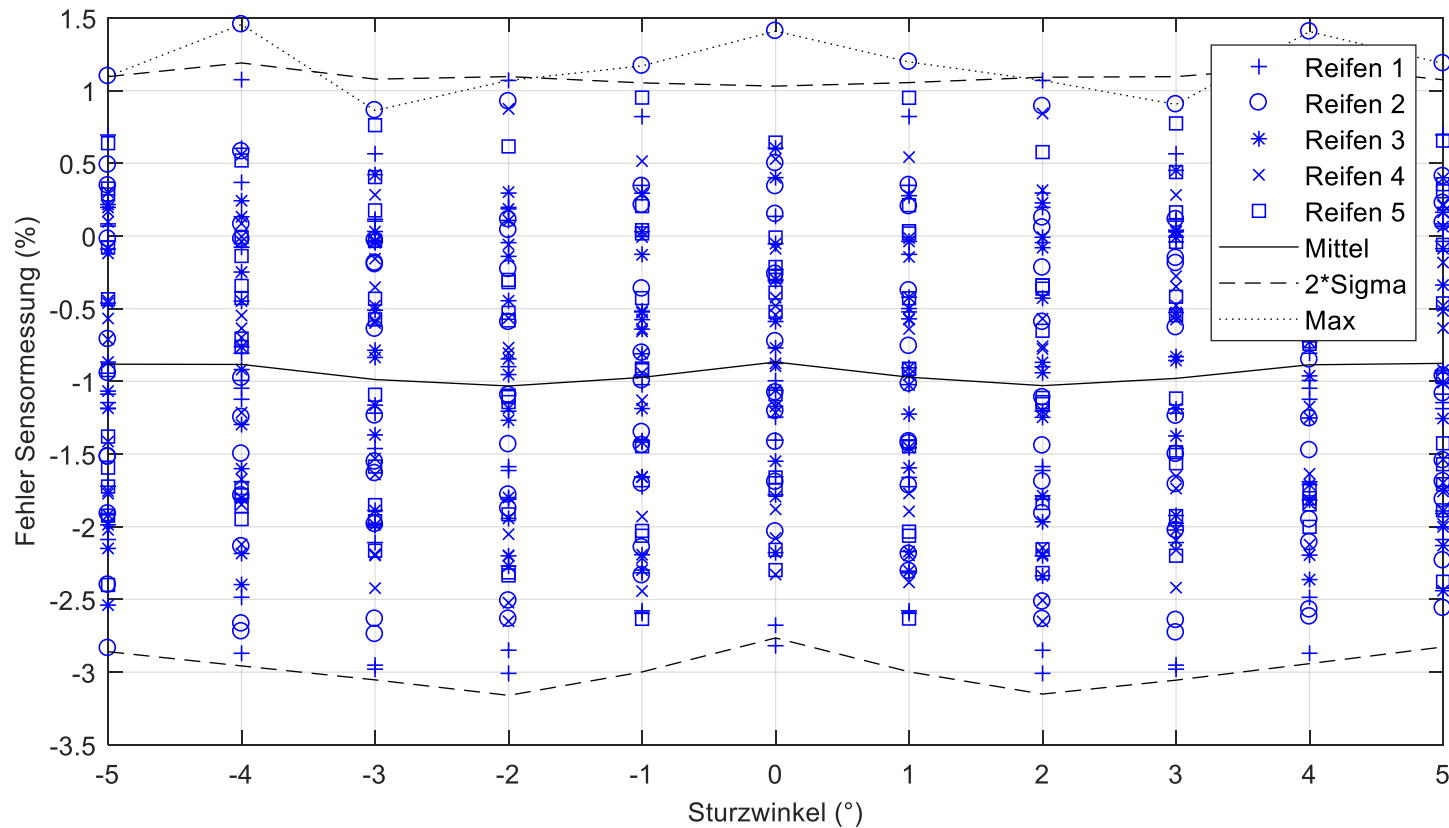
Variation Schlupfwinkel, Auswertemethode 2, Standarddiskretisierung



Archivierungsangaben

Messfehler der lokalen Analyse

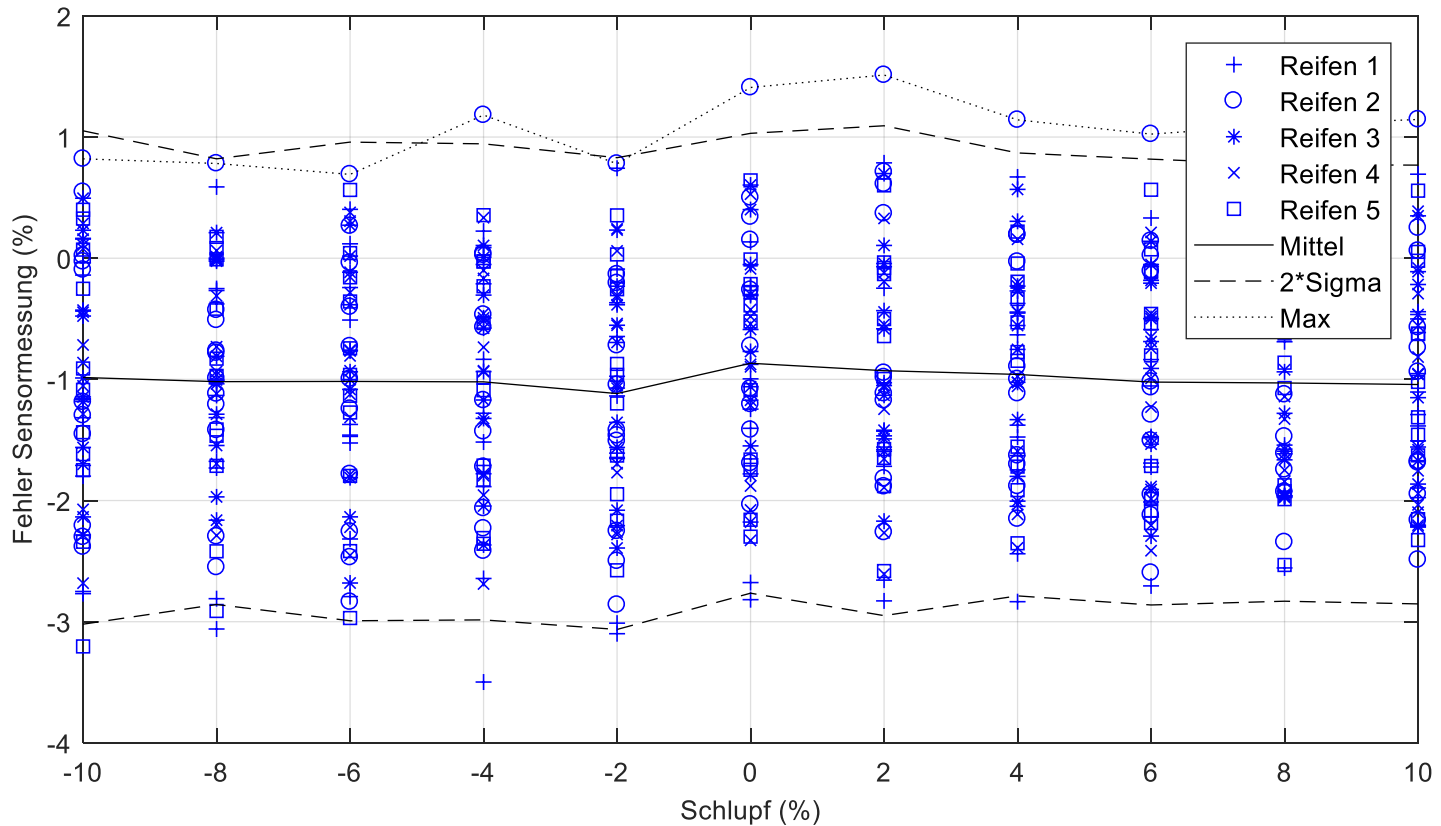
Variation Sturzwinkel, Auswertemethode 2, Standarddiskretisierung



Archivierungsangaben

Messfehler der lokalen Analyse

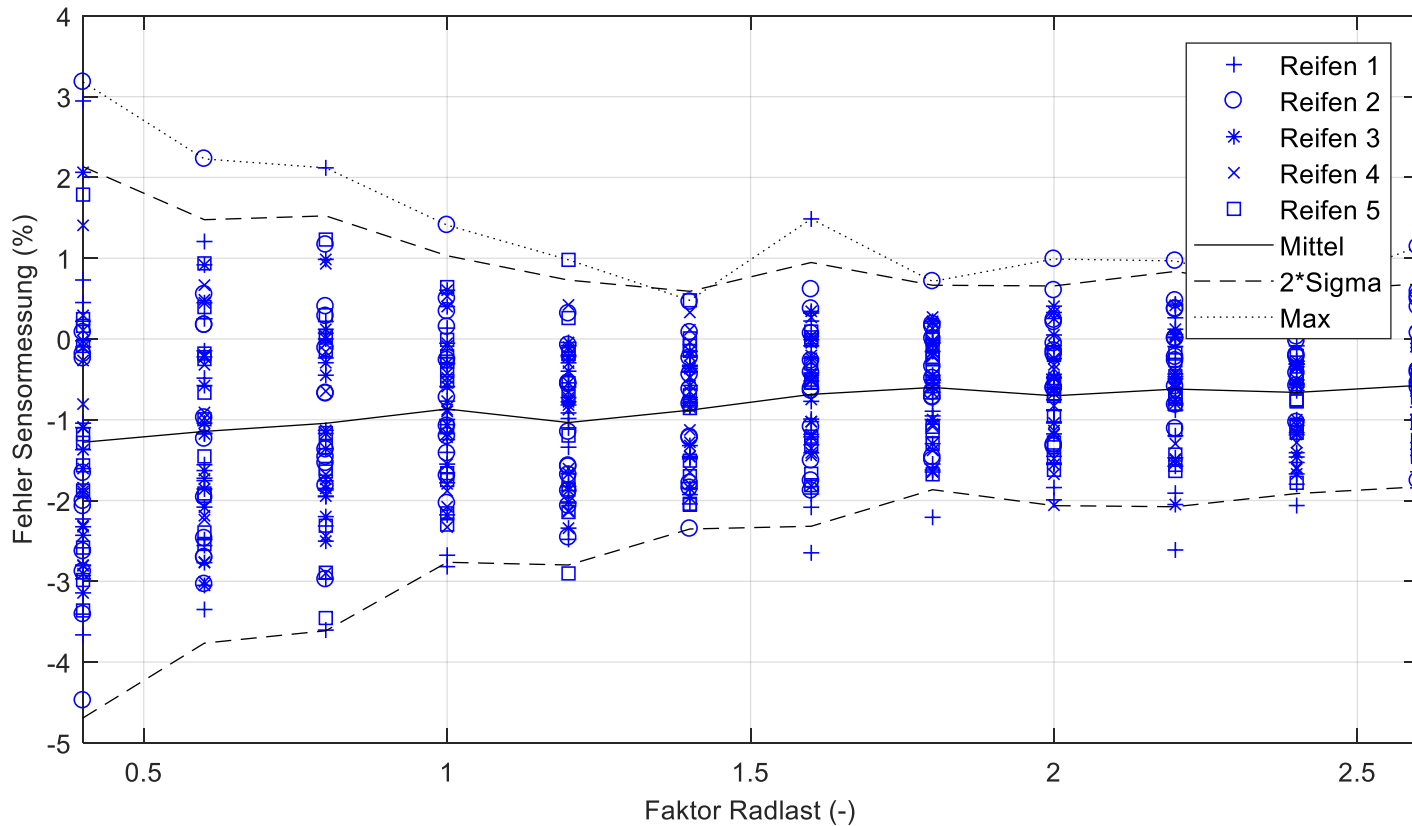
Variation Schlupf, Auswertemethode 2, Standarddiskretisierung



Archivierungsangaben

Messfehler der lokalen Analyse

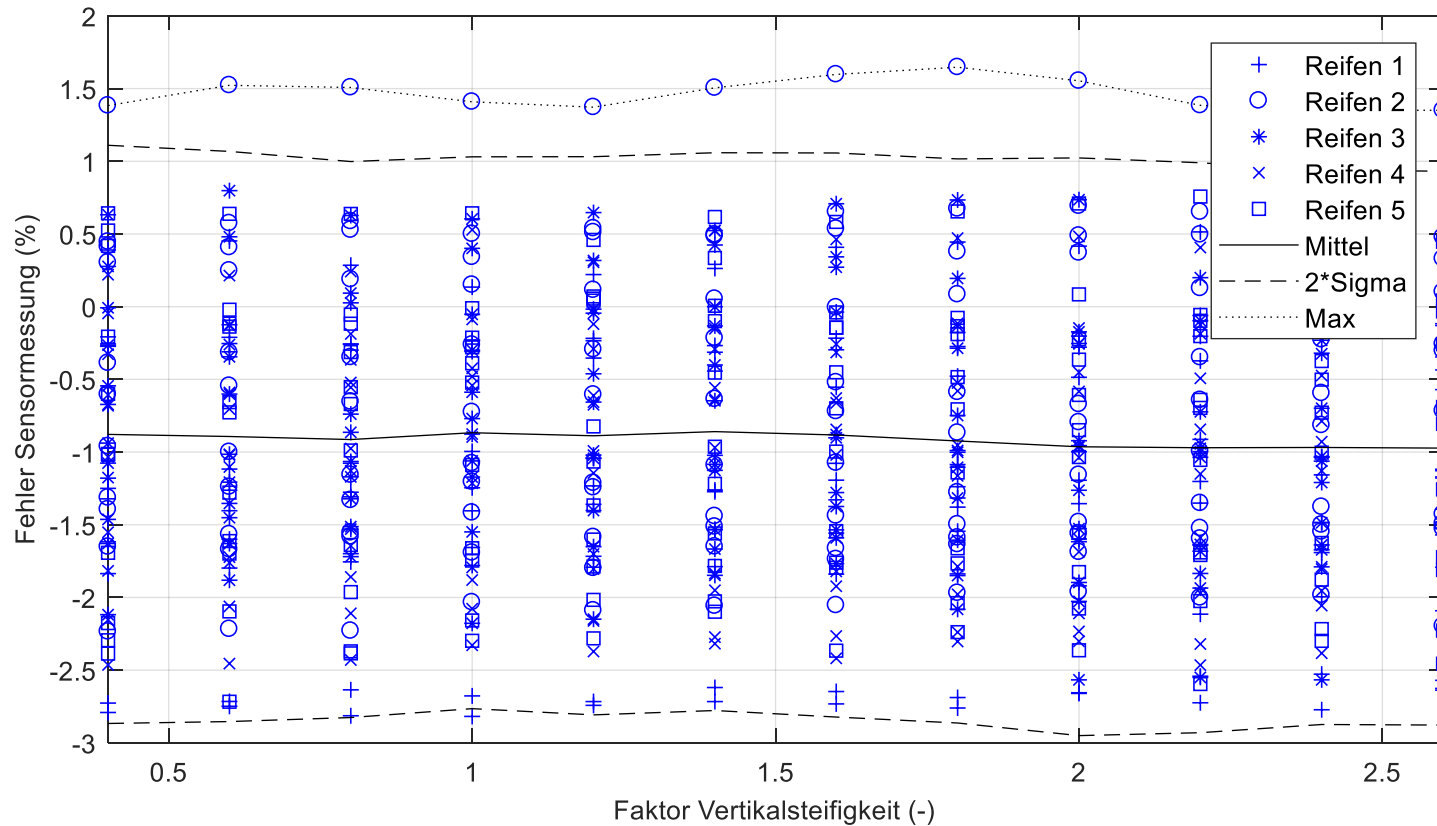
Variation Radlast, Auswertemethode 2, Standarddiskretisierung



Archivierungsangaben

Messfehler der lokalen Analyse

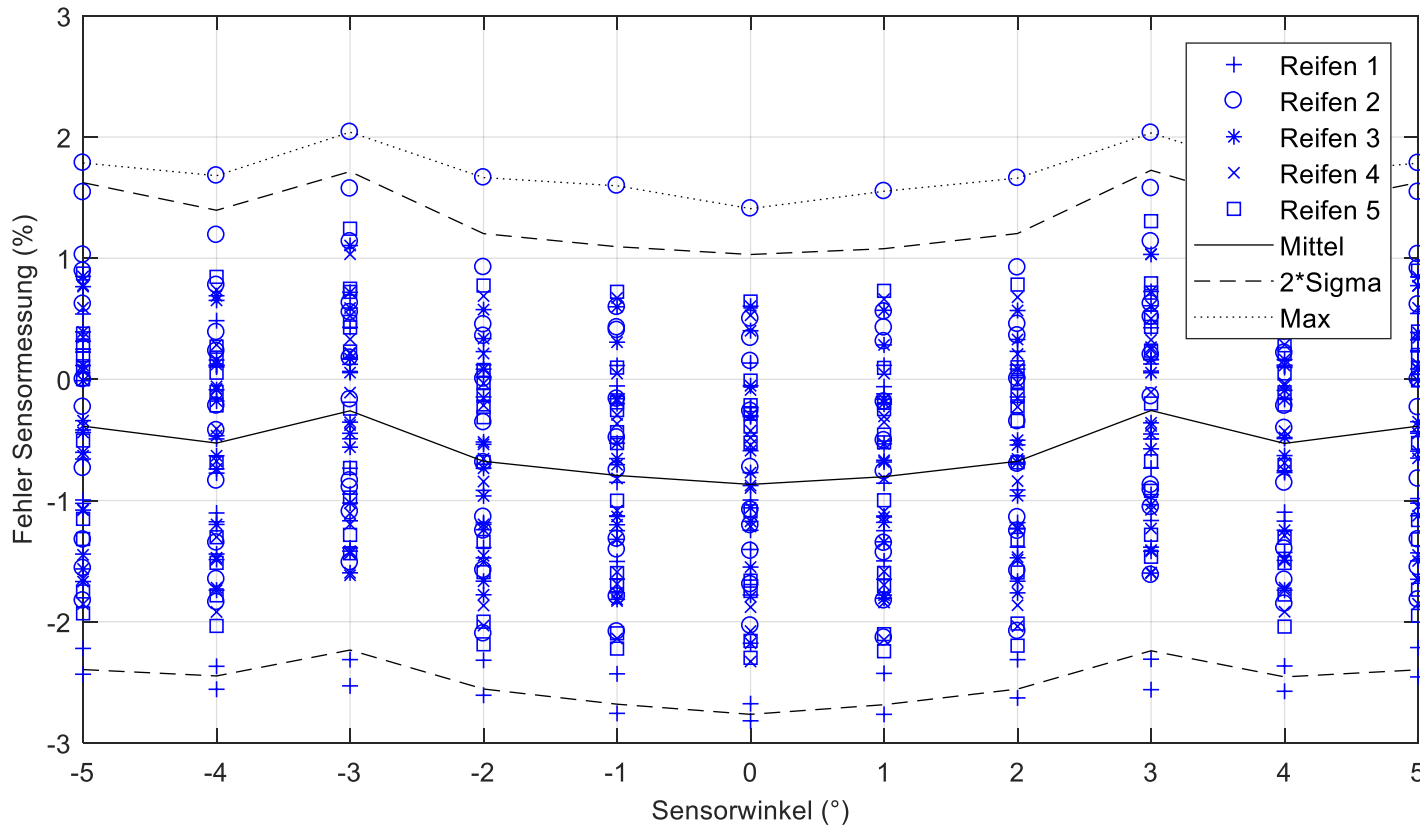
Variation Vertikalsteifigkeit, Auswertemethode 2, Standarddiskretisierung



Archivierungsangaben

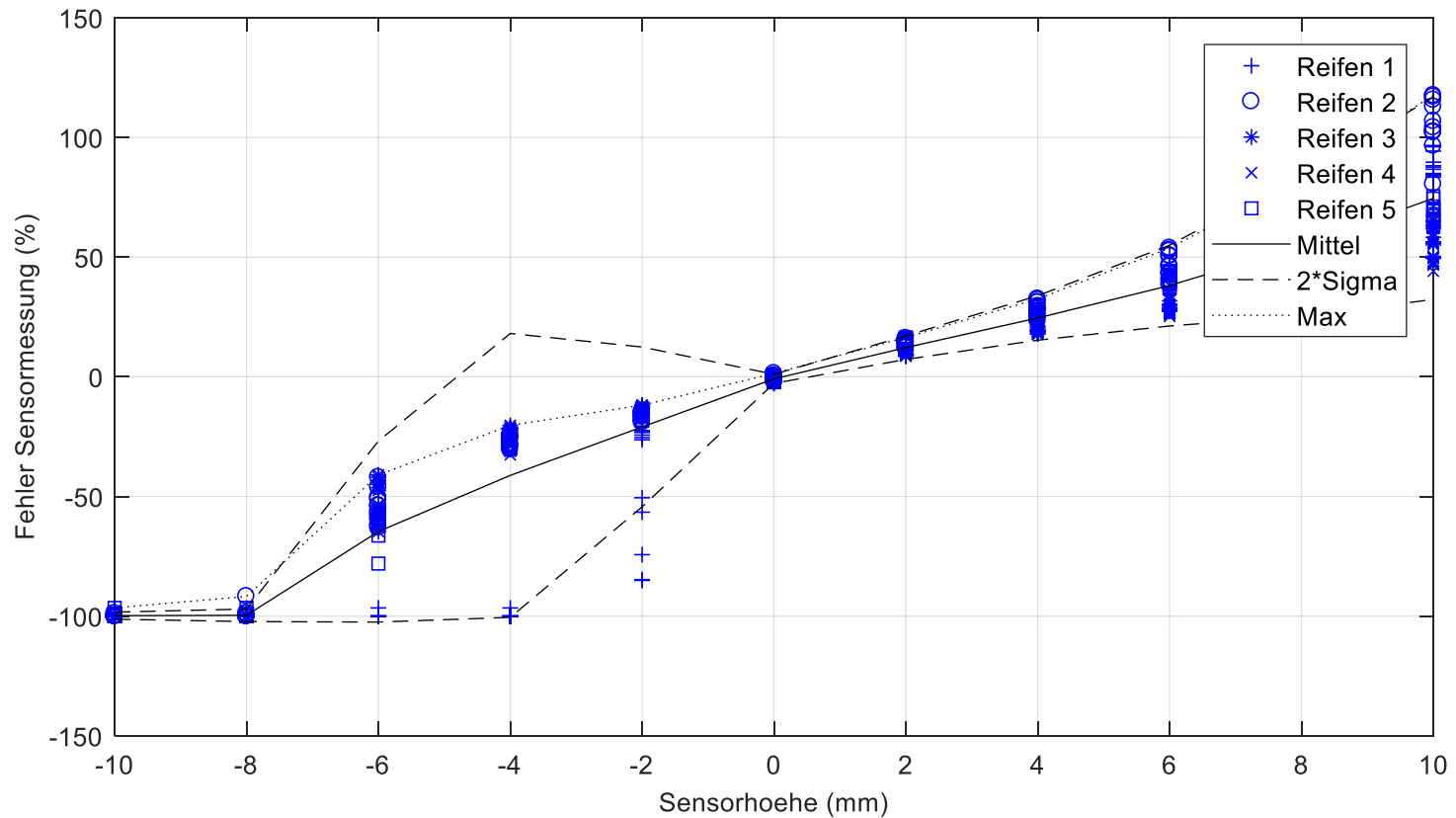
Messfehler der lokalen Analyse

Variation Sensorwinkel, Auswertemethode 2, Standarddiskretisierung



Messfehler der lokalen Analyse

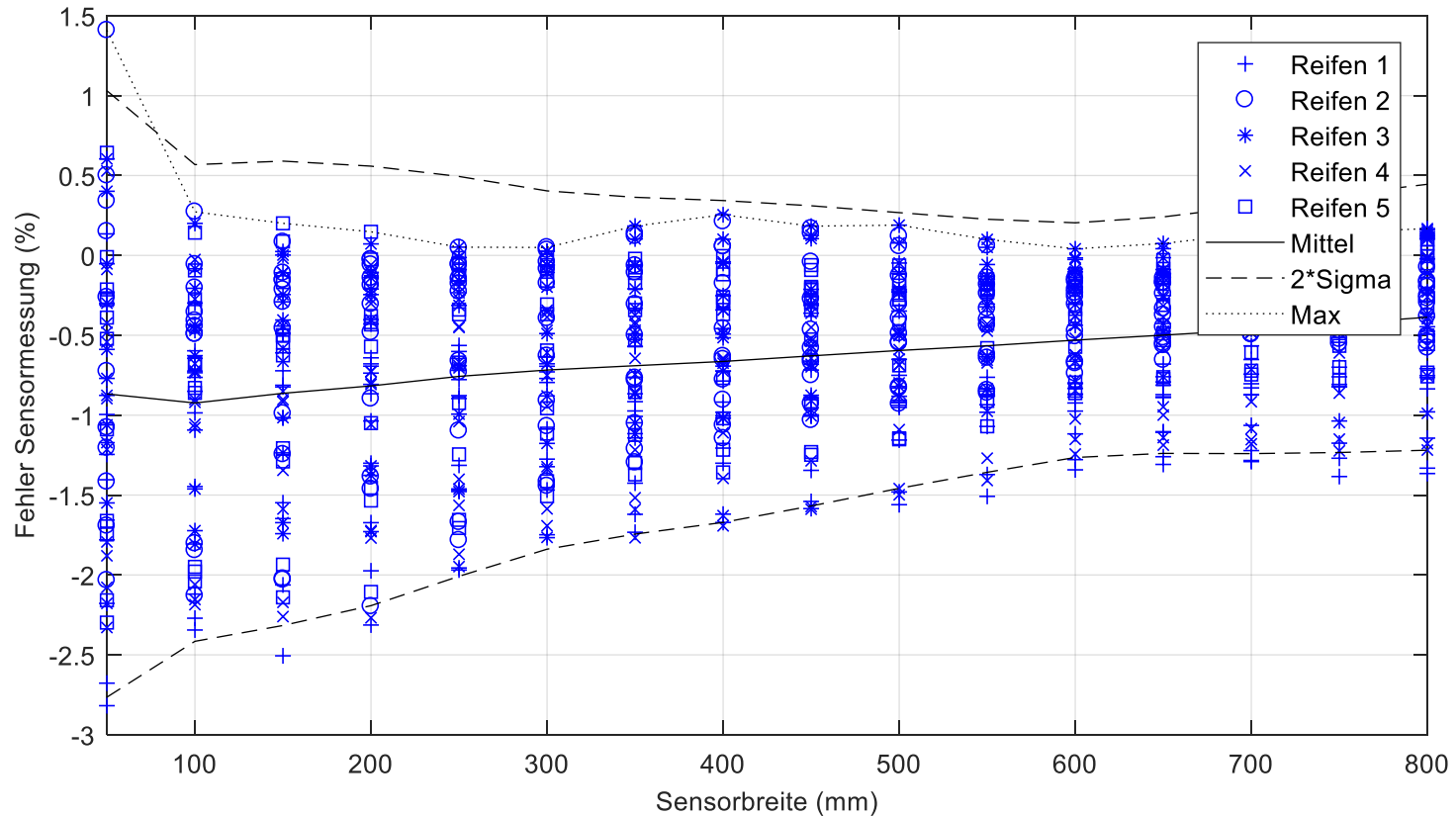
Variation Sensorhöhe, Auswertemethode 2, Standarddiskretisierung



Archivierungsangaben

Messfehler der lokalen Analyse

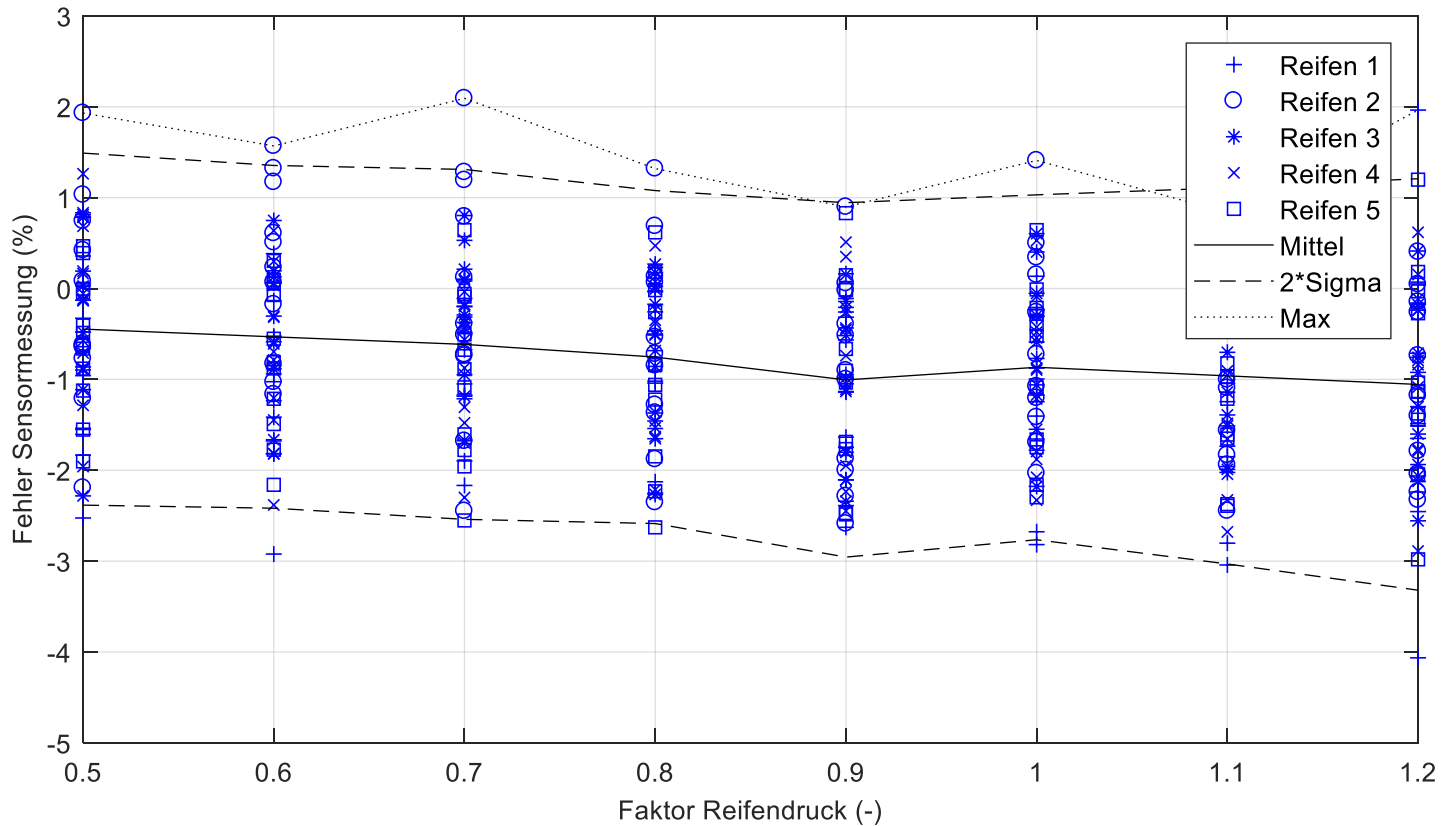
Variation Sensorbreite, Auswertemethode 2, Standarddiskretisierung



Archivierungsangaben

Messfehler der lokalen Analyse

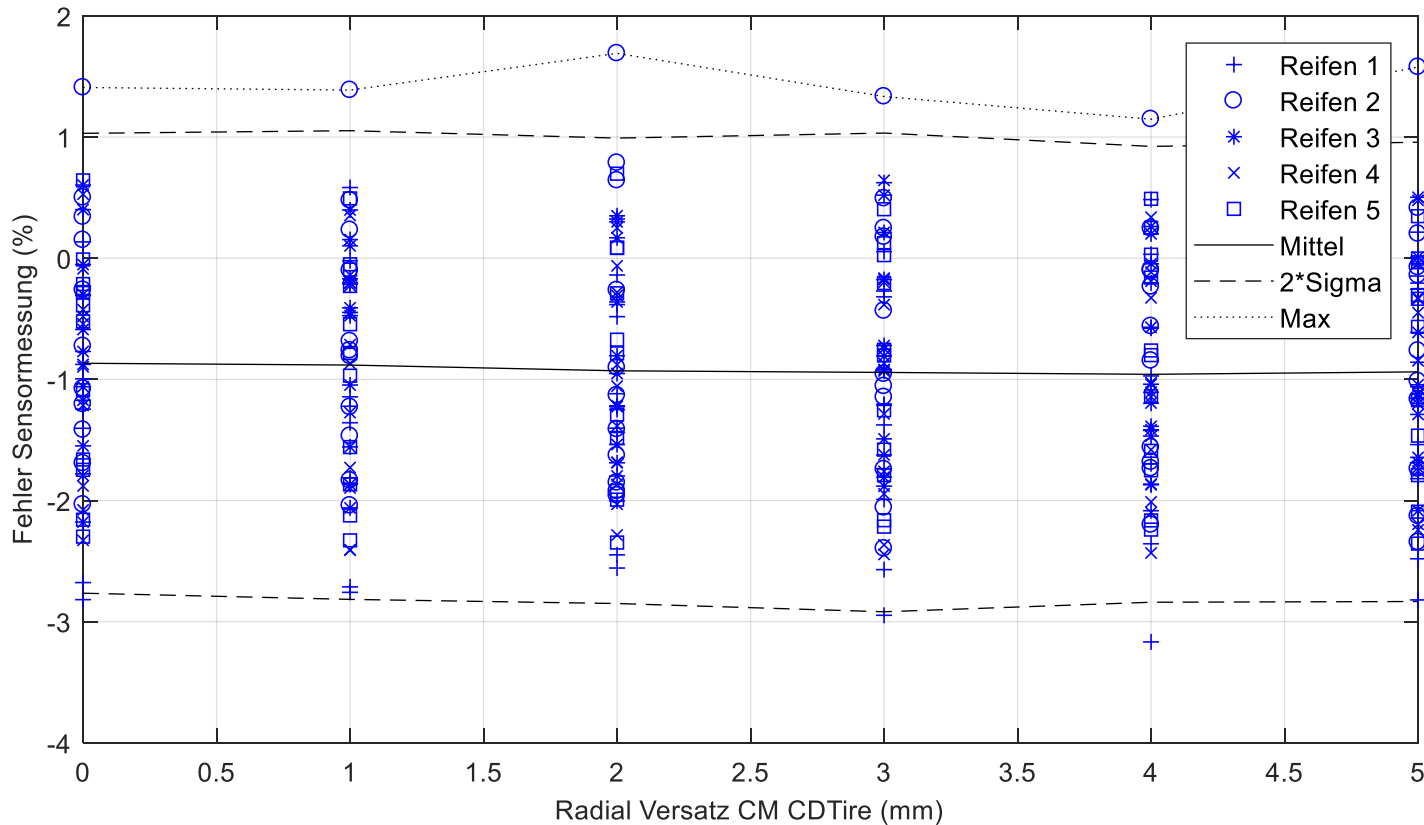
Variation Reifendruck, Auswertemethode 2, Standarddiskretisierung



Archivierungsangaben

Messfehler der lokalen Analyse

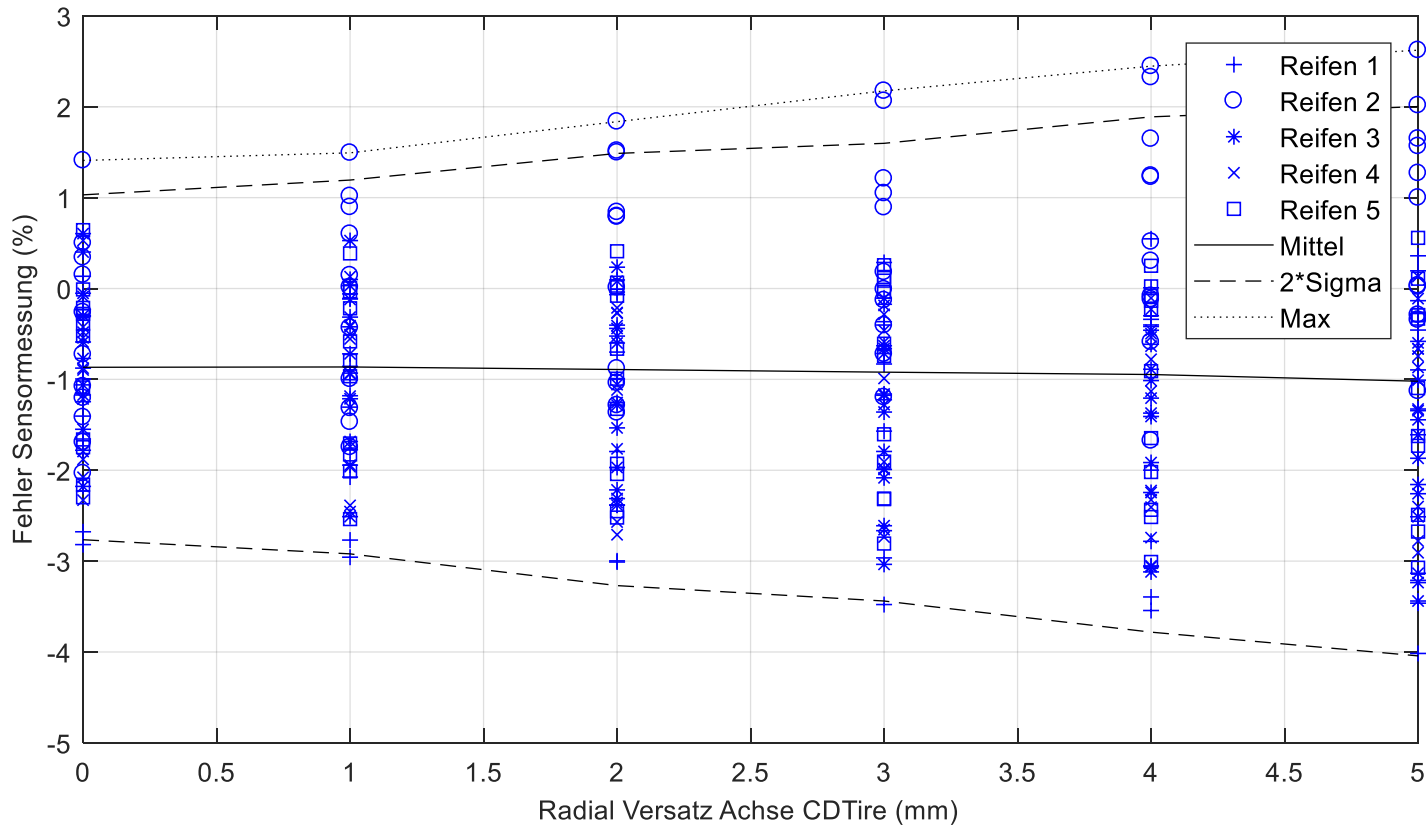
Variation radialer Versatz CDT-Schwerpunkt, Auswertemethode 2, Standarddiskretisierung



Archivierungsangaben

Messfehler der lokalen Analyse

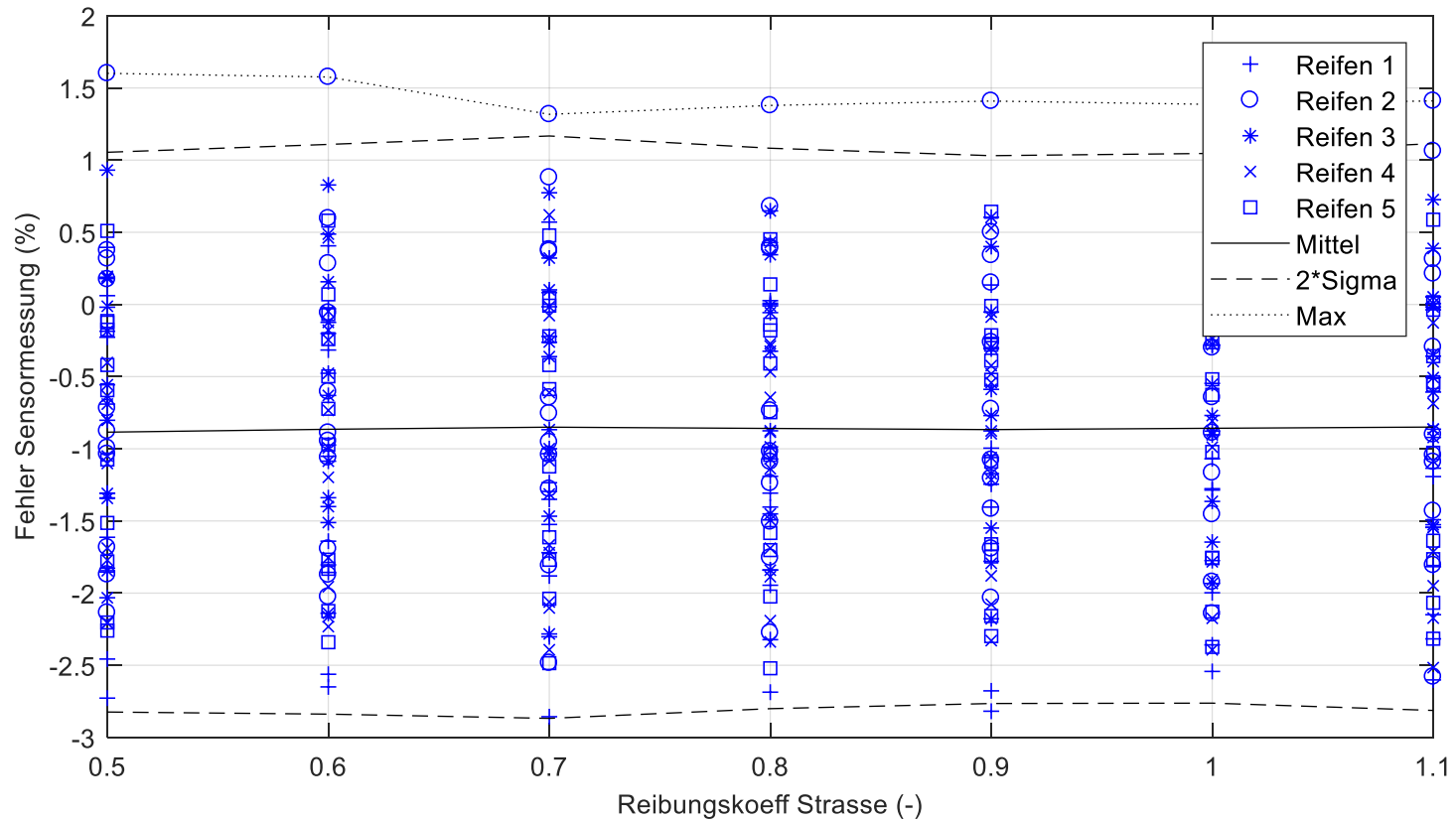
Variation radialer Versatz CDT-Rotationsachse, Auswertemethode 2, Standarddiskretisierung



Archivierungsangaben

Messfehler der lokalen Analyse

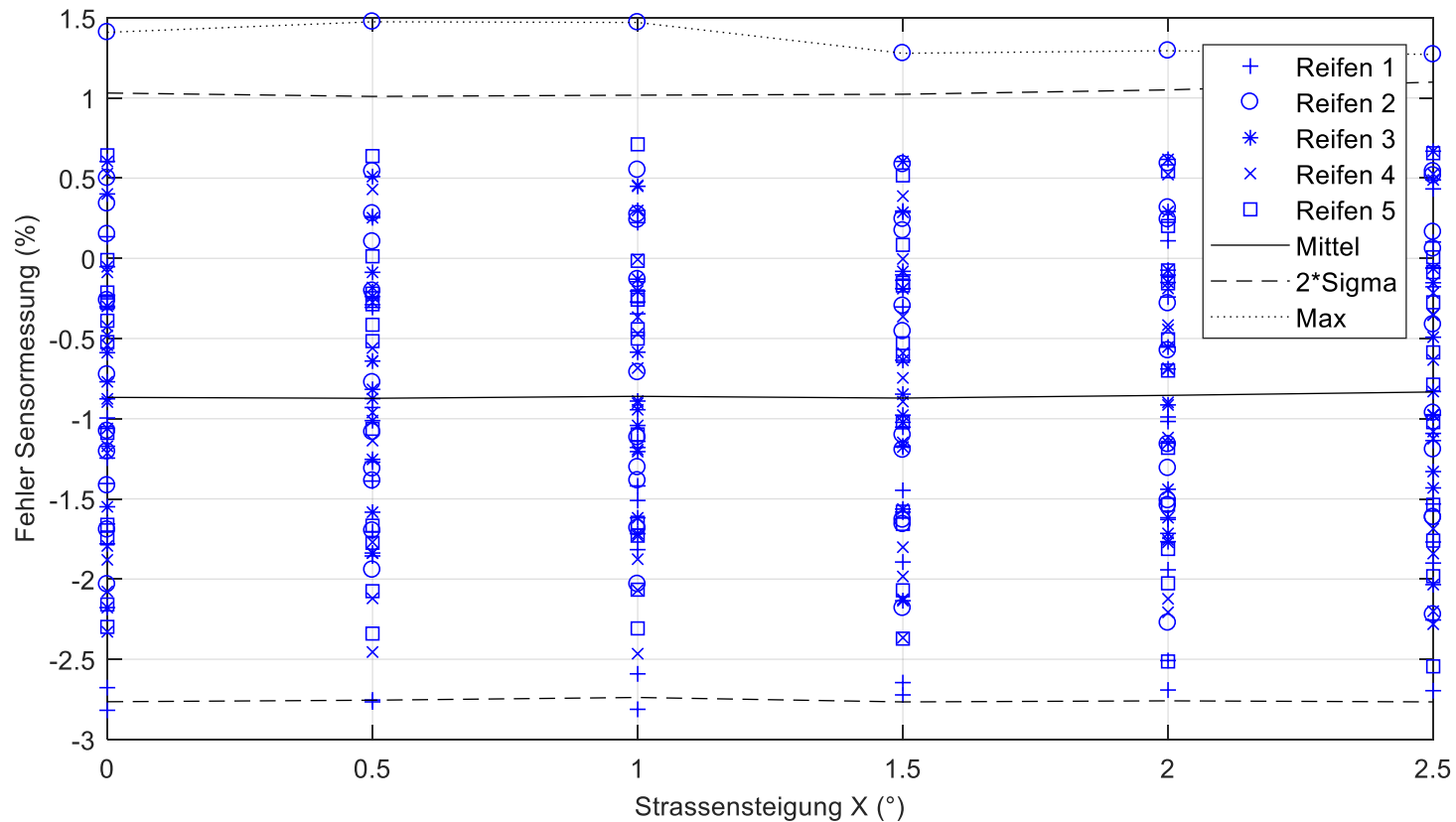
Variation Reibungskoeffizient der Straße, Auswertemethode 2, Standarddiskretisierung



Archivierungsangaben

Messfehler der lokalen Analyse

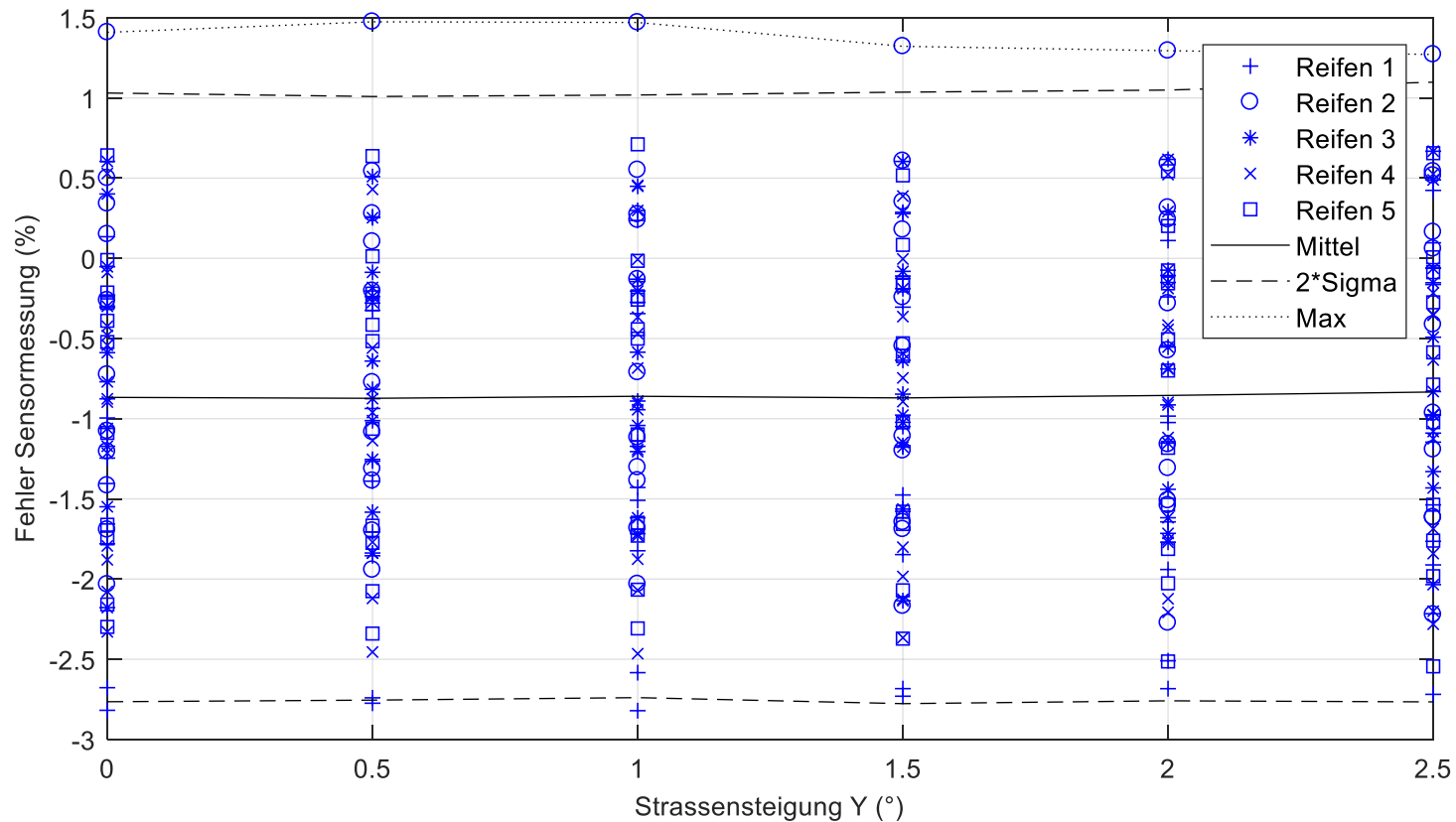
Variation Straßensteigung X, Auswertemethode 2, Standarddiskretisierung



Archivierungsangaben

Messfehler der lokalen Analyse

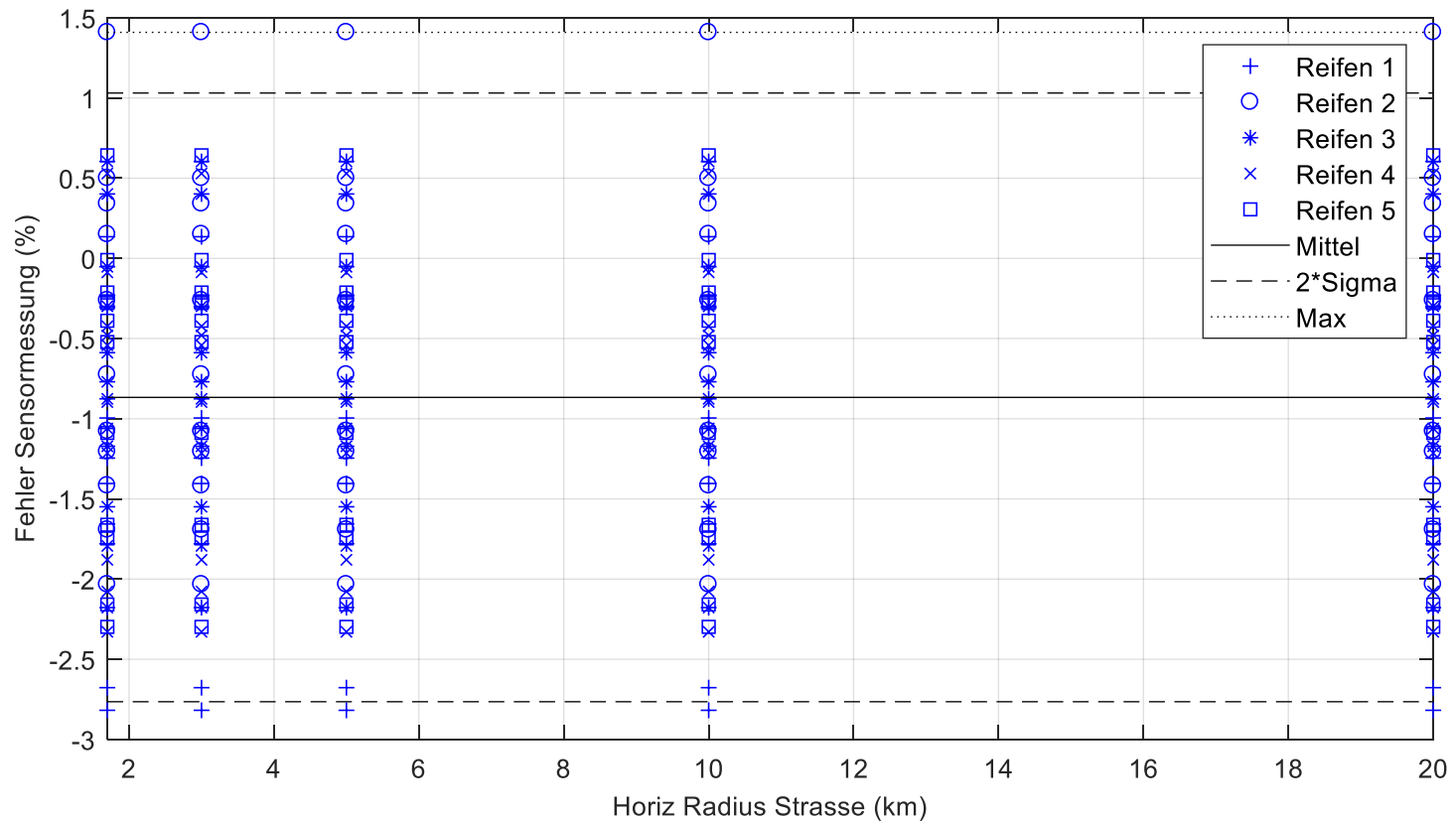
Variation Straßensteigung Y, Auswertemethode 2, Standarddiskretisierung



Archivierungsangaben

Messfehler der lokalen Analyse

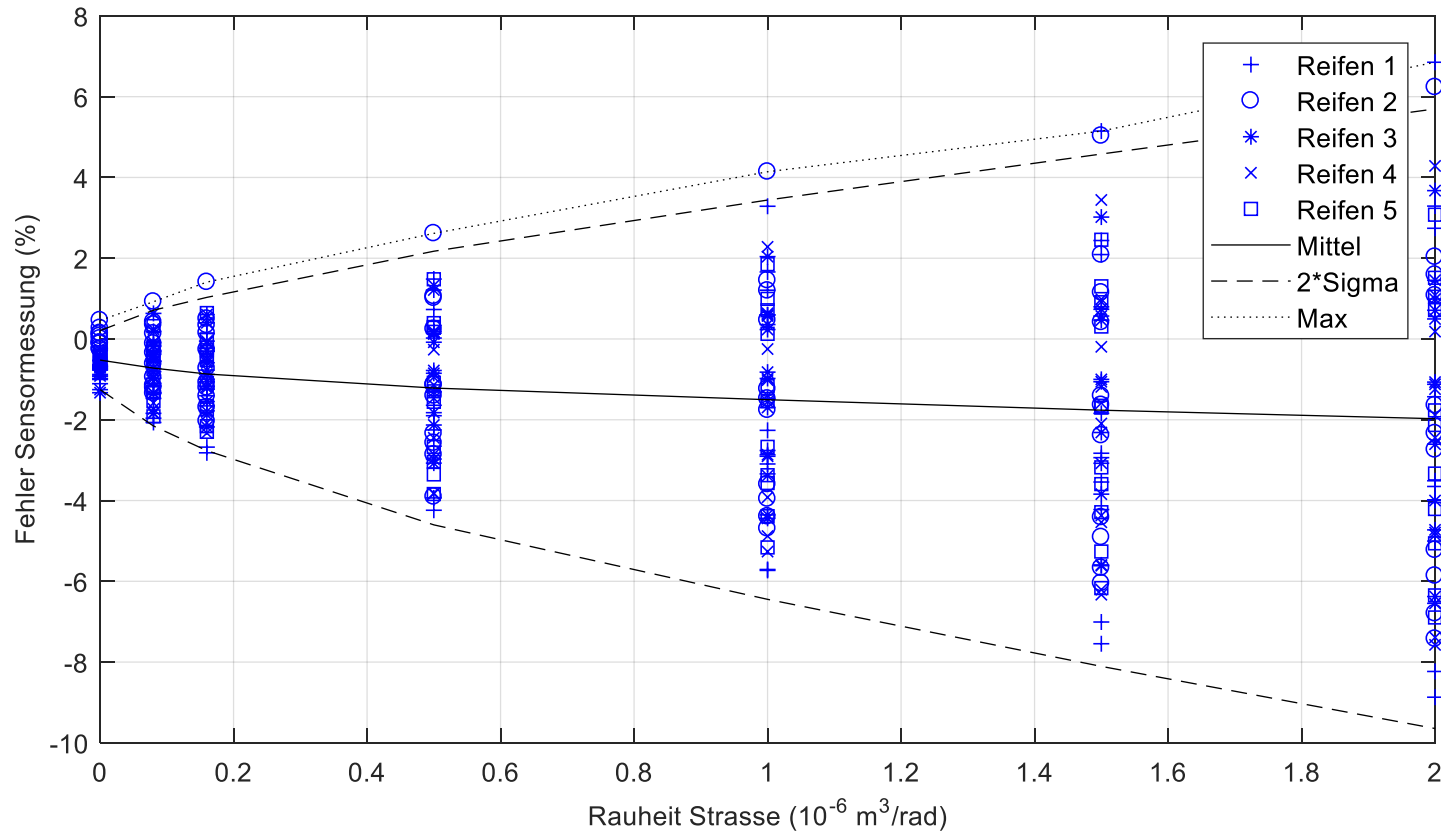
Variation horizontaler Radius der Straße, Auswertemethode 2, Standarddiskretisierung



Archivierungsangaben

Messfehler der lokalen Analyse

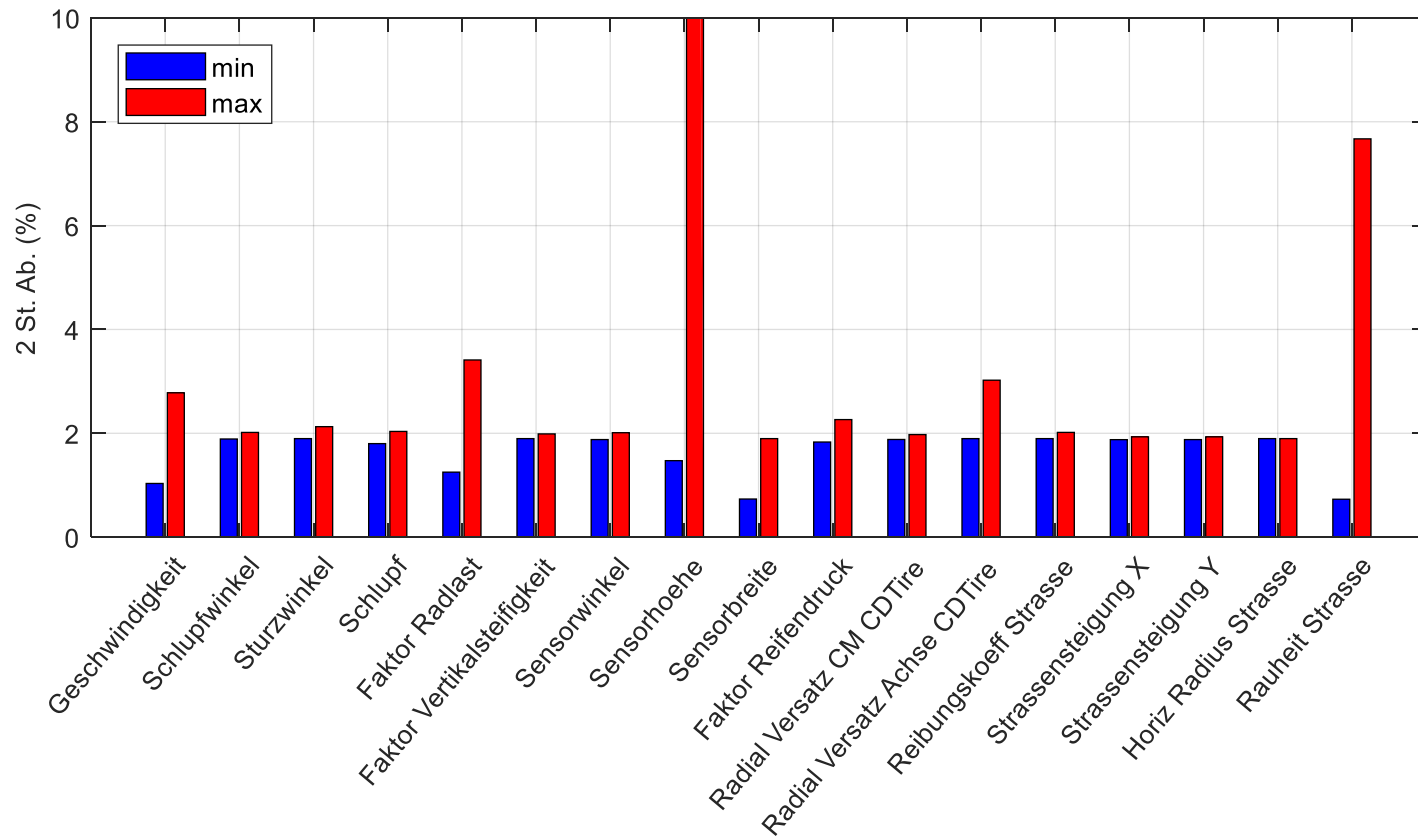
Variation Rauheit der Straße, Auswertemethode 2, Standarddiskretisierung



Archivierungsangaben

Ergebnis lokale Analyse

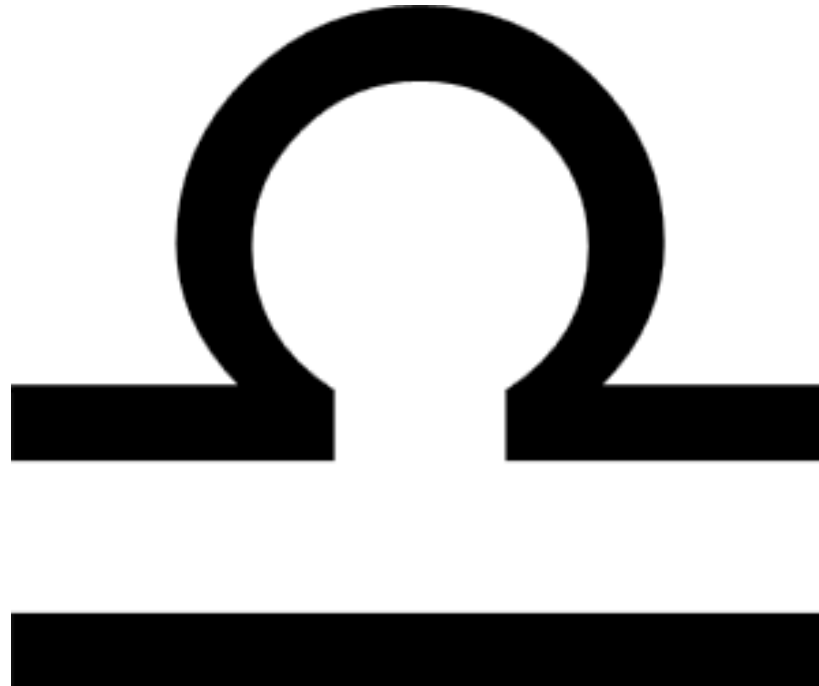
Minima/Maxima der zweifachen Standardabweichung für alle Faktoren



Anhang C des Fachberichts zum Vorhaben LiBra – Lasten in Bewegung rechtssicher aufzeichnen – Seite 56

ANHANG B DES FACHBERICHTS ZUM VORHABEN LIBRA – LASTEN IN BEWEGUNG RECHTSSICHER AUFZEICHNEN

Ergebnisse der Einflussfaktoren der Ganzfahrzeugsimulation (AP 2.3)



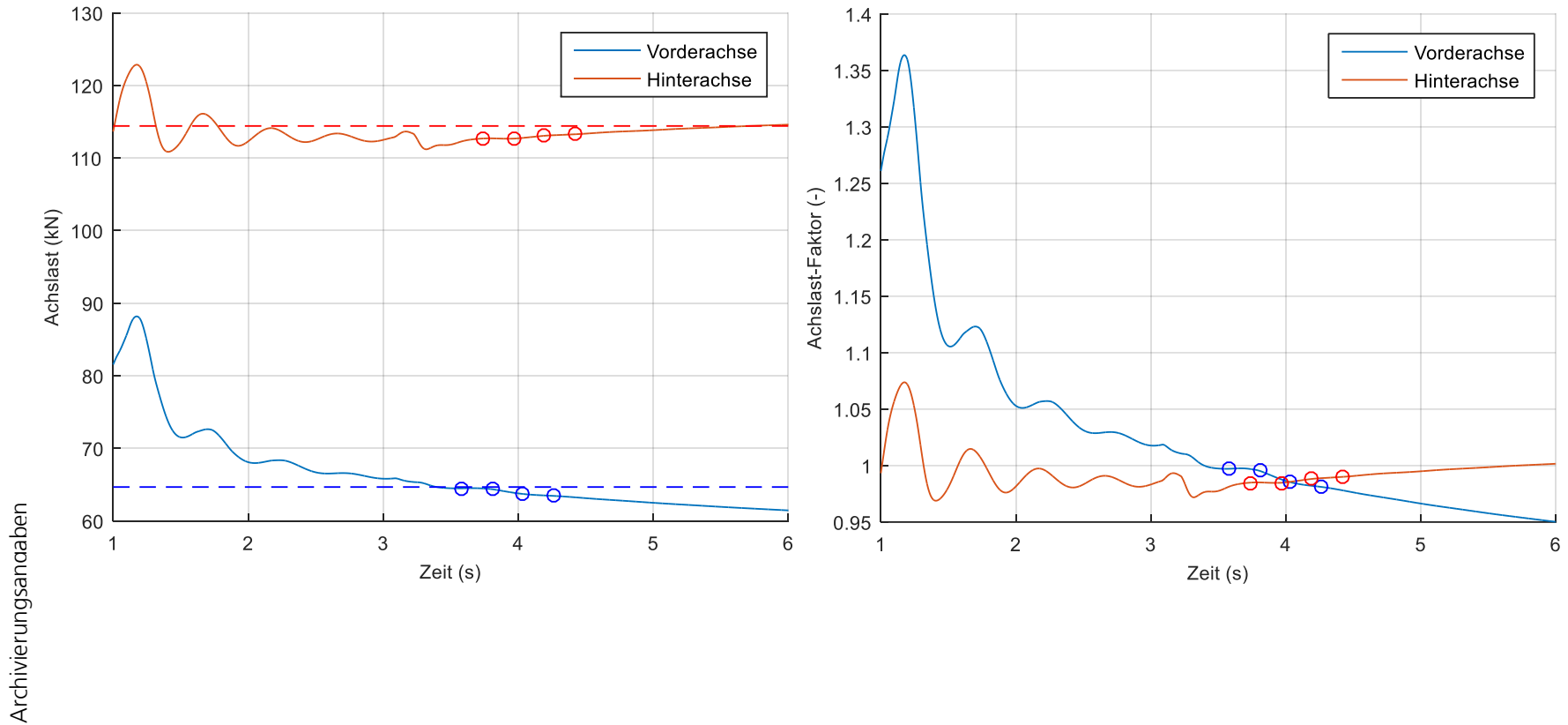
Gesamtfahrzeugmodell in der Software IPG TruckMaker



Archivierungsangaben

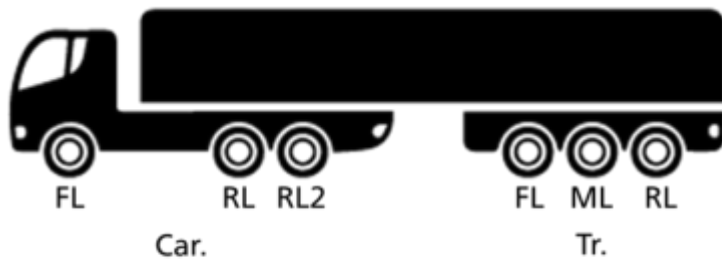
Anhang D des Fachberichts zum Vorhaben LiBra – Lasten in Bewegung rechtssicher aufzeichnen – Seite 58

Achslasten der Zugmaschine als Zeitverläufe und Messpunkte bei einem simulierten Bremsmanöver



Anhang D des Fachberichts zum Vorhaben LiBra – Lasten in Bewegung rechtssicher aufzeichnen – Seite 59

Bezeichnung der Achsen und Klassifizierung der Fahrzeugtypologien nach EU COST 323



Category	Silhouette	Description
Category 1	Cars, vans (< 35 kN)	Cars, cars+light trailers or caravans
Category 2		Two axle rigid lorry
Category 3		More than 2-axle rigid lorry
Category 4		Tractor with semi-trailer supported by single or tandem axles
Category 5		Tractor with semi-trailer supported by tridem axles
Category 6		Lorry with trailer
Category 7		Busses
Category 8		Other vehicles

Simulierte Fahrzeuge 1/3



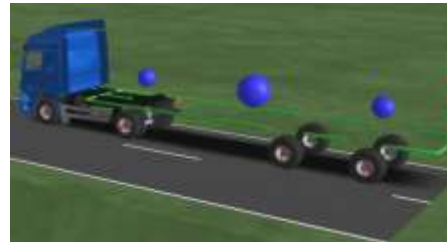
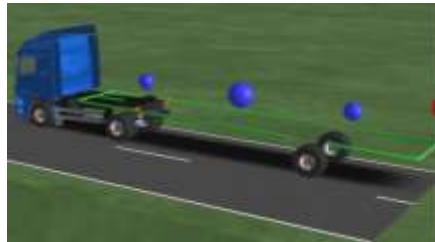
Fzg id	1	2	3
Name	Sprinter	Eurotech	Atego
Kat. EU COST	1	2	3
Bereifung Car	225/65 R16	215/75 R17,5	315/70 R22,5
Bereifung Tr			
Achslast Car F	1,75	3,04	10,13
Achslast Car R	1,75	3,70	9,58
Achslast Car R2			5,76
Achslast Tr F			
Achslast Tr M			
Achslast Tr R			
Gewicht	3,50	6,74	25,47

Archivierungsangaben

Anhang D des Fachberichts zum Vorhaben LiBra – Lasten in Bewegung rechtssicher aufzeichnen – Seite 61

Achslasten und Gewicht in Tonnen

Simulierte Fahrzeuge 2/3



Fzg id	4	5	6
Name	Actros – SemiTr 1	Actros – SemiTr 2	Actros – SemiTr 3
Kat. EU COST	4	4	5
Bereifung Car	315/70 R22,5	315/70 R22,5	315/70 R22,5
Bereifung Tr	385/65 R22,5	385/65 R22,5	385/65 R22,5
Achslast Car F	5,48	6,08	6,68
Achslast Car R	5,42	8,51	11,76
Achslast Car R2			
Achslast Tr F	6,76	6,97	8,03
Achslast Tr M			7,02
Achslast Tr R		6,58	6,03
Gewicht	17,66	28,14	39,52

Archivierungsangaben

Anhang D des Fachberichts zum Vorhaben LiBra – Lasten in Bewegung rechtssicher aufzeichnen – Seite 62

Achslasten und Gewicht in Tonnen

Simulierte Fahrzeuge 3/3



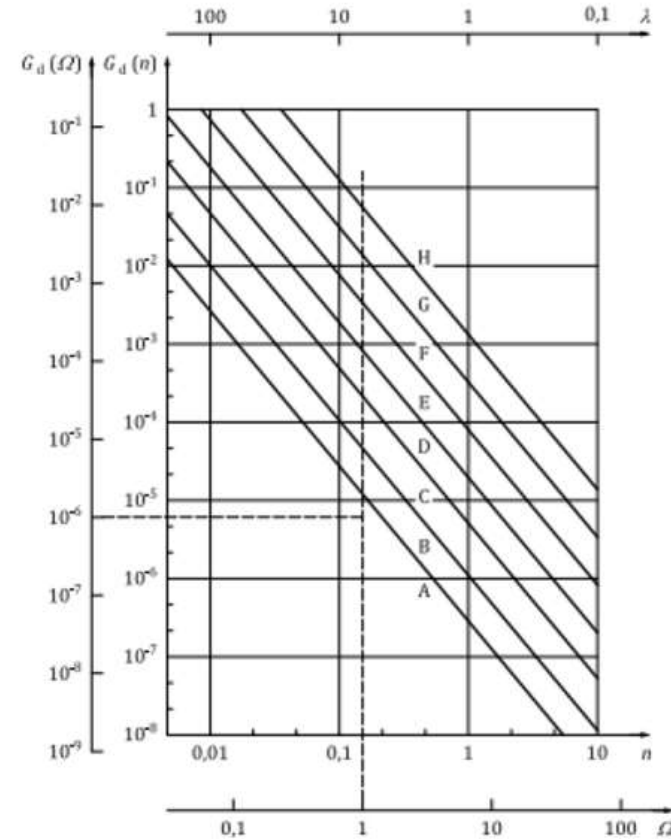
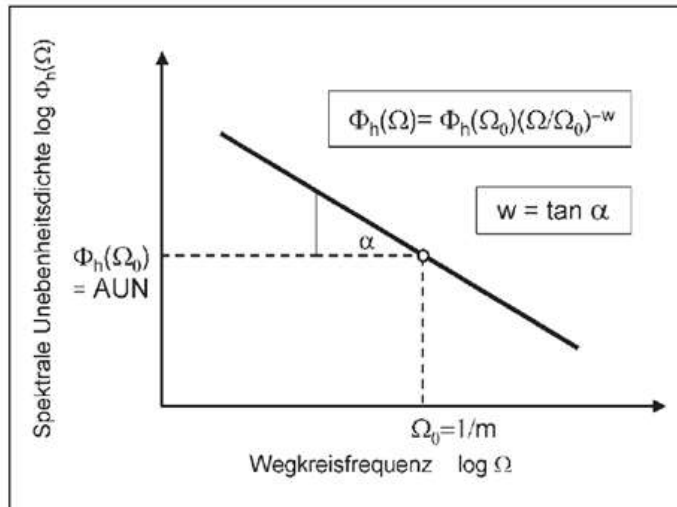
Fzg id	7	8	9
Name	Classic – SemiTr 3	Eurotech – CenterTr 2	Atego – DrawTr 2
Kat. EU COST	5	6	6
Bereifung Car	315/70 R22,5	215/70 R17,5	315/70 R22,5
Bereifung Tr	385/65 R22,5	265/70 R19,5	385/65 R22,5
Achslast Car F	6,51	3,02	10,12
Achslast Car R	9,50	3,76	9,60
Achslast Car R2	8,41		5,77
Achslast Tr F	7,29	5,10	9,04
Achslast Tr M	6,96		
Achslast Tr R	6,64	5,60	8,98
Gewicht	45,32	17,48	43,52

Archivierungsangaben

Anhang D des Fachberichts zum Vorhaben LiBra – Lasten in Bewegung rechtssicher aufzeichnen – Seite 63

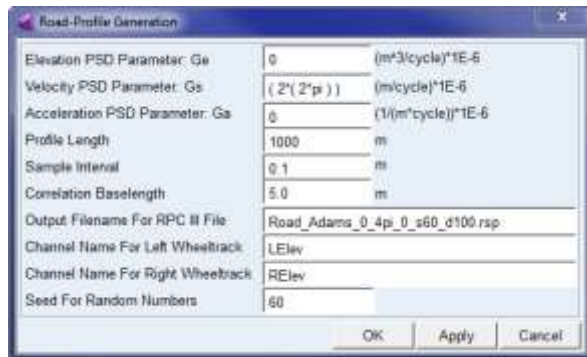
Achslasten und Gewicht in Tonnen

Graphische Definition der spektralen Unebenheitsdichte und Klassen der Straßenunebenheit nach ISO 8608:2016



Prozedur für Erstellung des Straßenprofils

MSC Adams Tool



- Globale Eigenschaften
- Profile für linke und rechte Seite
- Zufallsvariable

Matlab Tool für Open CRG



- Filter
- Check
- Exportierung in CRG-Format

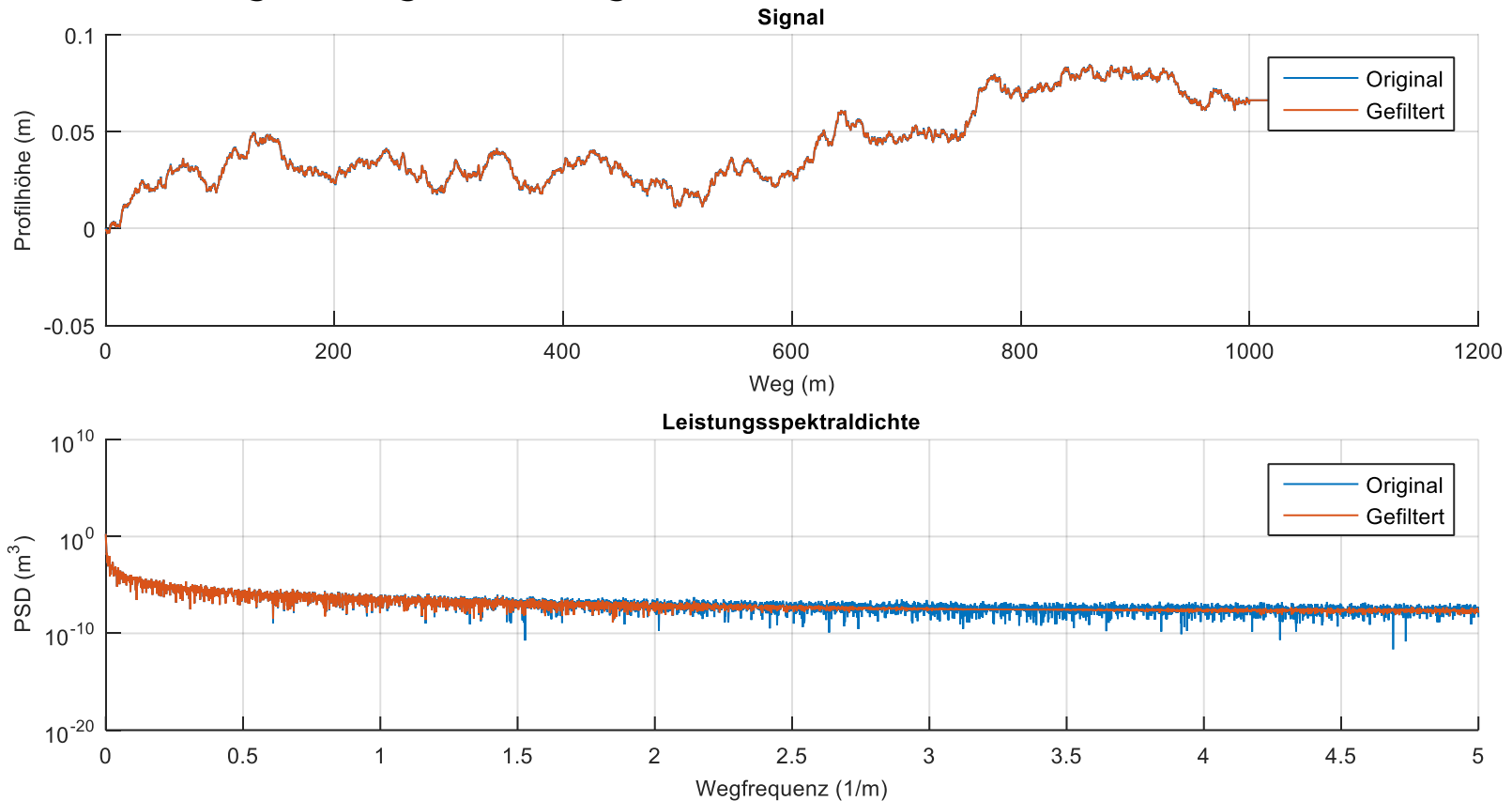
IPG TruckMaker Simulation



- Importierung
- Visualisierung
- Simulation

Beispiel eines generierten Straßenprofils

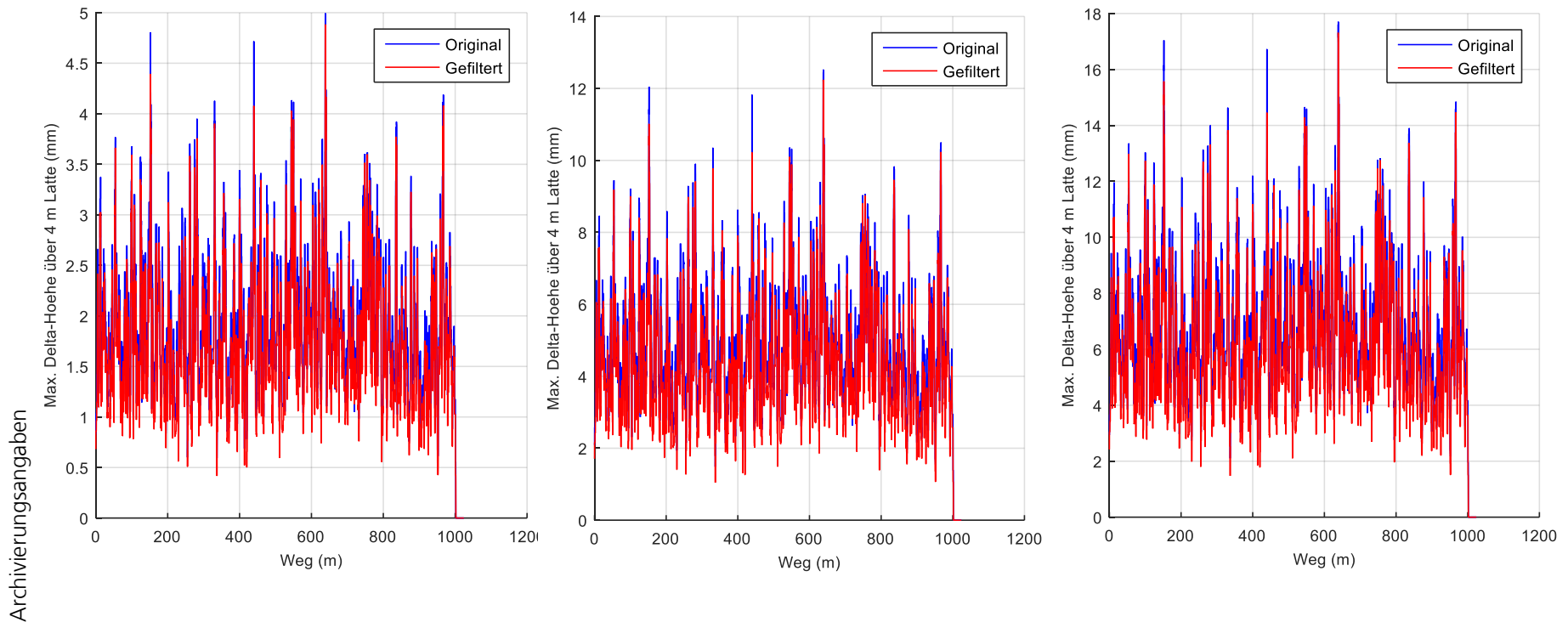
- Unebenheitsmaß AUN: $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{rad}$ (Klasse A ISO)
- Welligkeit: 2
- Diskretisierung: 0,1 m (gefiltert mit gleitendem Mittelwert über 3 Punkte)



Anhang D des Fachberichts zum Vorhaben LiBra – Lasten in Bewegung rechtssicher aufzeichnen – Seite 66

Analyse des Straßenprofils auf Basis der Vorgabe der BAST für WIM-Systeme

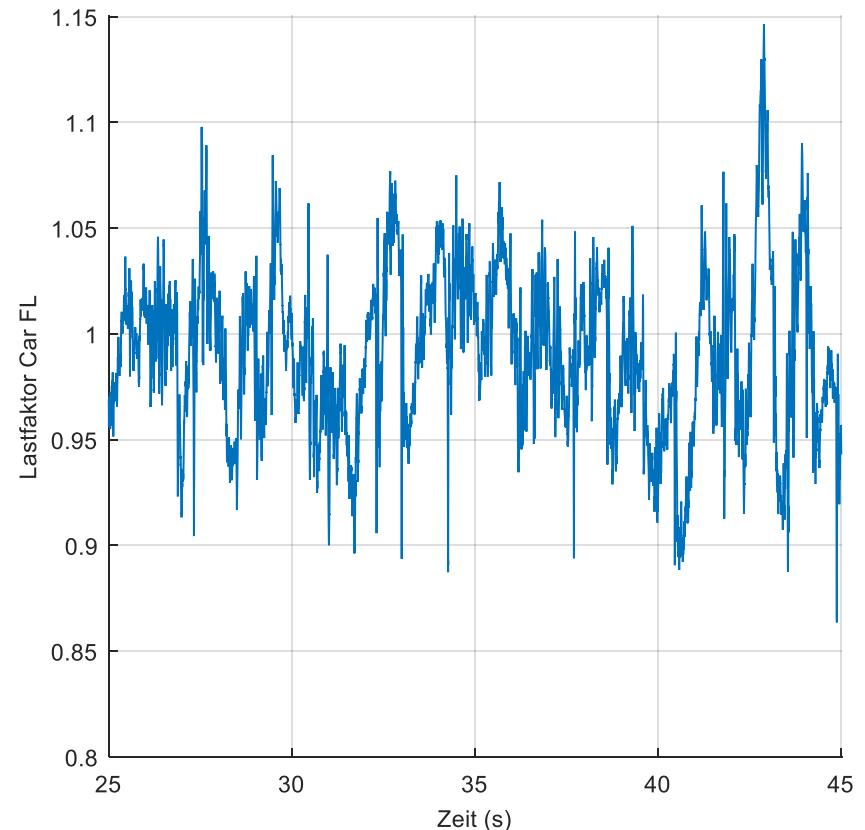
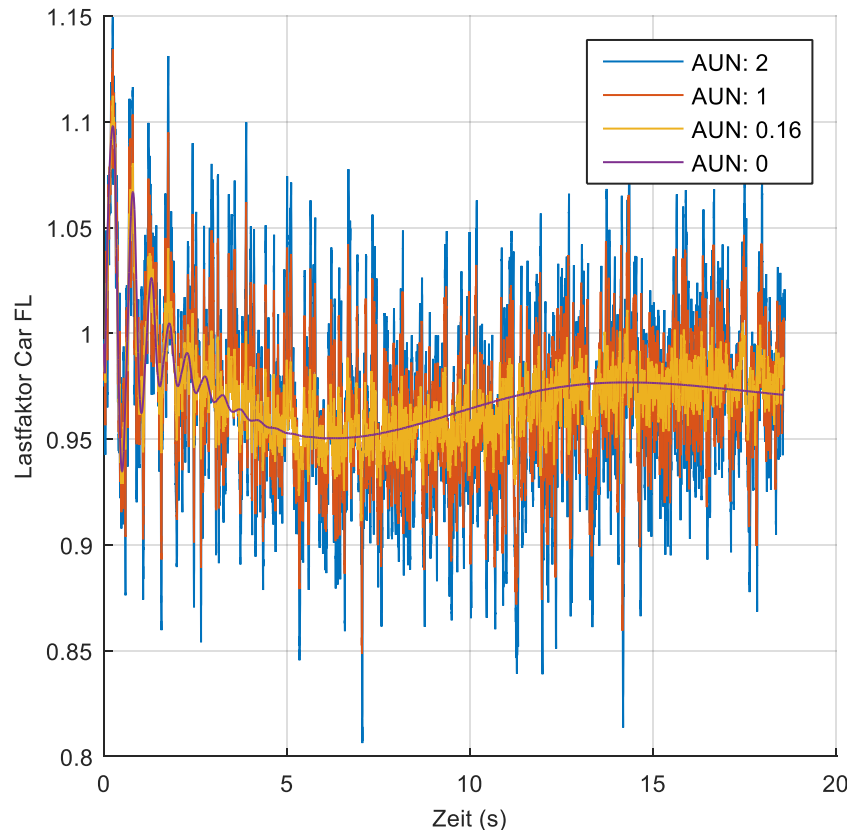
Unebenheitsmaß AUN in $10^{-6} \text{ m}^3/\text{rad}$



Anhang D des Fachberichts zum Vorhaben LiBra – Lasten in Bewegung rechtssicher aufzeichnen – Seite 67

Simulierte Radlast mit verschiedenen AUN-Werten und gemessene Radlast

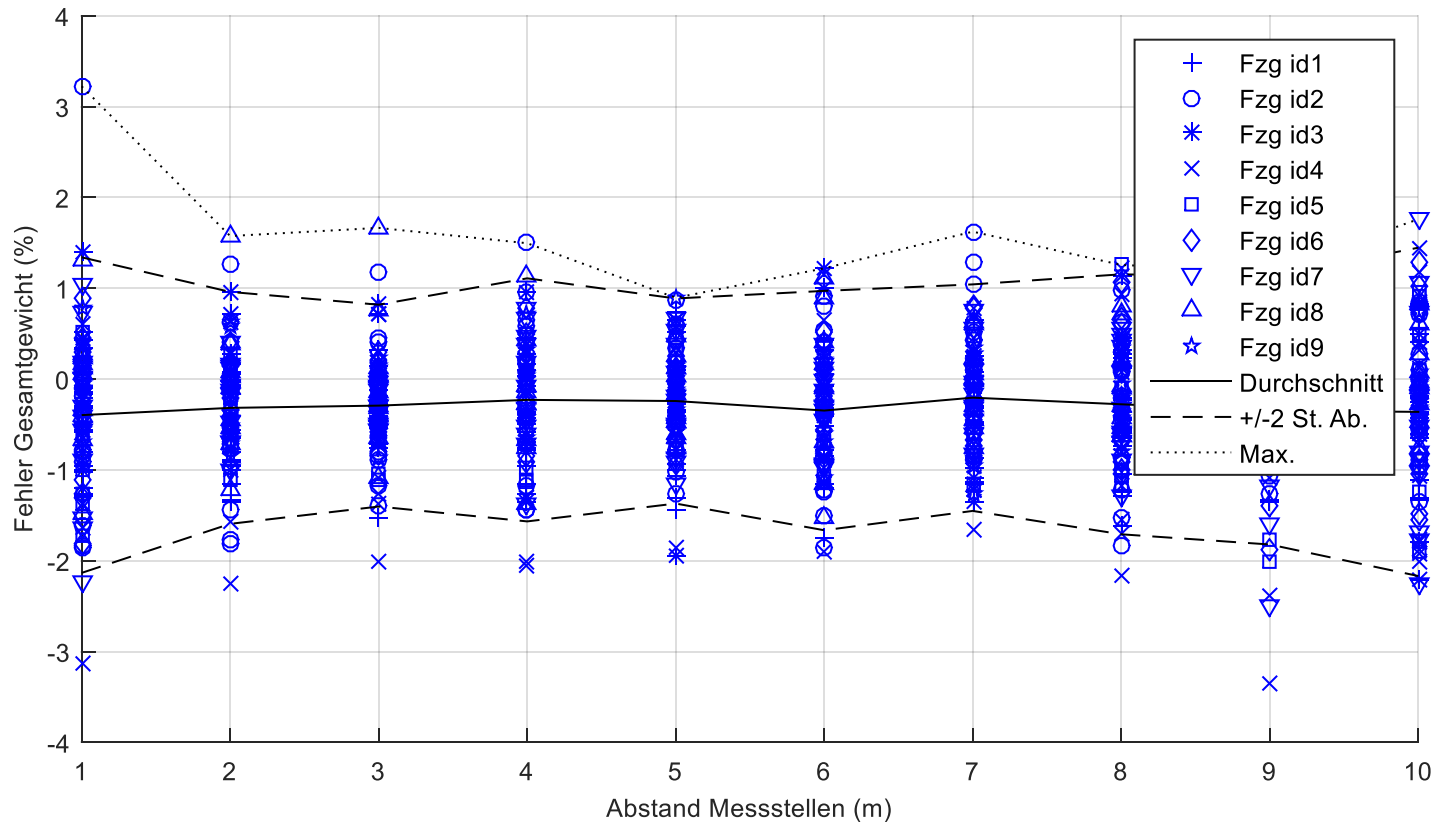
- Plausibilisierungsvergleich mit Messdaten (anderes Fahrzeug)
- Konstante Geschwindigkeit: ca. 80 km/h



Einflussfaktoren und Wertebereiche für AP 2.3

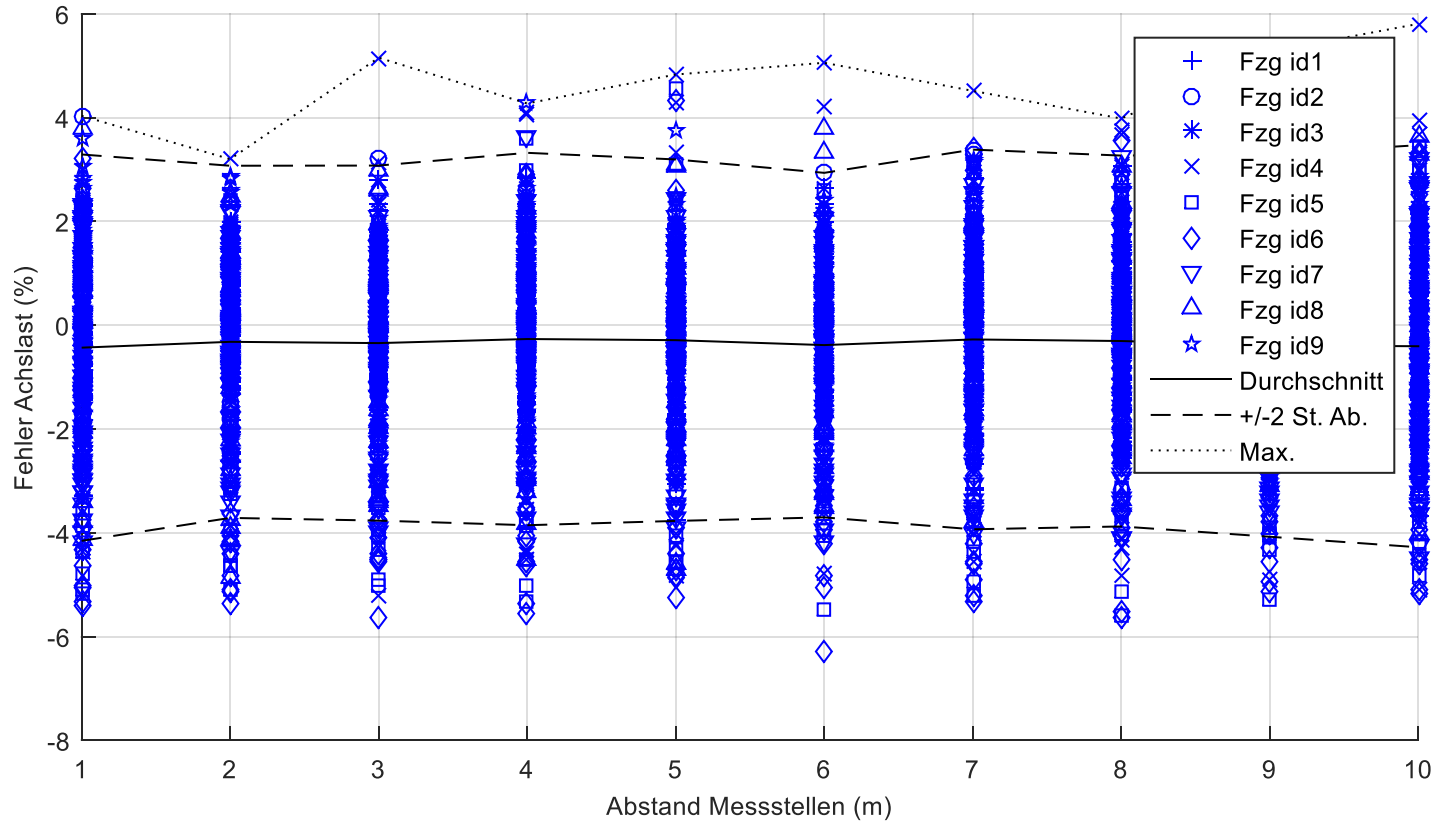
Nr.	Einflussfaktoren	Standard	Variation	Einheit
Messsystem				
1	Abstand Messstellen	4	1 – 10 (Step 1)	m
2	Anzahl Messstellen	3	1 – 8 (Step 1)	-
3	Layout Messstellen	1 (konst.)	4 Layouts	-
4	Höhe / Tiefe des Sensors	0	-5; -2; -1; 0; 1; 2; 5	mm
5	Übersprechen	0	-3; -2; -1; 0; 1; 2; 3	%
6	Offset Messstellen	(durchkombiniert)	0 – 200 (Step 20)	m
Straße				
7	Neigung	0	-2; -1; 0; 1; 2	%
8	Steigung	0	-2; -1; 0; 1; 2	%
9	Rauigkeit (Straßenunebenheit)	0,16	0; 0,08; 0,16; 0,5; 1; 2	m ³ /rad
10	Reibwert	1	0,4; 0,6; 0,8; 1	-
Fahrzeug				
11	Typ	(durchkombiniert)	1 - 9	-
12	Variation der Beladung	0	-30; -20; -10; 0; 10; 20; 30	%
13	Variation der vertikalen Fahrwerk-Steifigkeit	0	-20; -10; 0; 10; 20	%
14	Variation der vertikalen Fahrwerk-Dämpfung	0	-20; -10; 0; 10; 20	%
15	Variation des Reifenluftdrucks (vert. Steifigkeit)	0	-30; -20; -10; 0; 10; 20	%
Umgebung (Wind)				
16	Wind-Geschwindigkeit	0 (10)	0; 5; 10; 15; 20	m/s
17	Wind-Winkel (Bei Wind-Geschwindigkeit 10 m/s)	90	0; 45; 90; 135; 180	deg
18	Wind-Bö	0	0; 5; 10; 15; 20	m/s
Fahrmanöver				
19	Bremmung	0	0; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5	m/s ²
20	Beschleunigung (bei Geschwindigkeit 60 km/h)	0	0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4	m/s ²
21	Lenkradwinkel beim Lenkstoß	0	0; 10; 20; 30; 40	deg
22	Lenkradwinkel beim Wedeln (0,2 Hz)	0	0; 2,5; 5; 7,5; 10	deg
23	Geschwindigkeit	80 (60)	5; 20; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 110; 120	km/h

Abstand Messstellen – Fehler Gesamtgewicht

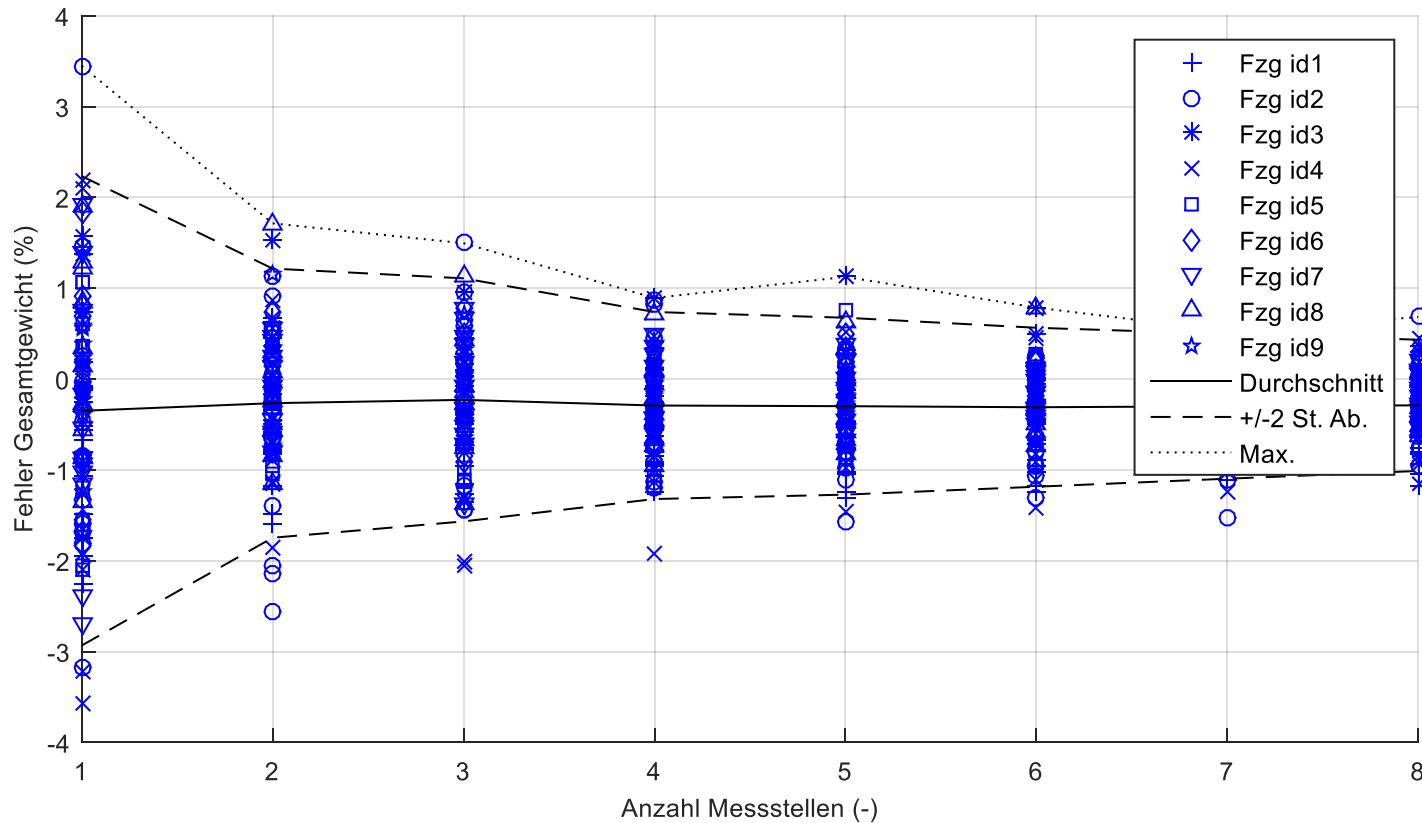


Archivierungsangaben

Abstand Messstellen – Fehler Achslasten

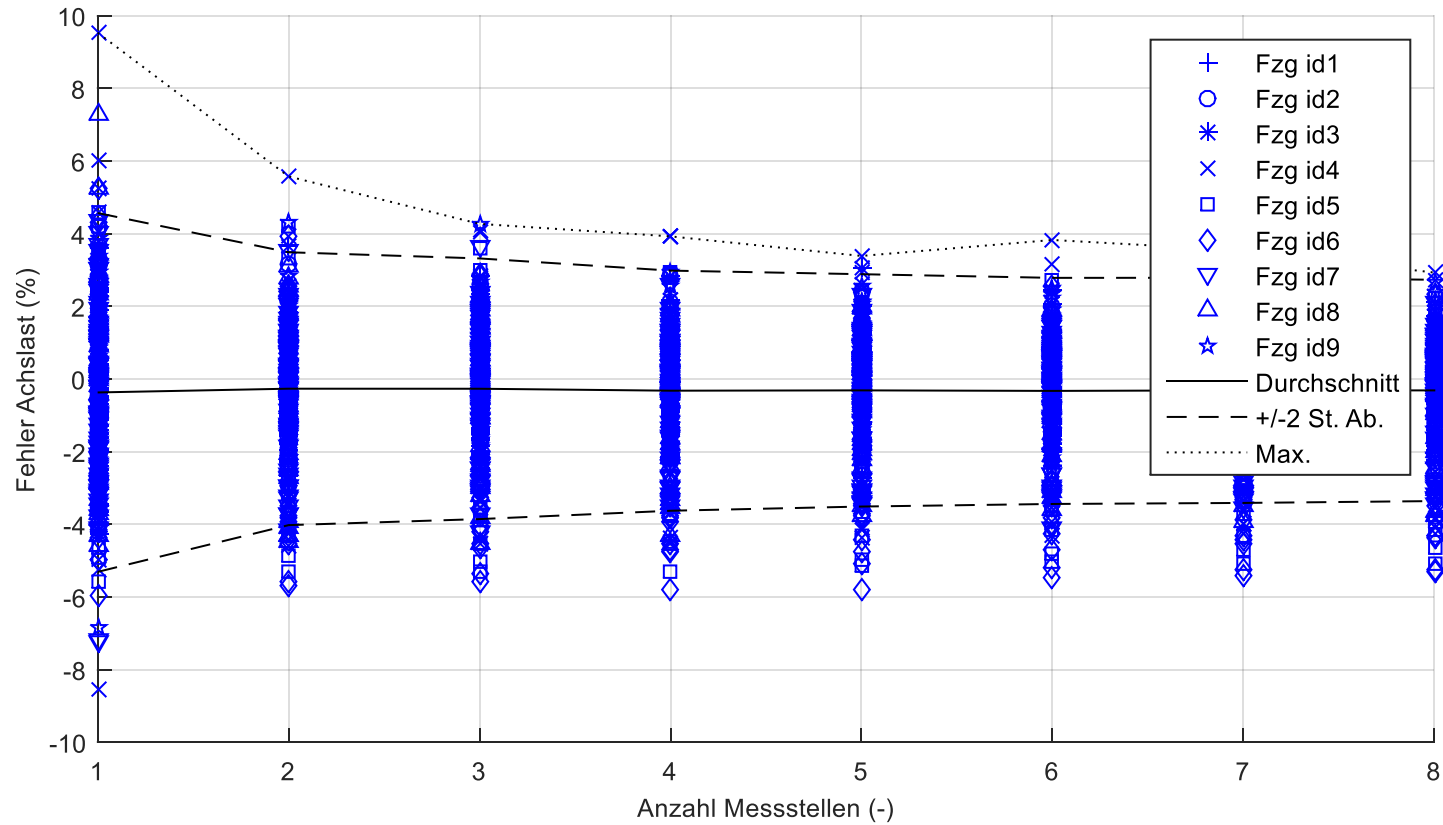


Anzahl Messstellen – Fehler Gesamtgewicht



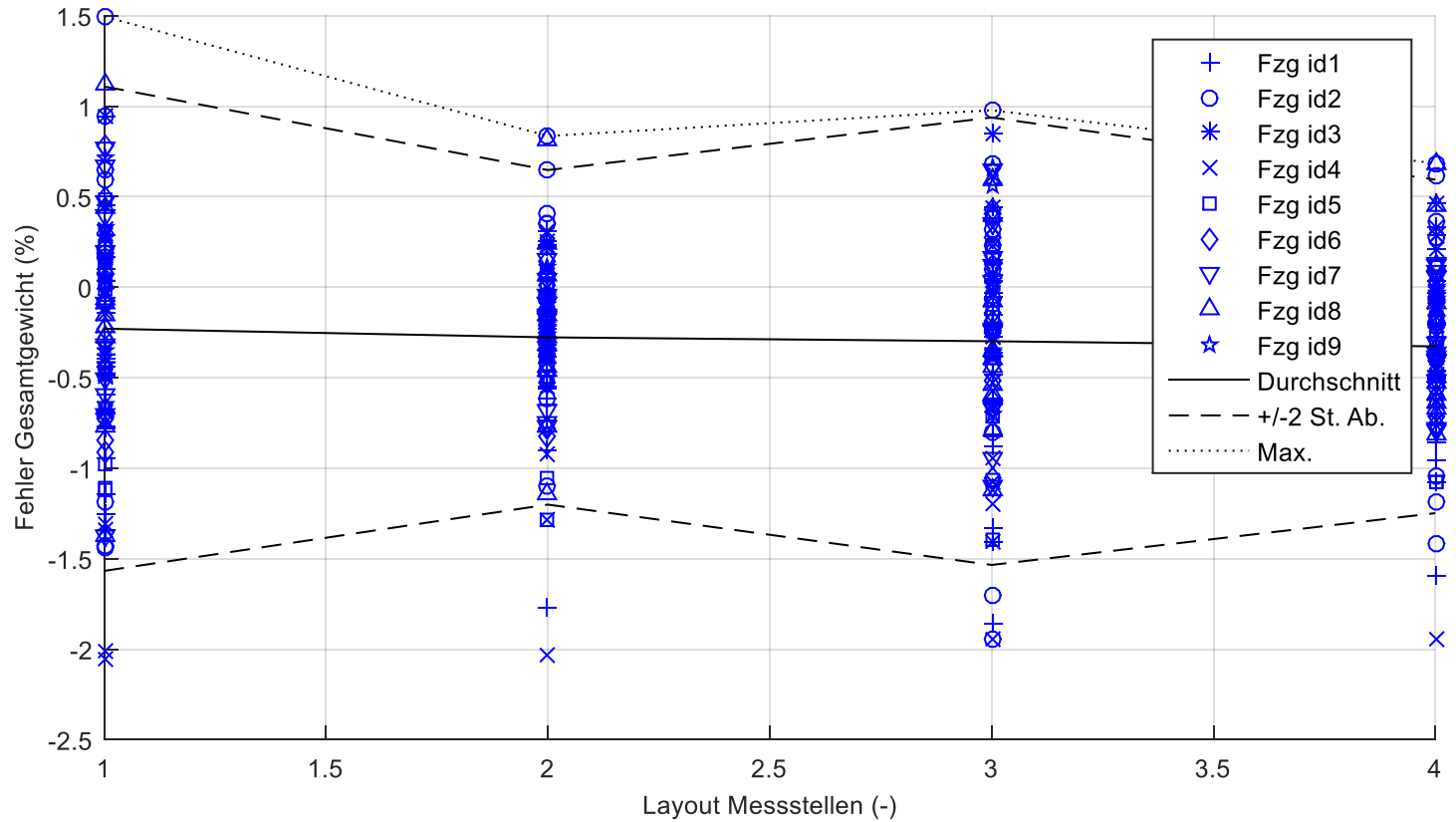
Archivierungsangaben

Anzahl Messstellen – Fehler Achslasten



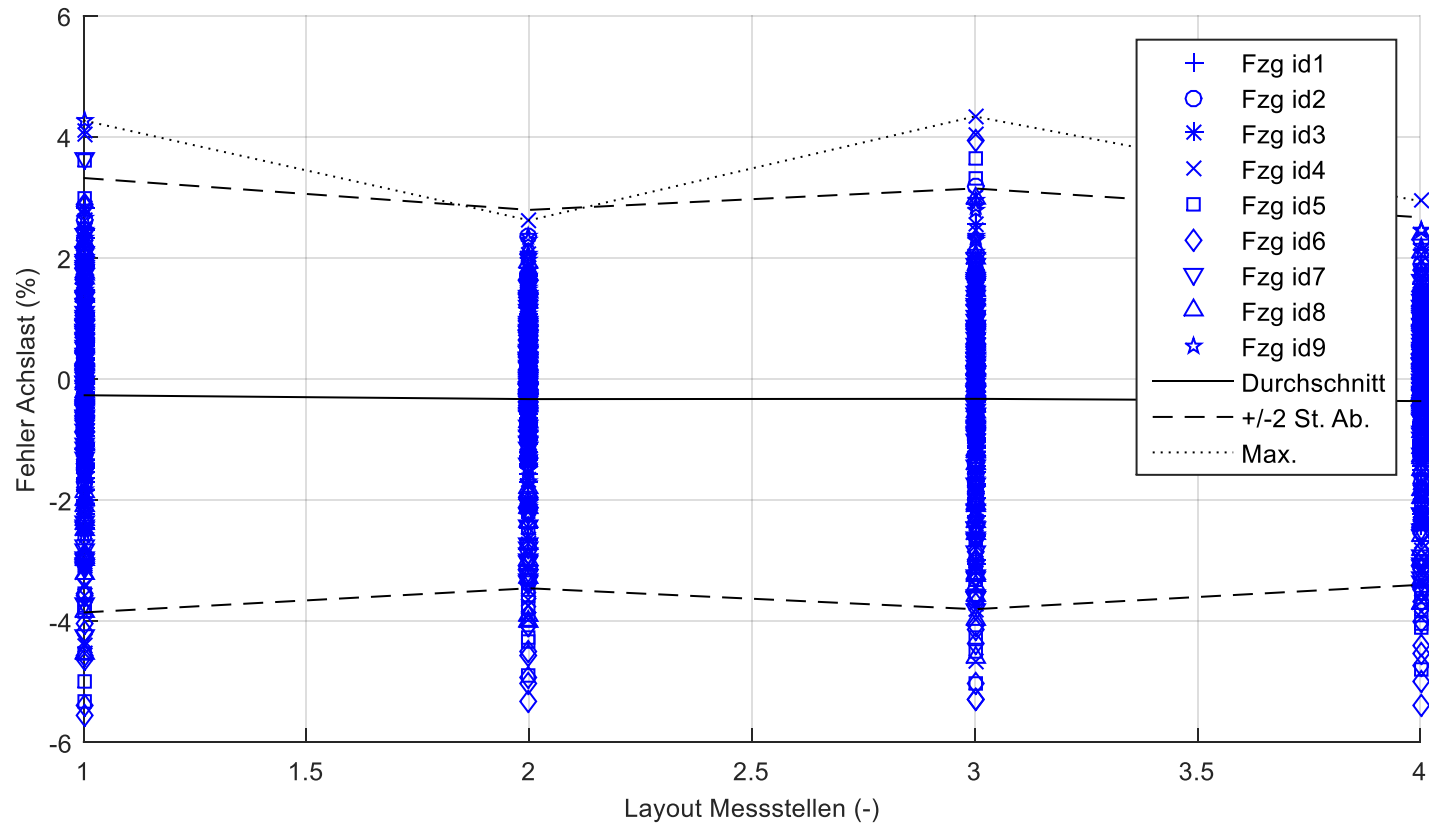
Archivierungsangaben

Layout Messstellen – Fehler Gesamtgewicht



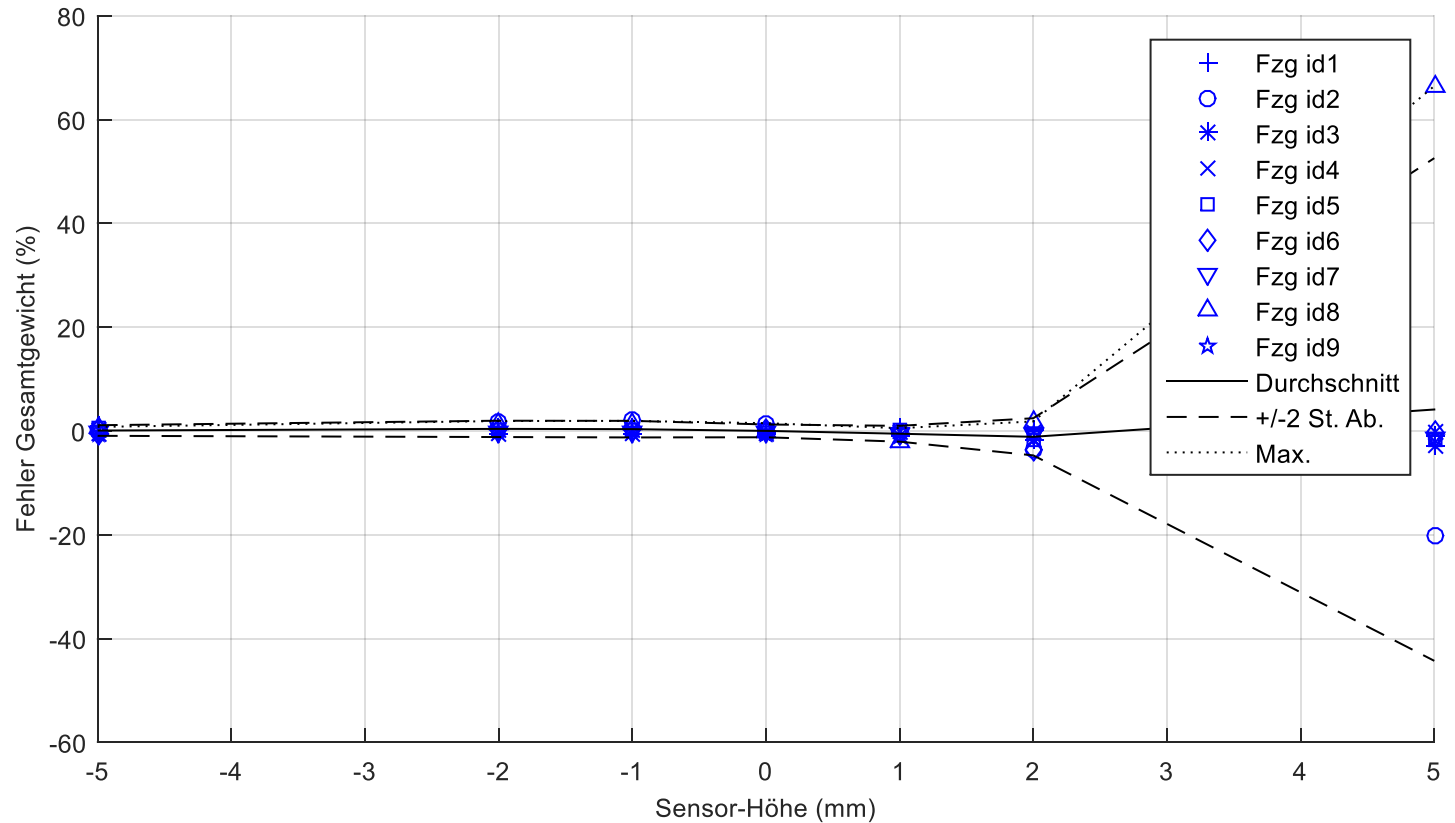
Archivierungsangaben

Layout Messstellen – Fehler Achslasten

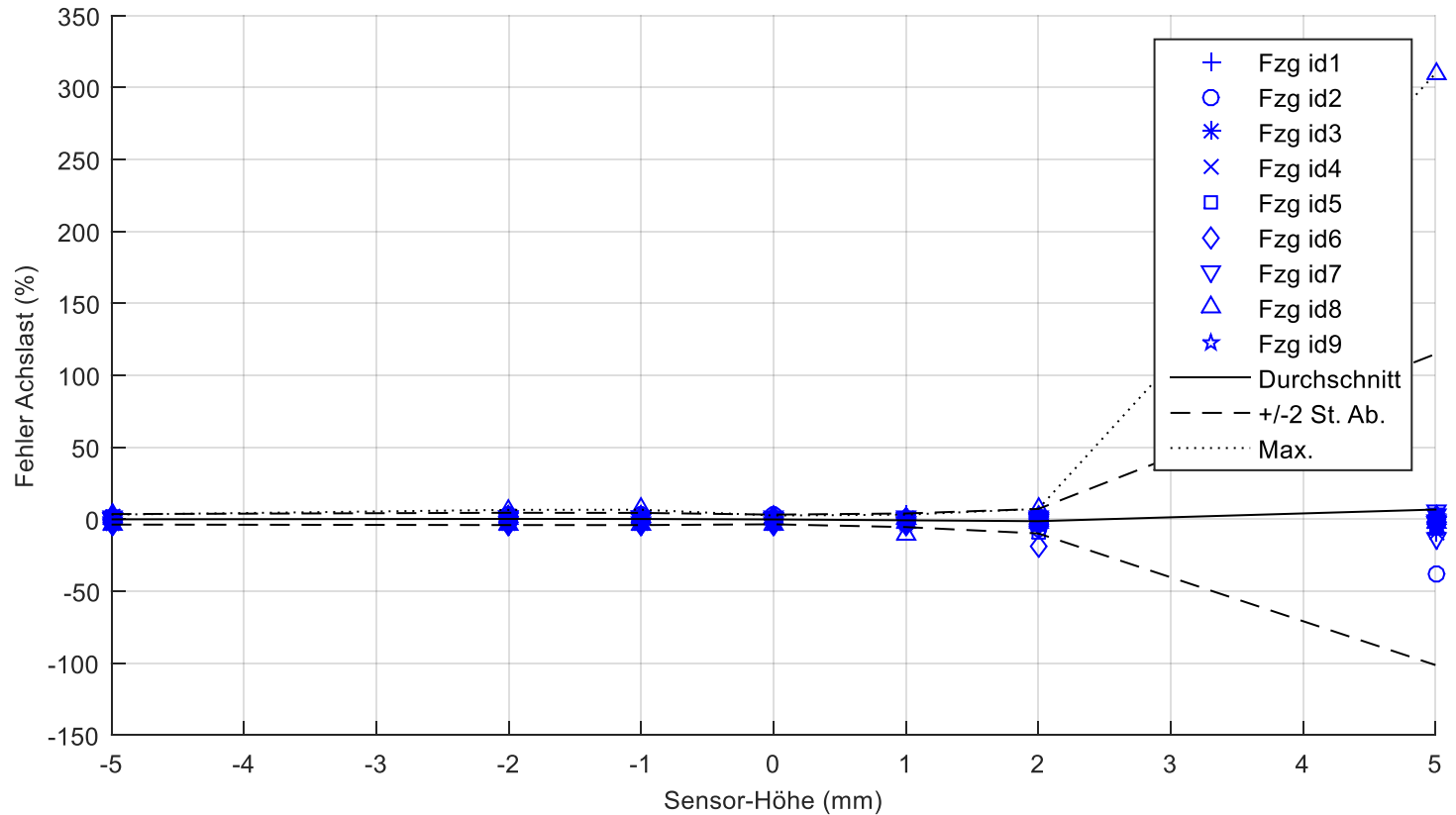


Archivierungsangaben

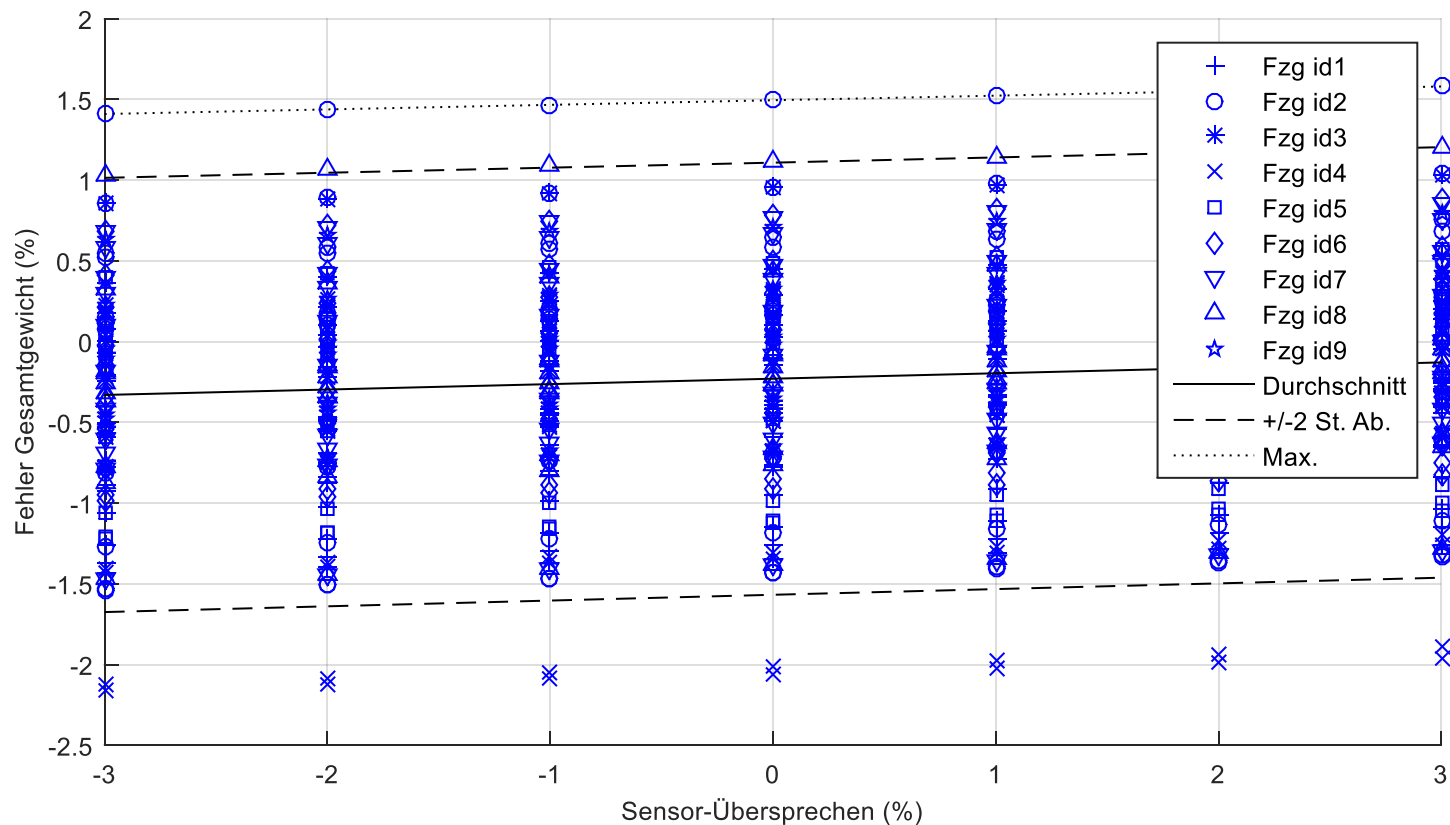
Höhe / Tiefe des Sensors – Fehler Gesamtgewicht



Höhe / Tiefe des Sensors – Fehler Achslasten

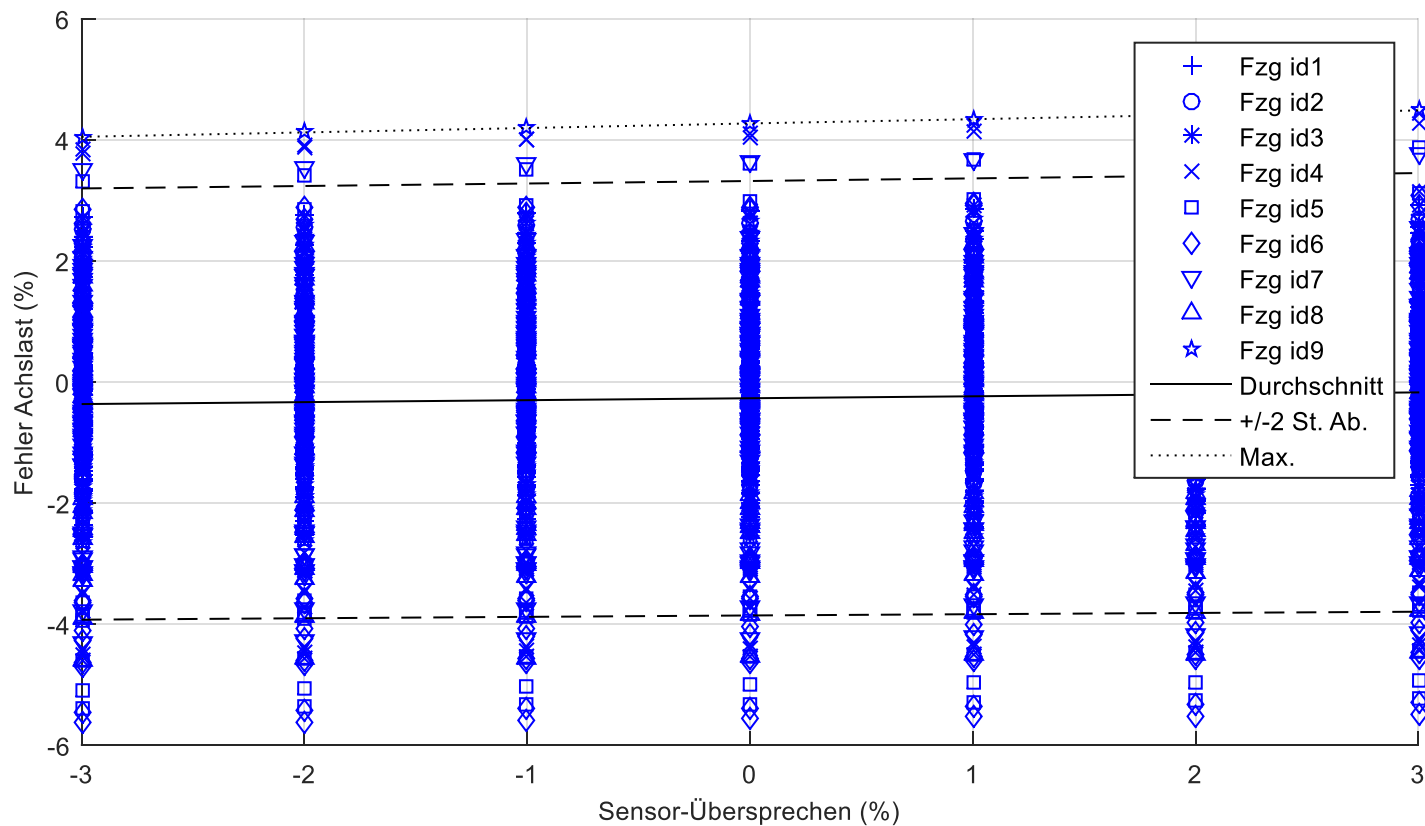


Übersprechen – Fehler Gesamtgewicht

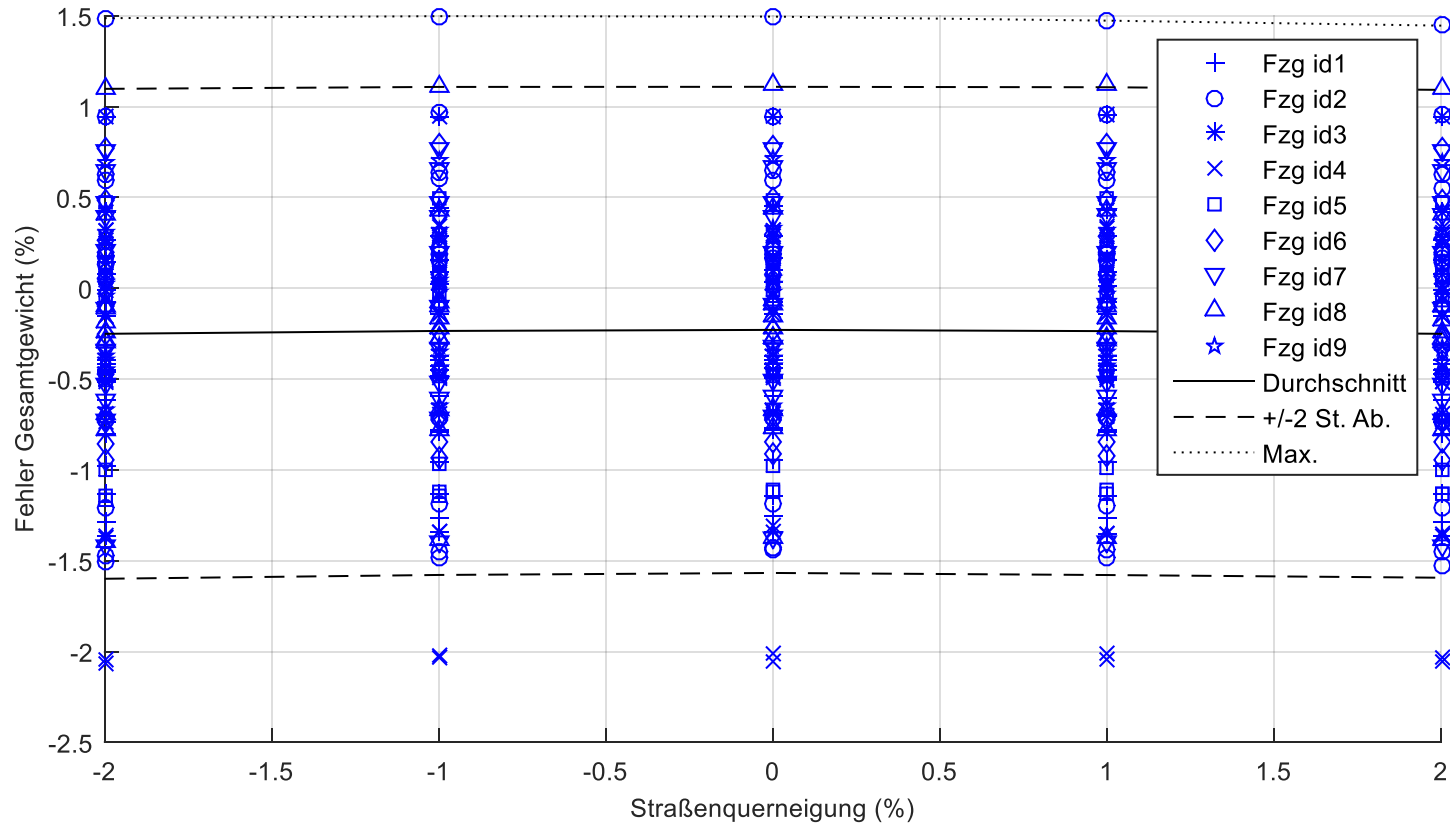


Archivierungsangaben

Übersprechen – Fehler Achslasten

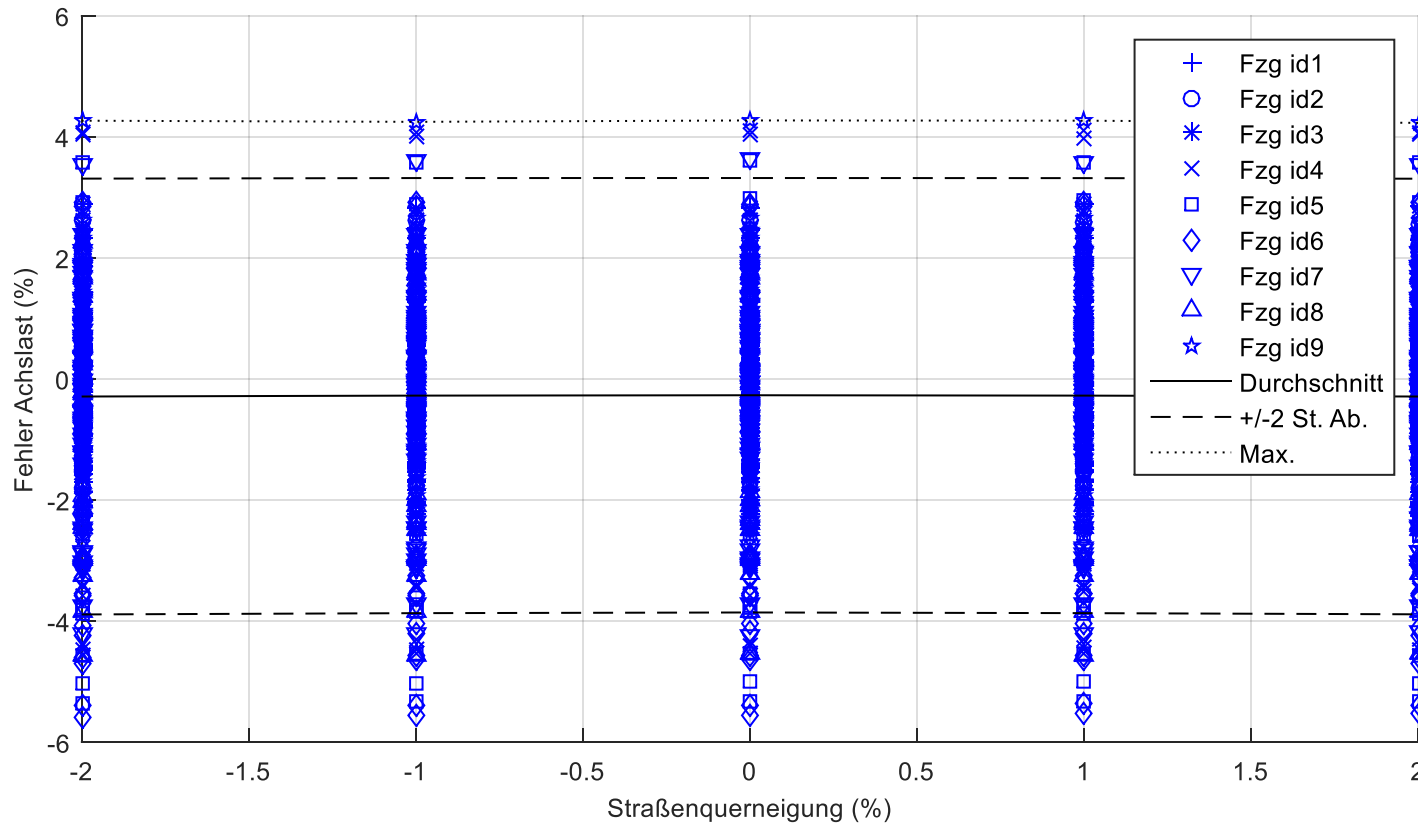


Neigung der Straße – Fehler Gesamtgewicht

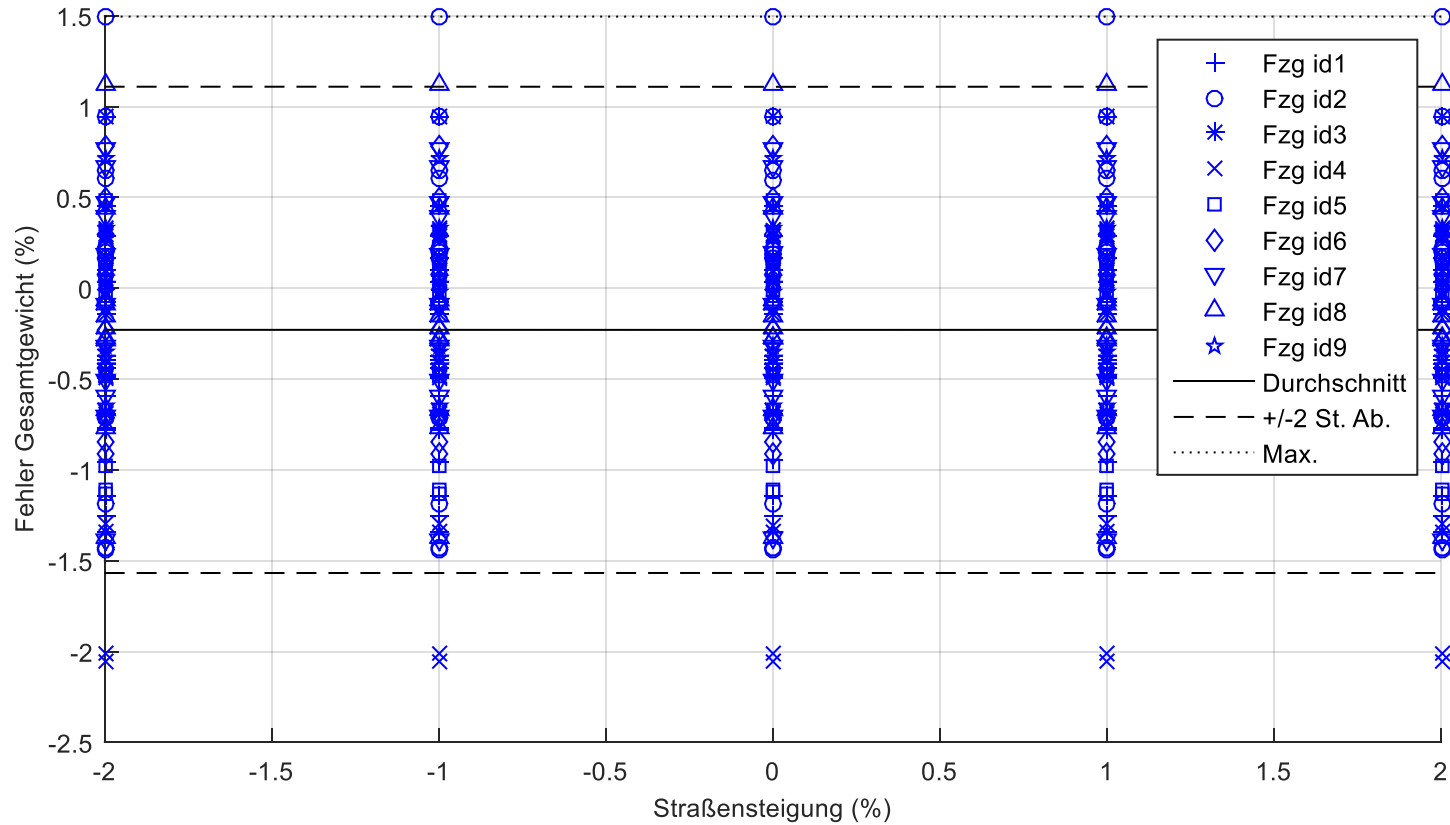


Archivierungsangaben

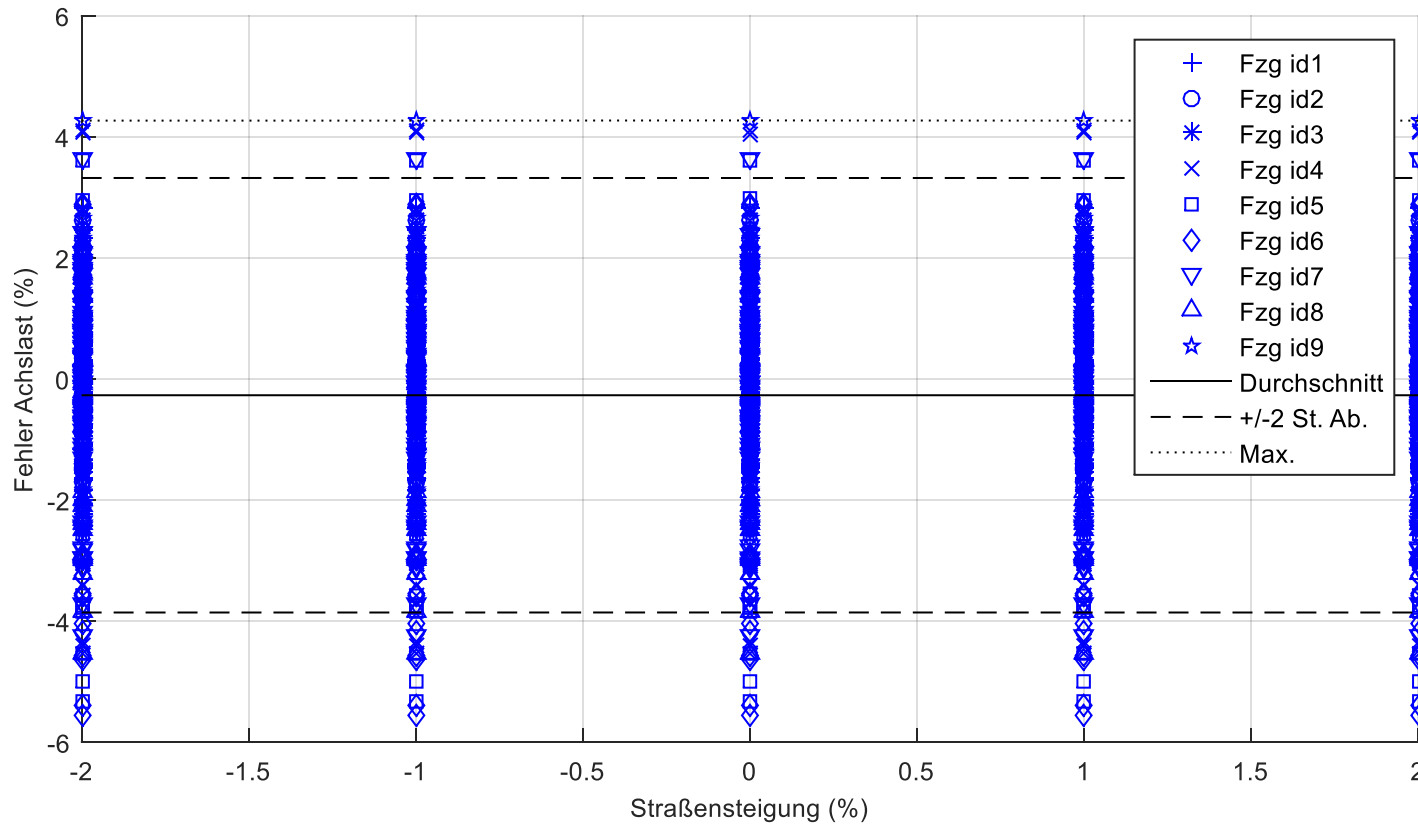
Neigung der Straße – Fehler Achslasten



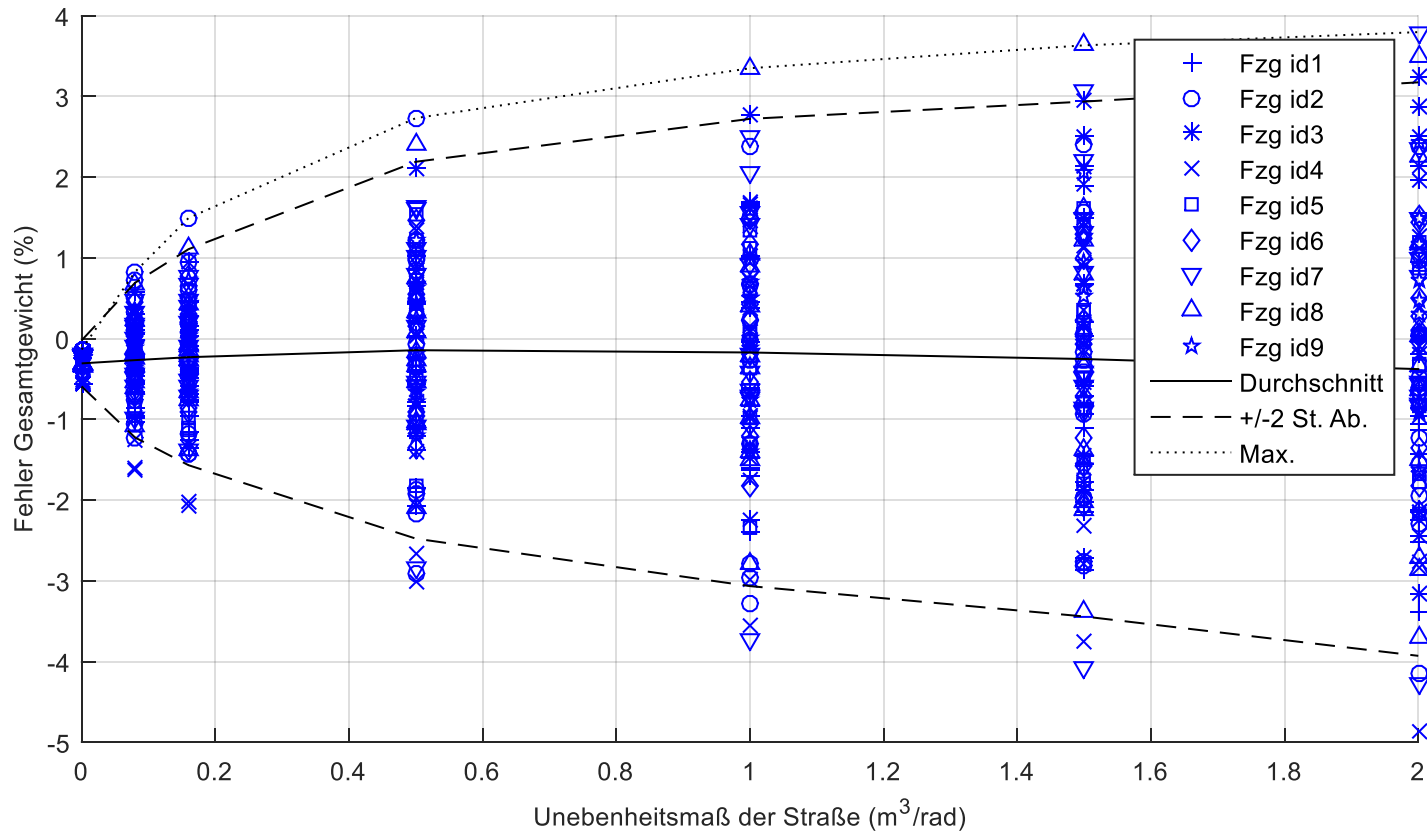
Steigung der Straße – Fehler Gesamtgewicht



Steigung der Straße – Fehler Achslasten

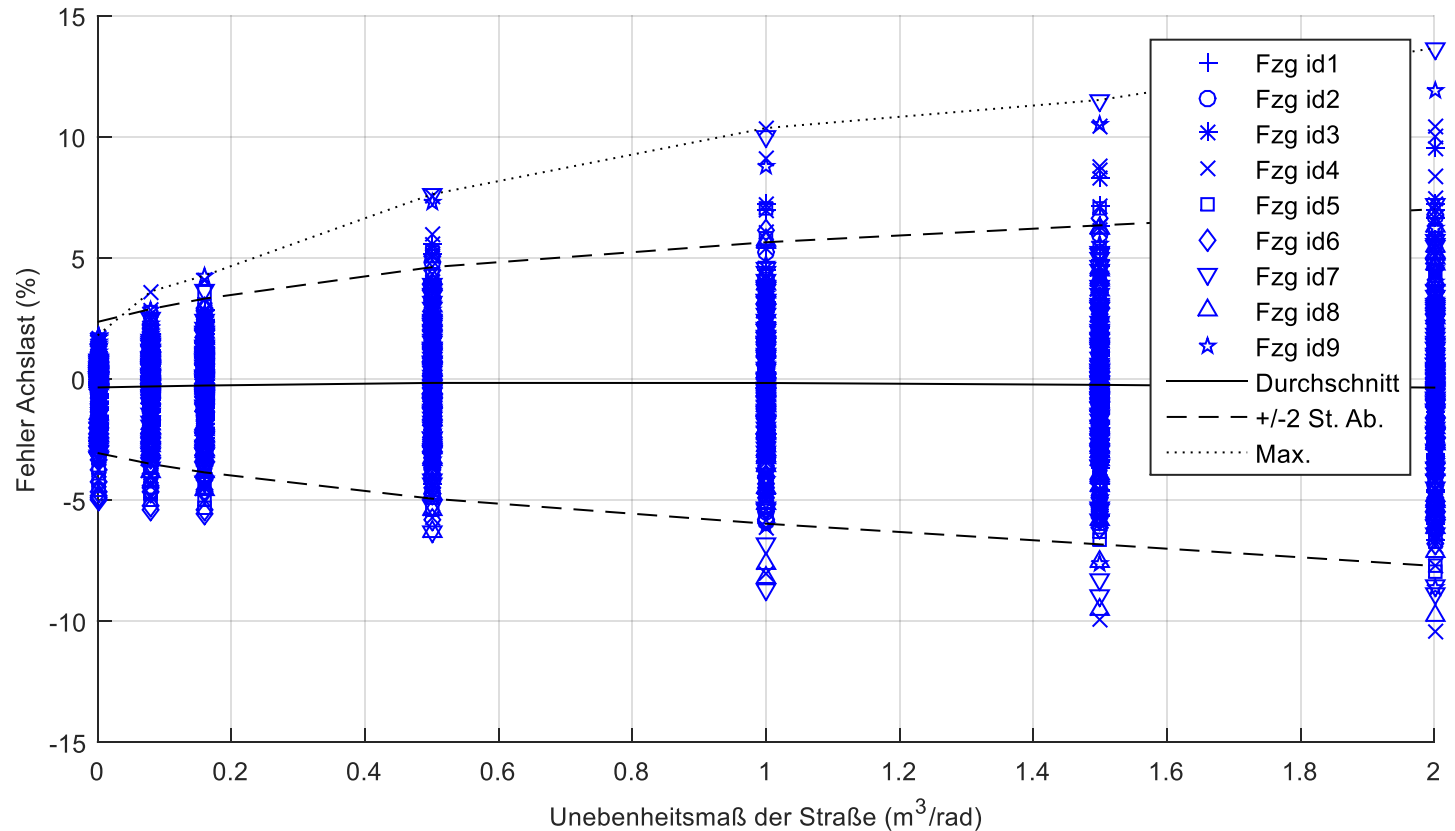


Rauigkeit der Straße (Straßenunebenheit) – Fehler Gesamtgewicht

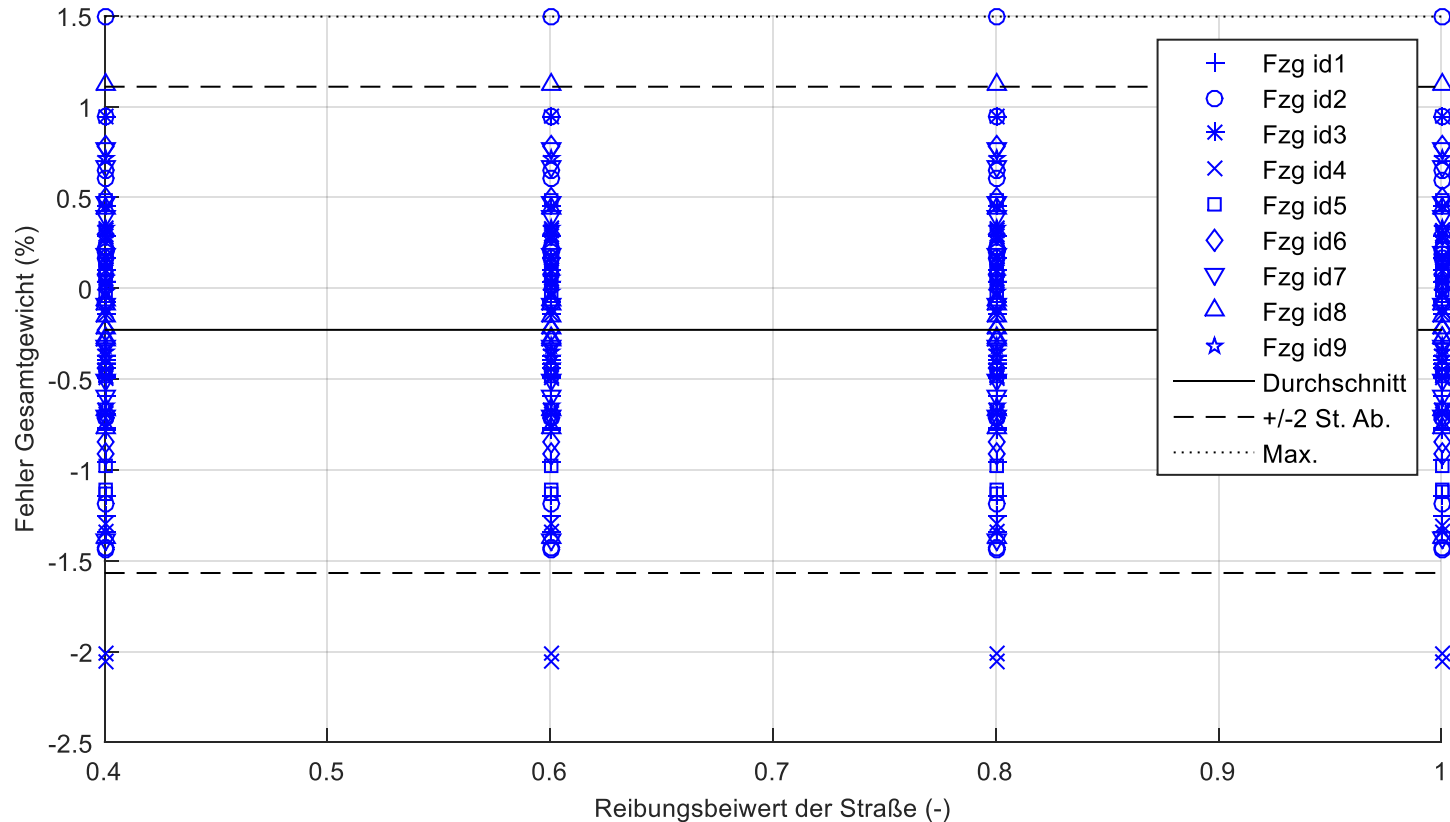


Archivierungsangaben

Rauigkeit der Straße (Straßenunebenheit) – Fehler Achslasten

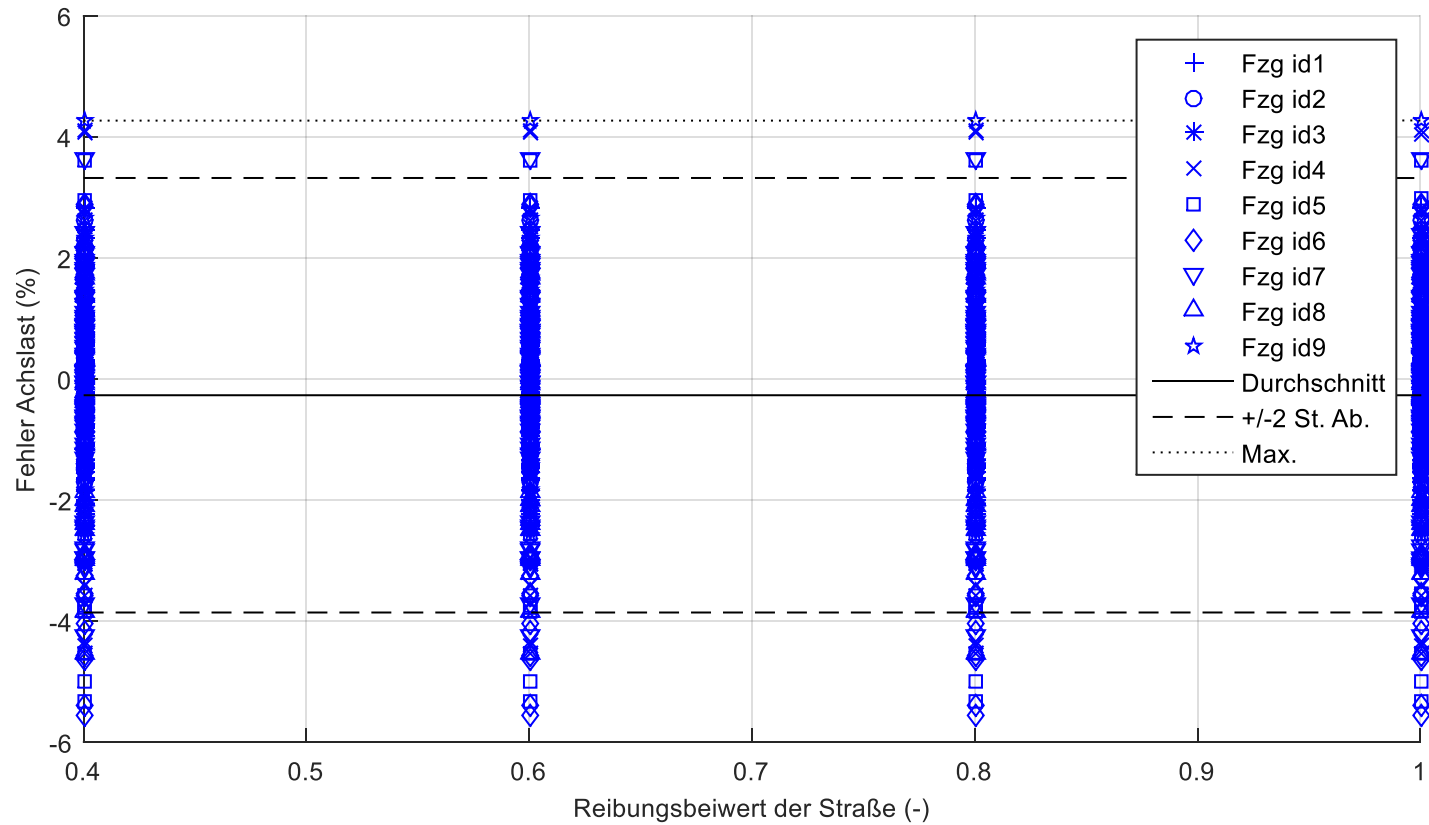


Reibewert der Straße – Fehler Gesamtgewicht



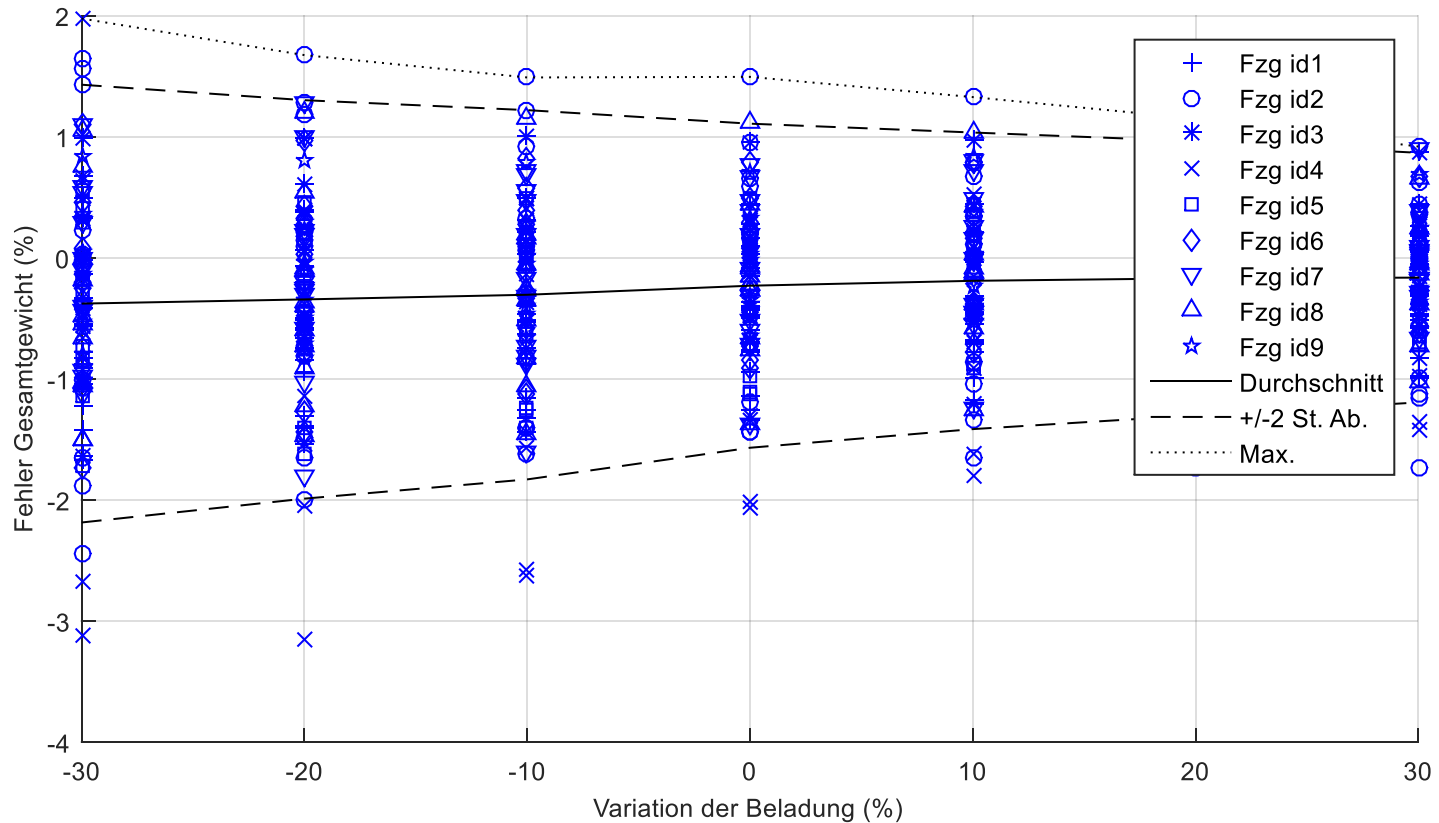
Archivierungsangaben

Reibewert der Straße – Fehler Achslasten

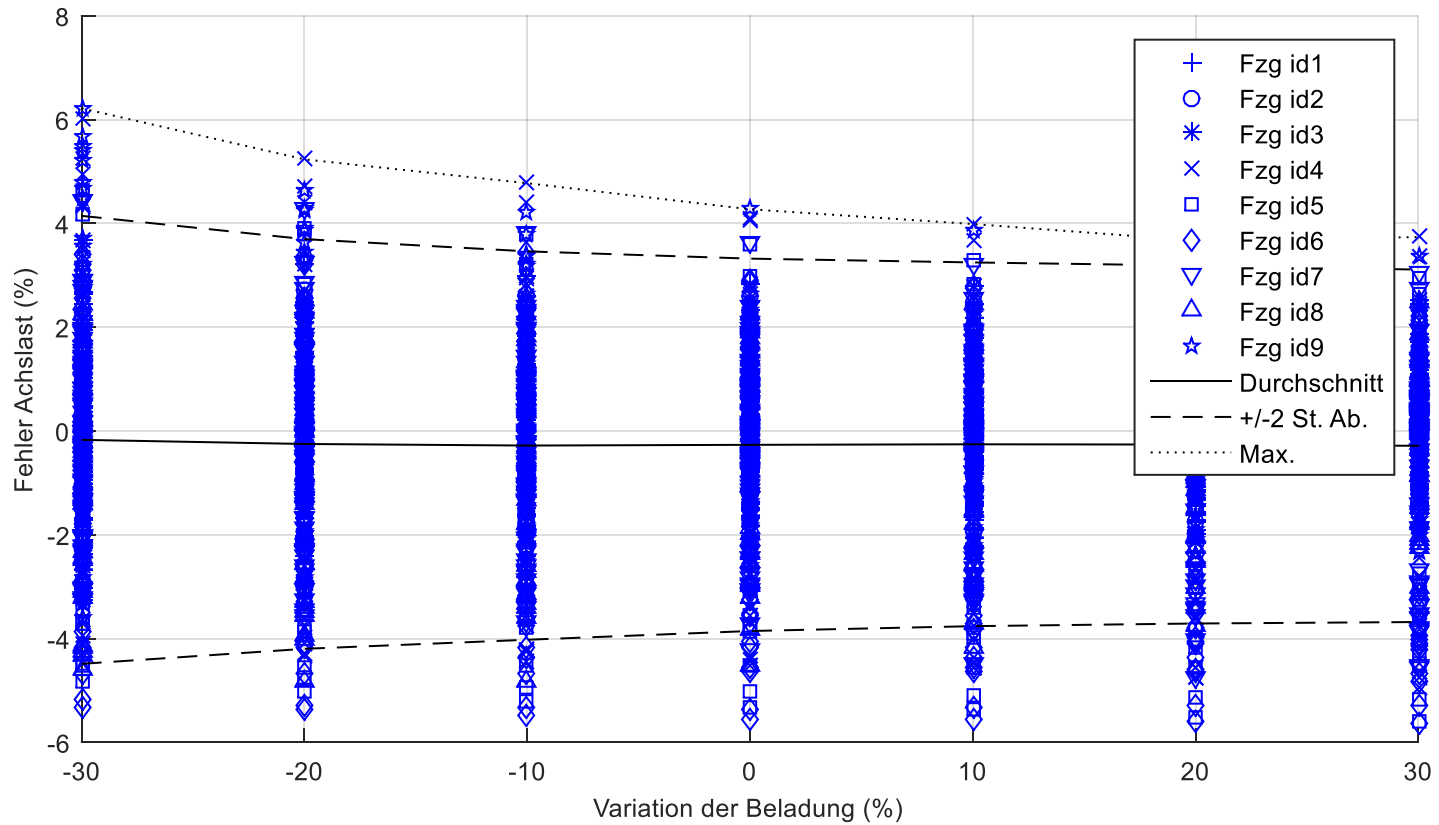


Archivierungsangaben

Variation der Beladung – Fehler Gesamtgewicht

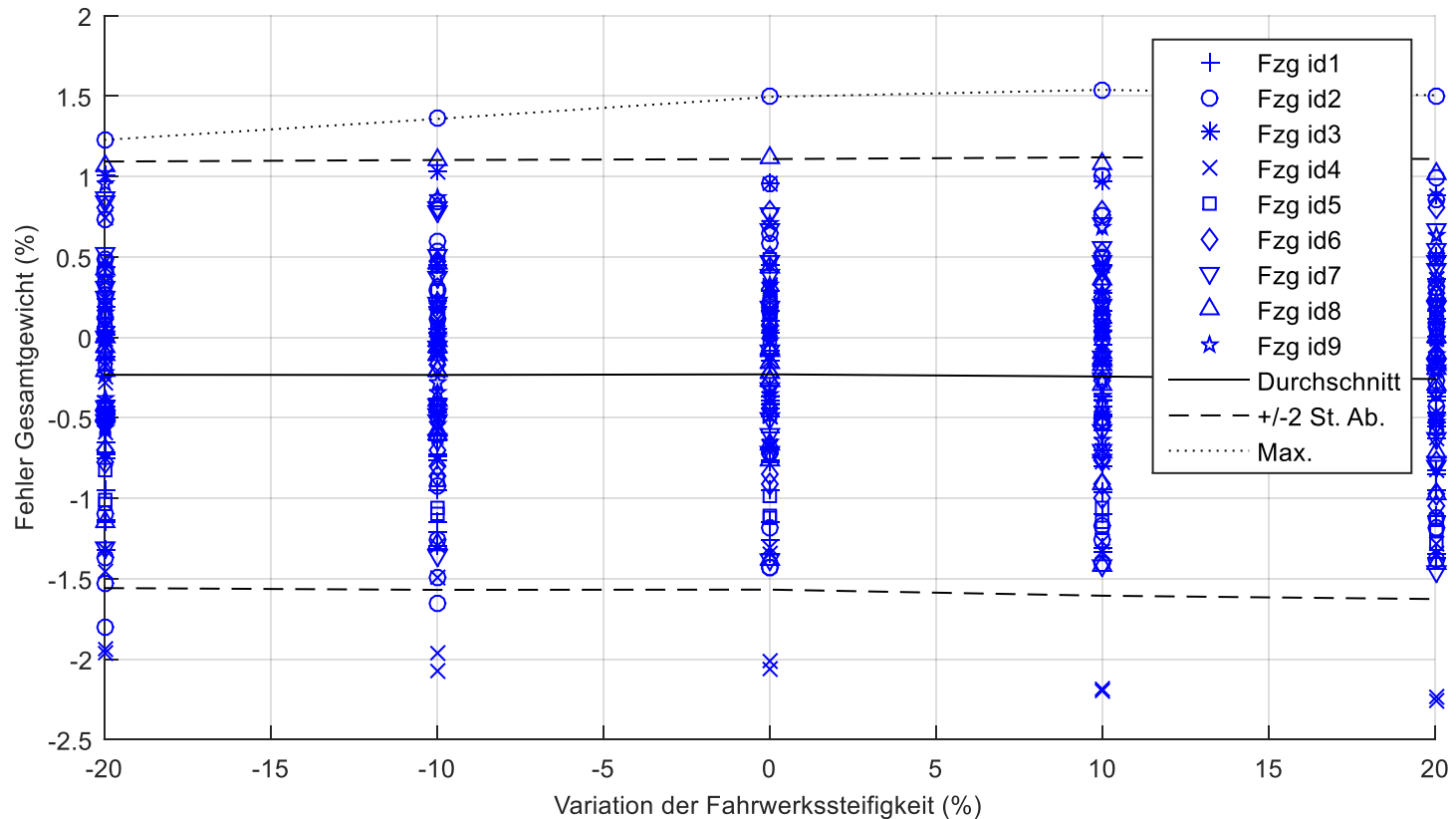


Variation der Beladung – Fehler Achslasten

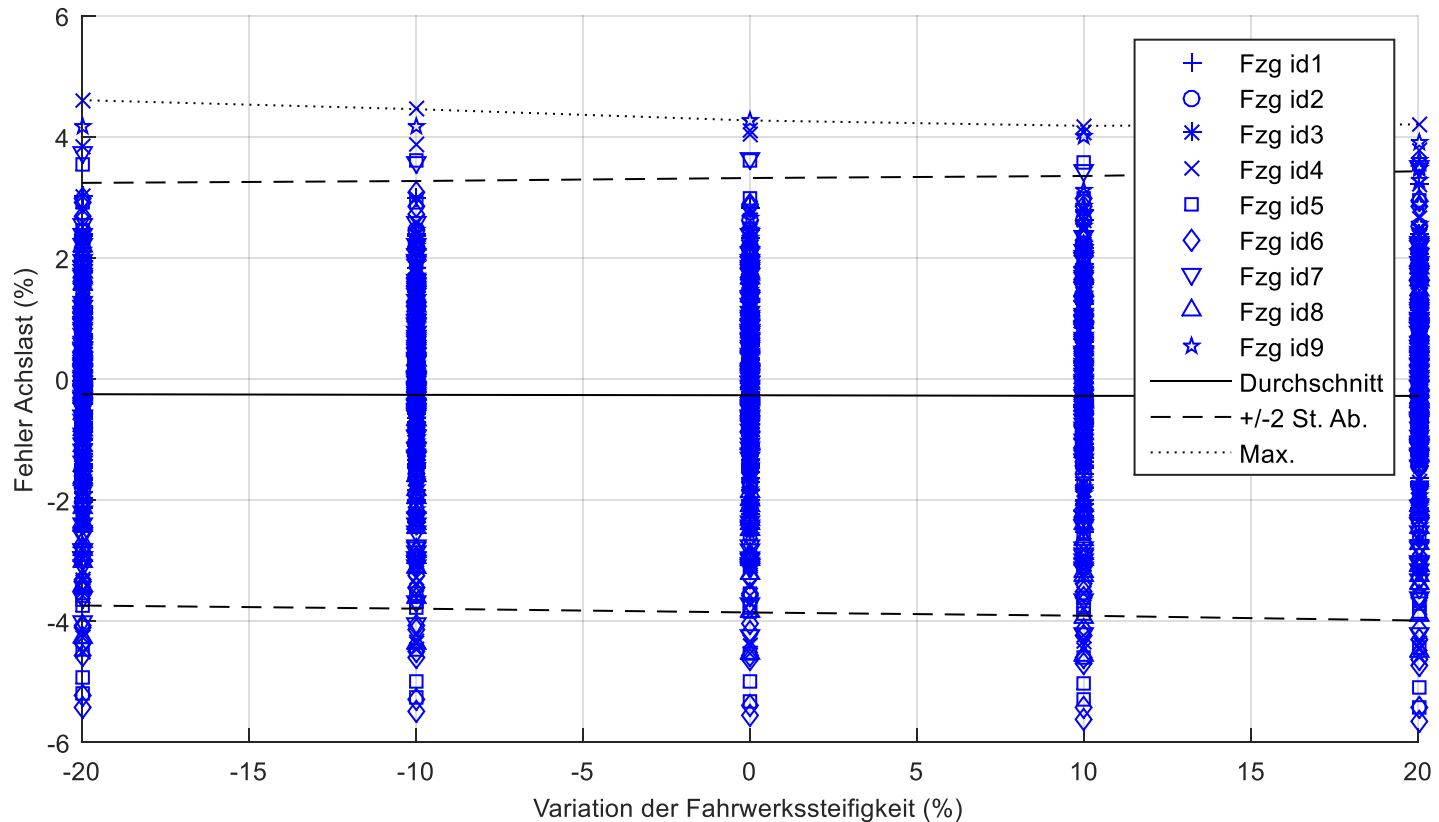


Archivierungsangaben

Variation der vertikalen Fahrwerk-Steifigkeit – Fehler Gesamtgewicht

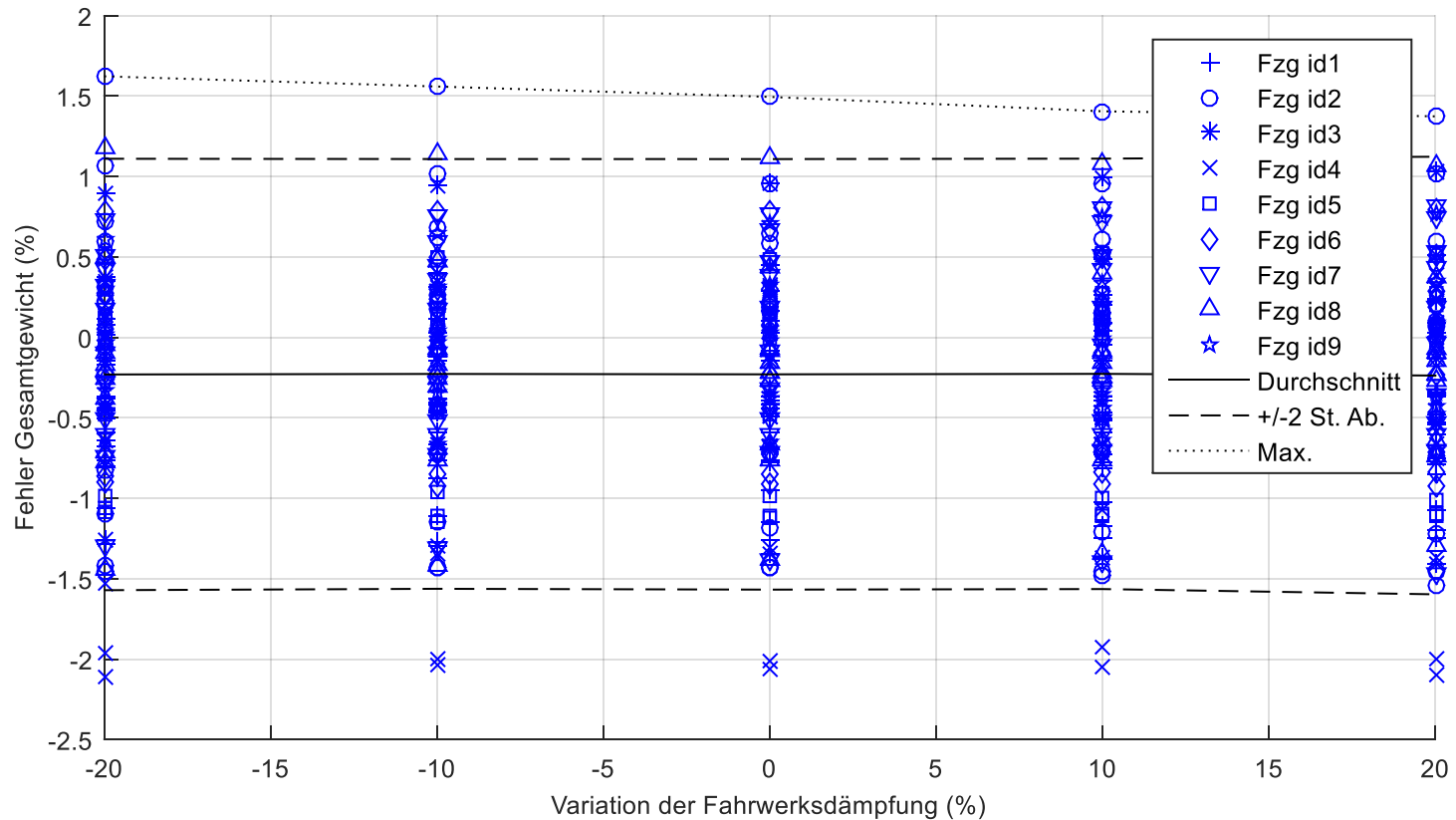


Variation der vertikalen Fahrwerk-Steifigkeit – Fehler Achslasten

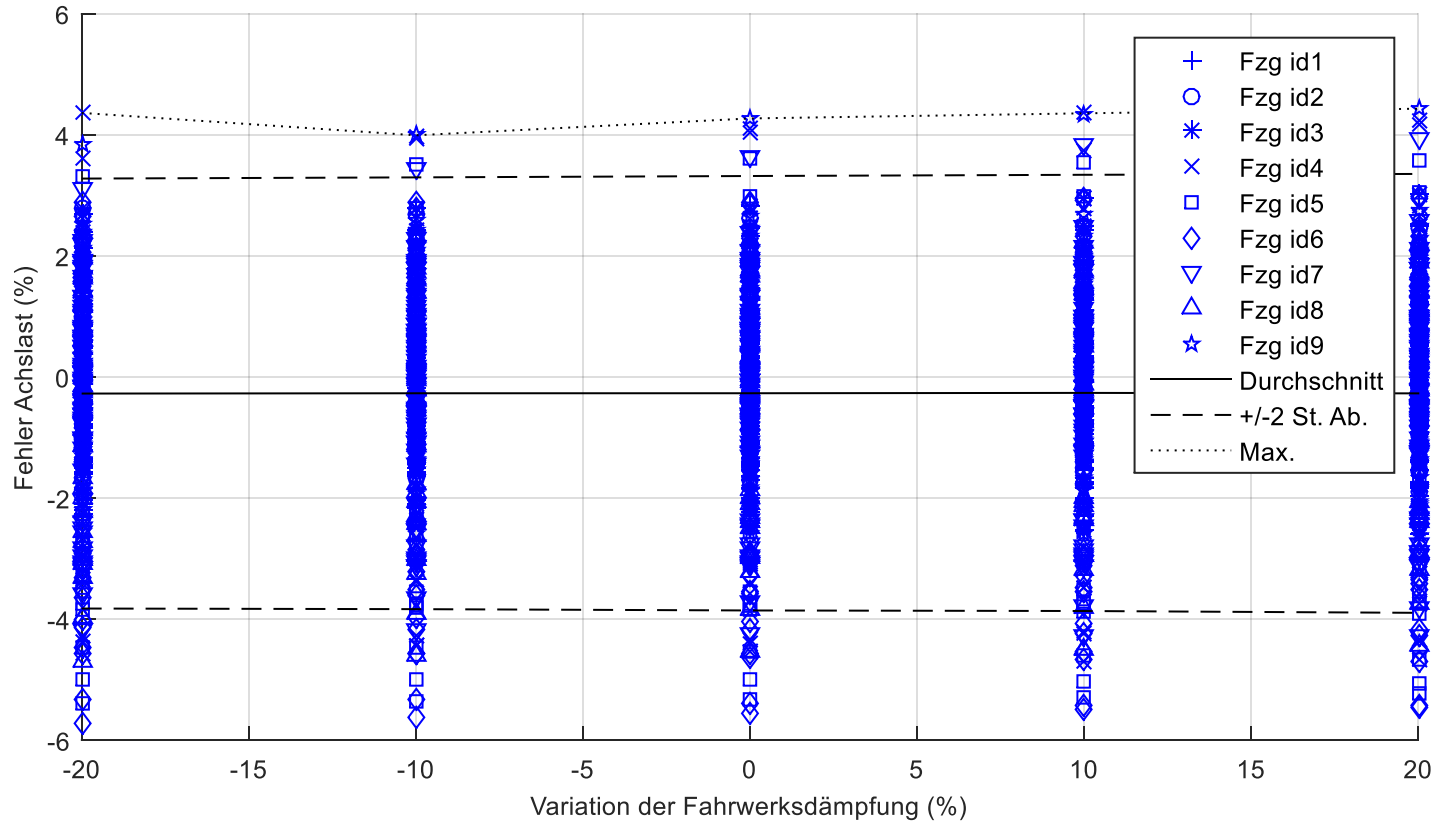


Archivierungsangaben

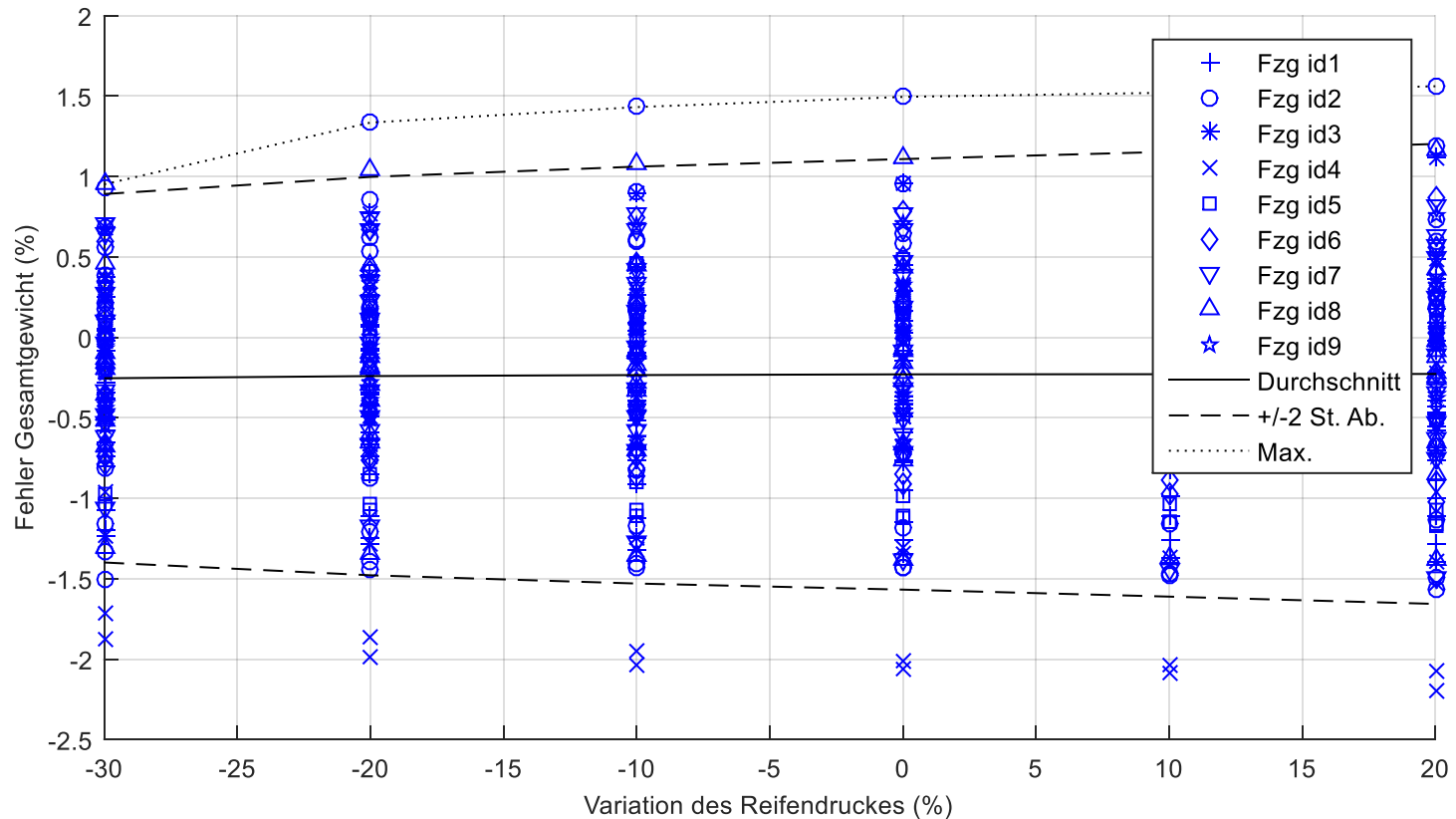
Variation der vertikalen Fahrwerk-Dämpfung – Fehler Gesamtgewicht



Variation der vertikalen Fahrwerk-Dämpfung – Fehler Achslasten

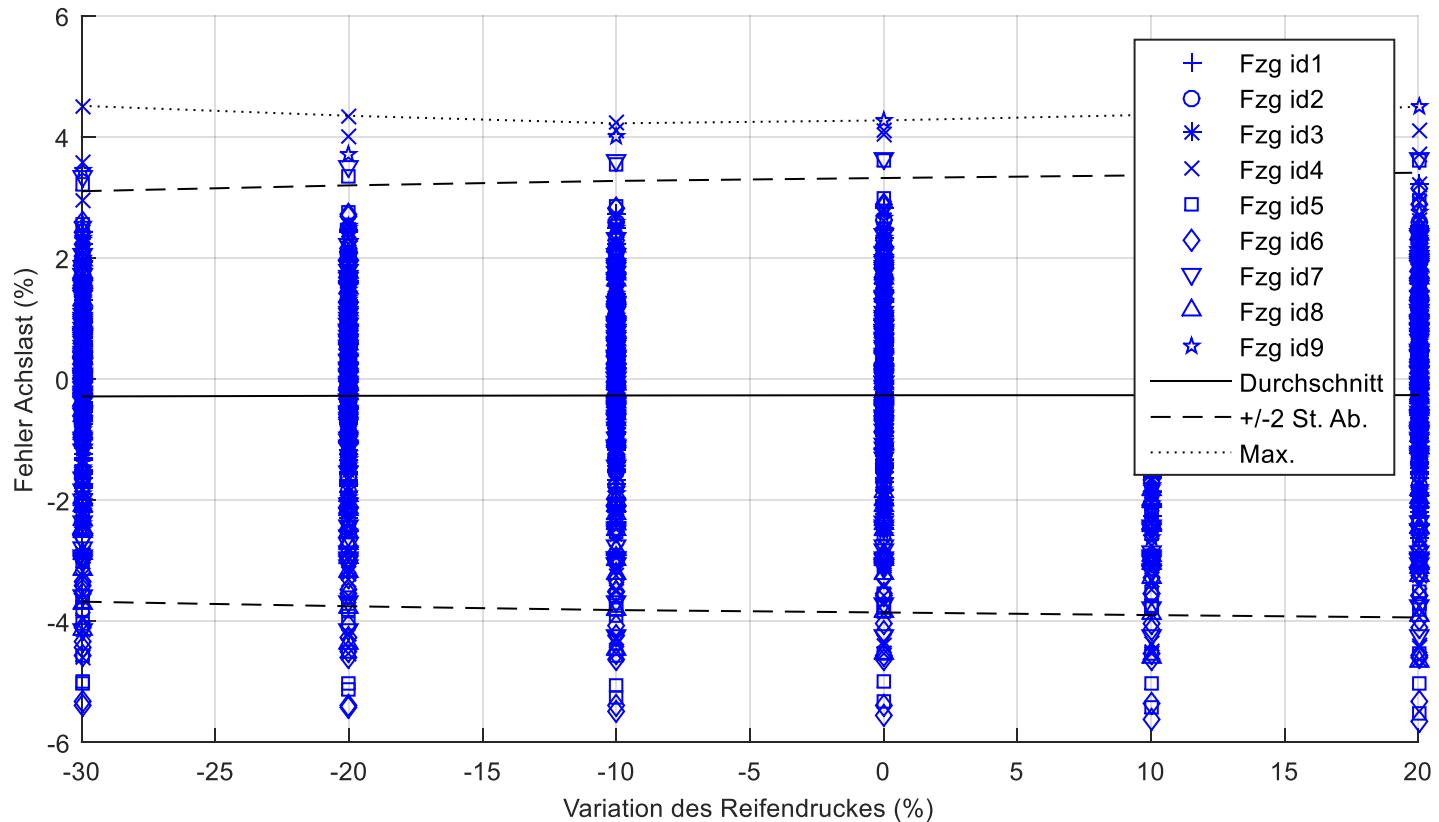


Variation des Reifenluftdrucks (vert. Steifigkeit) – Fehler Gesamtgewicht

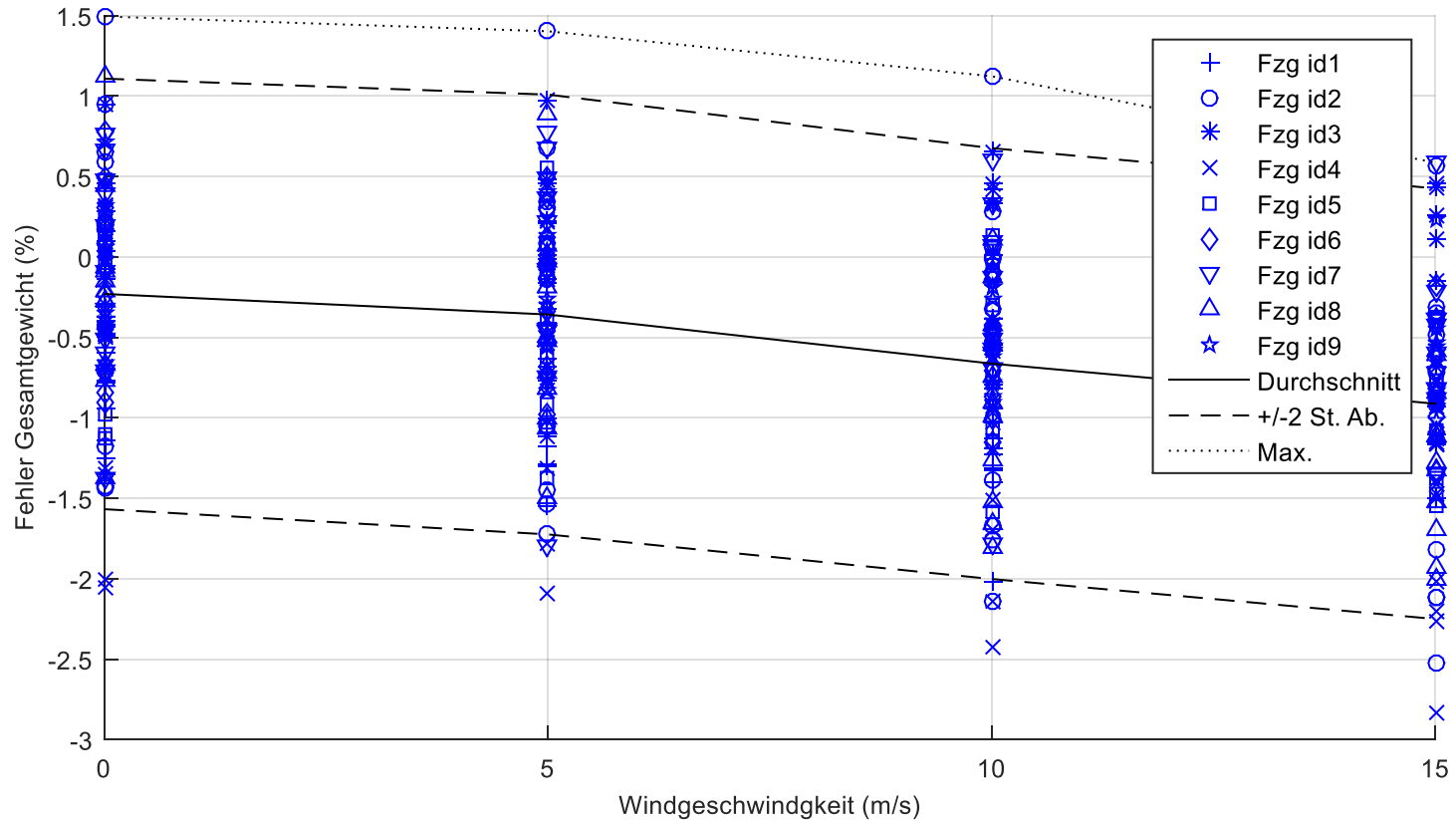


Archivierungsangaben

Variation des Reifenluftdrucks (vert. Steifigkeit) – Fehler Achslasten

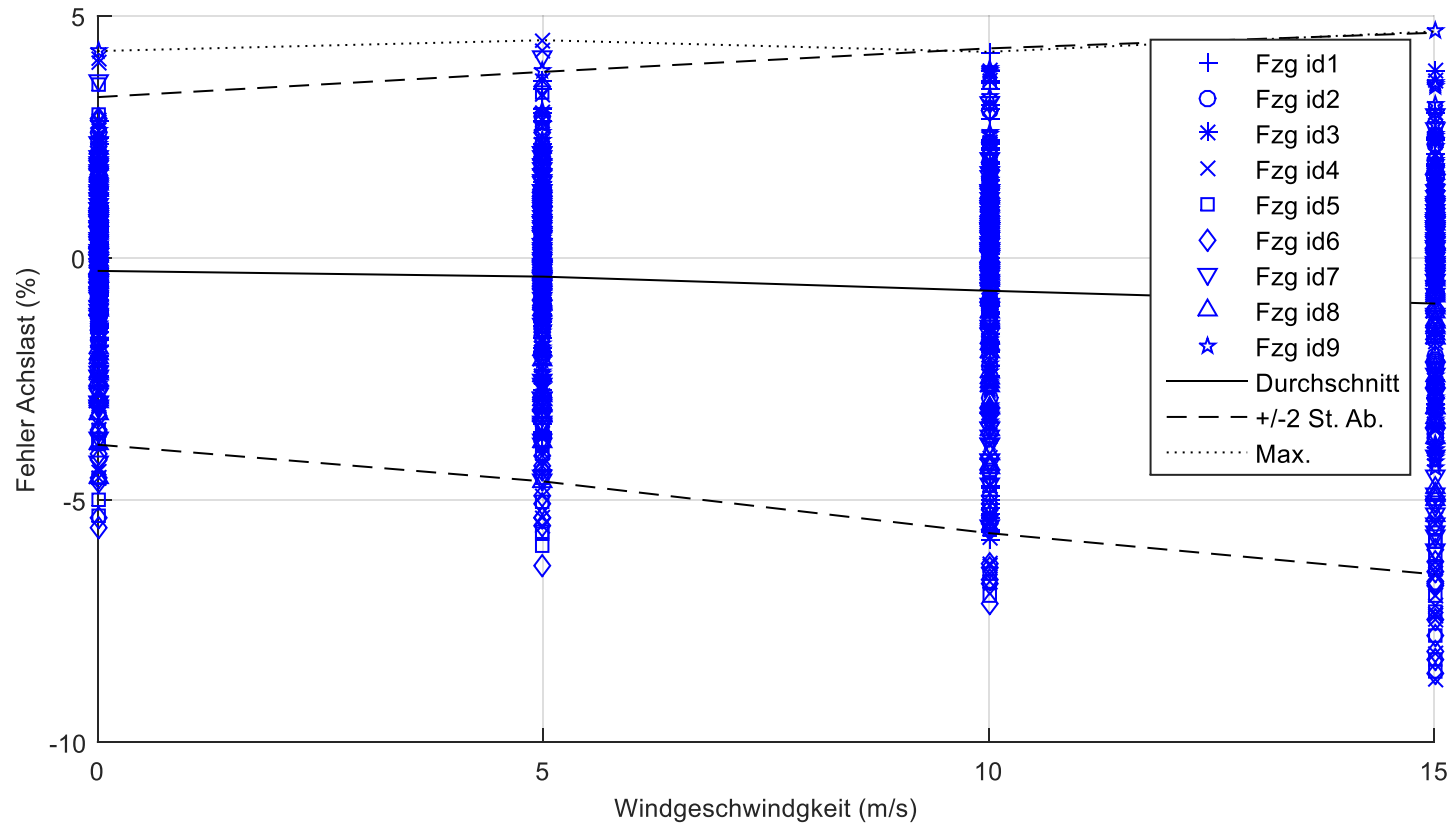


Wind-Geschwindigkeit – Fehler Gesamtgewicht



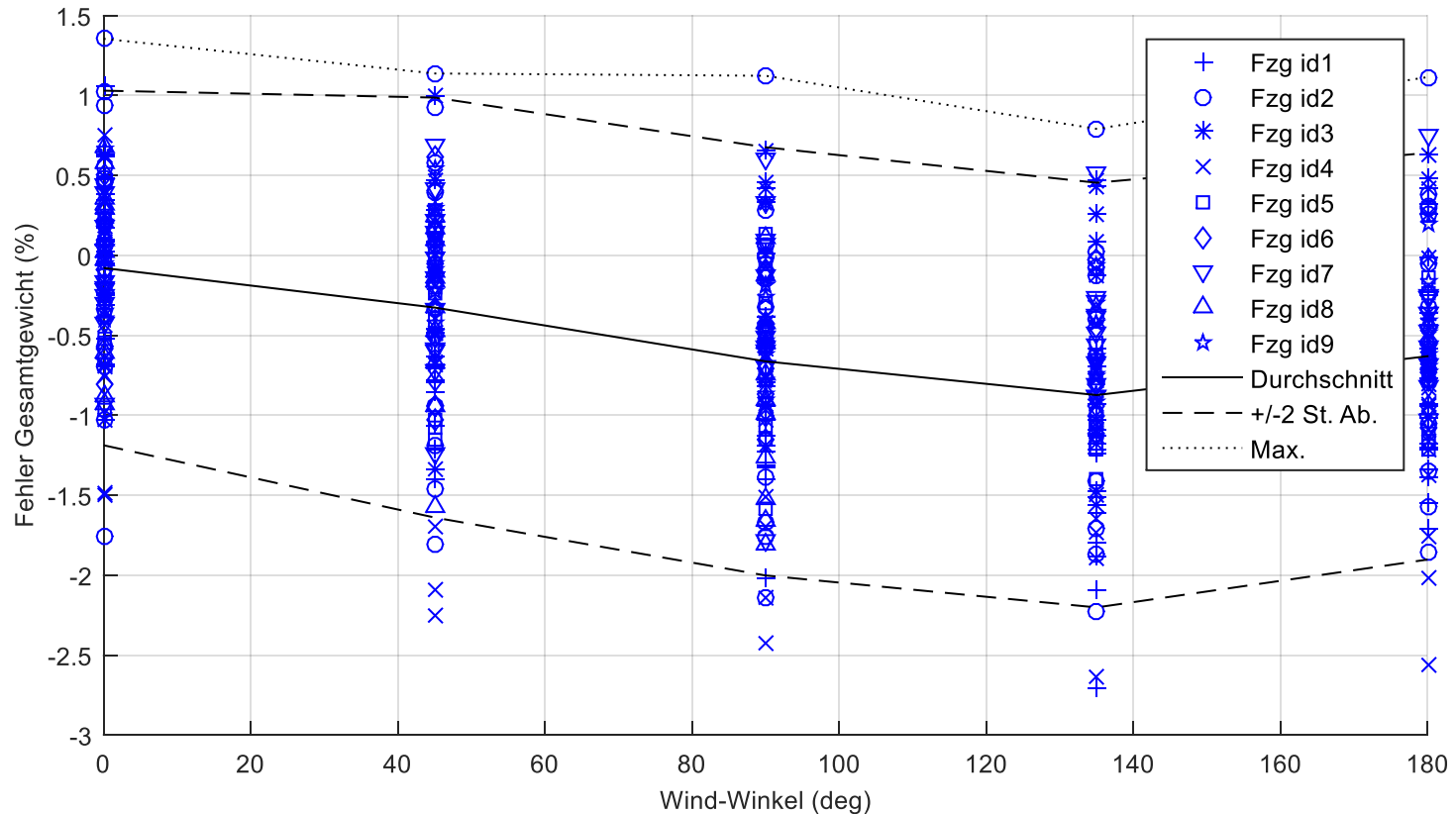
Archivierungsangaben

Wind-Geschwindigkeit – Fehler Achslasten



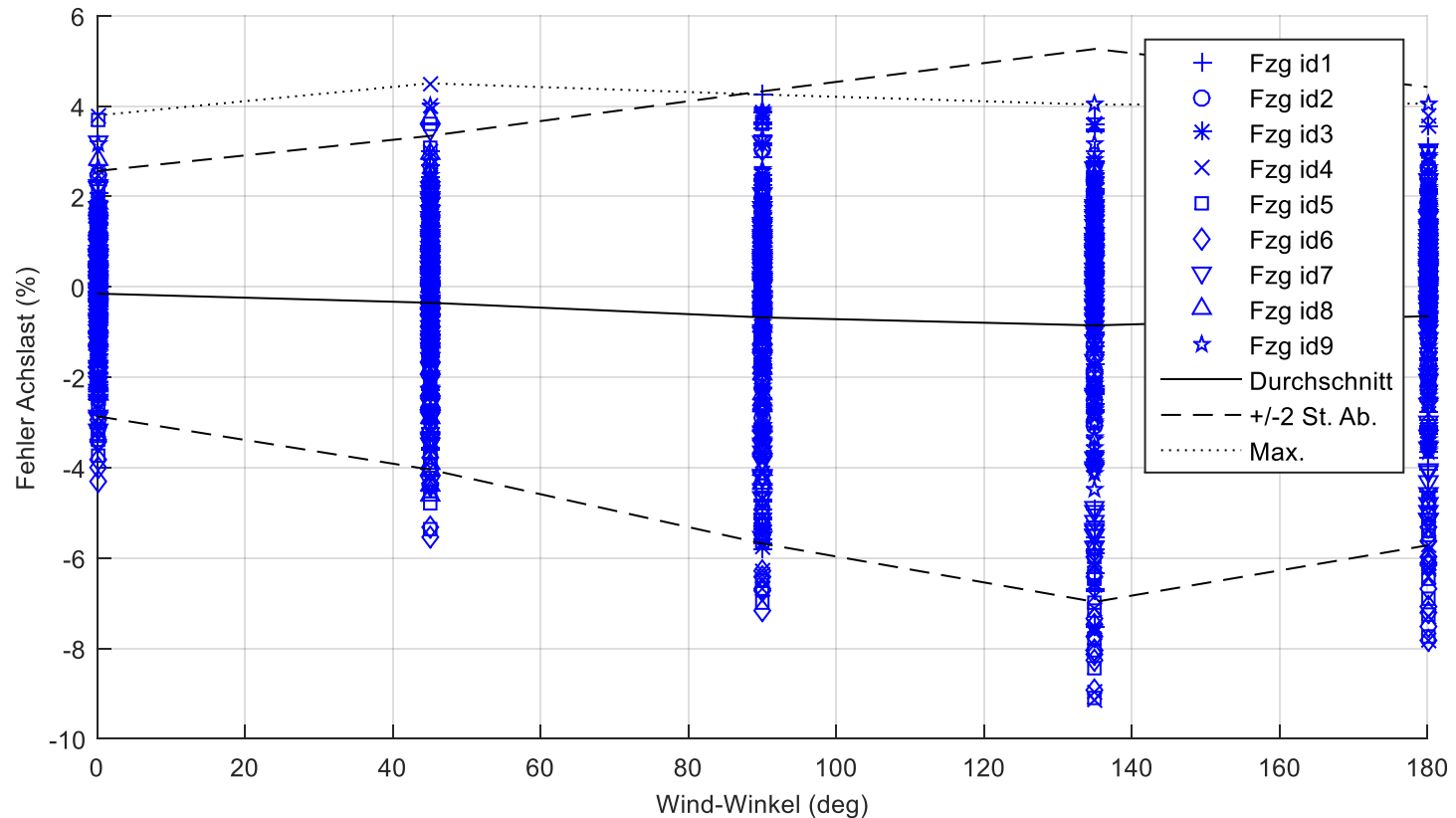
Archivierungsangaben

Wind-Winkel (Bei Wind-Geschwindigkeit 10 m/s) – Fehler Gesamtgewicht



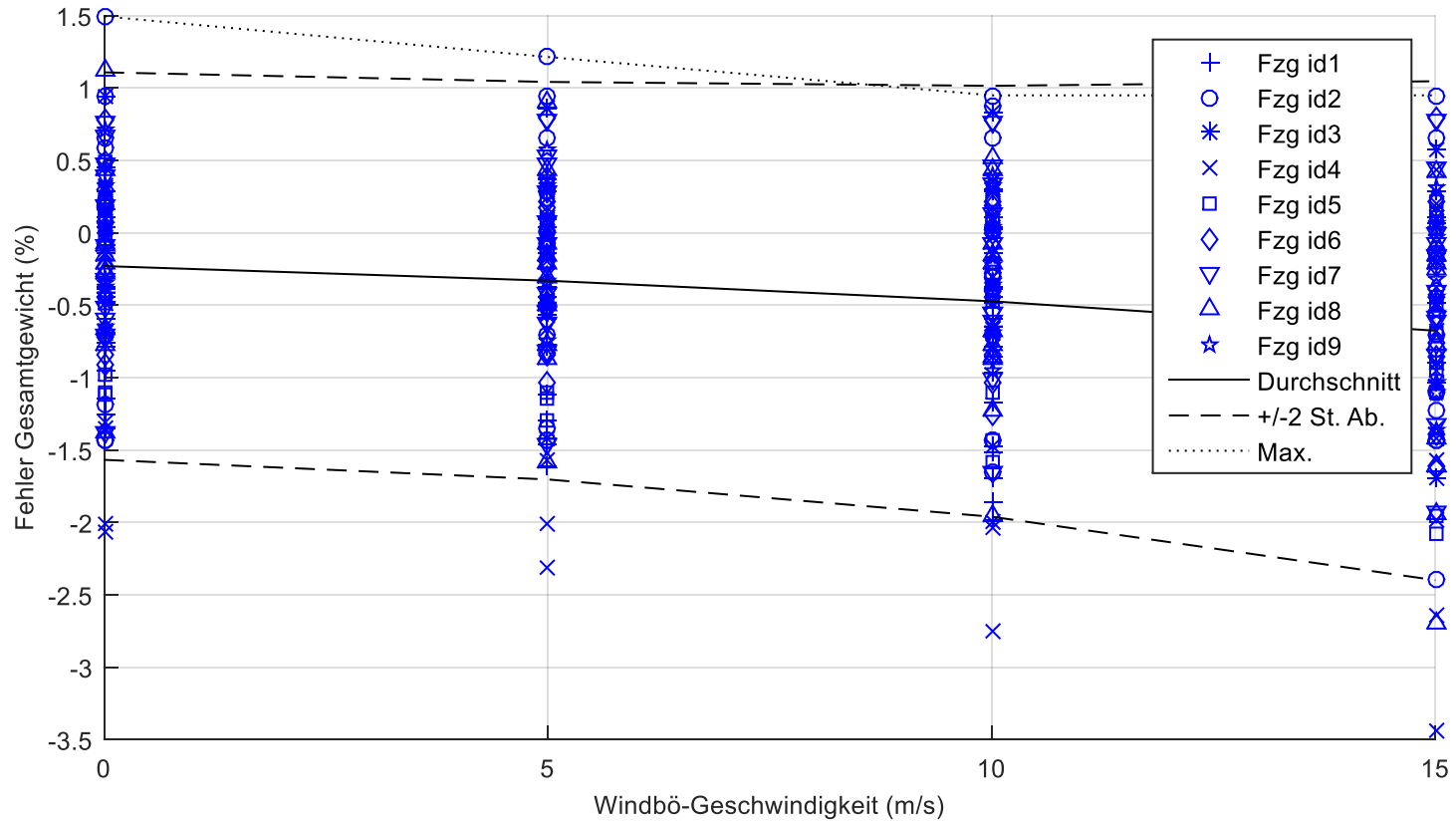
Archivierungsangaben

Wind-Winkel (Bei Wind-Geschwindigkeit 10 m/s) – Fehler Achslasten



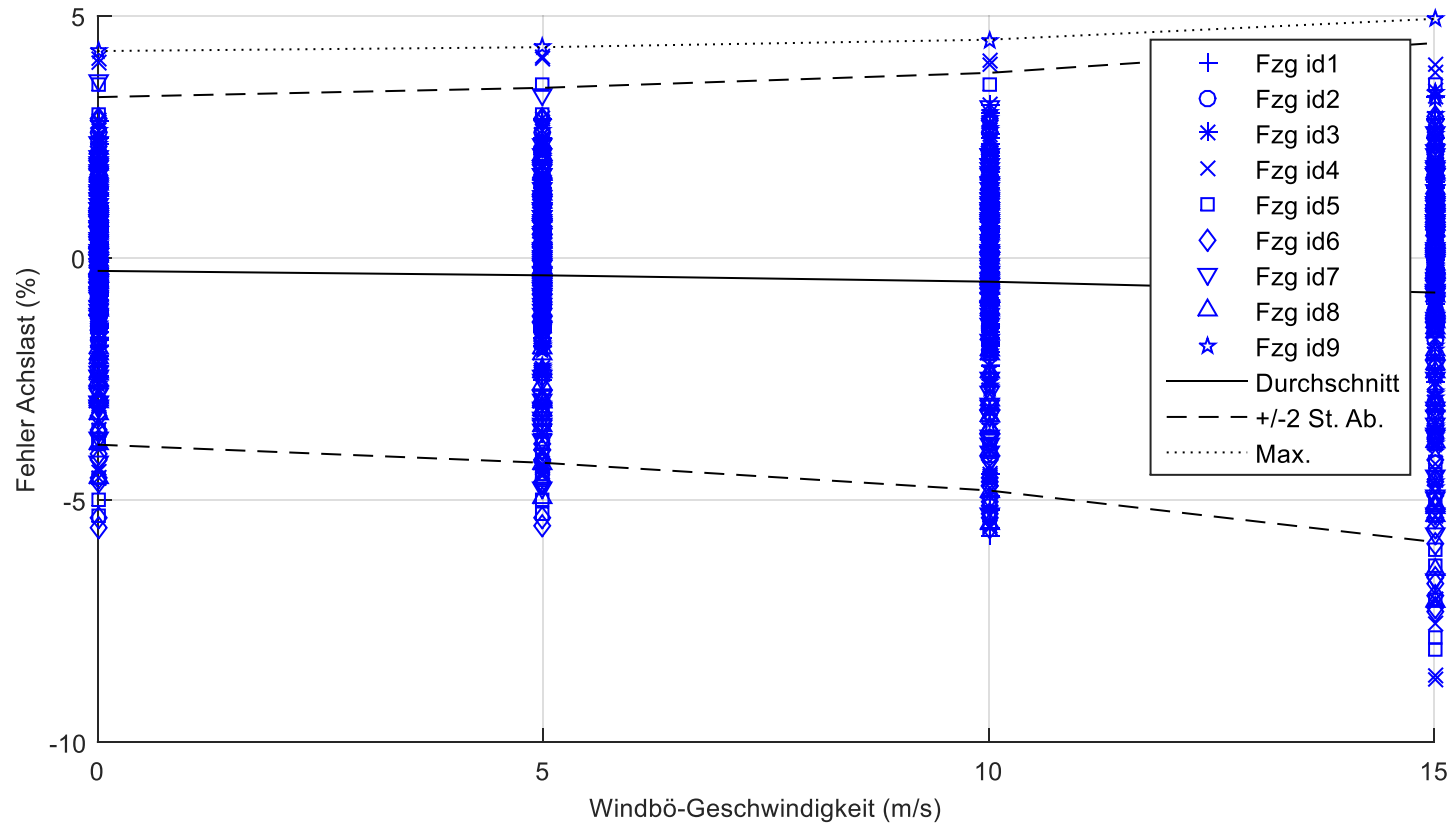
Archivierungsangaben

Wind-Bö – Fehler Gesamtgewicht



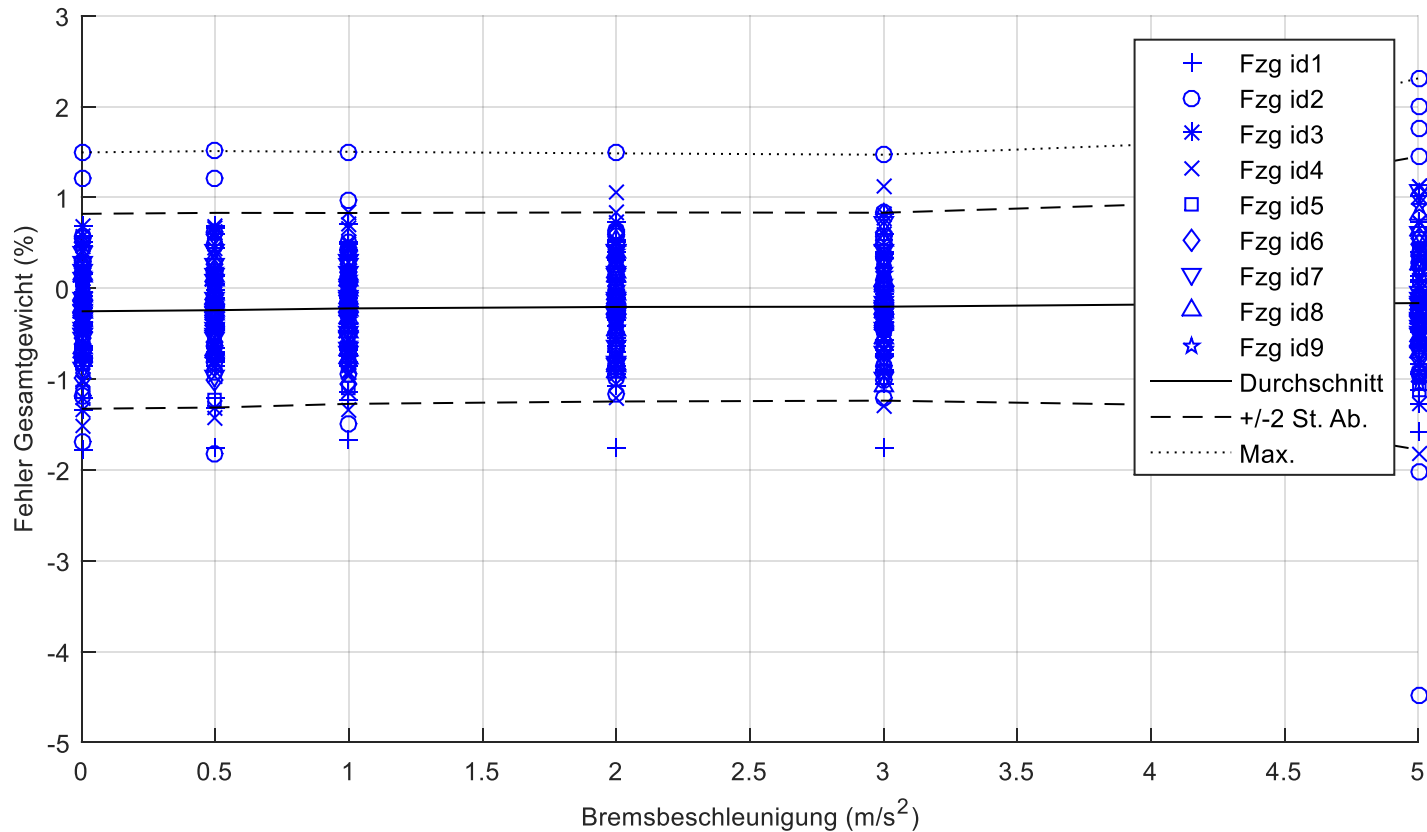
Archivierungsangaben

Wind-Bö – Fehler Achslasten

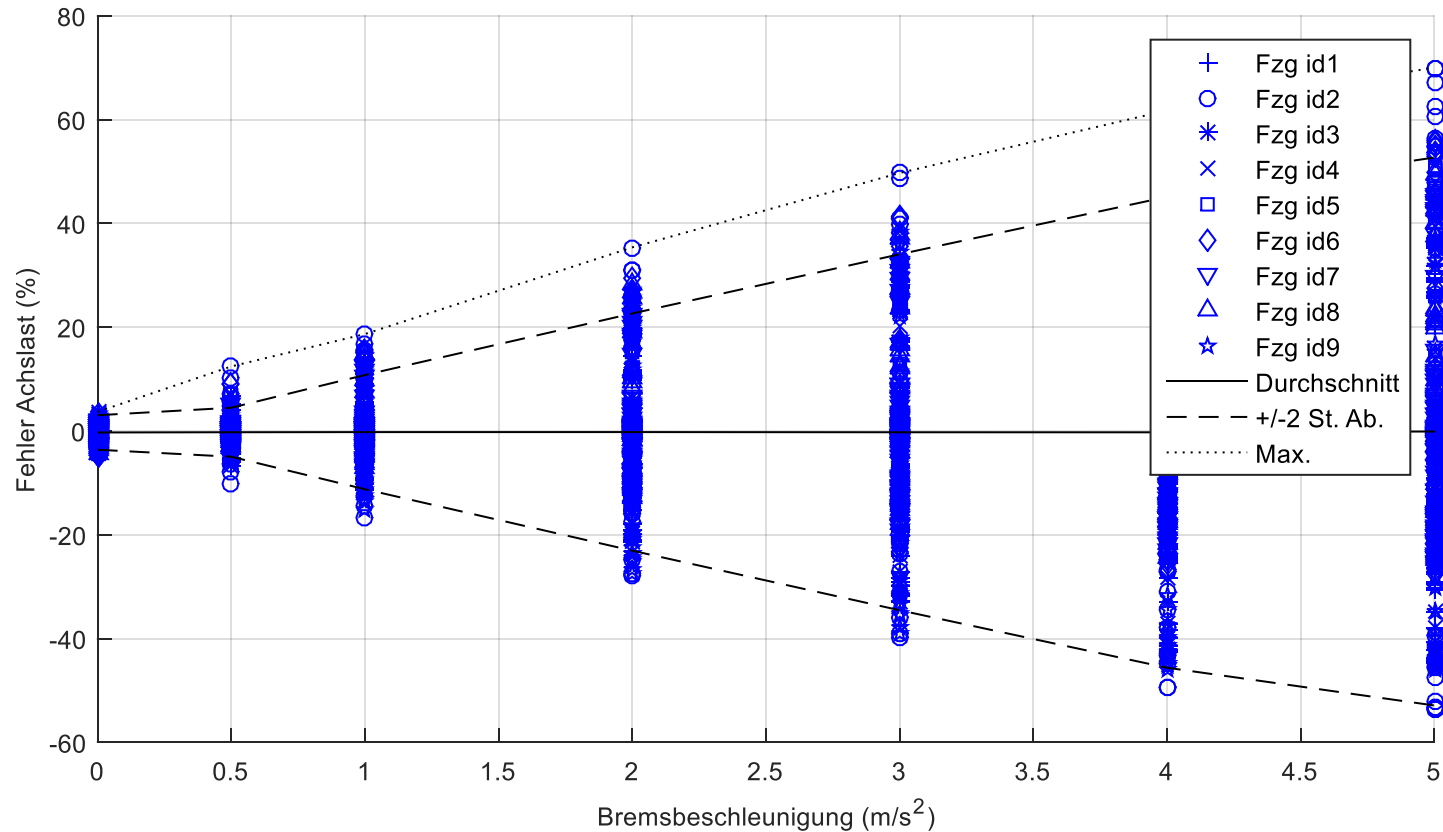


Archivierungsangaben

Bremmung – Fehler Gesamtgewicht

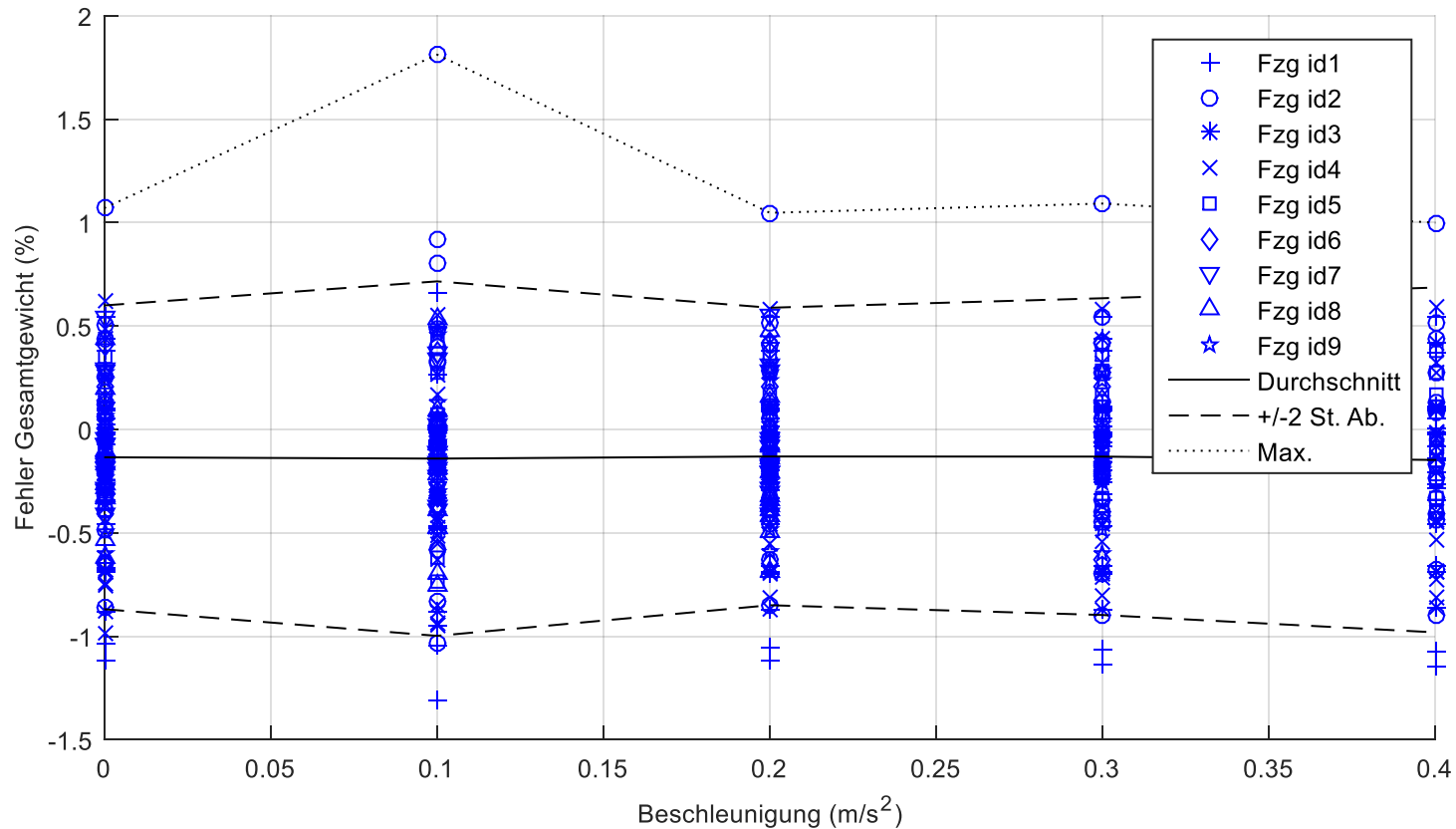


Bremmung – Fehler Achslasten



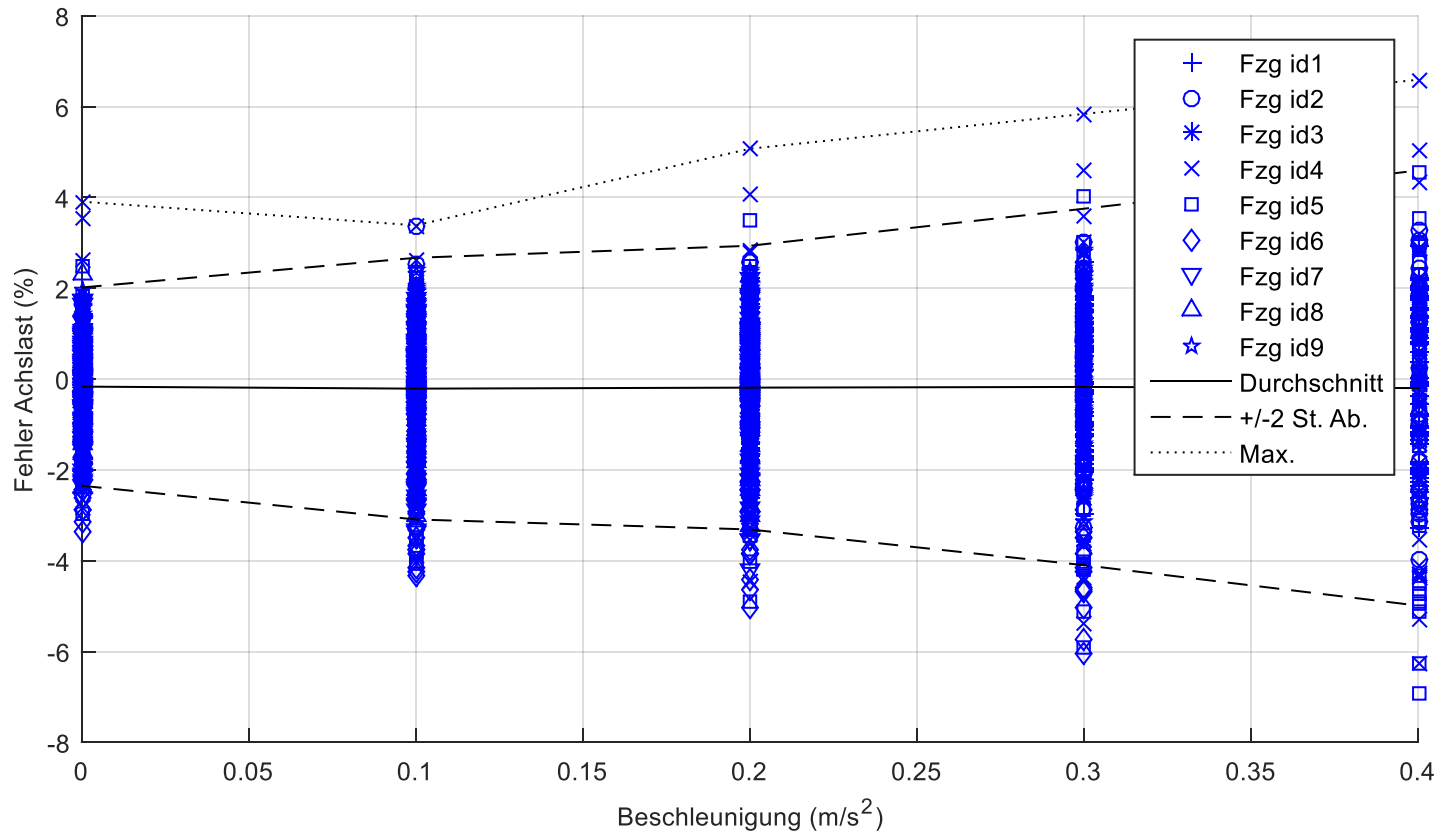
Archivierungsangaben

Beschleunigung (bei Geschwindigkeit 60 km/h) – Fehler Gesamtgewicht

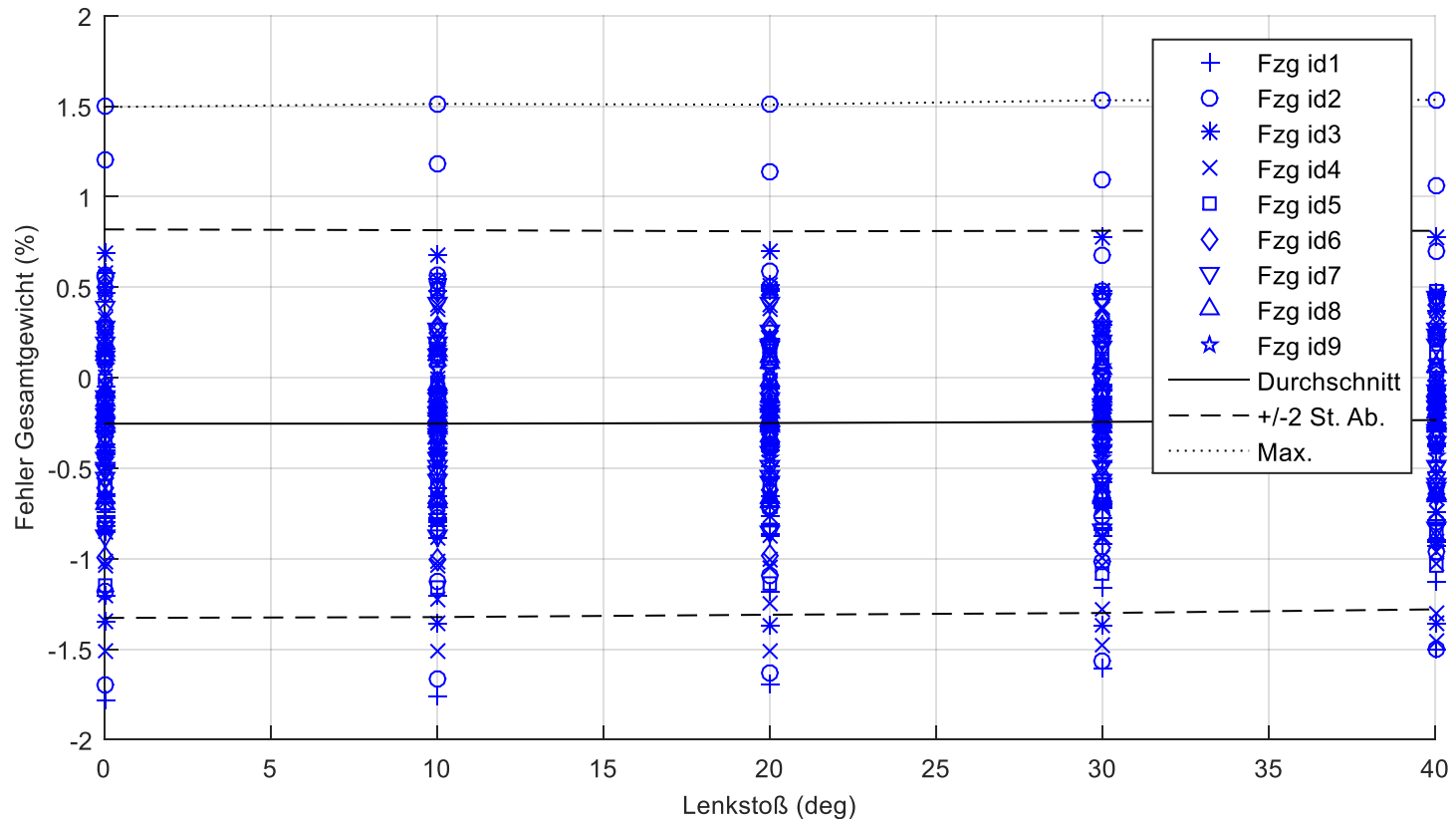


Archivierungsangaben

Beschleunigung (bei Geschwindigkeit 60 km/h) – Fehler Achslasten

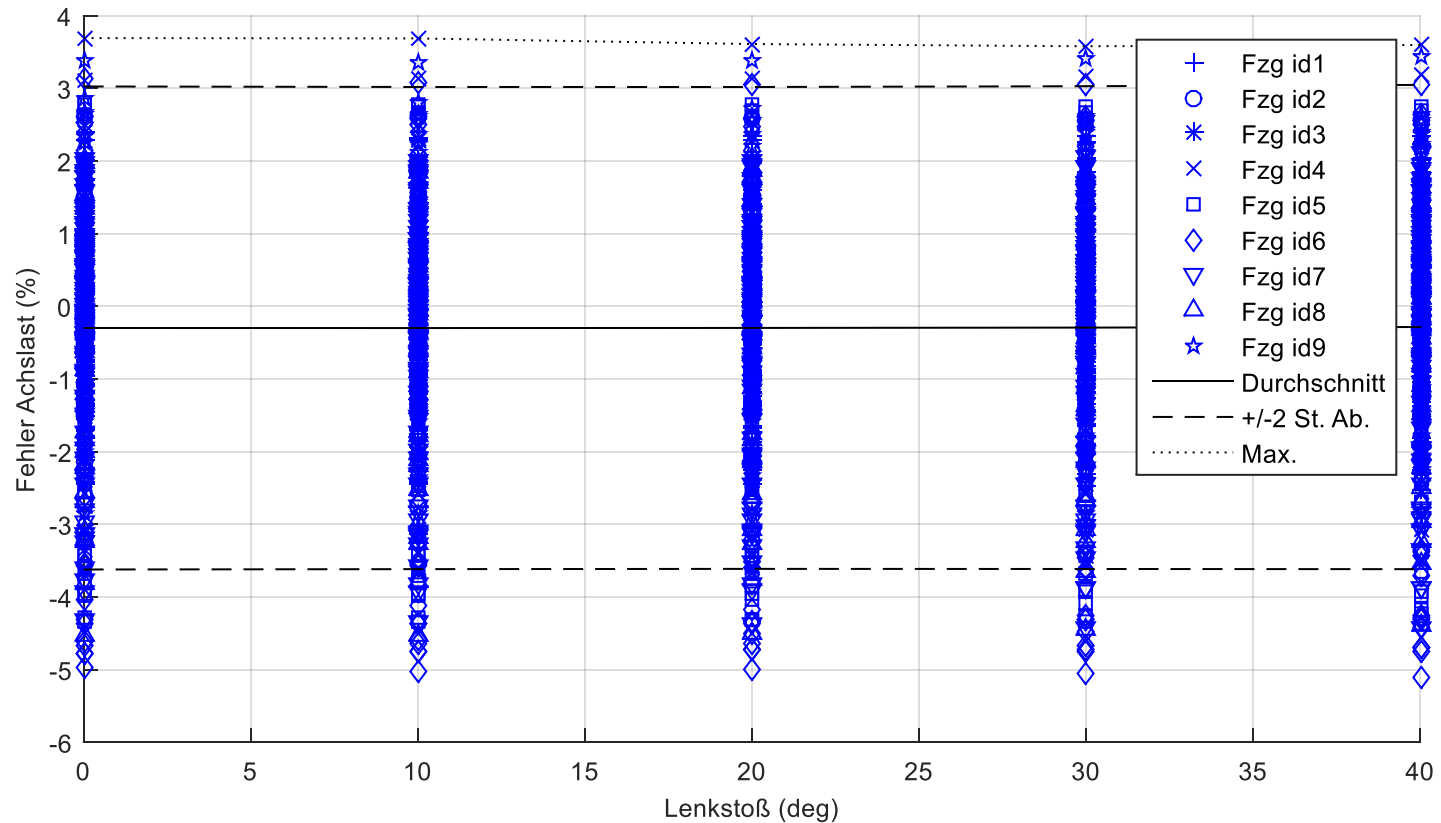


Lenkradwinkel beim Lenkstoß – Fehler Gesamtgewicht



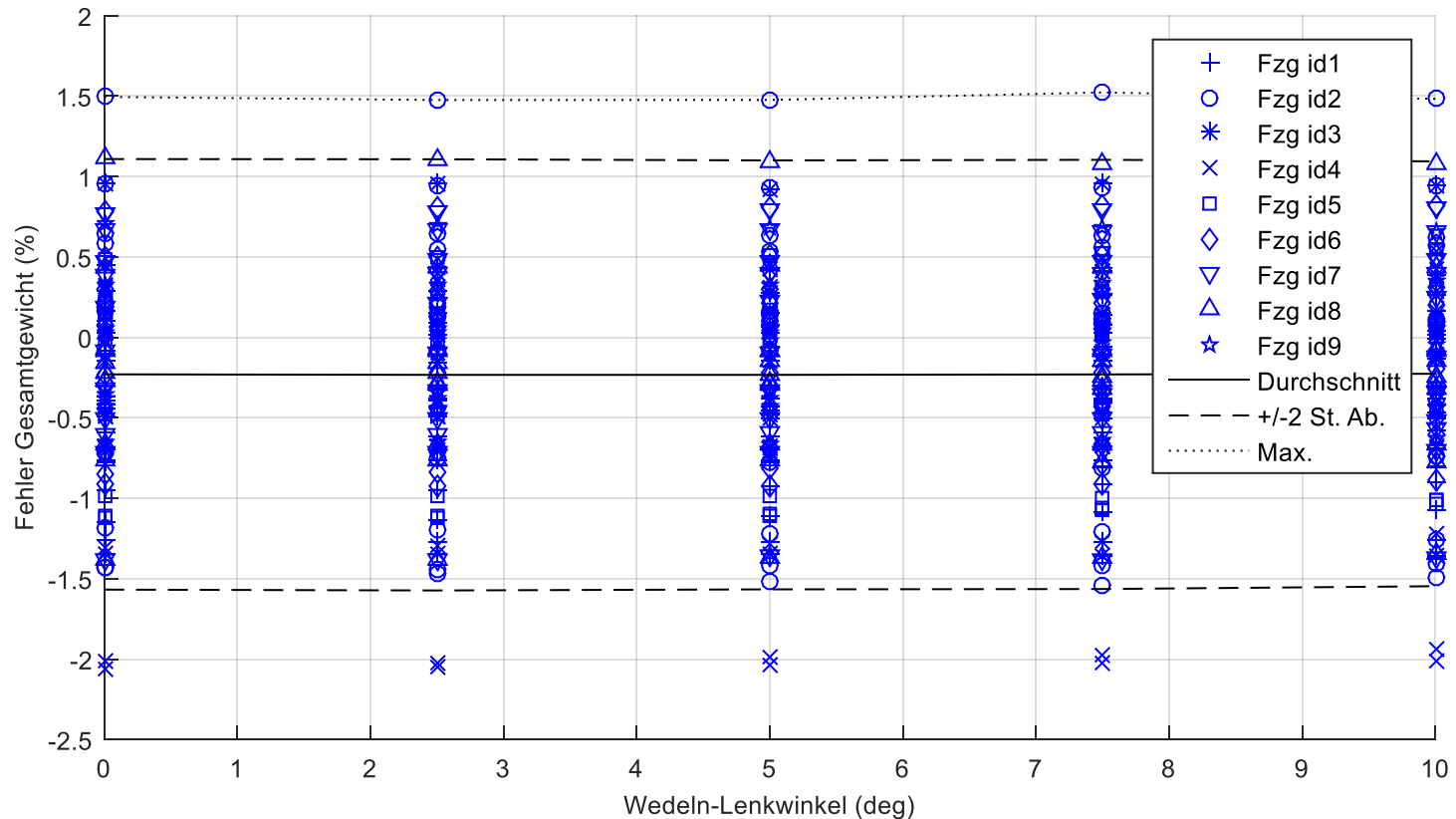
Archivierungsangaben

Lenkradwinkel beim Lenkstoß – Fehler Achslasten



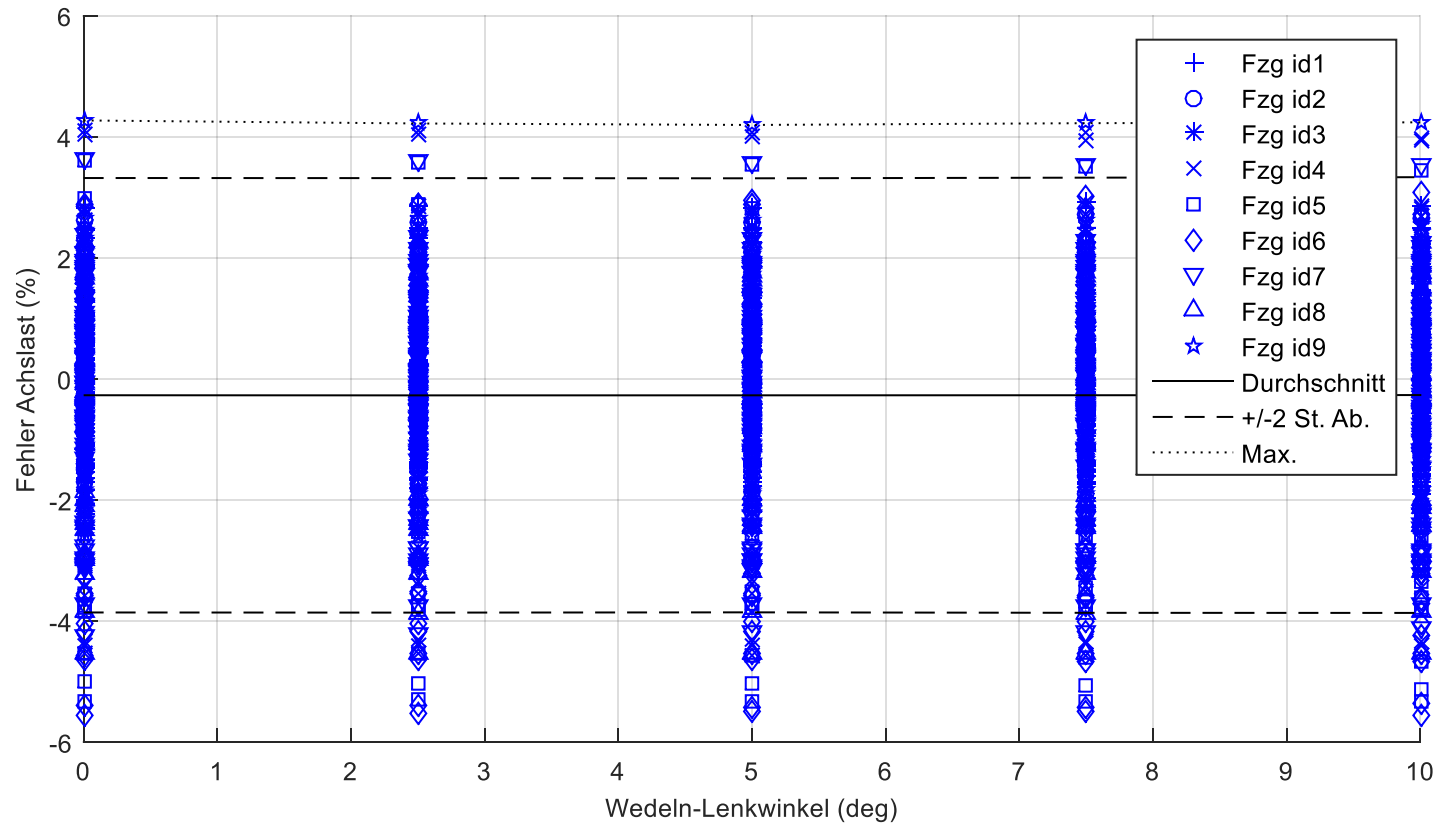
Archivierungsangaben

Lenkradwinkel beim Wedeln (0,2 Hz) – Fehler Gesamtgewicht



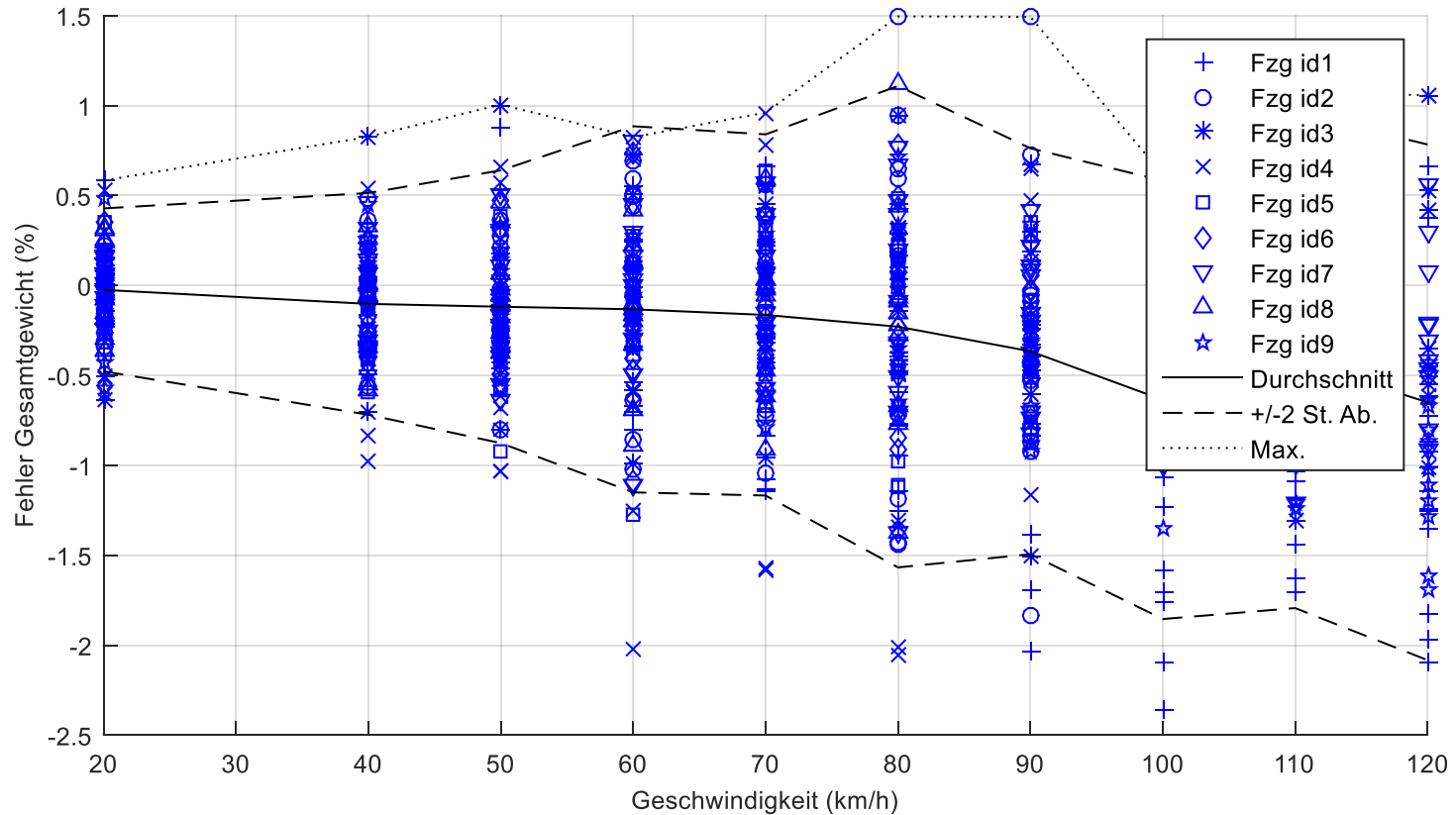
Archivierungsangaben

Lenkradwinkel beim Wedeln (0,2 Hz) – Fehler Achslasten



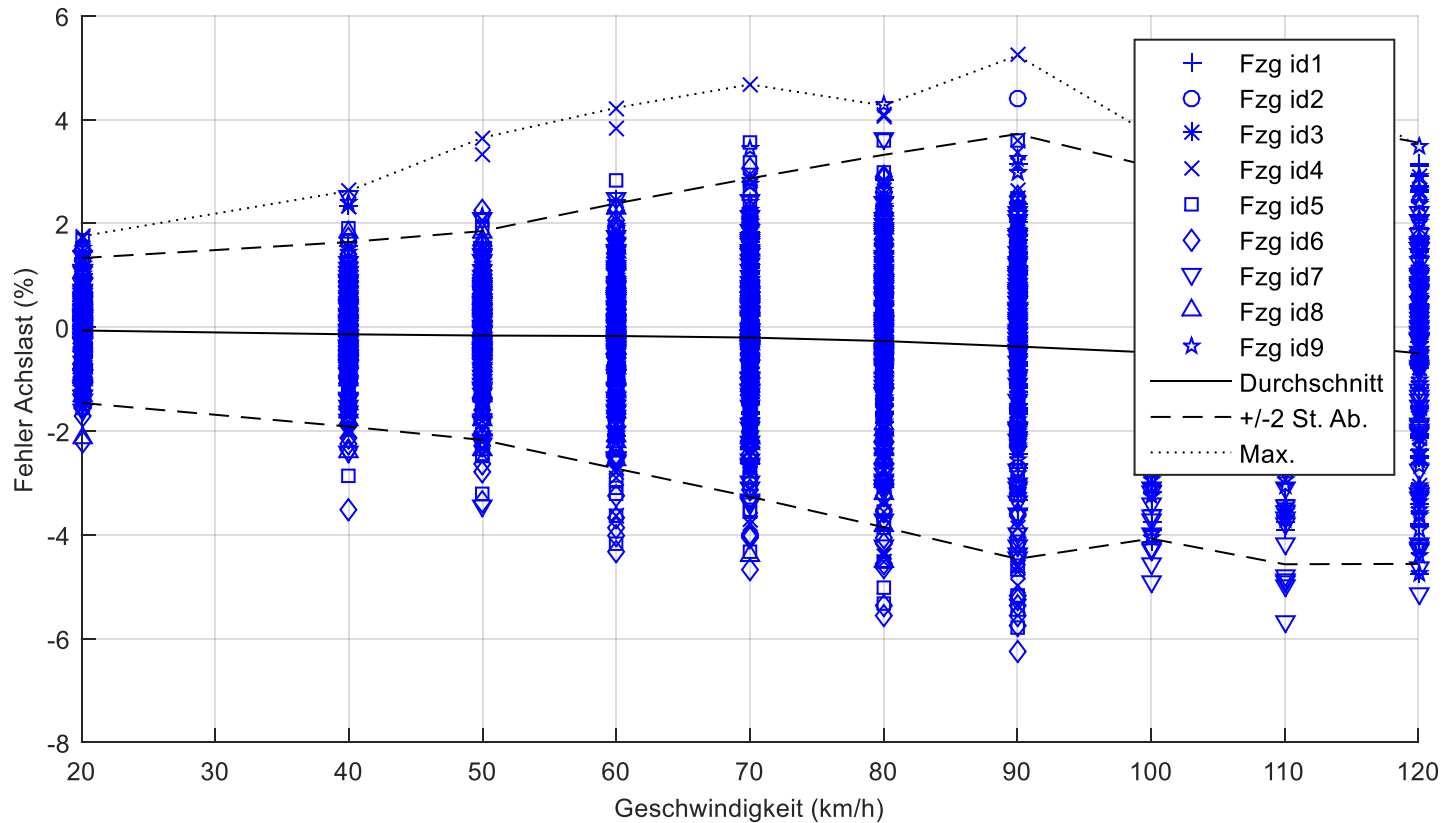
Archivierungsangaben

Geschwindigkeit – Fehler Gesamtgewicht



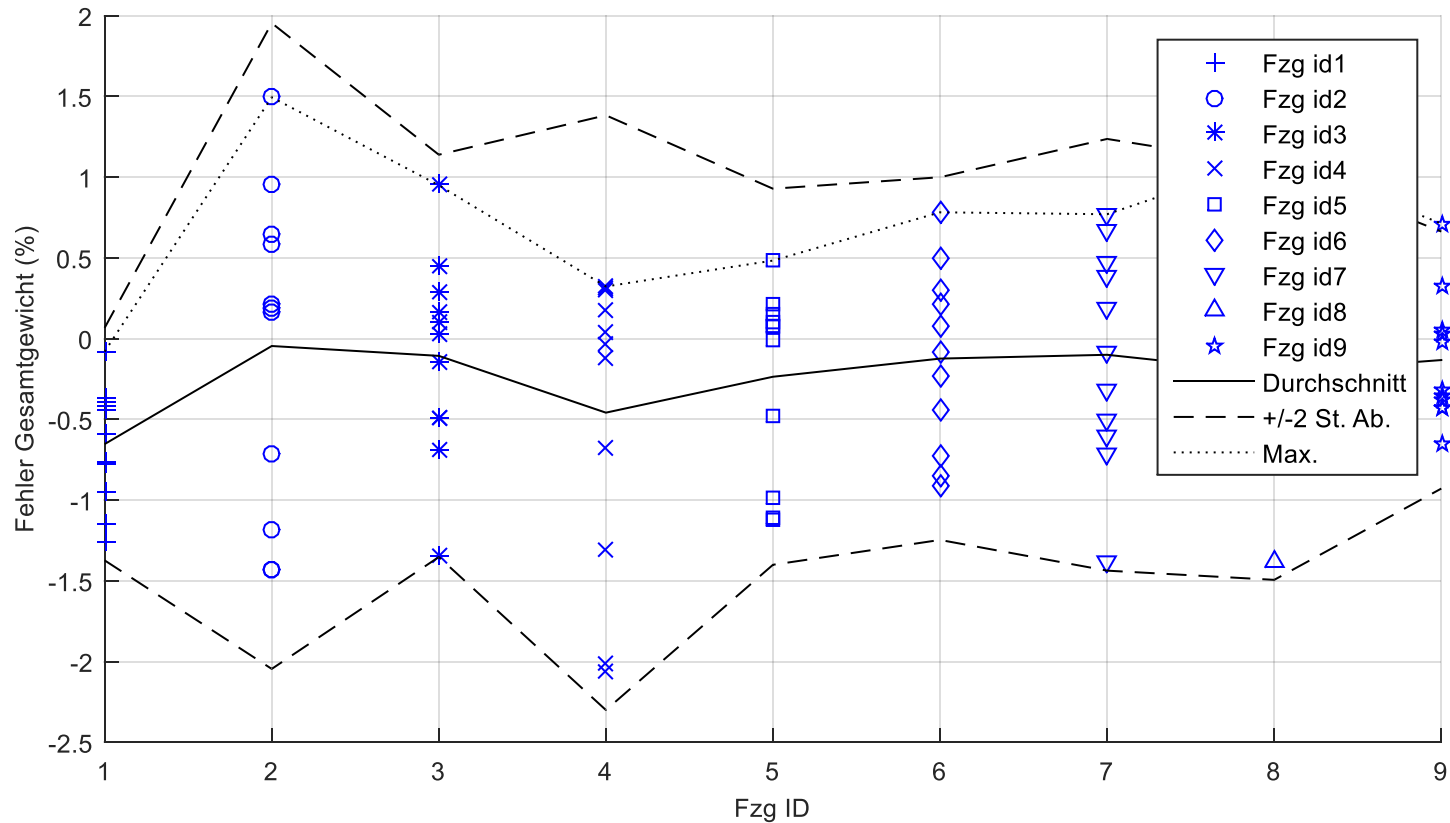
Archivierungsangaben

Geschwindigkeit – Fehler Achslasten



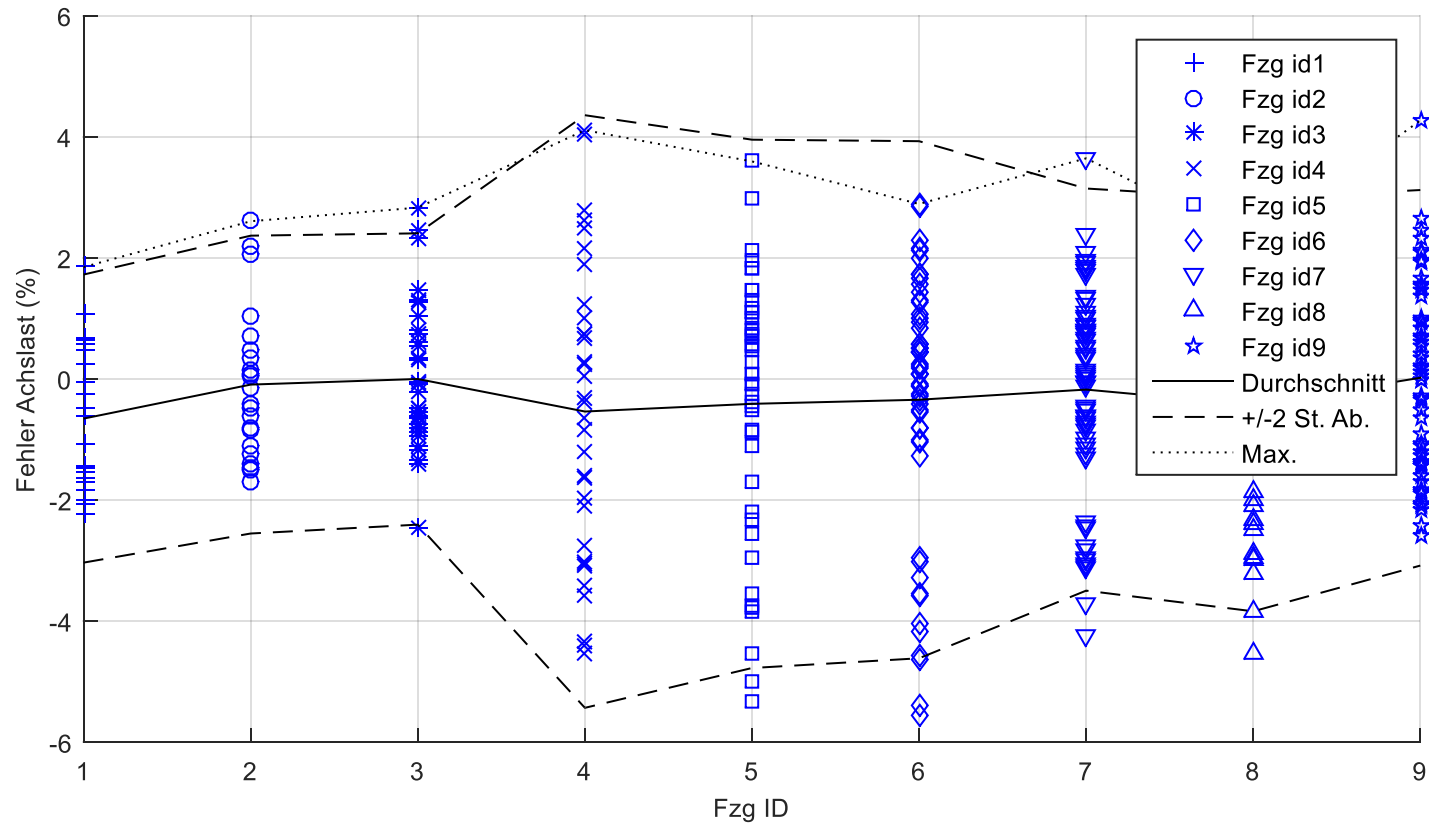
Archivierungsangaben

Fahrzeug-Typ – Fehler Gesamtgewicht



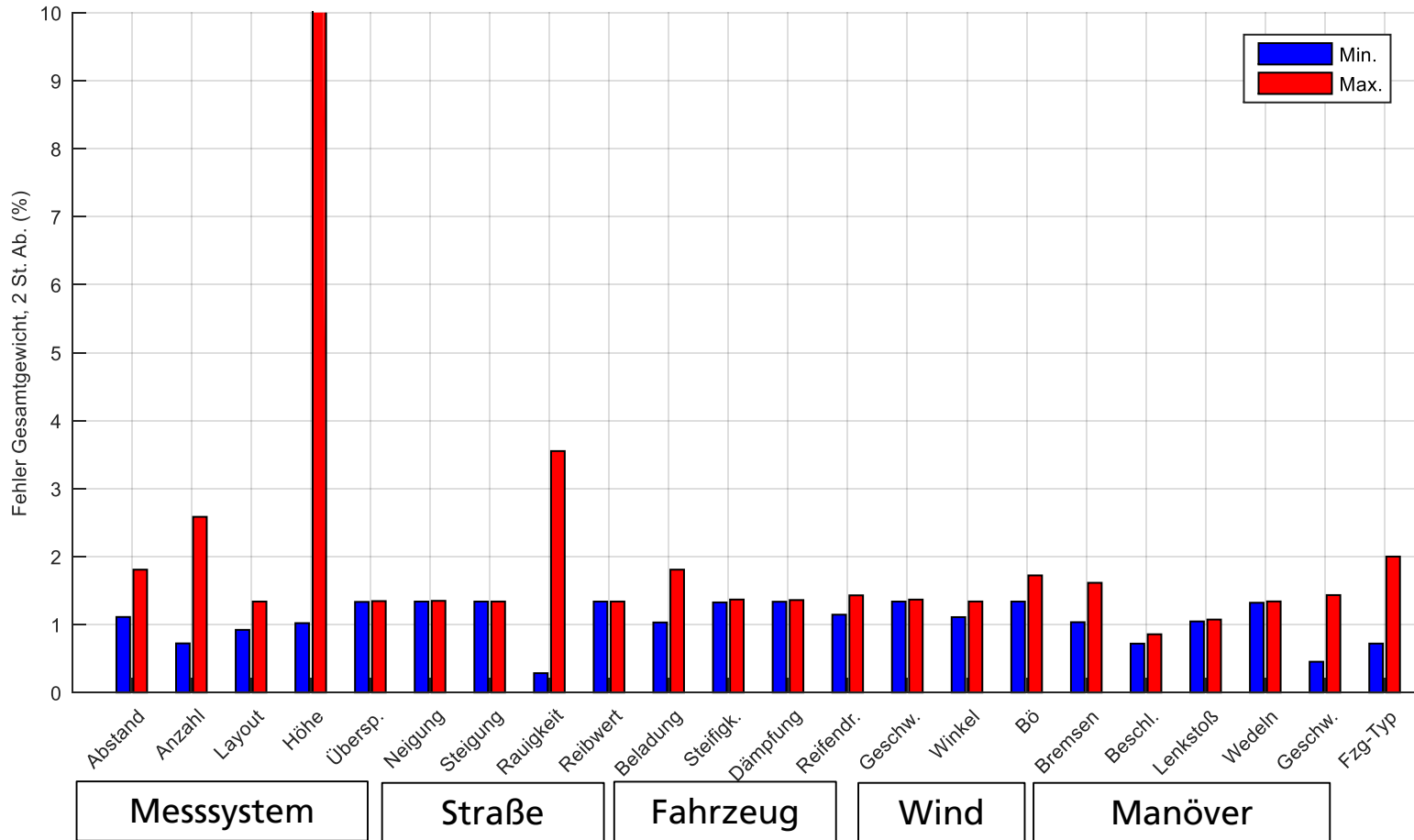
Archivierungsangaben

Fahrzeug-Typ – Fehler Achslasten



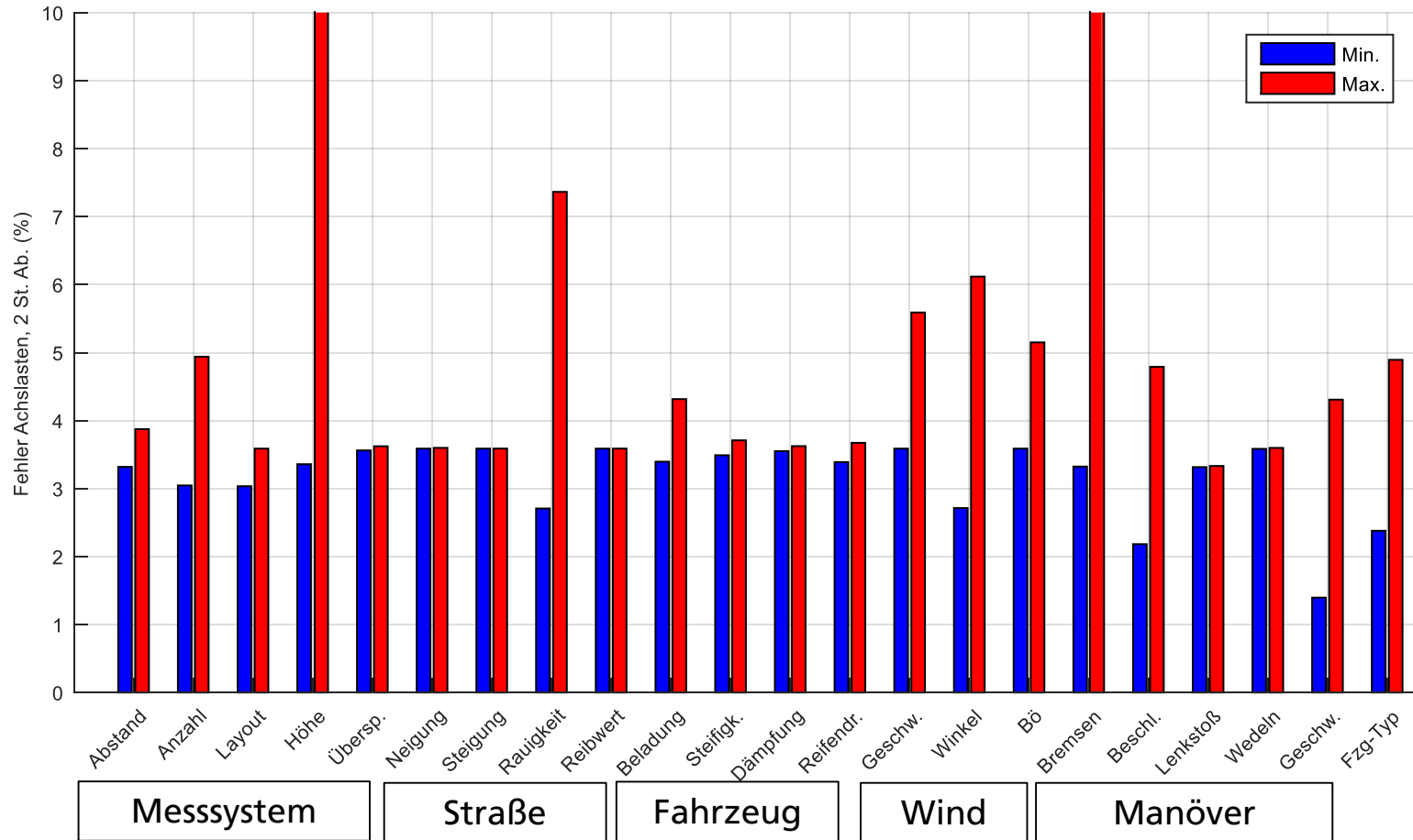
Archivierungsangaben

Zusammenfassung Ergebnisse des Gesamtgewichts (Zwei Standard-Abweichungen des Fehlers)



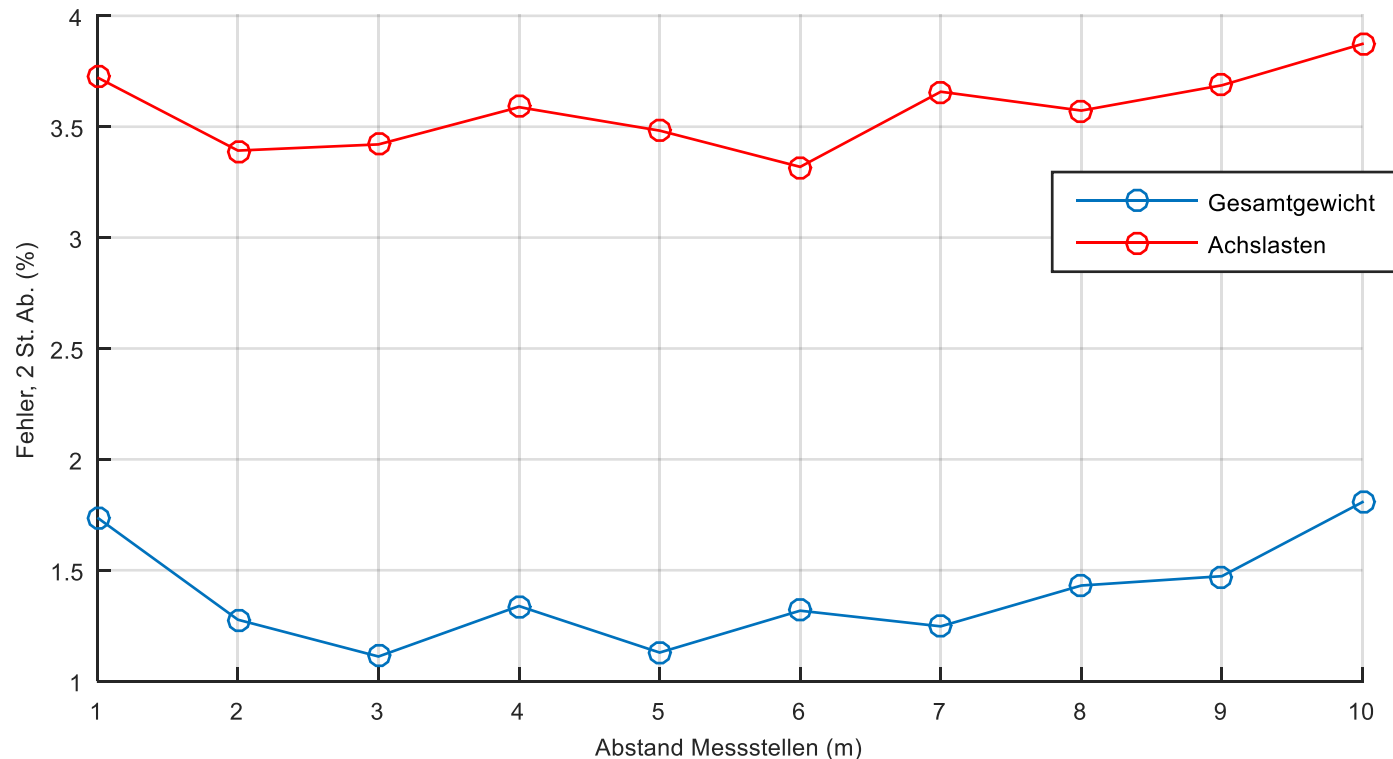
Archivierungsangaben

Zusammenfassung Ergebnisse der Achslasten (Zwei Standard-Abweichungen des Fehlers)

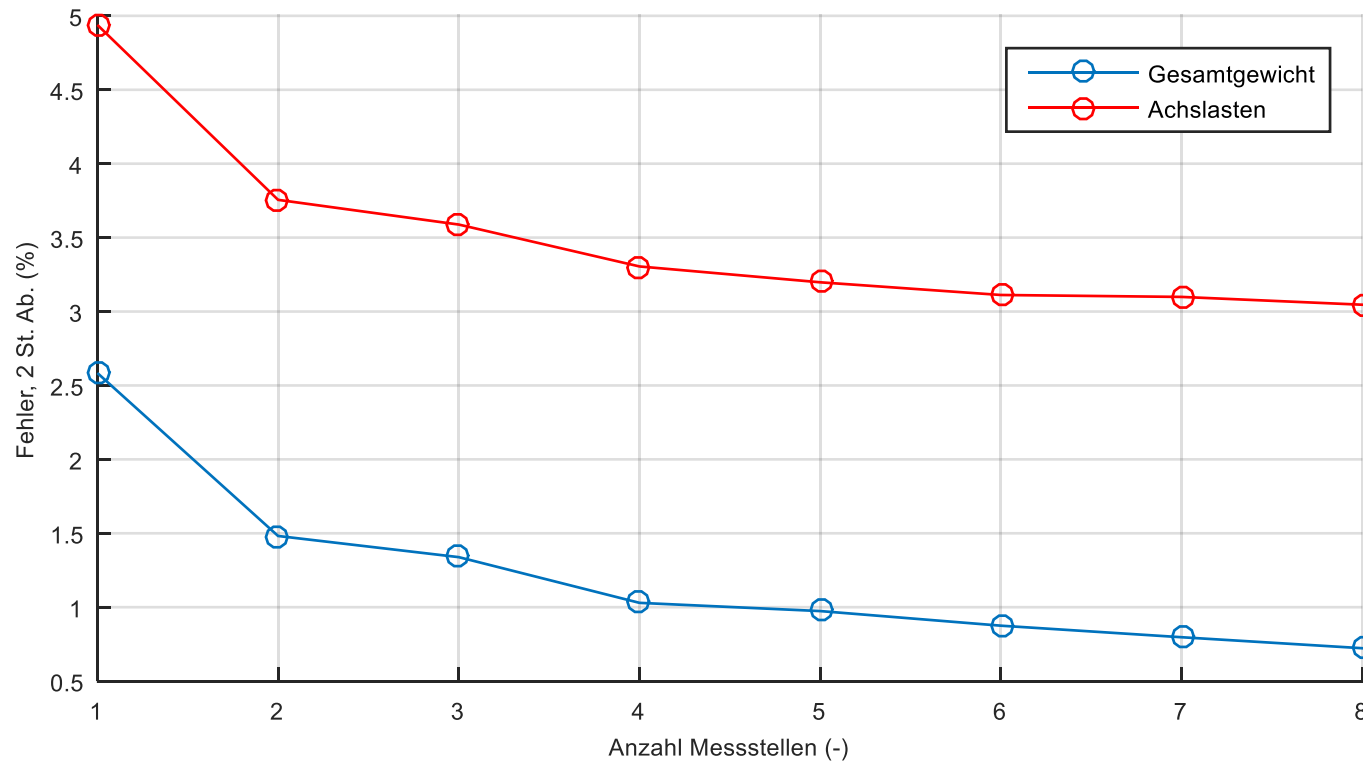


Archivierungsangaben

2 σ -Werte des Fehlers für das Gesamtgewicht und die Achslasten als Funktion des Abstands der Messstellen

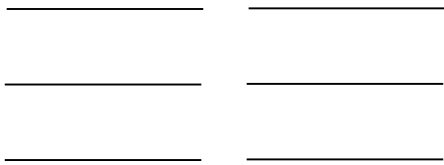


2 σ -Werte des Fehlers für das Gesamtgewicht und die Achslasten als Funktion der Anzahl der Messstellen

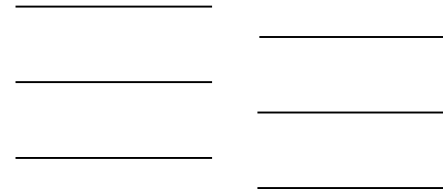


Untersuchte Layouts des Messsystems

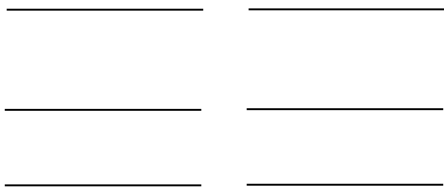
Layout 1: Konstanter Abstand
(Standard)



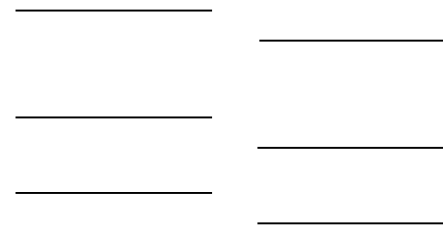
Layout 2: Konstanter Abstand
(links/rechts versetzt)



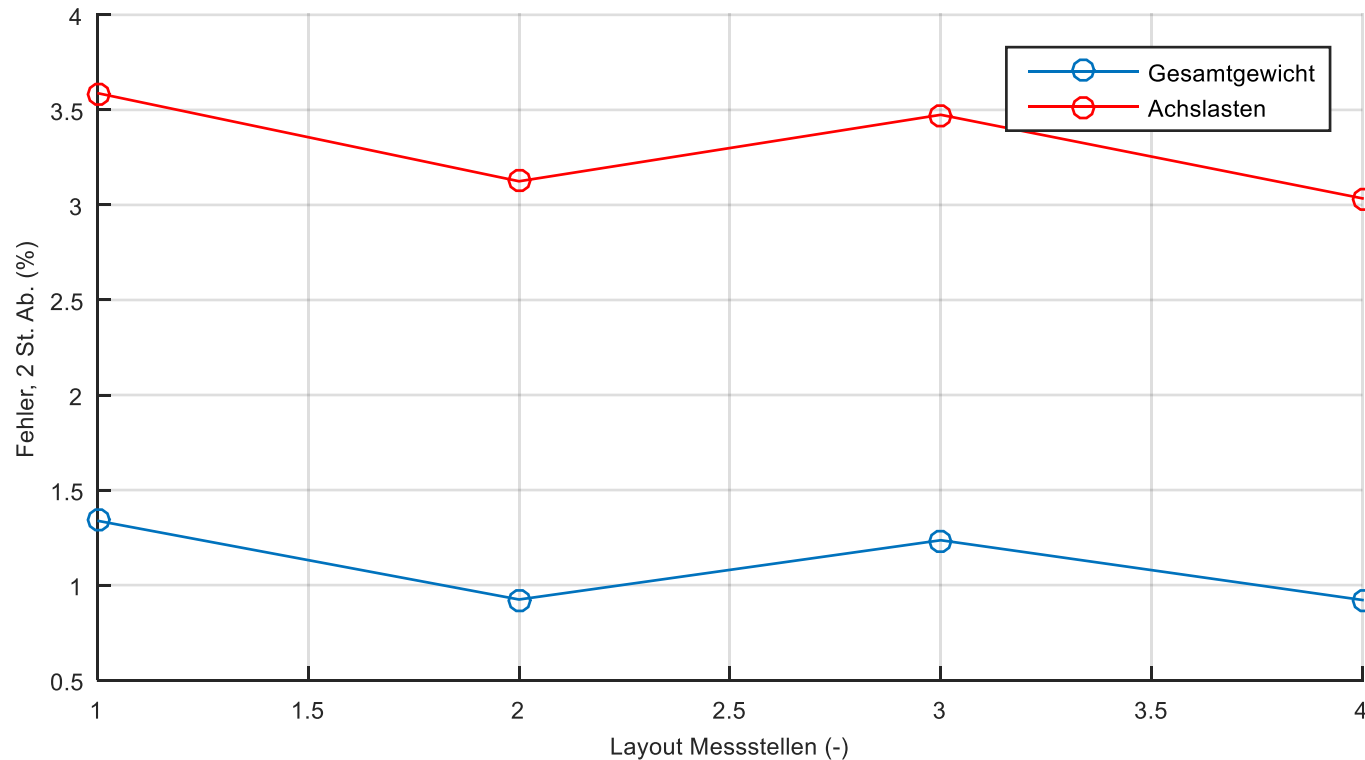
Layout 3: Progressiver Abstand



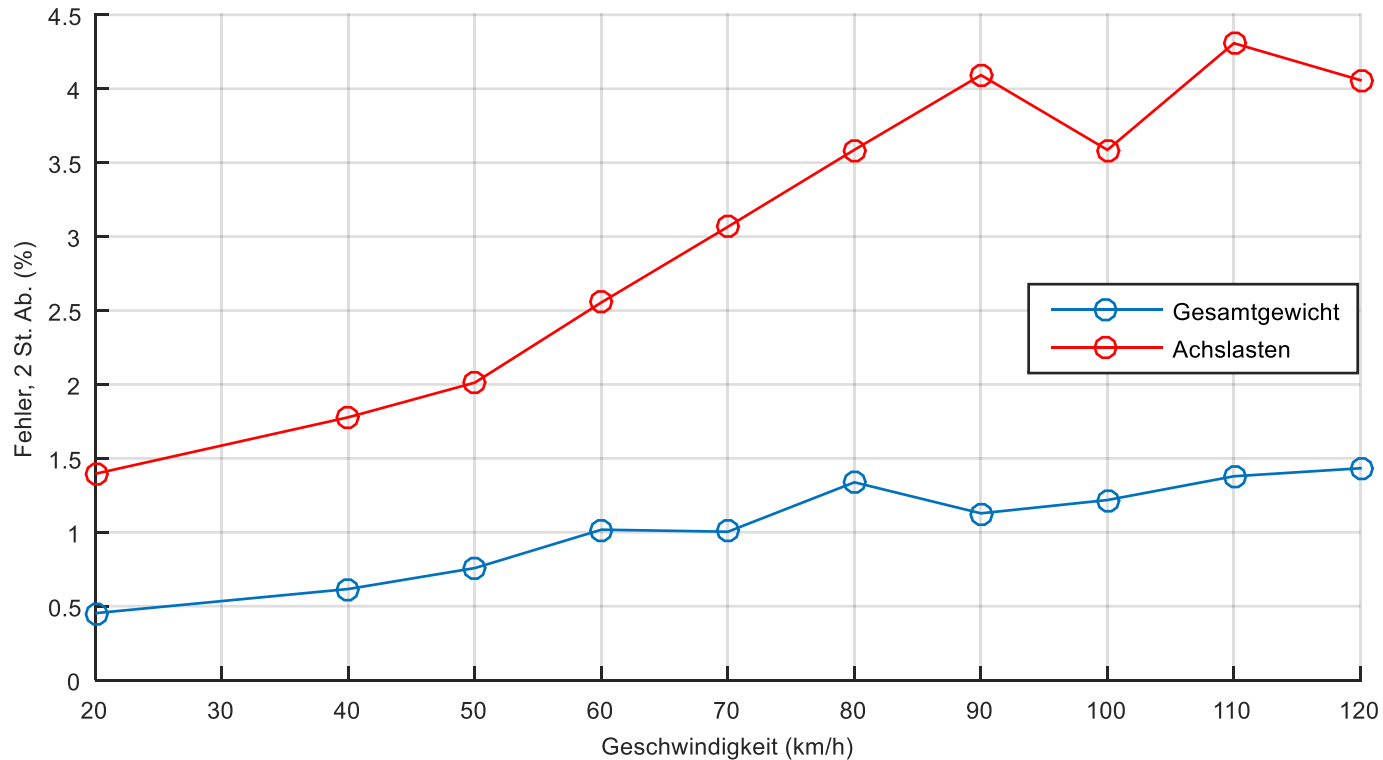
Layout 4: Progressiver
Abstand (links/rechts versetzt)



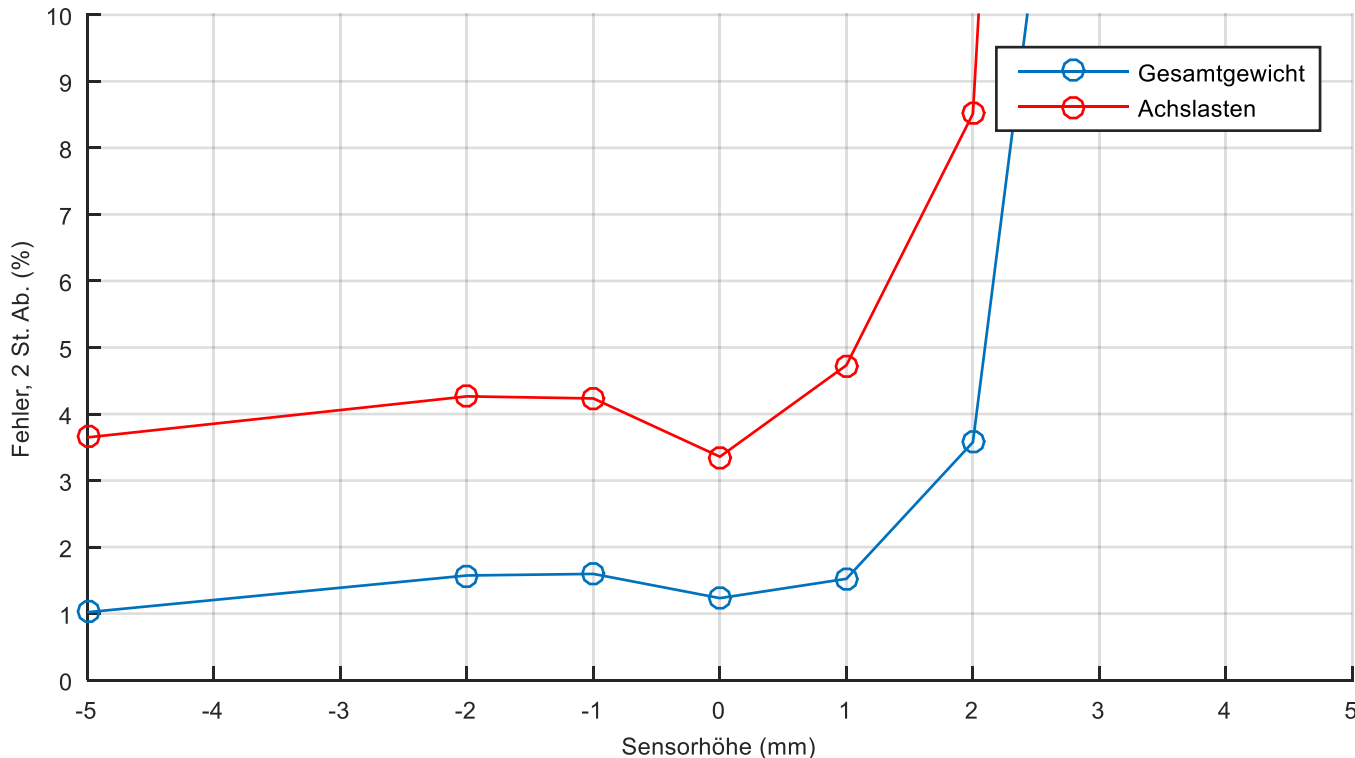
2 σ -Werte des Fehlers für das Gesamtgewicht und die Achslasten als Funktion des Layouts der Messstellen



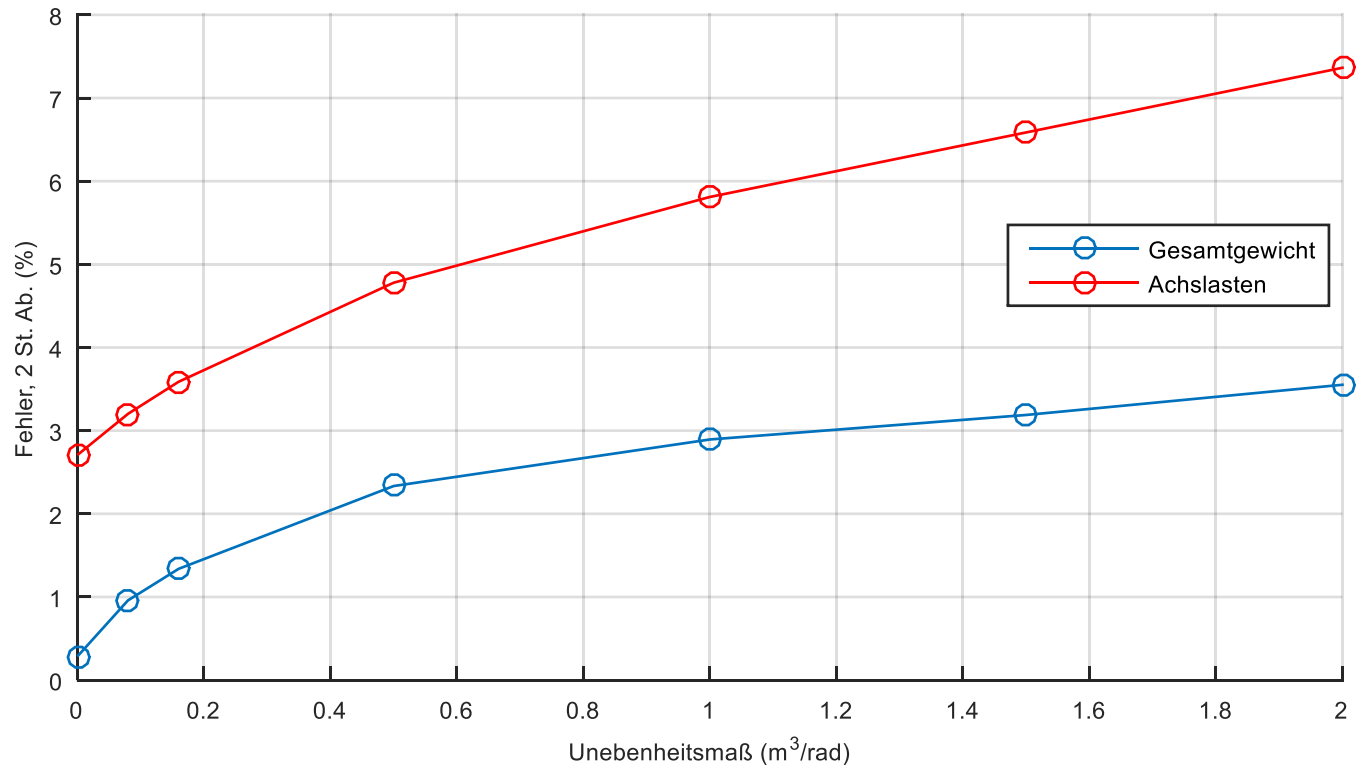
2 σ -Werte des Fehlers für das Gesamtgewicht und die Achslasten als Funktion der Geschwindigkeit



2 σ -Werte des Fehlers für das Gesamtgewicht und die Achslasten als Funktion der Sensorhöhe



2 σ -Werte des Fehlers für das Gesamtgewicht und die Achslasten als Funktion des Unebenheitsmaßes



2 σ -Werte des Fehlers für das Gesamtgewicht und die Achslasten als Funktion der Bremsbeschleunigung

