

Fachbericht

(Fachbericht als Teil des Sachberichtes (ZN) 2017 –
hierin enthalten Meilensteinbericht zu Meilenstein 1 –
Berichtszeitraum: 01.10.-31.12.2017)

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.

Darmstadt, 26.04.2018

Ort, Datum

Andreas Friedmann

A handwritten signature in blue ink that reads "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" Meilensteinbericht zu MS 1	2
4. Arbeitspaket 2.1 „Unsicherheitsanalyse – Analyse der Sensoreigenschaften“	5
5. Arbeitspaket 2.2 „Unsicherheitsanalyse – Analyse des lokalen Reifen-Straßensensor-Kontaktes“	6

2. Einleitung

Dieser Fachbericht ist Teil des Sachberichtes (ZN) 2017 (siehe entsprechenden Verweis auch dort) und enthält den Meilensteinbericht zu Meilenstein 1. Dieses Vorgehen 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 31.12.2017 ab.

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 (Anschnitt „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" | Meilensteinbericht zu MS 1

Die Bearbeitung von Arbeitspaket 1 führt planungsgemäß direkt zur Erreichung von Meilenstein 1 (Bearbeitungszeitraum für Arbeitspaket 1: 01.10.-31.12.2017)

Zielsetzung von Arbeitspaket 1 und Meilenstein 1 (entnommen der Gesamtvorhabensbeschreibung vom 22.08.2017):

„AP1 beinhaltet die Zusammenstellung der bzgl. der Eichfähigkeit und Gerichtsbarkeit 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.

Die Erarbeitung und Definition der Anforderungen basieren auf verschiedenen Informationsquellen: Schon im Rahmen der Antragstellung fand ein Expertengespräch mit der VITRONIC GmbH statt, welches erstes Überblickswissen bzgl. der Anforderungen lieferte. Dieses Überblickswissen soll direkt nach dem Projektstart von LiBra mit Hilfe von käuflich zu erwerbenden Normen, Richtlinien und technischen Standards erweitert und vertieft werden.

Auch sind weitere Gespräche mit Experten aus unterschiedlichen Fachgebieten in Form von entsprechenden Besuchen bei passenden Firmen vorgesehen.

Auch Daten aus der in der Fraunhofer Gesellschaft frei verfügbaren wissenschaftlichen Literatur sollen berücksichtigt werden. Nach Möglichkeit und bei gegebener Kooperationsbereitschaft können darüber hinaus Interviews mit den Experten der BAST, den Herstellern von aktuellen WIM-Systemen und Komponentenlieferanten geführt werden.“

„Meilenstein 1 „Anforderungsanalyse liegt vor“ ist erreicht, wenn AP 1 mit der Zusammenstellung der Anforderungen abgeschlossen ist. Die gesammelten Anforderungen an die Messgenauigkeit bzw. maximale Unsicherheit eines WIM-Systems sowie die Rahmenbedingungen, unter denen das geforderte System entsprechende Analyseergebnisse liefern soll, werden im Meilensteinbericht 1 festgehalten. Damit ist mit Meilenstein 1 als erstes Ziel des Projektes LiBra erreicht, dass die Zielstellung für die nachfolgenden Detailbetrachtungen definiert wurde.“

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 zugrunde 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 zwischen 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 im Rahmen von 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 Wertebereich 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 „gerichts feste 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 Verwiegung 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. Arbeitspaket 2.1 „Unsicherheitsanalyse – Analyse der Sensoreigenschaften“

Die Bearbeitung von Arbeitspaket 2.1 ist laut Gesamtvorhabensbeschreibung für den Zeitraum zwischen 01.11.2017 und 31.01.2018 geplant. Somit kann dieser Fachbericht nur einen Zwischenstand bzgl. dieses Arbeitspaketes beinhalten.

Zielsetzung von Arbeitspaket 2.1 (entnommen der Gesamtvorhabensbeschreibung vom 22.08.2017):

„Die Analyse der Einflüsse der wesentlichen Faktoren auf die Genauigkeit des WIM-Messsystems wird im Rahmen dieses Arbeitspaketes durchgeführt. Zunächst werden in AP 2.1 die Sensoreigenschaften analysiert und ein Sensormodell für die weiteren Untersuchungen erstellt. Die Unsicherheitsanalyse erfolgt anschließend auf zwei Ebenen. Die Interaktion zwischen Sensor, Straße und Reifen wird im AP 2.2 im Detail numerisch untersucht, um die Genauigkeit der Lastmessung zu analysieren. Im AP 2.3 wird das gesamte Messsystem mit dem vollständigen Fahrzeug numerisch simuliert und analysiert. Schließlich werden die Ergebnisse beider Analyse in ein Modell der gesamten Messunsicherheit im AP 2.4 zusammengefasst.“

„In diesem Arbeitspaket wird ein allgemeingültiges Ersatzmodell für das WIM Sensorelement erstellt. Dieses Modell soll parametrisch aufgebaut werden und die Sensoreigenschaften wie Steifigkeit, Sensormasse, Temperaturverhalten, Driftcharakteristik, Ansprechverhalten, Charakteristik der Signalverarbeitung, Abtastrate, Signal-Rausch Verhältnis, Überrollgeschwindigkeit etc. abbilden. Basierend auf den in AP 1 gesammelten Erkenntnissen bzgl. tatsächlich verfügbarer Sensoren sowie weiteren Expertengesprächen bei passenden Firmen orientieren sich die Wertebereiche der Parameter zum einen an den Eigenschaften tatsächlich verfügbarer Sensoren, sofern diese bekannt

sind oder von den Herstellern angegeben werden. Zum anderen werden Wertebereiche angenommen, die nach Abschätzungen basierend auf ingenieurmäßigem Verständnis praktisch umsetzbar sind.

Ziel ist es, die prinzipbedingten Unsicherheiten der Kraftmesselemente zu ermitteln. Hieraus werden nachfolgend die Mindestanforderungen an die Sensoreigenschaften definiert und der Einfluss der Sensoreigenschaften auf die Unsicherheiten herausgearbeitet. Ein Abgleich dieser Eigenschaften mit bestehenden Sensorlösungen erfolgt in AP 4 – „Marktrecherche Kraftmeseinrichtungen“.

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. Ausgehend von den in AP 1 gesammelten Parametern für die Sensorik wurden bis Ende 2017 weitere Informationen gesammelt, um diese dann bei der Umsetzung der Modellierung berücksichtigen zu können.

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

Die Bearbeitung von Arbeitspaket 2.2 ist laut Gesamtvorhabensbeschreibung für den Zeitraum zwischen 01.11.2017 und 30.04.2018 geplant. Somit kann dieser Fachbericht auch bzgl. dieses Arbeitspaketes nur einen Zwischenstand beinhalten.

Zielsetzung von Arbeitspaket 2.1 (entnommen der Gesamtvorhabensbeschreibung vom 22.08.2017):

„Wie im Kapitel 2 bereits erwähnt, steht insbesondere bei schmalen Messelementen der Reifen zu jedem Messzeitpunkt nicht komplett auf dem Messelement auf. Dies führt dazu, dass nur ein Teil der Radlast über das Messelement geleitet und erfasst wird, abhängig von verschiedenen Reifen- und Sensorparametern. Um die Einflüsse dieser verschiedenen Faktoren auf die Genauigkeit der Lastmessung des einzelnen Sensors zu untersuchen, werden Detailanalysen des lokalen Reifen-Straßensensor-Kontaktes im Rahmen dieses Teilarbeitspakets durchgeführt.

Das Verhaltensmodell für den lokalen Reifen-Straßensensor-Kontakt wird mit der erforderlichen Detailtiefe modelliert und numerisch simuliert. Dafür werden detaillierte physikbasierte Reifenmodelle für die Mehrkörpersimulation zusammen mit einem lokalen physikalischen Modell der Straßenoberfläche inkl. des Sensors verwendet.

In diesem Teilarbeitspaket werden die benötigten Simulationsmodelle erstellt und mit Variation einiger lokaler Reifen- und Straßen-/Sensorparametern simuliert, um die Einflüsse dieser Parameter auf die Genauigkeit der einzelnen Lastmessung zu ermitteln.

Die Parameter, die für diese Unsicherheitsanalyse in Frage kommen, sind:

- Reifenparameter: Luftdruck, Durchmesser, Breite und Steifigkeit.
- Sensorparameter: Abtastrate der Messung, Breite, Höhe und Tiefe.

Als Basis für die Wertebereiche der Reifenparameter, die untersucht werden, werden bisherige Erfahrungsdaten des LBF aus Projekten zum Thema LKW-Räder sowie Literaturdaten verwendet. Bzgl. der Wertebereiche der Sensorparameter, werden Daten von bereits entwickelten und auf dem Markt verfügbaren Lösungen verwendet, sofern diese bekannt sind oder von den Herstellern angegeben werden. Rücksprachen mit Sensorherstellern werden gehalten, um sinnvolle Variationsbereiche für diese Parameter zu definieren.

Eine Vielzahl an Simulationen mit Variationen dieser Faktoren wird systematisch geplant und durchgeführt und deren Ergebnisse mit Methoden aus der Unsicherheitsanalyse ausgewertet.“

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. Als Reifen wird das CDTire-Reifenmodell verwendet, das eine detaillierte dreidimensionale Beschreibung des dynamischen Verhaltens des Reifens und dessen Kontaktes mit der Straße ermöglicht (siehe Abbildung 1). Der Reifen wird mittels einer Vielzahl von diskreten Massenelementen modelliert, die mit Steifigkeits- und Dämpfungselementen untereinander verbunden sind. Die Elemente kommen in Kontakt mit einem dreidimensionalen kontinuierlichen oder diskreten Straßenoberflächenmodell und generieren einzelne,

lokale Kontaktkräfte, die in Summe zur gesamten Reifen-Straße-Kontaktlast (Kraft und Moment) führen. Die Anzahl der diskreten Elemente kann für die gewünschte Detaillierung der Modellierung je nach Bedarf angepasst werden.

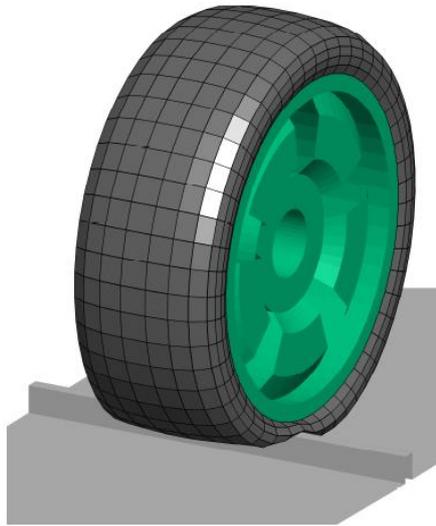


Abbildung 1: Reifenmodell CDTire [1].

Die Anwendung des CDTire Reifenmodells erfordert definierte, experimentelle Charakterisierungsversuche, die im Vorfeld durchzuführen sind und die Basis der Modellparametrierung darstellen. Einige physikalische Parameter (z. B. der Luftdruck im Reifen) lassen sich im parametrisierten Reifenmodell ändern, ohne dass eine erneute Charakterisierung erforderlich wird.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wird zunächst ein bereits parametrierter LKW-Reifen als Basis der Analysen verwendet, wobei einige charakteristische Parameter (Reifeninnendruck und Reifendimensionen) für die verschiedenen Simulationskombinationen variiert werden sollen.

Außerdem wird das MKS-Modell eine Darstellung der Straßenoberfläche beinhalten, inkl. der Stelle des Sensorelementes. Einflüsse der Straßenoberflächenparameter, wie die lokale Rauigkeit vor der Sensorstelle oder die Höhenlage des Sensors im Vergleich zur Straßenoberfläche können damit modelliert und analysiert werden.

Für jeden Zeitschritt der dynamischen Simulation können im MKS-Modell die Kräfte der einzelnen Reifenelemente, die in Kontakt mit der Sensorstelle sind, summiert werden um diese später als Input für das Sensormodell (siehe AP 2.1) zu verwenden.

Wie bereits erwähnt, ist bei schmalen Messelementen mit einer die Sensorfläche überschreitenden Reifenaufstandsfläche zu rechnen. Dies führt dazu, dass, abhängig von verschiedenen Reifen- und Sensorparametern, zu jedem Zeitpunkt jeweils nur ein Teil der Radlast über das Messelement geleitet und erfasst wird. Letztlich überrollt jedoch die gesamte Radlast das Messelement und muss also als eine integrale Größe betrachtet werden. Die Ermittlung der Radlast aus der gemessenen Last wird auf Basis von Algorithmen durchgeführt, deren Genauigkeit von verschiedenen Parametern des Reifens, des Sensors sowie von Fahrt- und Umgebungsbedingungen abhängt. In dieser ersten Phase des Arbeitspaketes wurde eine Vorstudie zu diesem Aspekt durchgeführt, um die Einflüsse der wesentlichen Parameter auf die Genauigkeit der Auswertung der einzelnen Sensormessungen zu untersuchen. Diese beinhaltet noch keine detaillierte Mehrkörpersimulation des Reifen-Sensor-Kontaktes. Stattdessen wurde zunächst ein aus der Literatur verfügbares Druckprofil der Reifenaufstandsfläche, das für Parametervariationen numerisch skaliert wurde, verwendet [2]. Bzgl. des Auswertungsalgorithmus wurde die in der Literatur verfügbare Funktion der Firma Kistler implementiert [3]. Die Ergebnisse der Analyse sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Diagramme zeigen den relativen Fehler in der Radlastabschätzung als Funktion von vier Einflussfaktoren: Zeitschrittweite der Signalabtastung (Samplingrate), Fahrzeuggeschwindigkeit, Breite der Messstreifen und Länge (in Fahrtrichtung) der Reifenaufstandsfläche. Bei jedem ausgewerteten Punkt ist ein blauer Fehlerbalken mit Median, maximalem und minimalem Wert zusammen mit dem Mittelwert (in Schwarz)

dargestellt. Für jeden Punkt sind 100 Rechnungen mit unterschiedlichen Random-Zeitoffsets für den Startpunkt der Abtastung ausgewertet worden.

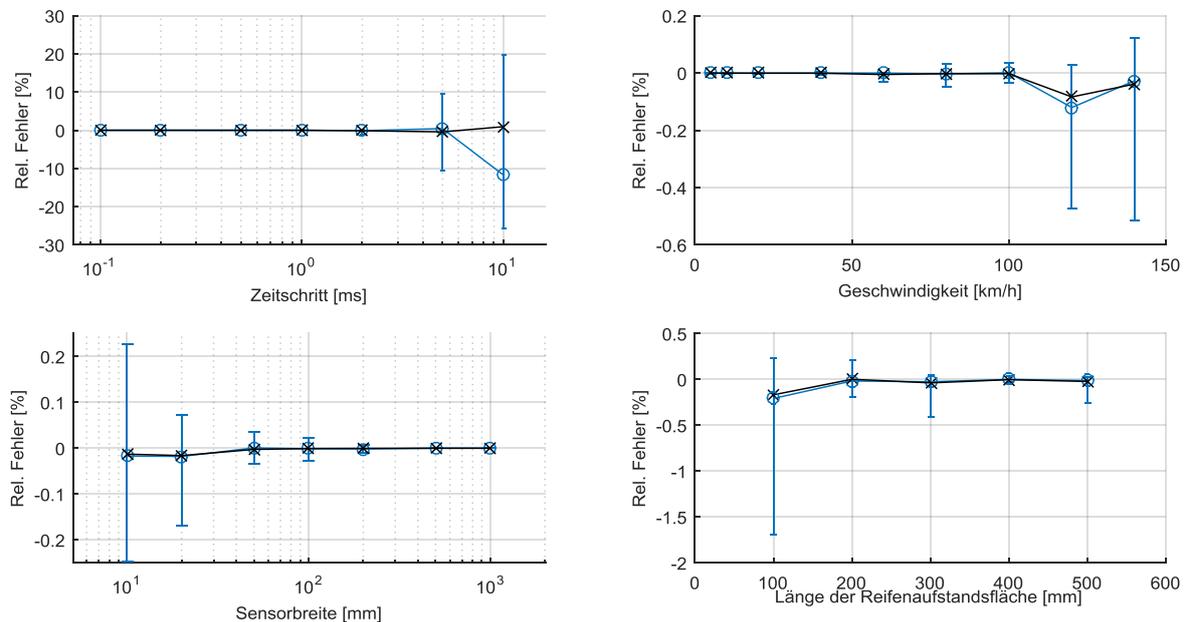


Abbildung 2: Sensitivitätsanalyse der Einflüsse einiger Parameter auf die Genauigkeit der Auswertungsroutine für einen Messstreifen.

Als Basis für diese Analyse wurden die Parameter folgendermaßen festgelegt:

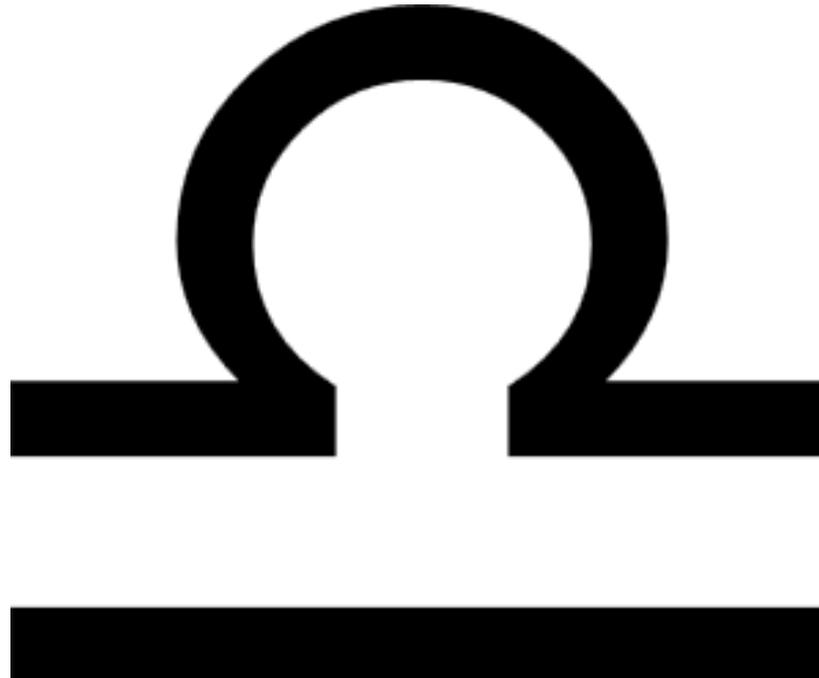
- Zeitschritt: 1 ms (entspricht einer Samplingrate von 1000 Hz)
- Geschwindigkeit: 100 km/h
- Sensorbreite: 50 mm
- Kontaktflächenlänge: 400 mm

Die Ergebnisse zeigen insbesondere, wie der Fehler in der Lastenabschätzung mit zunehmendem Zeitschritt und zunehmender Geschwindigkeit sowie mit abnehmender Sensorbreite und Länge der Reifenaufstandsfläche stark variieren kann. Innerhalb der analysierten Parameterräume zeigt sich die höchste Variation bei der Zeitschrittweite.

- [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.

ANHANG A DES FACHBERICHTS 2017 ZUM VORHABEN LIBRA – LASTEN IN BEWEGUNG RECHTSSICHER AUFZEICHNEN

Einflussfaktoren bzgl. der Zulassungsfähigkeit eines Messverfahrens
Abschätzung der Parameterräume



Anhang A des Fachberichts 2017 zum Vorhaben LiBra – Lasten in Bewegung rechtssicher aufzeichnen – Seite 1

Einflussfaktoren: Kategorien (gleichzeitig Struktur dieses Anhangs)

- 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 und 9
 - Umgebung - Seite 10
 - Fahrmanöver - Seite 11

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
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	55 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

Anhang A des Fachberichts 2017 zum Vorhaben LiBra – Lasten in Bewegung rechtssicher aufzeichnen – Seite 3

Lokale Einflussfaktoren – Sensorelement

Faktor	Beschreibung / Kommentar	Standard-Wert	Min.	Max.	Quelle
Breite (in Fahrtrichtung)		50 mm	50 mm	1000 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		5 kg	500 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	... 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)	(beinhaltet auch eine Abschätzung des Einfluss von Wasserfilmen und der Temperatur)	0,9	0,2	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)	$\leq 2 \%$ / $\leq 2 \%$	0 %	2 % (betragsmäßig)	BAST: TLB, 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: 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	... 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)

Archivierungsangaben

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	8	1	8	Kistler: Planning of a WIM Station (S. 17-23) Traffic Data Systems: Weigh-in-Motion Systems

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)	BAS: Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, 2012, (S. 57)
Steigung	... im Bereich 45 m vor bis 20 m nach der Messstelle	$\leq 2 \%$	0 %	2 % (betragsmäßig)	BAS: Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, 2012, (S. 57)
Welligkeit	„kein Wechsel von Quer- und Längsneigung oder größerer Unebenheiten (Kanten, unebene Brückenübergänge,..) innerhalb von 300 m vor und 20 m nach der Messstelle...“	keine	-	-	BAS: Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, 2012, (S. 57)
Rauigkeit	... im Bereich 45 m vor bis 20 m nach der Messstelle (nach BAS) – angegeben als Profiltiefe der Straßenoberfläche in Quer- und Längsrichtung unter einer 4 m langen Messlatte	2 mm	0 mm	4 mm	BAS: 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	∞	BAS: 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)

Archivierungsangaben

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
Beladung	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	-20 %	+20 %	IPG TruckMaker

Archivierungsangaben

LKW-Klassen

EU (COST 323)

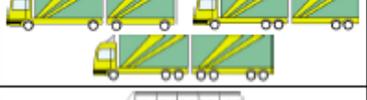
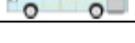
Category	Silhouette	Description
Category 1	Cars, vans (< 35 kN)	Cars, cars+light trailers or caravans
Category 2		Two axle rigid lorry
Category 3		More than 2-axle rigid lorry
Category 4		Tractor with semi-trailer supported by single or tandem axles
Category 5		Tractor with semi-trailer supported by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

Figure 3: COST 323 vehicle classification

USA FHWA VEHICLE CLASSIFICATION

CLASS GROUP	DESCRIPTION	NO. OF AXLES
1	 MOTORCYCLES	2
2	 ALL CARS CARS W/ 1-AXLE TRAILER CARS W/ 2-AXLE TRAILER	2 3 4
3	 PICK-UPS & VANS 1 & 2 AXLE TRAILERS	2, 3, & 4
4	 BUSES	2 & 3
5	 2-AXLE, SINGLE UNIT	2
6	 3-AXLE, SINGLE UNIT	3
7	 4-AXLE, SINGLE UNIT	4
8	 2-AXLE, TRACTOR, 1-AXLE TRAILER (2&1)	3
	 2-AXLE, TRACTOR, 2-AXLE TRAILER (2&2)	4
	 3-AXLE, TRACTOR, 1-AXLE TRAILER (3&1)	4
9	 3-AXLE, TRACTOR, 2-AXLE TRAILER (3&2)	5
	 3-AXLE, TRUCK W/ 2-AXLE TRAILER	5
10	 TRACTOR W/ SINGLE TRAILER	6 & 7
11	 5-AXLE MULTI-TRAILER	5
12	 6-AXLE MULTI-TRAILER	6
13	ANY 7 OR MORE AXLE	7 or more
14	NOT USED	
15	UNKNOWN VEHICLE TYPE	

HEAVY TRUCKS

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>BASt: 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	8 m/s	<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>BASt: 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>				