

1 Einleitung

Als komplexes System soll ein Fahrzeug nicht nur die Bedürfnisse erfüllen, Menschen zu transportieren, sondern auch hohen Anforderungen in Bezug auf Fahrkomfort, Fahrdynamik, Sicherheit und viele andere Aspekte genügen. Das Fahrwerk spielt dabei eine entscheidende Rolle. Alle Regelsysteme und Fahrerassistenzsysteme zur Optimierung des Fahrzeugverhaltens werden im Fahrwerk integriert. [HEH07]

Der Fahrzeugreifen als einziger Kontakt zwischen Fahrzeug und Fahrbahn kann maßgeblich dazu beitragen, die obengenannten Eigenschaften des Fahrzeugs zu beeinflussen. Die Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn dient zur Übertragung der Kräfte und kann somit den Fahrkomfort, die Fahrdynamik und den Verbrauch unmittelbar beeinflussen. Der Reifenfülldruck ist dabei eine der wesentlichsten Einflussgrößen, die die Kontaktfläche direkt beeinflussen können. Wenn der Reifenfülldruck vom idealen Fülldruck abweicht, wird die Performance des Gesamtfahrzeugs beeinträchtigt. Daher sind Reifendruckkontrollsysteme mittlerweile nahezu weltweit gesetzlich vorgeschrieben.

Die Reifendruckkontrollsysteme können in direkte und indirekte Systeme unterteilt werden. Das indirekte Reifendruckkontrollsystem (iTPMS) ist von der Reifenschwingung abhängig. In den letzten Jahren hat sich die Fahrwerkstruktur mit der Entwicklung der Fahrwerkstechnologien ständig verändert. Unterschiedliche Fahrwerkstopologie und elastische Fahrwerkskomponenten können auf die Reifenschwingung und die Funktionalität des indirekten Reifendruckkontrollsystems einwirken [Sün17]. Die Untersuchung der Reifenschwingung allein auf Reifenebene reicht für die Entwicklung des indirekten Reifendruckkontrollsystems nicht aus. Die Einflüsse aus dem Fahrwerk müssen ebenfalls untersucht werden, um das Verständnis der Reifenschwingung im Fahrbetrieb zu vertiefen, wodurch die Zuverlässigkeit des Reifendruckkontrollsystems verbessert wird und unnötige Entwicklungskosten aufgrund eines mangelnden Systemverständnisses reduziert werden können. Die moderne Fahrzeugentwicklung wird anhand des V-Modells aufgesetzt [Hen11; Ing04]. Im V-Modell wird die Fahrzeugentwicklung auf die Gesamtfahrzeug-, Subsystem- und Komponentenebene aufgeteilt. Die konventionelle Entwicklung des indirekten Reifendruckkontrollsystems mittels des Gesamtfahrzeugtests liegt im rechten Ast des V-Modells. Durch Gesamtfahrzeugtests unter verschiedenen Bedingungen wird das System entwickelt und abgesichert. Der Zeitraum für die Gesamtfahrzeugtests ist jedoch eingeschränkt, da die Tests erst in der späteren Entwicklungsphase stattfinden. Wenn die Entwicklungen mittels des Gesamtfahrzeugtests auf den Reifenprüfstand oder in eine virtuelle Umgebung verlegt werden und dabei ebenfalls die Einflüsse anderer Fahrzeugkomponenten berücksichtigt werden können, kann der Entwicklungszeitraum erheblich verlängert werden. Das System kann durch mehrere Iterationsschleifen optimiert werden. Darüber hinaus lassen sich die Entwicklungskosten durch diese Methode maßgeblich reduzieren.

In der vorliegenden Arbeit werden die Untersuchungen der iTPMS-relevanten Reifenschwingung auf Komponenten-, Subsystem- und Gesamtfahrzeugebene mithilfe von Experimenten und Simulationen vorgestellt. Das Ziel dieser Arbeit ist es, einerseits das Verständnis für die Reifenschwingung hinsichtlich der Fülldruckänderung zu vertiefen und andererseits Methodenansätze zur Ersetzung der aktuellen Entwicklungsmethode anhand von Gesamtfahrzeugtests mittels des erworbenen tieferen Verständnisses abzuleiten.

2 Motivation und Aufgabenstellung

In diesem Kapitel werden die Ziele der vorliegenden Arbeit und die Methoden zur Zielerreichung vorgestellt. Zuerst wird der Entwicklungsstand des indirekten Reifendruckkontrollsystems gezeigt. Anschließend werden die Motivation und die Forschungsfragen formuliert. Zum Schluss werden die Untersuchungsmethode und die Struktur der Arbeit abgeleitet.

2.1 Aktueller Stand der Entwicklung des indirekten Reifendruckkontrollsystems

Der Reifen als einziger Kontakt zwischen Fahrzeug und Fahrbahn hat maßgeblichen Einfluss auf die Fahrzeugsicherheit, den Fahrkomfort, die Fahrdynamik und den Kraftstoffverbrauch. Ein Reifen kann die optimale Performance erreichen, wenn ein entsprechender Reifendruck eingestellt wird. Aufgrund der Wichtigkeit des Reifendrucks wurde in den USA seit 2007 eine gesetzliche Vorschrift (FMVSS 138) veröffentlicht, die den Einbau von Reifendruckkontrollsystemen in PKW vorschreibt. Eine ähnliche Vorschrift (ECE-R 64) besteht seit 2012 in Europa. Ebenso mussten alle Fahrzeuge in China ab 2020 mit Reifendruckkontrollsystemen ausgestattet sein. In der Abbildung 2.1 werden die FMVSS 138 und ECE-R 64 Prüfverfahren veranschaulicht.

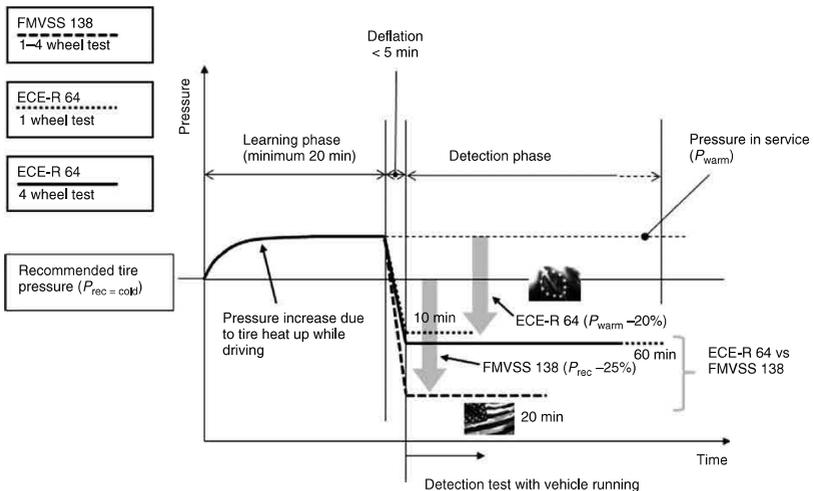


Abbildung 2.1: FMVSS 138 und ECE-R 64 Prüfverfahren [UR]+14

FMVSS 138 erfordert eine Fahrerwarnung innerhalb von 20 Minuten, wenn der Reifenfülldruck in einem oder mehreren Rädern unter 25 % des empfohlenen kalten Reifenfülldrucks liegt. In ECE-R 64 wird eine Warnung bei 20 % Druckverlust in Bezug auf den warmen Reifenfülldruck gefordert. Die Warnung soll für den Ein-Rad-Druckverlust innerhalb von 10 Minuten und für den Vier-Räder-Druckverlust innerhalb von 60 Minuten ausgegeben werden. In China wird die Warnung für den Ein-Rad-Druckverlust von 25 % in Bezug auf den kalten Reifenfülldruck innerhalb von 10 Minuten und für den Zwei-Räder- bis Vier-Räder-Druckverlust von 25 % innerhalb von 15 Minuten in GB-26149 vorgeschrieben.

Sowohl das direkte als auch das indirekte Reifendruckkontrollsystem müssen die obengenannten Anforderungen erfüllen, damit sie im Fahrzeug eingesetzt werden können. Das direkte Reifendruckkontrollsystem nutzt Drucksensoren an jedem Rad, um den Reifendruck

zu messen. Das indirekte Reifendruckkontrollsystem nutzt den Reifen selbst als Sensor, wobei die druckabhängigen Eigenschaften des Raddrehzahlsignals verwendet werden können, um Reifendruckverlust zu erkennen. Der Fokus dieser Arbeit ist die Entwicklung des indirekten Reifendruckkontrollsystems. Da dieses häufig iTPMS (Abkürzung von *indirect tire pressure monitoring system*) genannt wird, wird das System in den weiteren Abschnitten auch als iTPMS bezeichnet.

Das iTPMS arbeitet hauptsächlich mittels zweier druckabhängiger Phänomene des Reifens. Diese beiden Phänomene, die Änderung des Rollradius und die Änderung der Eigenfrequenz des Reifens, spiegeln sich im Raddrehzahlsignal wider. In der Abbildung 2.2 werden die beiden Phänomene veranschaulicht.

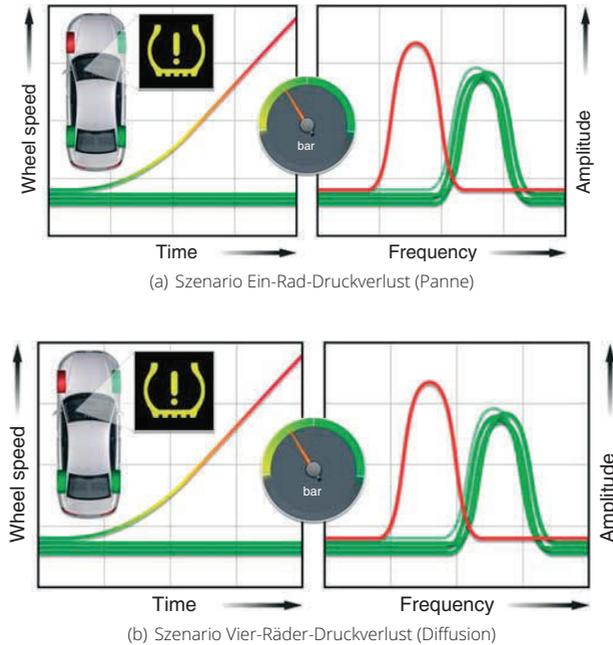


Abbildung 2.2: Änderung der Drehzahl (*wheel speed*) bei Druckverlustszenarien [URJ+14]

Wie in Abbildung 2.2 dargestellt, erhöht sich die Raddrehzahl des Rades mit Druckverlust beim Szenario des Ein-Rad-Druckverlustes im Vergleich zu den anderen Rädern. Dementsprechend verringert sich der Rollradius des Rades. Neben der Änderung des Rollradius ändert sich auch die Eigenfrequenz des Reifens, die sich im Raddrehzahlsignal widerspiegelt. Dieses wird durch den Hall-Sensor (Drehzahlsensor) gemessen und enthält Schwingungsinformation der Torsionsschwingung vom Reifen. Die Eigenfrequenz der Reifentorsionsschwingung ist abhängig vom Reifenfülldruck. Je geringer der Reifenfülldruck ist, desto kleiner ist die Eigenfrequenz der Reifentorsionsschwingung [URJ+14]. Die beiden Phänomene können für die Erkennung der Szenarien des Druckverlustes von ein bis drei Rädern verwendet werden. Das erste Phänomen, die Änderung des Rollradius, kann jedoch nicht für das Szenario der gleichzeitigen Druckverluste aller vier Räder (Diffusion) genutzt werden, da die Rollradien aller Räder sich gleichzeitig ändern und die Abweichung der Rollradien nicht mehr erkannt werden kann (siehe Abbildung 2.2(b)). In diesem Fall

kann nur die Änderung der Eigenfrequenz der Reifentorsionsschwingung verwendet werden, um einen Druckverlust von allen vier Rädern zu erkennen. Die Eigenfrequenzen aller Räder, die sich im Raddrehzahlsignal widerspiegeln, werden in einem vom Fahrer definierten Normalzustand angelernt und als Referenz im System gespeichert. Mittels des Vergleichs zwischen den Eigenfrequenzen aller Reifen bei einem Druckverlust und den im System gespeicherten Referenzwerten kann der Druckverlust von allen Rädern identifiziert werden.

Der Einsatz des direkten oder indirekten Reifendruckkontrollsystems im Fahrzeug hängt von der Strategie eines Fahrzeugherstellers ab. Im Vergleich zum indirekten Reifendruckkontrollsystem kostet das direkte System über die gesamte Fahrzeuglebensdauer 300 bis 400 Euro mehr für die Sensoren, die Montage und die Wartung [For09]. Heute wählt die Mehrheit der Fahrzeughersteller das direkte System aus. Allerdings nutzen auch viele Hersteller iTPMS, wie beispielsweise VW, Audi, Fiat, Honda und Peugeot. [ADA19]

Viele Zulieferer entwickeln das indirekte Reifendruckkontrollsystem. Zum Beispiel sind NIRA Dynamics AB, Continental und Dunlop Tech bekannte Anbieter für iTPMS. Die iTPMS-Produkte aller Hersteller basieren auf einem ähnlichen Funktionsprinzip. Sie analysieren die Raddrehzahl, um den Druckverlust anhand des Rollradius- und Frequenzverhaltens der Drehzahl zu detektieren. In der vorliegenden Arbeit (besonders im Fahrzeugtest) wird das indirekte System von NIRA Dynamics AB genutzt. In der Literatur [Per02b; PGD02; LKOG13; GPD+01] werden die grundlegenden Algorithmen des Systems erklärt. Zudem wird die Methode der Frequenzanalyse detailliert beschrieben. Die Frequenzanalyse basiert auf einem vereinfachten Reifenmodell. Die Reifenschwingung kann durch ein autoregressives Modell (AR-Modell) zweiter Ordnung geschätzt werden. Der Fokus der Untersuchungen von NIRA Dynamics liegt nicht auf der physikalischen Analyse der Reifenschwingung, sondern auf der Signalverarbeitung. In [GG00; Gus10; Per02a] werden die Methoden der Signalverarbeitung beschrieben, um die im Drehzahlsignal sichtbare Eigenfrequenz des Reifens zu schätzen und die beispielsweise durch die Straßenoberfläche sowie durch verschiedene rotierende Teile im Antriebsstrang verursachten Geräusche zu eliminieren. Die Methoden der Signalverarbeitung für die Schätzung der Reifeneigenfrequenz werden nicht nur von NIRA untersucht, sondern auch in anderen Publikationen [ZLL09; LHZ14] diskutiert.

Neben der Signalverarbeitung ist die physikalische Analyse des Reifenschwingverhaltens anhand eines Reifenmodells für das Verständnis des Frequenzverhaltens des Drehzahlsignals hinsichtlich des Druckverlustes wichtig. In [May96] wurden die physikalischen Reifenmodelle zur Beschreibung der Drehschwingung verwendet. In [Vos03] wurde das Starr-Gürtelring-Reifenmodell aus [Zeg98] genutzt, um das Reifenschwingverhalten zu analysieren. In dieser Arbeit wurde der Einfluss der Achse auf die Reifenschwingung ebenfalls diskutiert. Ähnliche Modellansätze und Methoden wurden in [Sün17] verwendet, um das Reifenschwingverhalten zu identifizieren. In derselben Publikation wurden Untersuchungen auf einem Reifenprüfstand zur Analyse des Rollradius- und Frequenzverhaltens hinsichtlich des Druckverlustes durchgeführt. Dazu wurde eine Reifenmessprozedur entwickelt, um die Reifenklassifizierung hinsichtlich der iTPMS-Kompatibilität im Prüfstand zu realisieren, damit die Anzahl der Fahrzeugtests reduziert werden kann.

Neben den einzelnen Modellansätzen wurde ein Konzept der virtuellen Entwicklung des indirekten Reifendruckkontrollsystems von der Softwarefirma IPG erarbeitet. IPG hat iTPMS in die Simulationssoftware CarMaker integriert. Mittels des von Michelin entwickelten thermomechanischen Reifenmodell TameTire kann der Druckverlust hinsichtlich der gesetzlichen Anforderung erkannt werden [BDMS12]. Allerdings gibt es keine detaillierten Informationen und Veröffentlichungen bezüglich der Umsetzung des Konzepts von IPG.

Bis auf die konventionelle Analyse der Rollradiusänderung und des Schwingverhaltens des Drehzahlsignals wurden auch andere Methoden zur Erkennung des Druckverlustes unter-

sucht. In [LLZZ18] und [Sol16] wurden die Methoden anhand der Reifenquerdynamik und des Zwei-Spur-Modells zur Schätzung des Druckverlustes konzipiert.

2.2 Motivation und Zielsetzung

Im Vergleich zum direkten Reifendruckkontrollsystem weist das indirekte Reifendruckkontrollsystem einen Kostenvorteil in Bezug auf die Materialkosten auf, da keine Hardware im Reifen erforderlich ist. Die Kosten des iTPMS fallen hauptsächlich in der Entwicklungsphase an. Aufgrund der verschiedenen Konstruktionen und Materialeigenschaften unterscheiden sich diverse Reifen deutlich in den Reifeneigenschaften hinsichtlich der Fülldruckänderung. Trotzdem muss das iTPMS mit diversen Reifen ein zuverlässiges Verhalten in Bezug auf die Detektion des Druckverlustes und ein robustes Verhalten gegenüber Fehlwarnungen zeigen. Aus diesem Grund werden zahlreiche Fahrzeugtests mit verschiedenen Reifen unter unterschiedlichen Bedingungen, z. B. Schnee, Regen usw., durchgeführt, um das System abzusichern. Um die Entwicklungskosten des iTPMS zu reduzieren, sollen die Fahrzeugtests möglichst durch eine Prüfstandsmessung oder Simulation ersetzt werden. In [Sün17] wurde eine Prozedur der Reifenmessung zur Klassifizierung des Reifenverhaltens hinsichtlich der Fülldruckänderung entwickelt. Als die weitergehende Untersuchung des Potenzials zur Reduktion der Fahrzeugtests wird in der vorliegenden Arbeit auf der einen Seite die Reifenmessprozedur weiterentwickelt und auf der anderen Seite die virtuelle Methode zur Untersuchung des Reifenverhaltens hinsichtlich der Druckänderung konzipiert.

Die in Kapitel 2.1 genannten druckabhängigen Eigenschaften von Reifen werden nicht nur durch den Reifenfülldruck beeinflusst. Insbesondere kann die Reifeneigenfrequenz noch durch Reifenkonstruktion, Gummimischung, Achsenkinematik usw. beeinflusst werden [Zeg98; Sün17; Vos03; Sch04]. In der aktuellen Entwicklung von iTPMS werden die Einflussfaktoren hauptsächlich mittels der Fahrzeugtests mit verschiedenen Reifen und Fahrzeugkonfigurationen identifiziert werden. Um den Testaufwand zu reduzieren und eine Vorhersage der iTPMS-Funktionalität in der frühen Phase des gesamten Fahrzeugentwicklungsprozesses zu realisieren, sollen diverse Simulationen zum Ersatz der Fahrzeugtests und zur Untersuchung der Einflussfaktoren auf iTPMS entwickelt werden.

Zusammenfassend gibt es zwei Hauptziele in der vorliegenden Arbeit:

- die unterschiedlichen Einflussgrößen auf das Reifenverhalten hinsichtlich der Fülldruckänderung anhand der Prüfstandsmessung und Simulation zu untersuchen, um ein besseres Systemverständnis aufzubauen, und
- die experimentelle Methode und die virtuelle Methode zu entwickeln, um zum zukünftigen Ersatz der Fahrzeugtests beizutragen.

Unter den beiden Hauptzielen werden folgende Forschungsfragen auf Reifen-, Subsystem- und Gesamtfahrzeugebene formuliert:

Reifenebene

- Beeinflussen die Geschwindigkeit, der Reifenverschleiß, die Reifendimension und die Temperatur das Reifenverhalten (Rollradiusänderung und Eigenfrequenzänderung) hinsichtlich der Fülldruckänderung?
- Welche Charakteristiken aus Prüfstandsmessungen sind für die Klassifizierung des Reifenverhaltens hinsichtlich des Druckverlustes am geeignetsten?

- Mit welchen Reifenmodellen kann das Reifenverhalten hinsichtlich des Druckverlustes realitätsnah nachgebildet werden?
- Wie können die Reifenparameter die iTPMS-relevante Reifenschwingung beeinflussen?
- Wie kann das ausgewählte Reifenmodell zwecks der Untersuchung des Reifenverhaltens bei Druckverlust effizient parametrisiert werden?
- Wie kann das ausgewählte Reifenmodell als Werkzeug zur Untersuchung der Einflussgrößen eingesetzt werden?

Subsystemebene

- Welchen Einfluss haben elastische Fahrwerkskomponenten (z. B. Fahrwerks- und Hilfsrahmenlager) auf das iTPMS-relevante Reifenschwingverhalten?
- Welchen Einfluss hat die Elastizität der starren Körper im Fahrwerk (z. B. des Hilfsrahmens) auf das iTPMS-relevante Reifenschwingverhalten?
- Welcher Unterschied besteht zwischen der Vorder- und Hinterachse hinsichtlich des Einflusses auf das iTPMS-relevante Reifenschwingverhalten?
- Welchen Einfluss hat das Differenzial auf das iTPMS-relevante Reifenschwingverhalten?

Gesamtfahrzeugebene

- Können die Ergebnisse der Fahrzeugtests hinsichtlich des Druckverlustes auch in den Gesamtfahrzeugsimulationen nachgebildet werden?
- Beeinflussen sich die Reifenschwingungen der Vorder- und Hinterachse gegenseitig?

2.3 Methode und Struktur der Arbeit

In Kapitel 2.1 werden die aktuellen Forschungen von indirekten Reifendruckkontrollsystemen vorgestellt. Daraus geht hervor, dass die bisherigen Forschungen zum Reifenschwingverhalten in Bezug auf die iTPMS-Entwicklung nicht ausreichend sind. Die Untersuchungen der verschiedenen Einflussgrößen auf das Rollradius- und Frequenzverhalten hinsichtlich der Fülldruckänderung sollten weiter ausgeführt werden. Darüber hinaus wurde bislang keine systematische Simulationsmethode von der Reifen- bis zur Gesamtfahrzeugebene entwickelt, die für die virtuelle Entwicklung des iTPMS verwendet werden kann. Zum Beispiel wurde in der bisherigen Literatur kein Parametrierungsprozess des verwendeten Reifenmodells hinsichtlich der Fülldruckänderung vorgestellt.

In der vorliegenden Arbeit werden die Prüfstandsmessungen und die Simulationsmodelle als zwei Schwerpunkte untersucht, um das Systemverständnis zu verbessern und eine Methode für die virtuelle Entwicklung des iTPMS zu entwickeln.

Um das Systemverständnis schrittweise aufzubauen, sind alle Untersuchungen in drei Ebenen unterteilt: Komponenten (Reifen)-, Subsystem- und Gesamtfahrzeugebene. Subsysteme fassen einzelne Komponenten eines Fahrzeugsystems sowohl strukturell als auch

hinsichtlich ihres mechanischen Verhaltens zusammen [Ang17]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit zählen das Fahrwerk, der Hilfsrahmen und das Differenzial dazu. Auf jeder Ebene unterscheiden sich die Forschungen in den virtuellen und experimentellen Untersuchungen. Für Erstere werden zwei Methoden eingesetzt. Auf der einen Seite werden die Konzeptmodelle entwickelt, um das Systemverständnis aufzubauen, auf der anderen Seite werden die Mehrkörpermodelle verwendet, um ein realitätsnahes Systemverhalten abzubilden. Die Methoden und die Struktur der Arbeit werden in der Abbildung 2.3 dargestellt.

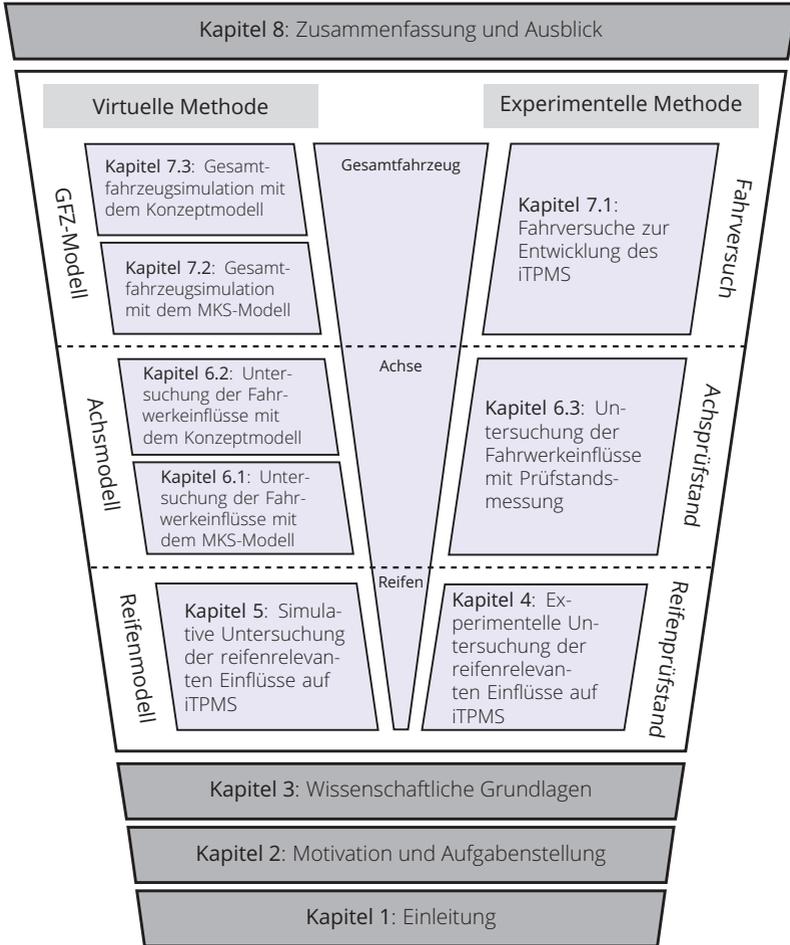


Abbildung 2.3: Struktur der Arbeit