

## 1.1. Motivation

Die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen dienen der Ausprägung eines Markenwerts und sind daher wichtige Produktentwicklungsziele für die Automobilhersteller [221]. Nach [32, S. 12] ist das Fahrverhalten für 81 % der Kunden eines Mittelklassefahrzeugs ein bedeutendes Kaufkriterium. In Bezug auf den Komfort liegt der Anteil der Befragten bei 62 %, wobei zu erwarten ist, dass die Kundenansprüche diesbezüglich in Zukunft steigen werden. Ursächlich dafür sind sowohl stetig steigende Fahrstrecken von Kraftfahrzeugen [180] als auch die Zunahme autonomer Fahrfunktionen, wie Studien [108, 65] sowie die Dissertation von Bellem [23, S. 6] zeigen. Beim Wegfall der grundlegenden Fahraufgabe werden zum einen Straßenunebenheiten verstärkt empfunden [145, S. 1], zum anderen wird die Umgebung nicht mehr erfasst, weshalb sich der Fahrer nicht auf Einzelstörungen wie beispielsweise Schlaglöcher vorbereiten kann [203, S. 5]. Insbesondere vor dem Hintergrund der sinkenden Straßenqualität in Deutschland [206, S. 35] kommt der Gestaltung der Fahreigenschaften und im Speziellen des Schwingungskomforts somit eine entscheidende Bedeutung für die Markenphilosophie zu [125, S. 1]. Da zudem der Wunsch des Kunden nach Individualität steigt, ist das Fahrverhalten ein wichtiges Differenzierungsmerkmal eines Kraftfahrzeugs [184, S. 1 f.].

Gleichzeitig ist der Produktentwicklungsprozess (PEP) eines Fahrzeugs durch hohe Zeit- und Kostenaufwände charakterisiert. Allein auf die Fahrwerksentwicklung entfallen 15-20 % der gesamten Entwicklungskosten [122, 67, S. 3]. Zwar werden schon in der Konzeptphase Anforderungen an die für das Fahrverhalten relevanten Baugruppen gestellt und damit das grobe Eigenschaftsspektrum eines Fahrzeugs definiert, jedoch erfolgt die Ausgestaltung des Fahrverhaltens durch die Komponentenabstimmung erst am Ende der Serienentwicklung in einem iterativen Prozess [96, S. 11]. Die dafür nötigen Fahrversuche nehmen aufgrund des Prototypenbedarfs einen hohen Anteil an den Entwicklungskosten des Fahrwerks ein [243, S. 36]. Des Weiteren werden die Entwicklungszeiträume von Kraftfahrzeugen aufgrund einer steten Erweiterung der Produktpalette sowie der Erhöhung der Modellwechselrate kontinuierlich verkürzt, um dem durch den Markteintritt neuer Hersteller ausgelösten Wettbewerbsdruck zu begegnen [240, S. 12, S. 30, 131, S. 1, 248, 184, S. 1].

Zur Bewältigung dieser Herausforderungen werden zunehmend virtuelle Entwicklungsmethoden in sämtliche Phasen des PEP integriert. Die Chancen der Virtualisierung liegen in der Steigerung der Produktqualität, der Verkürzung der Entwicklungszeit sowie der Kostenreduktion, da reale Prototypen durch virtuelle Prototypen ersetzt werden können [104, 205, S. 2, 243, S. 38]. Hinsichtlich der Abstimmung des Schwingungskomforts können Fahr- und Messaufwände zur Feinabstimmung durch den Einsatz simulationsbasierter Methoden reduziert werden. Damit leistet die Virtualisierung einen Beitrag zum „Frontloading“, worunter die Verlagerung von Entwicklungsaufwänden hin zu früheren Prozessphasen verstanden wird [253, S. 503]. Somit kann schon in der Konzeptphase eine hohe Produktreife erreicht werden, was den Aufwand bei der Feinabstimmung reduziert. Die Virtualisierung trägt damit wesentlich zur Unternehmensrentabilität bei.

Darüber hinaus bietet die Virtualisierung weitere Vorteile bei der praktischen Durchführung der Feinabstimmung. Zum einen können Umwelteinflüsse in simulativ erzeugten Ergebnissen ausgeschlossen werden, weshalb diese hinsichtlich ihrer Reproduzierbarkeit realen Abstimmfahrten überlegen sind. Damit bietet die Virtualisierung die Möglichkeit einer gezielten Sensi-

tivitätsanalyse der Modellparameter bei gleichzeitig unverändertem Verhalten des restlichen Schwingungssystems [30, S. 1]. Zum anderen kann bei ausreichender Simulationsgüte ein Wirkkettenverständnis von Komponenteneigenschaften hin zum Fahrverhalten aufgebaut werden, da für den Fahrer nicht unmittelbar wahrnehmbare Effekte im Übertragungspfad zwischen Straße und Insasse simulativ ausgewertet werden können [96, S. 14]. Anhand einer Wirkkettenanalyse kann somit quantifiziert werden, welchen Einfluss Komponenteneigenschaften auf das Fahrverhalten haben. Diese Kenntnis ermöglicht eine umfassende Formulierung von Lastenheften zur Verzielung von Bauteilen und unterstützt damit die funktionale Entwicklung von Fahrwerkskomponenten [32, S. 1142, 67, S. 25].

Um Teilschritte der Feinabstimmung durch simulationsbasierte Methoden zu ersetzen, werden hochgenaue Modelle benötigt. Die Abbildungsgüte muss hierfür über einfache Komponentenkenntnissen zur Grundauslegung des Fahrwerks hinausgehen. Insbesondere zur validen Fahrkomfortsimulation im zugehörigen höherfrequenten Betriebsbereich ist auch die Abbildung des dynamischen Übertragungsverhaltens notwendig, damit basierend auf simulativen Ergebnissen eine dem Realversuch entsprechende Komponentenauswahl erfolgen kann. Für die virtuelle Auslegung von Fahrwerkskomponenten in der Feinabstimmung ergeben sich zwei Optionen mit individuellen Vor- und Nachteilen. Soll dem Abstimmungsingenieur ein subjektiver Eindruck des Fahrverhaltens vermittelt werden, ist eine Verlagerung der Erprobungsumfänge an einen Fahr Simulator nötig [19, S. 1]. Neben der Echtzeitanforderung an das Gesamtfahrzeugmodell ist dabei eine realistische Bewegungsumsetzung im Arbeitsraum des Fahr Simulators sicherzustellen, um eine hohe Immersion und damit eine verlässliche Fahrverhaltensbeurteilung zu gewährleisten. Im Zuge der fortschreitenden Objektivierung von Fahrkomfortphänomenen bietet sich zudem die Offline-Simulation an, um die phänomenbeschreibenden Algorithmen auf simulierte Signale anzuwenden. Dies ermöglicht zwar eine umfassende und zeiteffiziente Einflussanalyse von Fahrwerkskomponenten mit Hilfe von Sensitivitätsstudien, ist jedoch durch die Aussagegüte der objektiven Gesamtfahrzeugziele limitiert.

## 1.2. Zielstellung und Eingrenzung

Aufbauend auf der dargelegten Motivation verfolgt diese Arbeit das Ziel, funktionale Modelle der Zusatzfeder und der konventionellen Wankstabilisierung zu entwickeln<sup>1</sup>. Die Komponentenmodelle sollen die Virtualisierung von Fahrzeugabstimm aufwänden bezüglich der Fahrdynamik und des Fahrkomforts im Frequenzbereich von 0-20 Hz ermöglichen<sup>2</sup>. Insbesondere die Komfortsimulation stellt dabei aufgrund der komplexen Wechselwirkung der Systemkomponenten im höherfrequenten Bereich eine Herausforderung für die Modellierung dar [224] und wird daher im Speziellen betrachtet. Um Abstimm schritte mit Hilfe simulationsbasierter Methoden durchzuführen, ist die virtuelle Abbildung einer Komponentenabstufung innerhalb des Abstimm baukastens<sup>3</sup> nötig. Basierend auf Zielwerten aus der Grundauslegung können damit Hardwarelösungen gefunden werden, was auch als „Induktion“ bzw. „Top-Down“-Methode der

---

<sup>1</sup>Der Modellierungsbedarf dieser Komponenten ergibt sich aus der Darstellung des Stands der Technik, siehe Kapitel 2.

<sup>2</sup>Dies entspricht dem Frequenzbereich der fühlbaren Schwingungen, siehe Kapitel 1.4.

<sup>3</sup>Ein Baukasten umfasst in diesem Zusammenhang Komponenten, die in verschiedenen Fahrzeugvarianten eingesetzt werden [32, S. 155 f.].

Modellierung bezeichnet wird. Um diese Lösungsmöglichkeiten anhand virtualisierter Komponentenbaukästen darzustellen, ist ein „Bottom-Up“-Ansatz nötig, welcher auch „Deduktion“ genannt wird und nach [4, S. 27] in Kombination mit der Induktion für Modellierungsumfänge im Fahrwerksbereich empfohlen wird. Die Untersuchungen in dieser Arbeit beschränken sich nicht auf eine Verzielungsebene zwischen der Komponente und einer übergeordneten Baugruppe. Stattdessen soll untersucht werden, ob der Einfluss der Komponenten auf das Fahrverhalten simulativ abgebildet werden kann, um unter Verwendung virtueller Methoden belastbare Aussagen als Grundlage für eine Komponentenauswahl zu generieren. Mittels einer Wirkkettenanalyse können so funktional relevante Komponenteneigenschaften identifiziert werden. Dies bezeichnet in diesem Kontext die Quantifizierung des Einflusses von – zu definierenden – Komponenteneffekten bezüglich objektiver Gesamtfahrzeugziele. Die Dissertation adressiert die Fahrwerksgrundaulegung sowie die Virtualisierung von Abstimmufwänden in der späten Phase des PEP. Die Einsatzmöglichkeiten der Arbeit reichen somit von der Konzeptphase bis zur Serienentwicklungsphase [243, S. 8], wobei der konkrete Mehrwert im Folgenden kurz erläutert wird:

- Die **Konzeptphase** startet mit einem nach der Konzeptfestlegung vorliegenden Minimal-konzept des Fahrzeugs und dauert etwa 30 Monate [43, S. 8, 10, S. 10, 3, S. 12]. Diese Phase beinhaltet die Konstruktion sowie die Auslegung des Fahrwerks und erfolgt virtuell bzw. anhand simulationsbegleitender Versuche. Insbesondere die Fahrkomfort-eigenschaften werden in der Konzeptphase detailliert [174, S. 1284]. Die Virtualisierung von Fahrwerkskomponenten verbessert hierbei die Produktreife noch vor dem Aufbau erster Prototypen und verkürzt die Entwicklungszeit („Frontloading“).
- In der nachgelagerten **Serienentwicklungsphase** erfolgen die Abstimmung des Fahrwerks sowie die Absicherung. Eine große Rolle spielt dabei die Erprobung mit dem Gesamtfahrzeug und auf Prüfständen, während die Simulation zur Unterstützung der Versuche dient [43, S. 8, 67, S. 251]. Durch eine hohe Abbildungsgüte der verwendeten Modelle in dieser Phase können Abstimmungsumfänge an Fahrsimulatoren durchgeführt oder durch die Offline-Simulation ersetzt werden. Dies ermöglicht eine Prototypenreduktion und damit eine Kosteneinsparung für die Automobilhersteller.

Trotz der unterschiedlichen Komponenteneigenschaften der Zusatzfeder und der Wankstabilisierung folgt die Modellentwicklung einer generischen Methode. Zunächst werden die Betriebsbereiche der Komponenten im Realfahrzeug vermessen, wobei sowohl Fahrdynamik- als auch Fahrkomfortmanöver betrachtet werden. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse sowie einer komponentenspezifischen Voridentifikation wird ein Prüfstandsmessprogramm definiert, um für ein spezifisches Bauteil den zur funktionalen Modellierung nötigen Datensatz zu erzeugen. Das grundlegende Vorgehen besteht dabei aus einer umfassenden Systemcharakterisierung anhand synthetischer sowie realer Anregungssignale aus der Betriebsbereichsermittlung. Ausgehend von einer geeigneten Datenaufbereitung und der Analyse der Messdaten im Zeit- und Frequenzbereich erfolgt anschließend die Komponentenmodellierung, die sowohl Methoden der theoretischen als auch der experimentellen Modellbildung enthält. Die zu entwickelnden Modelle für die Zusatzfeder und die Wankstabilisierung weisen jeweils eine generische Struktur auf, welche die Darstellung einzelner Komponenten mit Hilfe der Modellparameter ermöglicht. Die Parametrierung wird anhand von Optimierungsproblemen, die den Modellierungsfehler

gegenüber der Komponentenmessung minimieren, umgesetzt. Basierend auf den Betriebsbereichen bei realen Fahrmanövern, die das zur Abstimmung der Fahreigenschaften relevante Komponentenverhalten anregen, werden die Modelle validiert. Abschließend werden die Vermessung einer Komponentenspreizung im Realfahrzeug sowie eine Nachsimulation auf der Gesamtfahrzeugebene durchgeführt.

Für die Komponentenmodelle werden folgende Ziele angestrebt:

- **Hohe Abbildungsgüte für relevante Betriebsbereiche der Fahrdynamik und des Fahrkomforts:** Um die Fahrwerksabstimmung mit Hilfe virtueller Methoden zu unterstützen, sind hochgenaue Modelle der abzustimmenden Komponenten nötig. Dafür müssen zunächst die Betriebsbereiche der Komponenten im Realversuch ermittelt werden, damit der Validierungsrahmen der zu entwickelnden Modelle abgesteckt ist. Die Modellierung muss Abstimmsschritte und Komponenteneigenschaften, die im Realversuch durch Abstimmungsingenieure aufgelöst werden können, abbilden. Zudem muss die Komponentenabstufung innerhalb eines Komponentenbaukastens dargestellt werden können, der für die Fahrverhaltensabstimmung verwendet wird.
- **Recheneffizienz:** Die zu entwickelnden Komponentenmodelle sollen im Verbund mit dem Restfahrzeugmodell sowohl für den Einsatz in Fahr simulatoren als auch in einer Offline-Simulation verwendet werden können. Für beide Anwendungsfälle ist der Berechnungsaufwand der Modelle gering zu halten. Für den Einsatz im Fahr simulator gilt die strikte Echtzeitanforderung, falls der Insasse in eine Closed-Loop-Interaktion mit der Umgebung eingebunden ist. Auch in der Offline-Simulation soll der Rechenaufwand begrenzt sein, sodass weiterführende Sensitivitätsstudien und Optimierungen effizient durchgeführt werden können.
- **Wirtschaftliches Messprogramm:** Um die Zeitreihen zur Bedatung der Modelle für ein spezifisches Bauteil zu generieren, ist ein möglichst geringer Aufwand an Komponentenmessungen anzustreben. Damit soll die Wirtschaftlichkeit der zu entwickelnden Methoden bei der Virtualisierung einer Vielzahl von Komponenten adressiert werden.
- **Effizienter und robuster Parametrierungsalgorithmus:** Um die Modelle mittels der erzeugten Messdaten zu parametrieren, ist ein automatisierter Algorithmus zu entwickeln. Dieser soll die Parameter der standardisierten Modellstruktur zur Darstellung eines spezifischen Bauteils robust bestimmen, um die Methoden effizient in den Entwicklungsprozess eingliedern zu können. Der Parametrierprozess wird dabei als Optimierungsproblem verstanden. Eine hohe Robustheit kann durch eine gezielte Voridentifikation einzelner Modellteile zur Bestimmung geeigneter Startlösungen für einen Optimierungsalgorithmus angestrebt werden.

Der Umfang dieser Arbeit wird an folgenden Stellen eingeschränkt:

- Das Stabilisatormodell bezieht sich auf das in Kapitel 4 beschriebene Subsystem der passiven Wankstabilisierung. Das Zusatzfedermodell in Kapitel 5 wird für Druckanschläge aus Polyurethan entwickelt. Deutlich kürzer bauende Anschlagpuffer werden nicht betrachtet. Die Vermessung der Komponenten erfolgt bei Raumtemperatur. Eine Temperaturabhängigkeit wird in den Modellen nicht abgebildet.

- Die Manöver zur Betriebsbereichsableitung und Validierung der Modelle beschränken sich auf den Normalfahrbereich einer Abstimmung des funktionalen Fahrverhaltens. Missbrauchsmanöver sowie der fahrdynamische Grenzbereich werden nicht betrachtet, da hierfür häufig die Abbildungsgüte von Fahrzeugmodellen nicht ausreicht [4, S. 53] und außerdem die Objektivierung hochdynamischer, fahrerinduzierter Manöver in der Literatur nicht vollständig erarbeitet ist [3, S. 23].
- Die Abstimmbarkeit des Fahrverhaltens durch die simulative Abbildung einer Komponentenabstufung wird ausschließlich mittels objektiver Gesamtfahrzeugkennwerte untersucht. Dabei wird auf Erkenntnisse aus der Literatur zurückgegriffen. Da eine umfassende Objektivierung des Fahrverhaltens nicht möglich ist [96, S. 13], beschränkt sich die Aussagekraft auf der Gesamtfahrzeugebene lediglich auf die untersuchten Teilphänomene der Vertikaldynamik. Die vorgelagerte Validierung auf der Komponentenebene erfolgt prüfstandsseitig mit Hilfe einer umfangreichen Datengrundlage, bestehend aus abstimmrelevanten Fahrdynamik- und Fahrkomfortmanövern.
- Für die Komponentenmodelle wird ein umfassender Gültigkeitsbereich anhand generischer Messmethoden sichergestellt. Jedoch beschränken sich die Untersuchungen auf der Gesamtfahrzeugebene auf eine Fahrzeugstützstelle, gegeben durch ein Oberklasse-SUV mit Stahlfederung. Die Verstelldämpfer dieses Versuchsträgers sind konstant bestromt, sodass die Sensitivitäten der Komponenten bezüglich des Fahrverhaltens sowohl im Realfahrversuch als auch in der Simulation lediglich für diese Fahrzeugkonfiguration gelten. Die grundsätzliche Übertragbarkeit der zu entwickelnden Methoden auf andere Achskonzepte ist dennoch zu erwarten, da die Komponenten Zusatzfeder und Wankstabilisierung eine achskonzeptunabhängige Funktionsweise besitzen. Hingegen ist dies bei der Komponente Dämpfer nicht zu erwarten, da dieser bei radführenden Federbeinen hohe Querkräfte aufnimmt, weshalb funktionale Dämpfereigenschaften achskonzeptabhängig sind.

### 1.3. Strukturierung der Arbeit

Der Inhalt der einzelnen Kapitel stellt sich folgendermaßen dar:

---

#### Kapitel 2 Stand der Technik

Der Stand der Technik wird anhand der nötigen Teilaspekte zur Ableitung der Forschungsfragen aufgearbeitet. Zunächst werden die Rahmenbedingungen und Herausforderungen der funktionalen Gestaltung von Fahrdynamik- und Fahrkomfoteigenschaften im realen Fahrversuch erläutert. Der Fortschritt in Bezug auf die Objektivierung der fahrbahninduzierten Vertikaldynamik motiviert anschließend die virtuelle Abstimmung von Fahrwerkskomponenten in einer Offline-Simulation. Ausgehend vom Stand der Technik werden abschließend die Forschungsfragen formuliert.

### **Kapitel 3 Methodik und Werkzeuge**

In diesem Kapitel werden die in den nachfolgenden Kapiteln verwendeten Methoden erläutert. Dies erfolgt mittels einer abstrahierten Aufbereitung, wobei die für das Verständnis nötigen wissenschaftlichen Grundlagen angegeben werden. Die entwickelten Methoden umfassen die Bereiche Datenaufbereitung und Systemidentifikation. Außerdem wird die Theorie zum fahrbahninduzierten Vertikalkomfort erläutert sowie das Vorgehen bei der Auswertung der Betriebsbereichsmessungen aufgezeigt. Das Methodenkapitel dient der Entwicklung der Werkzeuge, um die anwendungsspezifische Beantwortung der Forschungsfragen in den folgenden Kapiteln zu ermöglichen.

---

### **Kapitel 4 Virtualisierung der Wankstabilisierung**

Zur Modellierung der Wankstabilisierung werden zunächst die Messmethodik und die Voridentifikation des Übertragungsverhaltens erläutert. Die Auswertung der Prüfstandsmessungen sowie die Entwicklung und Parametrierung des Modells erfolgen anschließend überwiegend im Frequenzbereich anhand von Einmassenschwingern, deren Entkoppelbarkeit mit Hilfe der Kohärenzfunktion nachgewiesen wird.

---

### **Kapitel 5 Virtualisierung der Zusatzfeder**

Zur Modellierung der Zusatzfeder wird zunächst die Entwicklung eines generischen Messprogramms erläutert. Auf Basis der Ergebnisse der Komponentenmessung werden die virtuell abzubildenden Eigenschaften der Zusatzfeder dargelegt. Anschließend erfolgen die Modellierung dieses Verhaltens sowie die Entwicklung eines Bedatungsprozesses. Der Nachweis der Modellgüte wird schließlich durch einen Vergleich mit realen Anregungsprofilen erbracht.

---

### **Kapitel 6 Messung und Simulation einer Komponentenvariation im Gesamtfahrzeug**

Abschließend wird der Komponenteneinfluss auf der Gesamtfahrzeugebene mit Hilfe objektiver Kennwerte untersucht. Dafür werden zunächst Realfahrzeugmessungen mit einer Komponentenvariation durchgeführt. Anschließend wird die Wiederholgenauigkeit dieser Aufzeichnungen anhand eines entwickelten Algorithmus im Zeitbereich bewertet. Dies ermöglicht die Ermittlung repräsentativer Messungen einer Fahrzeugkonfiguration. Die dadurch gegebenen Stützstellen der verschiedenen Fahrzeugaufbaustände werden im Anschluss mit Gesamtfahrzeugsimulationen verglichen.

## 1.4. Begriffsdefinitionen

Dieses Kapitel dient dem Verständnis der grundlegenden Fachtermini, die in dieser Arbeit verwendet werden. Kontextspezifische Fachbegriffe werden in den entsprechenden Kapiteln separat erläutert.

**Fahrzeug-Koordinatensystem:** Zur Beschreibung der Fahrzeugbewegungen wird das in Abbildung 1.1 gezeigte Koordinatensystem nach DIN 8855 [82] verwendet<sup>4</sup>. Ausgehend vom Ursprung im Fahrzeugschwerpunkt weist die x-Achse in Fahrtrichtung nach vorne, die y-Achse nach links und die z-Achse nach oben [67, S. 29].

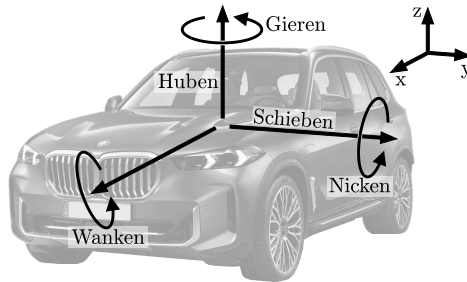


Abbildung 1.1.: Fahrzeugkoordinatensystem nach DIN 8855, © BMW Group

**Vertikaldynamik:** Gemäß der Abbildung 1.1 sind die primären Freiheitsgrade der Vertikaldynamik als die translatorische Bewegung entlang der z-Achse (*Huben*) sowie jeweils die rotatorischen Bewegungen um die y-Achse (*Nicken*) und die x-Achse (*Wanken*) gegeben [32, S. 635]. Grundsätzlich zeichnet sich eine gute vertikaldynamische Abstimmung dadurch aus, dass diese Freiheitsgrade bei fahrer- und fahrbahninduzierten Manövern relativ zur Fahrbahnoberfläche begrenzt bleiben [32, S. 639]. Außerdem sollen die Vertikallastschwankungen an den vier Rädern zur Gewährleistung der Fahrsicherheit gering sein [67, S. 52].

**Subsystem:** Dieser Begriff wird in der Arbeit für den zu modellierenden Freischnitt der Wankstabilisierung verwendet und umfasst die Komponenten Torsionsstab, Elastomerlager und Haltebügel, die zur aufbauseitigen Montage des Stabilisators dienen.

**Funktionale Komponenteneigenschaften:** Komponenteneigenschaften mit einer funktionalen Auswirkung auf das Fahrverhalten hinsichtlich der abzustimmenden Fahrdynamik- und Fahrkomfortziele werden als „funktionale Komponenteneigenschaften“ bezeichnet. Im Kontext dieser Arbeit umfasst dies statische und dynamische Effekte im Frequenzbereich von 0–20 Hz. Die Kenntnis funktionaler Komponenteneigenschaften ist für die Automobilhersteller zur vollumfänglichen Verzielung der Fahrwerkskomponenten in Lastenheften nötig, um die angestrebten Gesamtfahrzeugziele sicherzustellen.

<sup>4</sup>Ein weiteres Fahrzeug-Koordinatensystem ist das nach [233], bei dem die y-Achse und die z-Achse im Vergleich zur DIN 8855 um 180° gedreht sind [4, S. 91].

**Komfort:** Der Begriff „Komfort“ wird im heutigen Sprachgebrauch mit „Behaglichkeit“, „Bequemlichkeit“ und „Zufriedenheit“ verbunden [136, S. 1]. Das Komfortempfinden wird hauptsächlich durch die Sinnesorgane Auge und Ohr bestimmt, aber auch das Vestibularorgan, die Mechanorezeptoren und die Thermorezeptoren spielen eine Rolle [136, S. 6]. Bei der Untersuchung des menschlichen Komfortempfindens stellen streuende Versuchsergebnisse aufgrund unterschiedlich ausgeprägter Faktoren wie körperliche Verfassung, aktuelle Stimmungslage, Grad der Empfindlichkeit, Gewohnheiten, Einstellungen und Erwartungen eine Herausforderung dar [136, S. 1].

In Bezug auf den Sitzkomfort formulierte Herzberg im Jahr 1958 eine einfache Definition, welche „Komfort“ auf die Abwesenheit von „Diskomfort“ zurückführt [100]. Letzterer wird wiederum mit dem Begriff „Erleiden“ verbunden und hängt vor allem mit physiologischen und biomechanischen Faktoren zusammen. Die Untersuchungen von Zhang et al. [255] und Slater [209] widerlegen diese Theorie und zeigen anhand einer Clusteranalyse, dass Komfort und Diskomfort keine Antonyme sind, sondern eigene Dimensionen besitzen und daher unabhängig voneinander auftreten können. Als Beispiel einer starken Ausprägung beider Merkmale führt [136, S. 6] die Fahrt in einem Sportwagen an, die sowohl durch einen hohen Diskomfort aufgrund des harten Fahrwerks und des geräuschintensiven Motors geprägt sein kann als auch durch einen hohen Komfort, bedingt durch die Ästhetik des Fahrzeugs. Nach Bubb et al. ermöglichen die Methoden der Psychophysik ausschließlich die Untersuchung des Diskomforts, auf den sich auch die Theorie der sogenannten „Komfortpyramide“ (Abbildung 1.2) bezieht [39, S. 148]. Diese bietet eine hierarchische Anordnung von Einzelempfindungen des Diskomforts. Gemäß dieser Theorie müssen Bedürfnisse der unteren Pyramidenebenen befriedigt sein, damit höher gelegene Empfindungen als komfortmindernd für den Gesamteindruck wahrgenommen werden können [132]. Beispielsweise wird die Lärmbelastung lediglich dann als komfortmindernd wahrgenommen, wenn die Bedürfnisse hinsichtlich des Geruchs, des Lichts und der Schwingungen erfüllt sind.

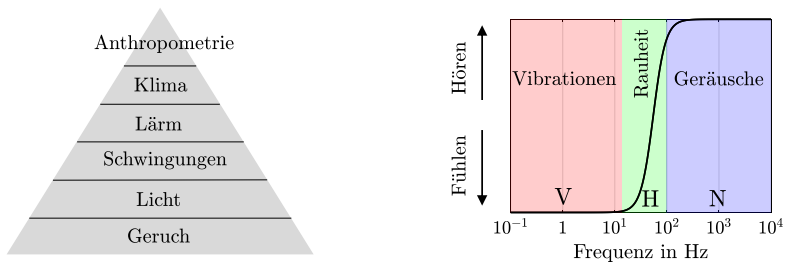


Abbildung 1.2.: Komfortpyramide nach Bubb et al. [39, S. 148] (links) und Zusammenhang zwischen Schwingungsfrequenz und Wahrnehmung als Vibration, Rauheit und Geräusch (rechts, angelehnt an [67, S. 210] und [76, S. 4])

Bezüglich seiner Bedeutung als Produktentwicklungsziel lässt sich der Fahrkomfort insbesondere mit Hilfe der Schwingungsphänomene eines Fahrzeugs gestalten [253, S. 91], die als Vibrationen und Geräusche auf die Insassen einwirken [67, S. 208]. Die dominante Schwingungsanregung erfolgt dabei durch die Straßenebenheit und wird durch den Reifen-Fahrbahn-Kontakt an

das Schwingungssystem Fahrzeug weitergeleitet [129, S. 205, 67, S. 210, 250, S. 431]. Zur frequenzspezifischen Aufteilung hat sich in der Fahrwerksentwicklung der Begriff „NVH“ aus dem Englischen verbreitet, der die Bereiche „Noise“ (Geräusche), „Vibration“ (fühlbare Schwingungen) und „Harshness“ (Rauheit/Übergangsbereich) unterscheidet. Abbildung 1.2 zeigt die frequenzabhängige Wahrnehmung der drei Phänomene. Der in dieser Arbeit zu untersuchende Bereich der Vibrationen ist demnach durch fühlbare Schwingungen bis etwa 20 Hz gekennzeichnet. Zur weiteren Aufteilung dieses Bereichs dient die Unterscheidung zwischen dem „Primary Ride“ und dem „Secondary Ride“<sup>5</sup>. Der Primary Ride enthält Aufbauswingungen wie Huben, Nicken und Wanken bis 5 Hz, wohingegen der Secondary Ride das darüberliegende Frequenzband bis 25 Hz beschreibt, dem unter anderem Schwingungen der ungefederten Massen und der Abrollkomfort zugeordnet werden [15]. Die frequenzspezifische Unterscheidung ist dabei in der Literatur nicht einheitlich. So wird beispielsweise der Übergangsbereich zwischen dem Primary Ride und dem Secondary Ride mit 3–6 Hz angegeben [3, S. 8].

Tabelle 1.1 zeigt die Wahrnehmung der Begriffe „Ride“ und „Handling“ in Abhängigkeit von der beurteilten Fahrzeugreaktion nach Botev [30, S. 5]. Demnach umfasst der Begriff Ride alle fahrbahninduzierten Reaktionen der Geradeausfahrt, also Huben, Wanken und Nicken. Handling umfasst fahrerinduzierte Lenkvorgänge, die anhand der Fahrzeugquerbewegung sowie der Wank- und Gierreaktion beurteilt werden.

Anregungsquelle	Bewegungsrichtung					
	längs	quer	vertikal	Wanken	Nicken	Gieren
Straße			Ride	Ride	Ride	
Fahrer		Handling		Handling		Handling

Tabelle 1.1.: Unterscheidung der Begriffe Ride und Handling nach [30, S. 5]

Hinsichtlich des Diskomforts sind insbesondere Schwingungen im Frequenzbereich von 5-10 Hz zu vermeiden. Da in diesem Bereich unter anderem die Resonanzfrequenz des Magens liegt, empfindet der Mensch diese Schwingungen als besonders unangenehm [32, S. 111]. Dennoch ist je nach Fahrzeugpositionierung unter Umständen ein gewisses Maß an Diskomfort vorzusehen. Als Beispiel führen Heißing et al. das Fahrwerk eines Sportwagens an, das gezielt Fahrbahnunebenheiten an den Fahrer übertragen soll [96, S. 116]. Die Rückmeldung über die Beschaffenheit der Straße trägt hierbei zum vom Kunden gewünschten Fahrerlebnis bei, während eine zu starke Isolation einen „schwammigen Gesamteindruck“ [96, S. 116] erzeugt.

## 1.5. Standardisierungen

Zur Methodenentwicklung werden in der Arbeit zwei Standardisierungen verwendet:

**Viertelfahrzeugmodell:** Das im Jahr 1920 entworfene Viertelfahrzeug ermöglicht eine einfache Modellvorstellung zur Beschreibung der Vertikaldynamik und kann erste Zielkonflikte der Komponentenauslegung aufzeigen [15]. Zur Demonstration einiger in der Arbeit entwickelter

<sup>5</sup>In Analogie zur Unterscheidung zwischen Fahrkomfort und Fahrdynamik wird in der englischsprachigen Literatur der Begriff „Handling“ als Pendant zum „Ride“ verwendet. Handling bezeichnet nach Gillespie das Kurvenverhalten des Fahrzeugs als Reaktion auf fahrerinduzierte Lenkvorgänge [78, S. 195].

Methoden kommt für folgende Erläuterungen ein lineares, standardisiertes Viertelfahrzeugmodell zum Einsatz:

- Analytische Herleitung des grundlegenden Zielkonflikts bei der Fahrwerksauslegung im Frequenzbereich in Kapitel 3.2.1.2.
- Theoretische Betriebsbereichsermittlung der Fahrwerkskomponenten im Frequenzbereich in Kapitel 3.4.2.
- Entwicklung eines Bewertungsschemas zur Wiederholgenauigkeit von Realfahrzeugmessungen mittels einer abschnittweisen Synchronisation im Zeitbereich in Kapitel 6.2.1.

Zur Standardisierung wird ein Viertelfahrzeugmodell mit einem einheitlichen Parametersatz verwendet, der [67, S. 115] entnommen wird und in Anhang A.1 angegeben ist.

**Lineare Übertragungsfunktion:** Zur Demonstration verschiedener Methoden wie der Kohärenzfunktion in Kapitel 3.1.3.2 sowie zur Entwicklung eines Verfahrens zur Systemidentifikation wird in der Arbeit eine standardisierte, lineare Übertragungsfunktion verwendet. Um die Identifikationsgüte gezielt hinsichtlich des Einflusses von Resonanzen und Antiresonanzen des Amplitudengangs zu untersuchen, wird die Übertragungsfunktion durch Vorgabe der Nullstellen und Pole definiert. Das zugehörige Verfahren wird in Kapitel 3.2.1 erläutert. Die standardisierte Übertragungsfunktion wird in Anhang A.2 beschrieben.