



1. EINFÜHRUNG





1.1. MOTIVATION

Auch wenn der Entwicklungsgrad des Kraftfahrzeugs mittlerweile weit über das grundsätzliche "Bereitstellen von Mobilität" hinausgeht, erfordern die sich ändernden Randbedingungen in der Automobilentwicklung eine kontinuierliche Weiterentwicklung des Systems Fahrzeug sowie der zugehörigen Prozesse. Dafür sind beispielsweise die gestiegene Varianten- und Funktionenvielfalt, der anhaltende Konkurrenzdruck oder die erforderliche Absenkung von Entwicklungszeit und -kosten verantwortlich [HKK03, Rau03, SR08].

Um dies zu ermöglichen, ist unter anderem der Einsatz von "Frontloading" als Methode zur Verlagerung des Entwicklungsaufwands in frühe Prozessphasen erwünscht. Ein wichtiges Mittel für dessen Umsetzung stellt die Simulation dar, welche bereits zum Einsatz kommt, wenn noch keine realen Bauteile für das Entwicklungsfahrzeug vorliegen. Bei Definition des Prozesses mittels eines dreistufigen V-Modells, bestehend aus Gesamtfahrzeug, Subsystem und Komponente, findet die simulative Arbeit hierbei konventionell auf Komponentenebene statt. Jedoch zeigt die Verlagerung der simulativen Entwicklung auf die Subsystemebene¹ ebenfalls deutliche Vorteile, wie im Weiteren noch ausgeführt wird.

Da dies in der Fahrdynamik² bereits mit Hilfe von konzeptunabhängigen Ein- und Zweispurmodellen stattfindet, ist die damit verbundene Entwicklungskette derzeit präziser definiert als im Fahrkomfort. Für Letzteres existieren aktuell wiederum keine integralen Modelle zur konzeptunabhängigen Auslegung des Gesamtfahrzeugs. Damit verbunden ist ebenfalls ein geringeres Verständnis einzelner Effekte, da zwar mit der heutigen Rechenleistung komplexe Schwingungssysteme aufgebaut und zeiteffizient berechnet werden können [Rau03], jedoch für das Verständnis möglichst einfache Modelle benötigt werden [MW14]. Um auch hier die gleichen Vorteile in der Auslegung von Kraftfahrzeugen zu erhalten, ist die Definition einer strukturierten methodischen Prozesskette von wesentlicher Bedeutung. Die Komplexität der im Fahrkomfort verwendeten Kennwerte, Modelle und Parameter ist aufgrund der anspruchsvolleren Systemdynamik höher als in der Fahrdynamik.

1.2. ZIELSTELLUNG UND STRUKTUR DER ARBEIT

Aufbauend auf der Motivation wird als Ziel der vorliegenden Arbeit die Entwicklung einer Methodik zur Auslegung fahrkomfortrelevanter Gesamtfahrzeugkennwerte auf Basis von Subsystemeigenschaften definiert. Neben der Entwicklung eines geeigneten Modellansatzes zählen dazu ebenfalls die Definition einer Parametrierungsmethode und die Einordnung des Ansatzes im Entwicklungsprozess. An dieser Stelle sei erwähnt, dass hierbei nicht die Entwicklung eines präziseren Ansatzes zur Abbildung einzelner Fahrkomfortkennwerte gegenüber Komponentenmodellen, sondern vielmehr die Definition einer für die Prozessintegration optimalen Zwischenebene zwischen Gesamtfahrzeug und Komponente im Vordergrund steht.

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit wird anhand von Abbildung 1.1 beschrieben.

Ausgehend von der Motivation wird im zweiten Kapitel der Stand der Technik erläutert. Darin findet zunächst eine detaillierte Analyse des Entwicklungsprozesses, insbesondere hinsichtlich Fahrdynamik und Fahrkomfort statt. Aufbauend darauf werden die im Fahrkomfort eingesetzten Methoden zur objektiven Charakterisierung auf Gesamtfahrzeugebene analysiert und hinsichtlich der Zielstellung der Arbeit diskutiert. Als Grundlage für die spätere

¹ Als Subsystem wird in dem Zusammenhang sowohl ein schwingungsfähiges System innerhalb des Kraftfahrzeugs (z.B. Hilfsrahmenmasse und deren Lagerung) als auch die Lagerung zwischen zwei abstrakten Massekörpern verstanden (z.B. Fahrwerk). Da je nach Betriebspunkt Systeme als starr oder elastisch betrachtet werden können, ist eine eindeutige Abgrenzung nur unter Angabe der Randbedingungen möglich.

² Unter dem Begriff Fahrdynamik wird in diesem Kontext vorwiegend die Querdynamik, d.h. das Verhalten des Fahrzeugs bei Kurvenfahrt mit konstanter Geschwindigkeit, verstanden.

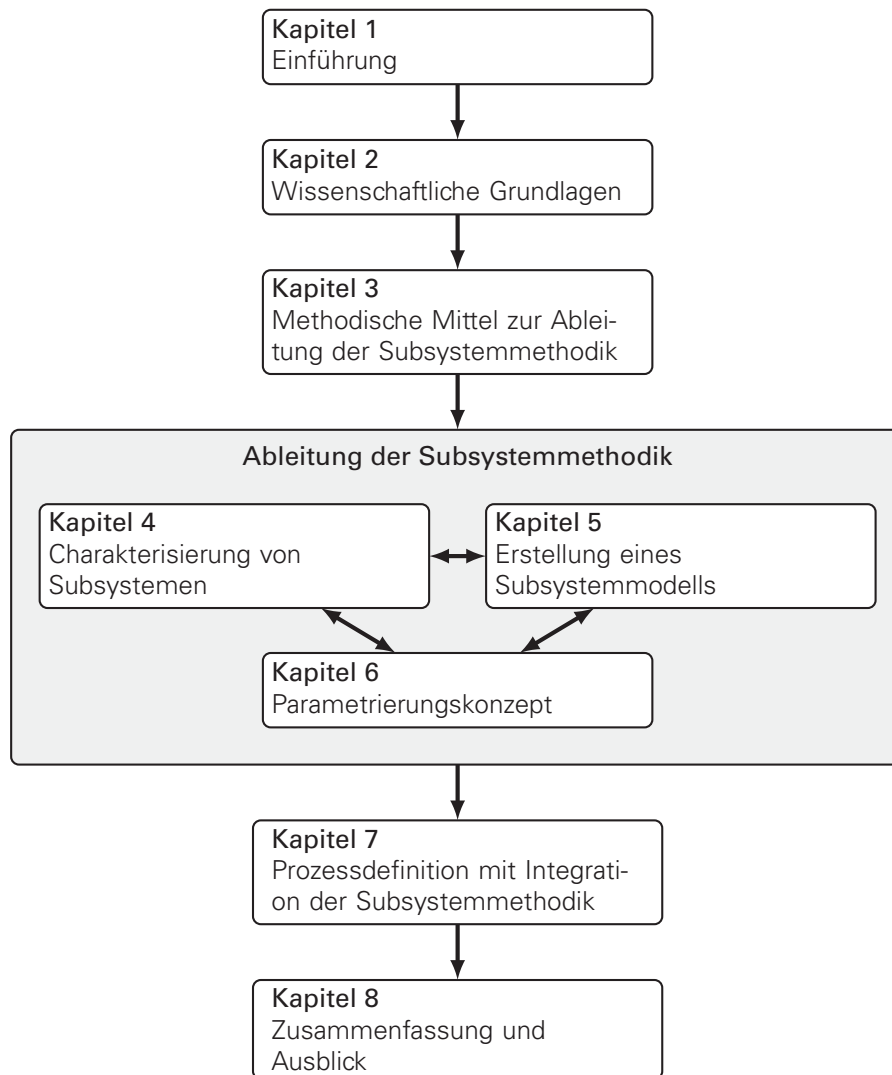


Abbildung 1.1.: Struktur der vorliegenden Arbeit

Modellierung wird weiterhin das Vorgehen zur Analyse und Modellierung mechanischer Systeme, insbesondere hinsichtlich des Aufbaus bereits eingesetzter einfacher Ersatzmodelle, erläutert. Unter deren Anwendung wurden die einzelnen Subsysteme des Kraftfahrzeugs bereits in der Vergangenheit modelliert. Die damit zusammenhängenden Kenntnisse über die Systemeigenschaften sowie abstrakte Ansätze zur Modellierung des Gesamtfahrzeugs bilden den Abschluss von Kapitel 2.

In Kapitel 3 werden die eingesetzten methodischen Mittel zur Erreichung der Zielstellung erläutert. Dazu zählen zunächst die verwendete Methode zur Identifikation dynamischer Systemeigenschaften sowie die in der Arbeit verwendete Versuchstechnik. Weiterhin steht in dem Kapitel das Vorgehen zur konzeptunabhängigen Analyse, Modifikation und Abstraktion von Systemen im Vordergrund. Diese wird beginnend mit dem folgenden Kapitel auf die einzelnen Subsysteme angewandt.

Die Analyse, Modellierung und Parametrierung der Subsysteme, welche die entwickelte Subsystemmethodik definieren, sind in der Betrachtungsweise miteinander gekoppelt, sodass Kapitel 4 bis 6 als parallel zu betrachten sind. Die Subsysteme, welche hierbei im Fokus liegen, sind Fahrwerk, Hilfsrahmen, Differenzial und Aggregat³.

³Unter Aggregat wird im Weiteren das Antriebsaggregat, d.h. der Motor des Kraftfahrzeugs verstanden.



Im vierten Kapitel wird zunächst die Relevanz der betrachteten Subsysteme im ausgewählten Frequenzbereich festgestellt. Als Voraussetzung für eine auf Verständnis basierende Modellierung werden anschließend die einzelnen Subsysteme hinsichtlich ihrer statischen und dynamischen Eigenschaften analysiert. Je nach Effekt ist dabei die Verwendung von Prüfständen oder die Simulation auf Komponentenebene zu bevorzugen. Neben der Subsystemmethode nach Kapitel 3 ist hierbei für das Verständnis und die Prozessdefinition auch die Verknüpfung zu Komponenteneigenschaften von Bedeutung.

Analog der Einteilung der Systeme nach Kapitel 4 werden in Kapitel 5 und 6 die Modellierung und Parametrierung eines Gesamtfahrzeugmodells auf Subsystemebene erläutert. In Kapitel 5 werden dazu zunächst Kriterien zur Auswahl geeigneter Subsystemparameter beschrieben. Da Aggregat, Hilfsrahmen und Differenzial gleichermaßen über eine elastische Lagerung verfügen, wird anschließend ein dafür gültiger allgemeiner nichtlinearer Abstraktionsansatz erläutert. Darauffolgend wird der Modellaufbau für die einzelnen Systeme beschrieben.

Die Parametrierung der Subsysteme wird in Kapitel 6 erläutert. Die damit verbundenen Prozeduren sind teilweise an Prüfständen durchzuführen, welche im Prozess derzeit noch nicht zur Verfügung stehen. In diesem Fall werden die zugehörigen Identifikationsverfahren auf simulativer Basis hergeleitet.

In Kapitel 7 wird die in den vorherigen Kapiteln hergeleitete Methodik in den Prozess eingegliedert. Dazu werden Ableitungsschritte von der Gesamtfahrzeug- über die Subsystemebene bis zur Komponentenebene benötigt. Um eine Ableitung zwischen den ersten beiden Ebenen zu ermöglichen, ist die Kenntnis des Einflusses von Subsystemparametern auf Gesamtfahrzeugkennwerte von entscheidender Bedeutung. Zunächst werden dazu die Abhängigkeiten für einzelne spezielle Parameter ausführlich dargelegt und anschließend die für ausgewählte Gesamtfahrzeugkennwerte wichtigsten Subsystemeigenschaften identifiziert. Daraufhin wird die Ableitung der neu definierten Subsystemparameter auf Komponentenebene erläutert. Das Vorgehen bildet die Voraussetzung für die zukünftige Definition eines detailliert strukturierten Auslegungsprozesses.

1.3. EINGRENZUNG DER AUFGABENSTELLUNG

Hinsichtlich der im vorherigen Kapitel definierten Zielstellung werden im Rahmen der Arbeit folgende Einschränkungen getroffen:

- Die obere Grenze des gültigen Frequenzbereichs des Modells wird auf 30 Hz festgelegt und orientiert sich an der oberen Frequenzgrenze des Secondary Ride (vgl. Unterabschnitt 2.2.1) [WMPZD14]. Es findet damit auch eine Beschränkung auf den mechanischen Fahrkomfort statt. Weiterhin ist zu beachten, dass sich Systeme mit Eigenfrequenzen über 30 Hz dennoch unterhalb dieses Grenzwertes auswirken können. Karosserieschwingungen werden in dem Zusammenhang nicht berücksichtigt.
- Eine subjektiv-objektiv Korrelation bzw. Objektivierung von Fahrkomforteigenschaften im Gesamtfahrzeug wird nicht durchgeführt. Dahingehend wird auf bestehenden Ansätzen aus der Literatur aufgebaut.
- Eine vollständige Definition eines durchgängigen strukturierten Auslegungsprozesses ist derzeit noch Gegenstand der Forschung in der Fahrdynamik und dessen Definition im Fahrkomfort geht über den Rahmen der vorliegenden Arbeit hinaus. Im Fokus steht die Entwicklung einer dafür geeigneten integrierbaren Subsystemmethodik.
- Der Fokus der Modellierung liegt auf Fahrwerk, Aggregat-, Hilfsrahmen- und Differenziallagerung. Die zusätzliche Entwicklung eines für die Subsystemmethodik geeigneten



Reifenmodells geht über den Rahmen dieser Arbeit hinaus, jedoch wird die korrekte Rückkopplung des Gesamtfahrzeugmodells zu einem derartigen Modell über eine modulare Reifenschnittstelle gewährleistet.

- Die Betrachtung erfolgt für passive Systeme, ist jedoch nicht darauf beschränkt. Aktive Systeme können unabhängig davon in das Modell integriert und auf Subsystemebene untersucht werden. Weiterhin finden Antriebsmomente aus dem Aggregat keine Berücksichtigung.

Die Eingrenzungen werden ebenfalls an den jeweils relevanten Stellen in den nachfolgenden Kapiteln noch einmal angeführt.

1.4. BEGRIFFSDEFINITIONEN

Im Folgenden werden die für diese Arbeit essenziellen Begriffe der Subsystem- und Komponentenebene definiert. Zur Definition der Subsystemebene wird zunächst der Begriff Subsystem näher erläutert:

Definition eines Subsystems:

Subsysteme fassen einzelne Komponenten eines Fahrzeugsystems sowohl strukturell als auch in ihrem mechanischen Verhalten zusammen. Das Präfix "Sub" verweist dabei auf eine der Gesamtfahrzeugebene untergeordnete Ebene.

Subsysteme fassen demnach bestimmte Komponenten eines Fahrzeugs in Gruppen zusammen. Wie bereits in Abschnitt 1.2 beschrieben, zählen dazu im Rahmen der vorliegenden Arbeit das Fahrwerk, der Hilfsrahmen, das Differenzial und das Aggregat. Die Subsystemebene wird im Weiteren wie folgt definiert:

Definition der Subsystemebene:

Die Subsystemebene beschreibt die Gesamtheit aller Eigenschaften der in einem Gesamtfahrzeug vorliegenden Subsysteme. Die Eigenschaften bzw. Parameter entsprechen verallgemeinerten abstrakten Kenngrößen und Kennlinien. Diese beschreiben das Subsystemverhalten als Black- oder Greybox, ohne dass detaillierte Informationen über dessen Aufbau aus Komponenten berücksichtigt werden.

Parameter, die das Systemverhalten auf Subsystemebene beschreiben, sind beispielsweise der Wankpol eines Gesamtfahrzeugs oder die zusammengefasste Vertikalsteifigkeit einer Achse.

Abschließend wird die Komponentenebene erläutert:

Definition der Komponentenebene:

Die Komponentenebene beschreibt die Gesamtheit aller Eigenschaften der in einem Gesamtfahrzeug bzw. Subsystem vorliegenden Komponenten. Sie ist dabei der Subsystemebene untergeordnet.

Parameter, die das Systemverhalten auf Komponentenebene beschreiben, sind beispielsweise die Steifigkeiten und Positionen von Elastomerlagern.



2. WISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN





Ausgehend von Kapitel 1 hat die vorliegende Arbeit das Ziel, die Schwingungseigenschaften des Gesamtfahrzeugs prozessorientiert auf Subsystemebene zu modellieren. Dazu soll sich zunächst mit dem automobilen Entwicklungsprozess, insbesondere hinsichtlich Fahrdynamik und Fahrkomfort, auseinandergesetzt werden. Darauf aufbauend wird anschließend Fahrkomfort auf Gesamtfahrzeugebene näher erläutert, indem grundsätzliche Schwingungsphänomene sowie deren Einteilung und zugehörige Bewertungsmethoden vorgestellt werden. Als Grundlage für das Verständnis der mechanischen Modellierung von Schwingungssystemen wird weiterhin auf mechanische Modellvorstellungen und dabei insbesondere auf Ansätze zur Modellierung von Reibungsmechanismen eingegangen. In der Vergangenheit wurden diese Modelle bereits eingesetzt, um einzelne Subsysteme des Fahrzeugs und deren Bestandteile darzustellen. Eine Literaturübersicht zu den in dieser Arbeit betrachteten Subsystemen ist in dem folgenden Abschnitt dargestellt. Abschließend werden bereits bestehende abstrakte Modellansätze zur Abbildung des Gesamtfahrzeugschwingungskomforts erläutert.

2.1. AUTOMOBILER ENTWICKLUNGSPROZESS

Die Entwicklung von Kraftfahrzeugen zeichnet sich durch hohe Komplexität aus, weshalb Prozessstrukturen erforderlich sind, welche den Ablauf in verschiedene Phasen und Teilschritte gliedern. Neben weiteren geläufigen Modellvorstellungen, wie dem Wasserfall- oder Spiralmodell [Boe88], hat sich in der Automobilindustrie vorwiegend das V-Modell durchgesetzt [KCGW05, FH06, ISO11, Ame13, EF13, MW13], vgl. Abbildung 2.1. Im Gegensatz zum Wasserfallmodell wird dabei dem abfallenden ersten Entwicklungsast ein zweiter aufsteigender Entwicklungsast hinzugefügt, sodass sich für jede Ebene eine spezifizierende und eine testende Phase gegenüberstehen. Innerhalb der verschiedenen Phasen können weitere Iterationen nach dem V-Modell durchgeführt werden. In der Automobilentwicklung werden die einzelnen Ebenen generell durch Gesamtfahrzeug, Subsystem und Komponente definiert. Die Übergänge zu weiteren Detaillierungen wie z.B. Sub-subsystemen sind fließend.

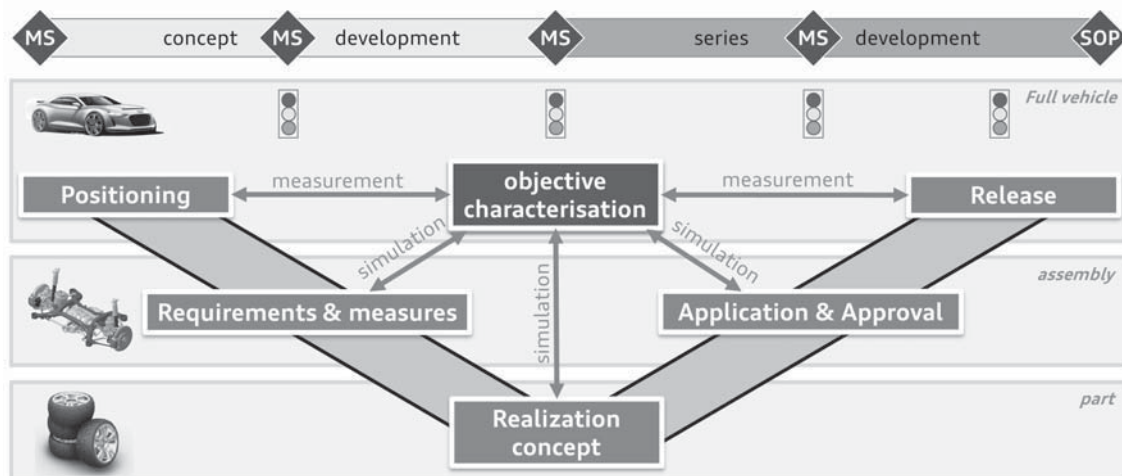


Abbildung 2.1.: Entwicklungsprozess nach EINSLE & FRITZSCHE, in Anlehnung an [EF13, S. 750].



Die Entwicklung erfolgt durch Ableitung von Eigenschaften auf den verschiedenen Modellebenen. Im ersten Teil der Entwicklung, welche dem linken Modell-Ast in der Abbildung entspricht, wird die Zielwertableitung⁴ bzw. Konzeptentwicklung durchgeführt [KRPS03, KMPJ03]. Im zweiten Teil findet die Absicherung bzw. Serienentwicklung statt. In beiden Zeitabschnitten sind verschiedene Meilensteine definiert, bei denen Produktentscheidungen getroffen werden [HKK03].

In der Phase der Zielwertableitung wird zunächst ein Benchmark zwischen Wettbewerberfahrzeugen durchgeführt, um das markeneigene Fahrzeug im Wettbewerbsumfeld zu positionieren [KHJ09]. Der Benchmark findet sowohl auf subjektiver (vgl. [LHG⁺99], [PGH03]) als auch objektiver Ebene (vgl. [ASL00, EF13]) statt, wobei die Methoden hinsichtlich Fahrkomfort in Abschnitt 2.2 noch einmal näher analysiert werden. Aufbauend auf den Erkenntnissen werden Zielwerte für das nachfolgende Fahrzeug definiert, welche als Vorlage für die Ableitung auf Subsystemebene und anschließend auf Komponentenebene dienen [KHJ09]. Dies findet unter Anwendung von Simulationsmodellen, Prototypenversuchen sowie Erfahrungswerten statt [PGH03]. In dem Zusammenhang werden auch kontinuierliche Abgleiche zwischen Simulation und Messung auf Hardware-in-the-Loop-Prüfständen⁵ durchgeführt, wodurch eine kooperative Entwicklung von virtueller und realer Entwicklung gegeben ist [Sch10, S. 8]. Der Detaillierungsgrad und die Komplexität der Parameter sowie der zugehörigen Simulationsmodelle nehmen dabei stetig zu. Die Entwicklung erfolgt vom Abstrakten zum Konkreten [Gen10, S. 205]. Als wichtiger Meilenstein am Ende der Konzeptentwicklung existiert der Konzeptentscheid⁶, wobei Subsystemkonzepte festgelegt und für die Übergabe an die Serienentwicklung vorbereitet werden. Die Phasenlänge der Konzeptentwicklung liegt bei etwa 30 Monaten. Der genaue Wert hängt vom Entwicklungsprozess des jeweiligen Herstellers ab. Die Zeiträume, um Ableitungen zwischen jeweils zwei Ebenen vorzunehmen, sind jedoch kürzer und können mit einer Länge von drei bis vier Monaten abgeschätzt werden.

Besonders in frühen Phasen der Entwicklung liegen lediglich wenige Parameter vor [BS11, S. 899], [vMKR13]. Bekannt sind einzelne Konzeptparameter wie beispielsweise Radstand, Spurweite oder Radlastverteilung [WSWZ15, S. 841], [BS11, S. 902]. Einige Parameter, wie die Fahrzeugmasse, welche direkt mit der Radlastverteilung zusammenhängen, unterliegen dabei einer größeren Änderungsrate (und damit Unsicherheit) im Laufe des Prozesses. Das Achskonzept ist zum Zeitpunkt der Ableitung von Gesamtfahrzeug- auf Subsystemebene unbekannt, außer es wird durch einen Baukasten (vgl. [MR00, SDWC07], [HEG13, S. 542]) vorgegeben. In diesem Fall ist es für die Produktpalette von Vorteil, wenn der Baukasten eine möglichst hohe Spreizung zulässt, um eine Differenzierung zwischen verschiedenen Modellderivaten zu ermöglichen. Die Entwicklung eines Baukastens kann wiederum durch ein separates V-Modell dargestellt werden.

Im Rahmen der Serienentwicklung bzw. Absicherung, welche durch den rechten Ast im V-Modell visualisiert ist, werden die einzelnen Bestandteile des Fahrzeugs sowohl virtuell als auch real zusammengesetzt, um einen Abgleich von Kennwerten zu ermöglichen. Dabei werden auf jeder Ebene die in der Ableitung definierten Kennwerte anhand der in der Absicherung ermittelten Werte validiert. Der Anteil an Prototypen nimmt in dieser Phase stetig zu, während die Simulation zunehmend zur Ableitung von Maßnahmen für die finale Abstimmung einzelner Systeme eingesetzt wird [HKK03, Rau03].

Der dargestellte Prozess lässt sich für verschiedene Subsysteme wie Fahrwerk, Reifen oder Antrieb, aber auch verschiedene Disziplinen wie Fahrdynamik oder Fahrkomfort definieren [HEG13, S. 16]. Um dabei neuen Anforderungen in der Automobilentwicklung gerecht zu werden (vgl. [Rau03, S. 135]), muss ein effizienter, kontinuierlicher Prozess innerhalb und zwi-

⁴engl.: target cascading

⁵kurz: HiL-Prüfständen

⁶kurz: KE



schen den Disziplinen formuliert werden. Um das zu erreichen, ist Frontloading (vgl. [HW13, S. 66-67], [vMKR13, S. 182-183]) erwünscht, wodurch aufwendige konstruktive Änderungen in späteren Entwicklungszeiten vermieden werden können [Gen10]. Dabei kommt dem Einsatz von Simulationsmodellen in frühen Entwicklungsphasen vermehrte Bedeutung zu, da Hardware nur unvollständig in Form von Technikträgern zur Verfügung steht [HKK03]. Wie bereits angemerkt, sind zu diesem Zeitpunkt auch nur wenige Fahrzeugparameter bekannt, sodass in dem Fall abstraktere Simulationsmodelle zu bevorzugen sind [vMKR13].

2.1.1. ENTWICKLUNGSPROZESS DER FAHRDYNAMIK

Bei Betrachtung des Entwicklungsprozesses der Fahrdynamik wird deutlich, dass für diesen bereits eine definierte Prozesskette zur Ableitung von Fahrzeugeigenschaften auf den verschiedenen Modellebenen besteht. Beginnend auf Gesamtfahrzeugebene existiert eine Vielzahl von objektiven Auslegungsgrößen und Normen, welche das Fahrzeugverhalten auf objektiver Ebene beschreiben [HB02, Dec09, Sch10]. Als Beispiele seien dabei der Lenkwinkelgradient oder die Giereigenfrequenz genannt. Auf Basis dieser objektiven Kenngrößen lassen sich nun unter Einsatz von parametrischen nichtlinearen Ein- und Zweispurmodellen (vgl. [DSH⁺06], [HUH⁺08], [Sch10, S. 25], [SHB10], [HEG13, S. 96-106], [Ada14, S. 116]) die Subsystemparameter für Fahrwerk und Reifen ableiten. Ein typisches Zweispurmodell ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

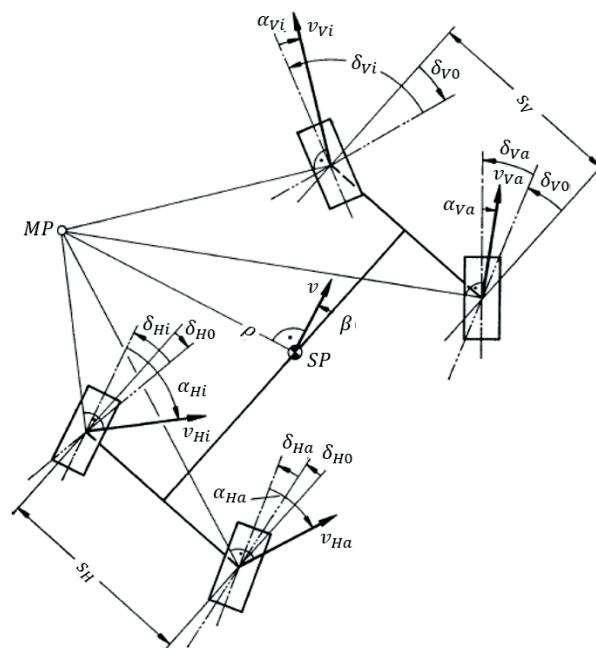


Abbildung 2.2.: Zweispurmodell, in Anlehnung an [MW14, S. 834]

Die Subsystemparameter werden hierbei vorwiegend durch Kennlinien oder Kenngrößen abgebildet, anstatt durch konkrete Komponenteneigenschaften. Demnach werden die Subsysteme im Sinne von Greybox-Modellen betrachtet, sodass beispielsweise das Subsystem Fahrwerk konzeptunabhängig ist. Als charakteristische Beispiele für verwendete Kennwerte können die Rollzentrumshöhe oder die Vorspurnachgiebigkeit der Achse angeführt werden ([KCGW05, S. 93] [Jaz14, S. 513]), welche explizit oder implizit im Modellansatz integriert sind.



Für den dargestellten Modellierungsansatz können in Analogie zu [APK18] einige Vorteile hinsichtlich der Anwendung im Prozess definiert werden:

- **Konzeptunabhängigkeit**

Durch die Greybox-Modellierung und dem daraus resultierenden reduzierten Parametersatz lassen sich besonders in frühen Entwicklungsphasen Simulationen ohne Kenntnis von Bauteileigenschaften durchführen.

- **Simulationsgeschwindigkeit**

Aufgrund des reduzierten Parametersatzes steigt die Simulationsgeschwindigkeit gegenüber konventionellen Komponentenmodellen, sodass schnell Maßnahmen abgeleitet werden können [KCGW05, S. 93]. Insbesondere bei sich regelmäßig ändernden Parametern, wie der in Abschnitt 2.1 angeführten Fahrzeugmasse bzw. Radlastverteilung, ist eine schnelle Abschätzung der fahrdynamischen Auswirkungen von Vorteil.

- **Physikalische Wirkkettenanalyse**

Durch die übersichtliche Modellierung können physikalische Effekte gezielter analysiert und verstanden werden.

- **Schnelle Parametrierung**

Anstatt verschiedene Komponenten einzeln zu vermessen, werden die Subsystemeigenschaften auf entsprechenden Subsystem- oder Gesamtfahrzeugprüfständen identifiziert. Beispielsweise sind dazu Kinematics and Compliance Prüfstände⁷ (vgl. auch Unterabschnitt 3.2.2) geeignet.

- **Geringerer Fehler in der Parametrierung**

Der Gesamtfehler der Messungen auf der übergeordneten Parametrierungsebene ist i.d.R. geringer als der kumulierte Fehler einzelner Komponentenmessungen, wodurch die Qualität der Simulationsergebnisse positiv beeinflusst wird.

- **Möglichkeit der Parametrierung und Analyse von Wettbewerberfahrzeugen**

Während die Parametrierung von Wettbewerberfahrzeugen durch Vermessung einzelner Bauteile im Zeitrahmen des Prozesses ausgeschlossen ist, wird eine schnelle Parametrierung mit Hilfe von Gesamtfahrzeugmessungen dennoch ermöglicht. Dies lässt einen Benchmark auf Subsystemebene zwischen Wettbewerberfahrzeugen zu [Mor04].

- **Bedeutung von Parametern**

Da sich die Parameter auf eine minimale (für die Anwendung relevante) Anzahl reduzieren, nimmt die Bedeutung der Parameter für das Gesamtfahrzeugverhalten zu. Dadurch wird eine Optimierung von Bauteilparametern, welche nur einen geringeren Einfluss haben, unwahrscheinlicher.

Nach Definition der Subsystemparameter mit Hilfe von Ein- und Zweispurmodellen werden diese dem Komponentenentwickler übergeben, welcher mit Hilfe von geeigneten Teilsystem- und Gesamtfahrzeugmodellen auf Komponentenebene die Zusammensetzung der Eigenschaften analysiert und auslegt [KHJ09].

⁷kurz: K&C-Prüfstände



2.1.2. ENTWICKLUNGSPROZESS DES FAHRKOMFORTS

Hinsichtlich der Zielwertableitung im Fahrkomfort kann zunächst von einem ähnlichen Prozess wie in der Fahrdynamik ausgegangen werden. Im Gegensatz dazu sind im Fahrkomfort einige Methoden jedoch noch nicht eindeutig definiert. Das kann vorwiegend damit begründet werden, dass die physikalischen Prozesse deutlich komplexer sind, noch nicht so klare objektive Gesamtfahrzeugkennwerte wie in der Fahrdynamik existieren (vgl. auch [Rau03, S. 153-154]), aber auch geschlossene parametrische Subsystemmodelle nicht vorhanden sind. Zur simulativen Auslegung von Kraftfahrzeugen wird im Fahrkomfort vorwiegend Mehrkörpersimulation⁸ eingesetzt [PH02, S. 443], [Ame13, S. 21]. In der Literatur finden sich entsprechend auch eine Vielzahl von Beispielen zur Analyse und Auslegung von Kraftfahrzeugen mit Hilfe von MKS-Komponentenmodellen [KR02, MGM02, TGU04, KCGW05, RRS05, SEM08, BK09, BHA⁺09, Fro09, SHB10, KMFY12, HEG13, Sch13, SAKZ14, JW15]. Bei Einsatz dieser Modelle im Prozess muss die Ableitung demnach direkt von Gesamtfahrzeug- auf Komponentenebene erfolgen. In Analogie zu [APK18] ergeben sich dabei jedoch Nachteile:

- **Verfügbarkeit und Status des Vorgängerfahrzeugs**

Für ein Fahrzeugprojekt muss nicht zwangsläufig ein Vorgänger existieren, sodass dieser nicht als Entwicklungsbasis verwendet werden kann. In dem Fall kann beispielsweise kein Achskonzept vorausgesetzt werden, welches für die Simulation auf Komponentenebene jedoch bekannt sein muss. Auch wenn ein Vorgängerfahrzeug vorhanden ist, kann dennoch ein anderes Konzept für den Nachfolger geeigneter sein. Weiterhin muss der Parametrierungsstatus des Vorgängersimulationsmodells nicht dem des realen Fahrzeuges entsprechen, da Änderungen in späten Phasen des Entwicklungsprozesses nicht immer in Simulationsmodelle übertragen werden.

- **Verfügbarkeit von Komponentenparametern**

Komponentenparameter sind in frühen Entwicklungsphasen zu großen Teilen unbekannt, sodass eine Fahrkomfortsimulation ohne weitere Annahmen nicht möglich ist. Da derzeit ebenfalls kein Prozess zur schnellen Parametrierung von Komponenten im Gesamtfahrzeug vorliegt, ist die simulative Arbeit in der Regel nur mit einem Vorgängermodell möglich, wodurch wiederum die oben genannten Nachteile bestehen.

- **Entwicklung mittels "Trial and Error"**

In komplexen MKS-Modellen können geänderte Komponentenparameter die Eigenschaften auf Subsystem- oder Gesamtfahrzeugebene mehrdimensional beeinflussen, sodass die Auswirkungen einer einzelnen Änderung nicht immer direkt interpretierbar ist. Der Ableitungsprozess basiert daher häufig auf dem "Trial and Error"-Ansatz [HEG13, S. 511].

- **Zuverlässigkeit von Daten und begrenzte Zeit für Maßnahmenableitung**

Komplexe MKS-Modelle können bis zu mehrere Stunden Rechenzeit für wenige Sekunden Simulationszeit benötigen [Rau03]. Unter Berücksichtigung kurzer Zeiträume für die Maßnahmenableitung ist das von Nachteil. Besonders bei Parametern, welche sich oft ändern (vgl. Abschnitt 2.1), besteht die Forderung, dass die Auswirkungen auf Gesamtfahrzeugebene schnell abgeschätzt werden können.

Da geeignete Subsystemmodelle zum Ausgleich der genannten Nachteile fehlen, wird die Zielwertableitung erschwert. Stattdessen kommen oft überdimensionierte MKS-Modelle zum Einsatz [vMKR13], welche jedoch nicht für alle Phasen des Entwicklungsprozesses geeignet sind.

⁸kurz: MKS

2.2. FAHRKOMFORT AUF GESAMTFAHRZEUGEBOENE

Da der objektive Charakter des Fahrkomforts eine zentrale Bedeutung in dieser Arbeit einnimmt, sollen die Kette von der Subjektivempfindung zu Methoden der objektiven Bestimmung und Bewertung von Fahrkomforteigenschaften näher betrachtet und die Zielvorstellung auf Gesamtfahrzeugebene präzisiert werden.

Während bereits in den 1950er Jahren Komfort als die Abwesenheit von Diskomfort definiert wurde, haben ZHANG et al. Komfort und Diskomfort als unabhängige Größen identifiziert, welche getrennt behandelt werden müssen [ZHD96]. Diskomfort hat dabei seine Ursache in physiologisch, biomechanischen Faktoren, während Komfort abhängig von ästhetischen Gesichtspunkten ist. Infolge dessen, dass Komfort damit durch persönliche Bedürfnisse geprägt ist, kann dieser nicht objektiviert werden [Kna10]. Die im Weiteren betrachtete Entwicklungsgröße Fahrkomfort bezieht sich daher auf ein geringeres Diskomfortlevel.

In dem Sinne wird Fahrkomfort auch häufig als die Gesamtheit aller auf die Insassen einwirkenden mechanischen und akustischen Schwingungen definiert [HB02]. Demnach haben auch viele Methoden zur Einteilung und Bewertung des Fahrkomforts das Ziel, Schwingungen und damit Krafteinwirkungen auf den Fahrer zu minimieren. Dabei gibt es eine Vielzahl von Faktoren, welche bestimmen, wie der Mensch Schwingungen empfindet. Neben Amplitude, Richtung, Dauer, Art und Einleitungsort der Schwingung wird häufig auch die Frequenzabhängigkeit als wichtige Einflussgröße angeführt [Gil92, LHG⁺99, Gri07, LAC⁺08]. Demnach ist die Definition des Fahrkomforts im Frequenzbereich von entscheidender Bedeutung.

2.2.1. DEFINITION CHARAKTERISTISCHER SCHWINGUNGSPHÄNOMENE

Die Einordnung des Fahrkomforts im Frequenzbereich wird in der Literatur unterschiedlich vorgenommen. Dabei werden beispielsweise die Schwingungen im Frequenzbereich von 0 bis 30 Hz [PGM09]; 0 bis 100 Hz [LAC⁺08]; 0,5 bis 80 Hz [LHG⁺99] oder 0,5 bis 100 Hz [STM12] dem Fahrkomfort zugeordnet. Weiterhin lässt er sich in die unterschiedlichen Bereiche primary ride⁹, secondary ride¹⁰ sowie impact harshness¹¹ unterteilen [Zel09, WMPZD14]. Auch in diesem Fall sind die Übergänge nicht immer einheitlich definiert.

Für die detailliertere subjektive und objektive Beschreibung von Schwingungen innerhalb dieser Frequenzbereiche wird zwischen unterschiedlichen Phänomenen unterschieden. HEISSING et al. stellen dafür eine Übersicht von Phänomenen über dem Frequenzbereich dar, vgl. Abbildung 2.3. Weitere Übersichten zur Einteilung sind in [Rau03, Str11, HEG13] zu finden. Ausgehend von der Vielzahl von Phänomenen sollen nur einige für die vorliegende Arbeit relevante Schwingungen näher erläutert werden.

Im niederfrequenten Frequenzbereich wird zunächst die Vertikaldynamik des Fahrzeugaufbaus betrachtet. Neben einer reinen Vertikalbewegung (Huben) geht es dabei auch um die Nick- und Wankeigenschaften des Aufbaus auf verschiedenen Fahrbahnen. Unter statischen Bedingungen ist beispielsweise der auftretende Nickwinkel des Aufbaus infolge von Längskräften von besonderer Bedeutung. Analog lässt sich das Wankfederverhalten bei Querkraften infolge Kurvenfahrt charakterisieren. Allgemein kann formuliert werden, dass kleinere Winkel oft als komfortabler empfunden werden [Kra11]. Insbesondere bei diesen Kennwerten ist eine Trennung zur Fahrdynamik nicht immer eindeutig.

Bei dynamischen Vertikalschwingungen des Fahrzeugaufbaus wird im Frequenzbereich wiederum zwischen der Verstärkung der Anregung durch den Aufbau im Resonanzbereich sowie dessen Isolationsfähigkeit im überkritischen Bereich unterschieden. Das zweite Phänomen

⁹Primary ride definiert die Aufbauschwingungen im Bereich von 0,5 bis 4...5 Hz.

¹⁰Secondary ride definiert die Aufbauschwingungen infolge der Schwingung von Subsystemen im Bereich von 4...5 bis 30 Hz.

¹¹Impact harshness definiert die Aufbauschwingungen aufgrund von Einzelhindernissen im Bereich von 30 bis 100 Hz.

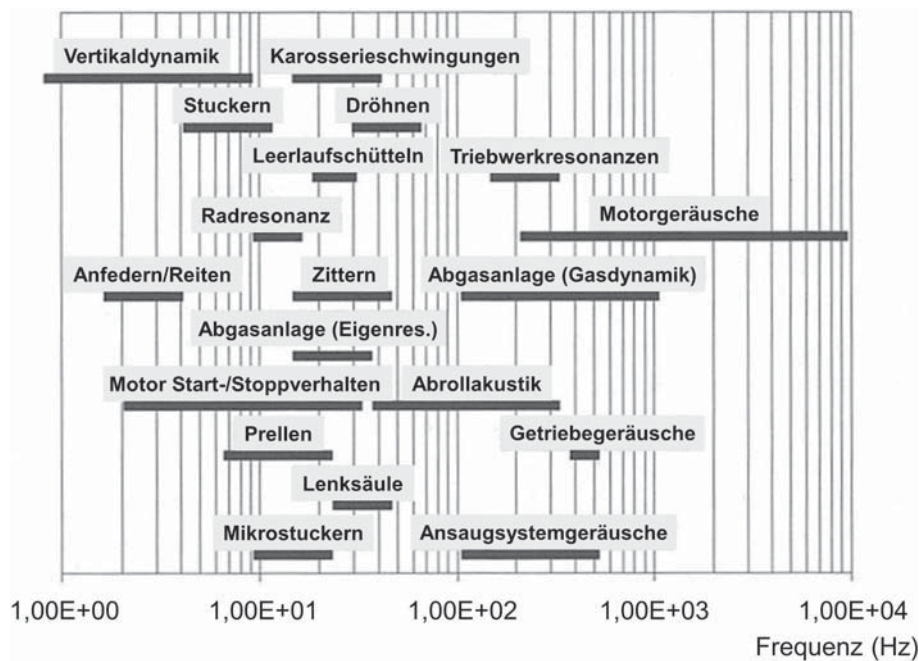


Abbildung 2.3.: Schwingungsphänomene im PKW über der Frequenz, in Anlehnung an [HB02]

wird dabei häufig auch als Kopieren/Isolationsvermögen oder Anfedern¹² bezeichnet. In Unterabschnitt 2.4.1 werden die beiden Kennwerte noch einmal erläutert. Auf ähnliche Weise lassen sich Nick- und Wankschwingungen im Frequenzbereich charakterisieren.

Im Bereich der Schwingung von Subsystemen wird das Stuckern als charakteristischer Kennwert angeführt. Dabei ist jedoch zwingend zwischen der Schwingung des Aggregats¹³ und der des Fahrwerks¹⁴ zu unterscheiden. Beide Effekte kommen durch Resonanzen der Subsysteme als Reaktion auf Fahrbahnunebenheiten zustande. In der Praxis treten die Schwingungen von Aggregat und Fahrwerk jedoch häufig gemeinsam auf, sodass rein subjektiv eine Trennung zwischen den beiden Subsystemen erschwert ist. Die nach dem Stand der Technik bekannten Eigenschaften der Schwingungssysteme werden für die Achse in Unterabschnitt 2.4.3 und für das Aggregat noch einmal in Unterabschnitt 2.4.4 näher erläutert.

Beim Überfahren von Einzelhindernissen wird zwischen der Kantenempfindlichkeit und dem Prellen unterschieden. Die Kantenempfindlichkeit bezeichnet dabei die empfundene "Härte" des ersten Schlages, während das Prellen das Nachschwingen des Rades infolge der Auslenkung beschreibt. Dabei ist ein Zusammenhang zum Stuckern gegeben, da in beiden Fällen die Schwingungen der reifengefederten Massen¹⁵ (in Abbildung 2.3 als Radresonanz aufgeführt) sowie des Aggregats von besonderer Bedeutung sind. Bei Betrachtung des Phasenversatzes zwischen dem Überfahren der Kante durch die vorderen und hinteren Räder kann ebenfalls eine Verbindung zur niederfrequenten Vertikaldynamik des Aufbaus gezogen werden, da beispielsweise die dadurch angeregte Nickschwingung ebenfalls von der Aufbaufederung abhängt.

¹²Häufig wird das Anfedern bei geringeren Amplituden als bei der Isolation betrachtet.

¹³als Aggregatsstuckern bezeichnet

¹⁴als Achsstuckern bezeichnet

¹⁵Häufig werden die reifengefederten Massen in der Literatur auch als ungefederte Massen bezeichnet.