

1 EINLEITUNG

Moderne Fahrzeuge dienen nicht mehr nur vordringlich der Fortbewegung von Personen und dem Transport von Gütern. Sie zeichnen sich durch eine Vielzahl an Eigenschaften aus, die potentielle Kunden über ein gewisses Maß an Emotionen ansprechen sollen. Zu objektiven Anforderungen wie Fahrdynamik, Ladevolumen, Sicherheitsausstattung, Verarbeitungsqualität und Kosten kommen weitere Anforderungen hinsichtlich Alltagstauglichkeit, Design, Information und Kommunikation sowie Bedienbarkeit und Fahrkomfort. Insbesondere der Fahrkomfort wird vor dem Hintergrund der Elektromobilität und dem autonomen Fahren in den nächsten Jahren zunehmend in den Vordergrund rücken. Fahrzeughersteller entwickeln daher nicht mehr nur Komponenten, sondern Fahrzeugeigenschaften. Diese müssen durch Messungen aus vorhandenen Komponenten und Baugruppen in Identifikationsverfahren abgeleitet und dem Entwicklungsprozess am Beginn wieder zugeführt werden. Einfache und abstrakte Simulationsmodelle können dazu dienen, Eigenschaften und Charakteristika bereits früh im Entwicklungsprozess abzubilden, auch wenn noch kein Prototyp verfügbar ist. Eine Änderung dieser ist damit leicht möglich. Sie werden weiter detailliert und letztlich Komponenten zugewiesen, mit denen sie realisiert werden. Insbesondere für Komponenten, welche zugeliefert werden, ist die Vorgabe von Eigenschaften wichtig. Nur so ist es dem Zulieferer möglich, innerhalb seines eigenen Entwicklungsprozesses ein geeignetes Produkt zu generieren.

1.1 METHODISCHE ENTWICKLUNGSPROZESSE

Von der Produktidee bis zur serienreifen Umsetzung des Produktes sind mehrere Entwicklungsschritte notwendig. Dazu existieren verschiedene Vorgehensmodelle, welche in verschiedenen Branchen und Fachbereichen verwendet werden.

Wasserfallmodell

Das Wasserfallmodell stammt ursprünglich aus dem Bau- und Produktionsprozess und wird erstmalig von Winston W. Royce formal beschrieben. Herbert D. Benington adaptiert es am 29. Juni 1956 für die Softwareentwicklung. Es handelt sich dabei um ein lineares Vorgehensmodell, in welchem aufeinanderfolgende Projektphasen organisiert sind. Die Ergebnisse vorangegangener Phasen stellen dabei bindende Vorgaben für die nächste Phase dar (Abb. 1.1).

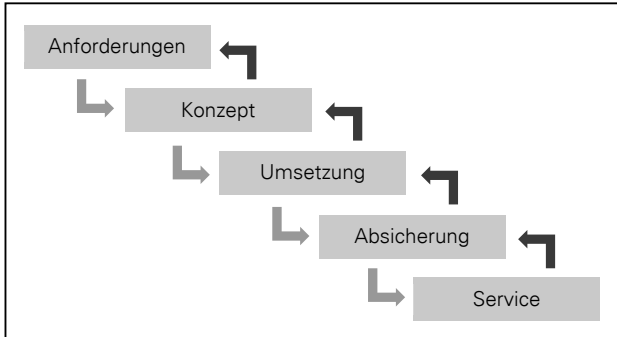


Abb. 1.1: Wasserfallmodell

Eine Erweiterung dieses einfachen Modells ergibt sich durch Iterationen, wobei die dargestellte Kaskade schrittweise rückwärts von unten nach oben durchlaufen wird. Ein sich ergebender Handlungsbedarf, dessen Ursache eindeutig in den vorangegangenen Phasen zu suchen ist, führt zu Abweichungen vom linearen Prozess. Das Wasserfallmodell ist zweckmäßig, wenn sich Prozesse und Abläufe relativ gut beschreiben lassen. Es zeichnet sich aus durch eine klare Abgrenzung von Teilabschnitten, einfache Möglichkeiten der Planung und Kontrolle sowie eine klare Aufwands- und Kostenabschätzung. Diese klare Abgrenzung ist jedoch in fast allen komplexen Entwicklungsvorgängen nicht gegeben. Oftmals überschneiden und durchdringen sich die einzelnen Phasen.

V-Modell

Das V-Modell ähnelt grundsätzlich dem Wasserfallmodell derart, dass ebenfalls Phasen definiert werden. Erstmals vorgeschlagen wurde diese Vorgehensweise von Barry Boehm 1979. Der linke Ast stellt dabei mit der Anforderung von oben beginnend eine immer weitere Spezifizierung dar und endet mit der Realisierung. Gleichzeitig werden Tests definiert, die auf dem rechten Ast das schrittweise Vorgehen zur Qualitätssicherung beschreiben (Abb. 1.2).

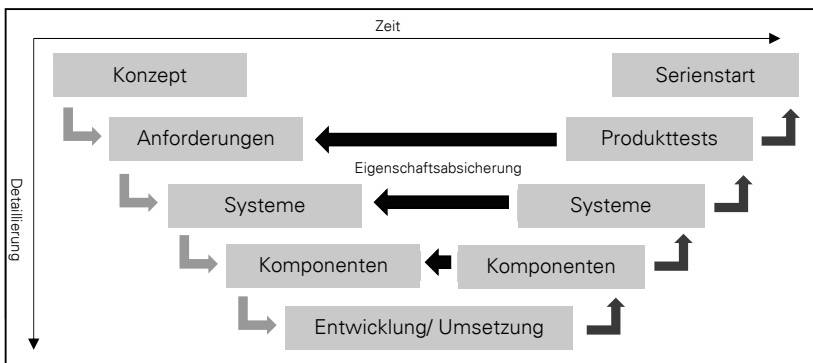


Abb. 1.2: V-Modell der Entwicklung

Die einzelnen Schritte der Testphasen werden den jeweiligen Entwicklungsphasen gegenübergestellt. Dieses Modell wird ca. seit dem Jahre 2000 fortlaufend auf alle denkbaren Entwicklungsprozesse angewendet. Dabei gewinnt die Eigenschaftsabsicherung vom rechten zum linken Ast aufgrund steigender Komplexität mechatronischer Systeme stetig an Bedeutung. Fortlaufend werden die tatsächlichen Eigenschaften mit den spezifizierten abgeglichen und die Teilsysteme im Zusammenwirken im Gesamtsystem untersucht. Auch im V-Modell werden einzelne Phasen schrittweise und iterativ durchlaufen. Eigenschaftsabweichungen können bereits in den unteren Ebenen erkannt und frühzeitig

korrigiert werden. Dadurch lassen sich Risiken minimieren, die Qualität schrittweise gewährleisten sowie Prototypen während der Entwicklung erstellen. Das V-Modell enthält keine Informationen zur Organisation und Durchführung von Aufgaben. Jedoch lassen sich darin Verantwortlichkeiten definieren (Abb. 1.3).

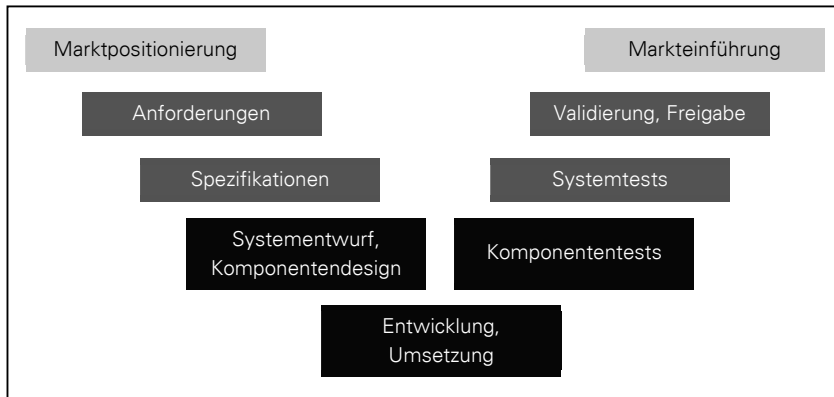


Abb. 1.3: Verantwortlichkeiten im V-Modell

Die Planung und Abnahme des Produkts sind dabei Aufgaben der Geschäftsführung (hellgrau). Produktmanager und Anwender (mittelgrau) spezifizieren und testen Anforderungen und Funktionen von Gesamtsystemen und Systemverbänden. Den Entwicklern (schwarz) obliegt die Umsetzung des Produktes im Detail.

Agile Produktentwicklung

Eine Planung von Neuentwicklungen ist mit dem V-Modell bis ins Detail sowie zeitlich nicht immer möglich. Hier setzt die agile Produktentwicklung als eine weitere Vorgehensweise an [Sch17], welche in den letzten Jahren verstärkt hinzugekommen ist. Es werden ähnliche Rollen wie im V-Modell definiert. Ein Projektleiter behält dabei Qualität, Kosten und Termine im Blick. Den Kundenkreis bilden die Stakeholder ab. Sie setzen sich zusammen aus Produktmanagern und Anwendern, welche ihren gewünschten Umfang und Anforderungen spezifizieren und testen. Dem Entwicklerteam obliegt die Umsetzung der Anforderungen und die Bereitstellung eines Demonstrators, mit dem die Stakeholder ihre Anwendungsfälle testen und entsprechende Rückmeldungen geben können.

Grundsätzlich lassen sich bei der Entwicklung zwei Gesetzmäßigkeiten anwenden. Das Gesetz von Parkinson wurde 1955 veröffentlicht. Es besagt, dass jeder solange Zeit braucht, wie er bekommt. „The Students Law of Tension“ wiederum beschreibt das menschliche Verhalten, die Konzentration erst zu erhöhen, wenn ein Abgabetermin nahe rückt. Bei der agilen Entwicklung bildet das Entwicklerteam Scrums; kleine Teams zum Erstellen und Lösen von Teilaufgaben. Die Teilaufgaben und Teilziele werden dabei vom Team selbst definiert. Es legt ebenfalls den zeitlichen Rahmen fest. In anschließenden Sprints werden die Aufgaben umgesetzt. Tägliche kurze Besprechungen helfen, die gesteckten Ziele zu erreichen oder einen Handlungsbedarf direkt zu identifizieren und Lösungsmaßnahmen zu planen. Letztlich werden während mehrerer Sprints und auch während einzelner Aufgaben viele kleine V-Modelle durchlaufen mit Anforderungen, Spezifikationen, Umsetzung und Tests von Teilkomponenten, welche sich das Entwicklerteam selbst definiert hat. In einem Review werden die Ergebnisse den Stakeholdern vorgestellt (Abb. 1.4).

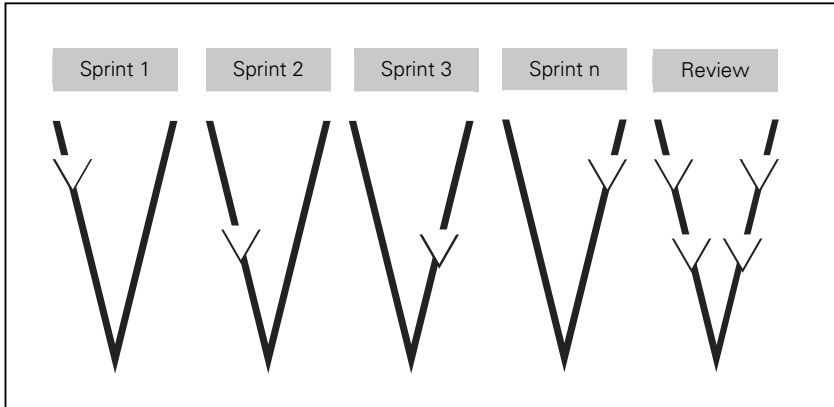


Abb. 1.4: Agile Produktentwicklung

Als Vorteil der Agilen Methodik gegenüber dem V-Modell erweist sich, dass Entwicklungsschritte über relativ kurze Zeiträume gut planbar sind. Somit lassen sich schnell detaillierte Anforderungen herausarbeiten. Die Agile Methodik kann als Unterstützung für die Definition der verschiedenen Phasen des V-Modells gesehen werden, insbesondere bei der Planung von Neuentwicklungen.

Frontloading

Das Frontloading ist in den vergangenen Jahren als Entwicklungstendenz übergreifend hinzugekommen. Aufgrund des fortlaufenden Anstiegs der Variantenvielfalt bei sich gleichzeitig verkürzenden Produktzyklen erhöht sich der Entwicklungsbedarf enorm. Nach [Bra99] wird die Gestaltung und Optimierung dieses Prozesses auch in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Mit konventionellen Methoden ist dieser Aufwand nicht zu bewältigen. Eine Lösung liegt in der konsequenten Nutzung des Potentials von Simulationenethoden.

Nach [Bul97] wird unter Frontloading eine Methode verstanden, die das Ziel verfolgt, bereits zu einem frühen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess eine so hohe Produkt- und Prozessreife zu erreichen, dass Entscheidungen über Lösungsansätze getroffen werden können, die im konventionellen Entwicklungsprozess erst deutlich später möglich wären. Dazu werden auch Entwicklungsbudgets für die frühe Phase erhöht, welche später durch eine geringere Anzahl erforderlicher Prototypen eingespart werden können. Die zeitliche Zuordnung der Produkt- und Prozessreife zeigt Abb. 1.5.

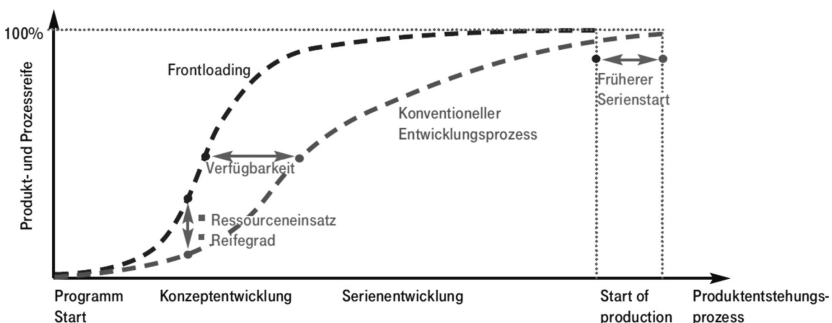


Abb. 1.5: Frontloading im Entwicklungsprozess [N.N07]

1.2 WISSENSCHAFTLICHER HINTERGRUND

Die Reifen von Kraftfahrzeugen stellen die einzige Verbindung zur Straße dar. Alle für fahrdynamische Manöver erforderlichen Kräfte werden hier übertragen. Gleichzeitig sorgt der Reifen bei Überfahrt von Unebenheiten für Radbewegungen, welche weitere Subsysteme wie Fahrwerk und Aufbau auslenken und zu Schwingungen anregen. Der Reifen wirkt dabei aufgrund seiner elastischen Struktur als Filter für die Straßenoberfläche. Infolge der elastischen Struktur bildet auch der Reifen selbst ein schwingungsfähiges System, welches sowohl über das Fahrwerk als auch über die Straße angeregt werden kann.

Obwohl das Reifenverhalten von vielen Randbedingungen wie z.B. Radlast und Reibwert sowie Fülldruck und Temperatur abhängig ist, lassen sich für fahrdynamische Anwendungen charakteristische Reifeneigenschaften wie Einlaufänge, Schräglaufsteifigkeit und Reibwert identifizieren. Damit können Kenngrößen, welche die Fahrdynamik beeinflussen, sehr gut durch einfache Fahrdynamikmodelle wie Ein- und Zweispurmodelle in verschiedenen Detaillierungsstufen abgebildet und festgelegt werden. Fahrdynamische Kenngrößen des Fahrzeuges wie z.B. die maximale Querbeschleunigung oder Gierverstärkung lassen sich anhand solcher Modelle auf Basis von Reifenkenngrößen schnell abschätzen. Während hierbei vergleichsweise niederfrequente Änderungen der Eingangsgrößen relevant sind, liegt der für den Fahrkomfort relevante Frequenzbereich höher. Viele der in Fahrwerk und Reifen verwendeten Materialien weisen frequenzabhängige Eigenschaften auf, die gezielt eingestellt werden müssen. Eine Abstimmung der Reifeneigenschaften in Bezug auf Fahrdynamik und Fahrkomfort erfolgt iterativ im Fahrversuch und in der Simulation mittels komplexer Mehrkörpermodelle. Ist das Reifenverhalten im Frequenzbereich bekannt, lassen sich daraus analog zur Fahrdynamik charakteristische Kenngrößen, die den Gesamtfahrzeugkomfort beeinflussen, ableiten.

Das frequenzabhängige Reifenverhalten lässt sich nach Heißig et al. [Hei13] in einen vergleichsweise niederfrequenten mechanischen Bereich und einen höherfrequenten akustischen Bereich unterteilen. Zwischen 10 und 100 Hz existiert ein Übergangsbereich, in welchem Schwingungen beiden Bereichen zugeordnet werden können.

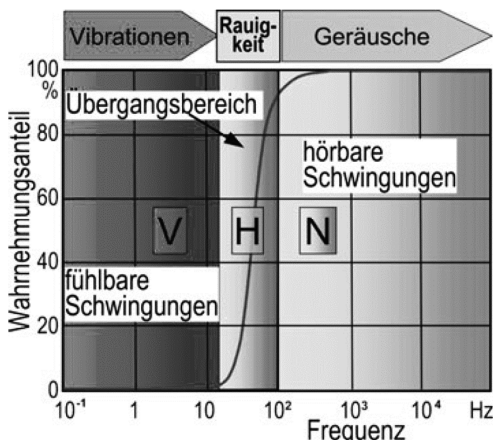


Abb. 1.6: Wahrnehmung der Schwingungsfrequenz als fühlbare und hörbare Schwingungen
[Hei13, S.475]

Der am häufigsten auftretende Fahrzustand ist die Geradeausfahrt mit relativ geringem Längskraftanteil. Der Zustand des frei geradeaus rollenden Rades ist damit die häufigste Anwendung. Durch Einzelhindernisse und Anregungen durch Straßenoberflächen kommt es vorwiegend zu vertikalen und longitudinalen Anregungen der Räder. Die Bedeutung des lateralen Anteils steigt bei querdynamischen Einsatzbedingungen.

1.3 MOTIVATION

Die Motivation für diese Arbeit hat sowohl einen Fokus auf fachlichen Erkenntnissen als auch bezogen auf den Entwicklungsprozess. In dieser Arbeit soll eine Identifikation von komfortrelevanten Reifeneigenschaften des geradeaus frei rollenden Rades bis 100 Hz durchgeführt werden. Dazu werden Versuche mit verschiedenen Reifen an Prüfständen durchgeführt. Deren zu bestimmende Kennwerte werden mit weiteren Messungen dieser Reifen im Verbund mit einer ausgewählten Achse gegenübergestellt. Ein Maß für einen Zusammenhang zwischen Reifeneigenschaften und dem Einfluss des Reifens auf die Achse wird bestimmt, welches Rückschlüsse auf die Komfortrelevanz der Reifeneigenschaften zulässt.

Die komfortrelevanten Kenngrößen müssen in einem geeigneten Reifenmodell oder einfachen Modellansatz abbildbar sein. Das FTire (Flexible Ring Tire) Reifenmodell basiert auf einem physikalischen Ansatz der Abbildung des Reifenverhaltens einschließlich flexibler Gürtelschwingungen bis ca. 120 Hz. Der Reifen wird im Modell diskretisiert und durch Steifigkeiten, Dämpfungen und Materialeigenschaften parametrisiert. Dadurch soll es möglich sein, beliebige Hindernisüberfahrten mit hoher Genauigkeit abbilden zu können. Die Parameteridentifikation ist vergleichsweise komplex. Die Abbildungsgüte für fahrdynamische Anwendungen stuft Gipsler als mäßig ein. [Gip13]

Ein etabliertes Reifenmodell für Anwendungen der Fahrdynamik ist die Magic Formula ([Bak87], [Pac06], [Pac12]). Dieses Modell basiert auf der empirischen Beschreibung von Reifenkennlinien mittels mathematischer Formeln. Das SWIFT (Short Wavelength Intermediate Frequency Tyre) Reifenmodell stellt eine Erweiterung des Schlupfmodells der Magic Formula durch einen starren Gürtel dar. Der Modellansatz wurde 1998 – 2004 unter Betreuung von Prof. Dr. H.B. Pacejka ausgearbeitet und validiert. Das SWIFT Reifenmodell ist in der Lage im erweiterten Frequenzbereich bis maximal 100 Hz valide Ergebnisse zu liefern. Zudem können kleine Unebenheiten und Einzelhindernisse korrekt aufgelöst werden. ([Zeg98], [Mau00], [Sch04])

Hinsichtlich des allgemeinen Bestrebens der Automobilindustrie nach der Nutzung eines einfachen Reifenmodells für Anwendungen aus Fahrdynamik und Fahrkomfort soll geprüft werden, inwiefern das SWIFT Reifenmodell geeignet ist, die identifizierten charakteristischen Reifeneigenschaften hinreichend genau abzubilden.

Bezogen auf die Motivation, lassen sich folgende Forschungsfragen stellen:

- Kann der Reifeneinfluss auf den mechanischen Fahrkomfort ermittelt werden, indem der Reifen im Verbund mit der Achse betrachtet wird?
- Lassen sich einfache Kennwerte identifizieren, welche den Einfluss des Reifens auf den mechanischen Fahrkomfort beschreiben?

Daraus lassen sich konkrete und projektspezifische Ziele ableiten:

- Beschreibung von Reifeneigenschaften durch Kennwerte auf Basis von Versuchen
- Korrelation dieser Kennwerte mit dem Achsverhalten unter Reifeneinfluss
- Ableiten komfortrelevanter Reifeneigenschaften
- Erstellung und Validierung von SWIFT Reifenmodell Datensätzen mit Hilfe der Versuchsergebnisse
- Validierung der Simulationsergebnisse des Verbundes Rad Achse
- Gezielte Abschätzung und Festlegung von Reifeneigenschaften für die frühe Entwicklungsphase mit Hilfe der Simulation

Ein validiertes Modell der verwendeten Fahrzeugachse wird vom Hersteller zur Verfügung gestellt. Gelingt es ausgehend von Komponenten- und Systemverbundtests komfortrelevante Eigenschaften zu identifizieren und verschiedene Reifen hinsichtlich dieser Eigenschaften zu klassieren, kann dieses Wissen im Absicherungstest des V-Modells genutzt werden, um die Anforderungen an das Gesamtfahrzeug im Hinblick auf den Fahrkomfort effektiv zu erreichen. Auch für die Zulieferer können spezifische

Eigenschaften als Vorgabe für das zu liefernde Produkt dienen. Ergebnisse einer Validierung von Simulationsmodellen gegen die Ergebnisse aus den Versuchen können zu Beginn der Entwicklung des Nachfolgermodells berücksichtigt und dazu genutzt werden, eine bessere Detaillierung der Eigenschaften im linken Ast des V-Modells zu ermöglichen. Zu diesem Zeitpunkt ist kein Prototypenreifen verfügbar, welcher als Referenz dienen kann. Eine Spezifikation kann mit Hilfe von Simulationsmodellen geschehen. Die beiden Stoßrichtungen in Richtung Systemverbundtests und einfacher Systemmodelle ausgehend von Reifentests illustriert Abb. 1.7.

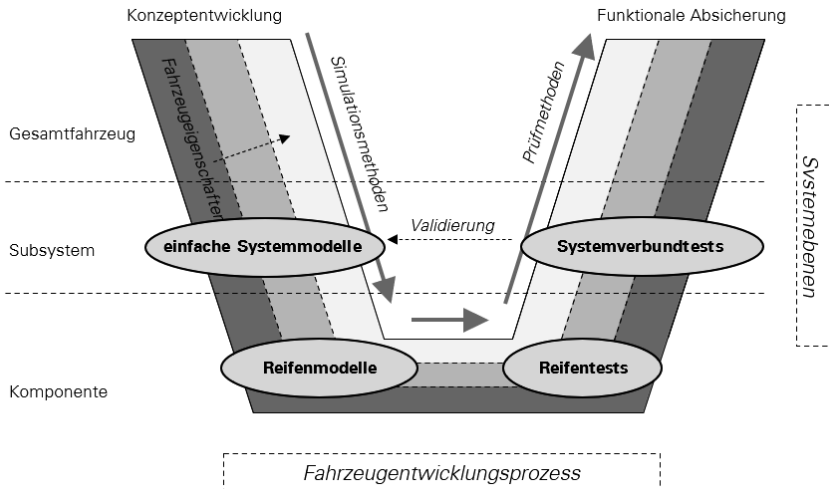


Abb. 1.7: Einordnung der Arbeit im V-Modell, V-Modell nach [Büt16]

Der Weg der Arbeit zu diesem Ziel hat dabei den Charakter der agilen Entwicklung. Kompetenzen aus der Simulations- und Prüftechnikwelt werden gezielt eingesetzt, um nachzuweisen, ob der gewählte Ansatz erfolgreich ist oder um weiteren Handlungsbedarf zu identifizieren.

1.4 METHODIK

Der Gesamtfahrzeugkomfort wird durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren bestimmt. Wesentliche Anregungsstellen sind dabei die Reifen. Da diese als Teil der ungefederten Massen elastisch am Fahrwerk mit seinerseits charakteristischen Eigenschaften gelagert sind, genügt es nicht, den Reifen isoliert zu betrachten. Durch den Verbund der Systeme entstehen Wechselwirkungen, welche Einfluss auf die Signifikanz einzelner Eigenschaften von Reifen und Fahrwerk haben können. Die Fahrwerkkinematik erhöht den Freiheitsgrad des sich drehenden Rades. Wird die Elastokinematik hinzugezogen, besitzt das daran befestigte Rad den Freiheitsgrad 6, wobei die Bewegungen durch Kraftelemente in Form von Fahrwerklagern abgestützt werden. Wechselwirkungen mit Elementen des Antriebsstranges sind ebenfalls möglich. Darunter fallen zum Beispiel ein elastisch gelagertes Achsdifferenzial, welches das Schwingverhalten der Achse verändern kann oder auch Verspannungen des Reifens durch Antriebs- und Bremsmomente. Wechselwirkungen mit dem Antriebsstrang stehen jedoch nicht im Fokus dieser Arbeit. Im Rahmen der Untersuchungen sollen insbesondere charakteristische Reifeneigenschaften definiert und deren Einfluss auf den Gesamtfahrzeugkomfort identifiziert werden. Die Reifeneigenschaften werden auf Basis des Reifenaufbaus analysiert und im Prüfstandversuch ermittelt. Parallel dazu erfolgt eine Abbildung der Ergebnisse mit virtuellen Methoden auf Reifenebene und dem Verbund Reifen-Fahrwerk. Vergleiche

sollen die Relevanz einzelner Reifeneigenschaften klären und deren Abbildbarkeit in Simulationsmodellen zeigen (Abb. 1.8).

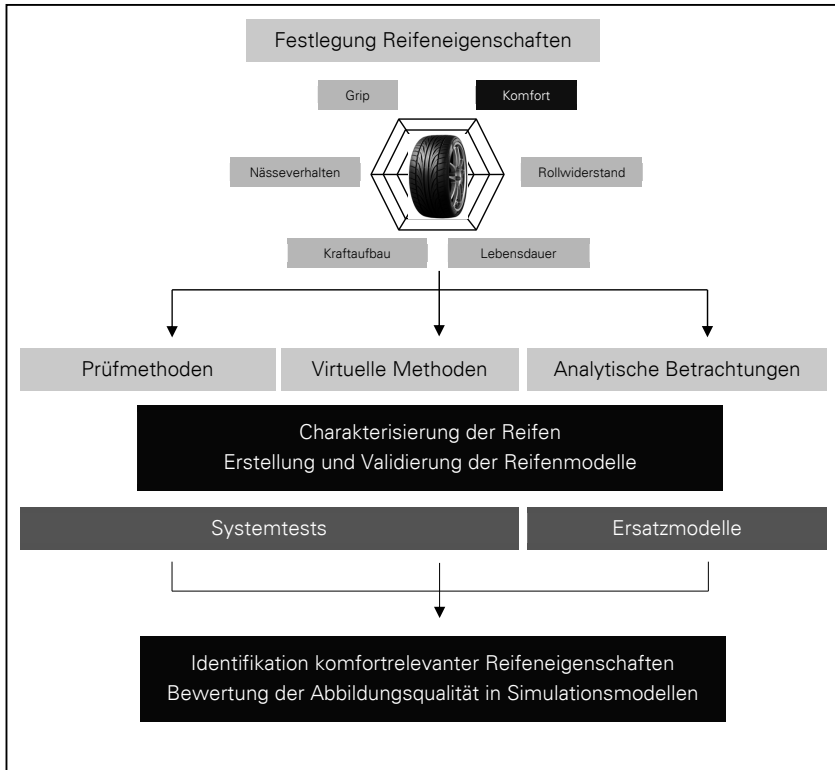


Abb. 1.8: Methodik der Arbeit

In einem Literaturüberblick werden verschiedene Reifeneigenschaften vorgestellt und eine Übersicht über gängige Reifenmodelle gegeben. Bewertungsmethodiken zum Thema Fahrkomfort, z.T. auch unter Berücksichtigung des Reifeneinflusses, sowie ausgewählte Ergebnisse werden präsentiert. Zur Identifikation von komfortrelevanten Reifeneigenschaften werden am Reifenprüfstand des Instituts für Automobiltechnik Dresden (IAD) Reifenmessungen auf einem Trommelreifenprüfstand durchgeführt. Auf Basis einer Analyse des Reifenverhaltens im Frequenzbereich und deren Ergebnissen erfolgt die Ermittlung von Kennwerten zur Charakterisierung der Reifen. An einem Ein-Achs-Hydropulsprüfstand werden Messungen zum dynamischen Übertragungsverhalten von Reifen durchgeführt. Das stehende Rad kann hier sowohl über die Straße als auch über die Felge angeregt werden. Schnittkräfte werden ebenfalls an beiden Seiten gemessen. Die Ergebnisse werden genutzt, um sowohl die Ermittlung von ausgewählten Reifeneigenschaften als auch die Modellparameteridentifikation zu unterstützen. Beim Agrartechnischen Prüfstand handelt es sich um einen Reifenprüfstand für Landmaschinenräder. Diese rollen über eine 2 m lange Verschiebeplatte. Im Rahmen der in dieser Arbeit zu untersuchenden Reifeneigenschaften können hier Einzelhindernisüberfahrten auf flacher Straße durchgeführt werden. Dadurch lässt sich die Qualität der Übertragbarkeit der Ergebnisse vom Reifenprüfstand zwischen Trommeluntergrund und der flachen Straße bewerten. Gleichzeitig ist eine Aussage über die Abbildungsqualität dieses Einflusses durch Simulationsmodelle möglich. Die Relevanz der Reifeneigenschaften für den Fahrkomfort soll abschließend im Systemverbund Reifen-Fahrwerk am Rad-Achs-Prüfstand (RAPS) des IAD quantitativ bewertet werden.

Zum weiteren Systemverständnis werden begleitend zu den Prüfstandversuchen Simulationen mit gängigen Reifenmodellen durchgeführt. Der Schwerpunkt wird auf der Nutzung der kommerziellen Reifenmodelle SWIFT ([TNO02], [TNO13]) und FTire [Gip13] liegen. Es wird die Abbildungsgüte der in den Messungen bestimmten Reifeneigenschaften insbesondere durch das SWIFT Reifenmodell analysiert. Als Ergebnis soll eine Aussage getroffen werden, ob der vergleichsweise einfache Ansatz dieses Reifenmodells geeignet ist, komfortrelevante Reifeneigenschaften hinreichend genau abzubilden. Falls die Eignung bestätigt werden kann, folgt daraus die Möglichkeit der Nutzung eines Reifenmodells für die Analyse von Fahrdynamik und Fahrkomfort. Anhand der aus den Messungen bekannten komfortrelevanten Reifeneigenschaften wird ein Bedatungsprozess des SWIFT Reifenmodells für die Anwendung Fahrkomfort entwickelt. Ein Vergleich der Messergebnisse vom Rad-Achs-Prüfstand mit entsprechenden Simulationen dient der Validierung. Weitere Sensitivitäten von Parametern werden in zusätzlichen Simulationen analysiert.

