

1.1. PROBLEMSTELLUNG

Autonomes Fahren, Elektrifizierung und Digitalisierung sind die drei großen Automobilthemen, welche während der Erstellung dieser wissenschaftlichen Arbeit in den Medien präsent sind. Sowohl die Märkte als auch die jeweiligen Gesetzgeber fordern die Automobilhersteller auf, zu diesen Themengebieten innovative Lösungen zu erarbeiten. Die ursprünglichen Schwerpunkte wie das Fahrwerk rücken somit leicht in den Hintergrund, wobei dieser Bereich zu dem Grundgerüst eines jeden Fahrzeugs zählt. Jedoch wandelt sich auch auf diesem Gebiet durch die Priorisierung anderer Forschungsfelder die Gewichtung der Anforderungen.

Das Ziel, immer bessere Fahrwerkseigenschaften zu realisieren, muss unter den Prämissen eines niedrigeren Gewichts und kostengünstigen und somit möglichst wirtschaftlichen Bauteilkonzepten erfolgen. Teilweise ergibt sich hierbei der Zielkonflikt zwischen Eigenschaften und Kosten.

Die aus diesen unterschiedlichen Anforderungen resultierende Problematik ist das Auftreten fahrdynamischer Auffälligkeiten, die erst im physischen Fahrzeug durch subjektive Fahrverhaltensbeurteilungen festgestellt werden. Die Ursache dieser Auffälligkeiten kann speziellen Baugruppen der Radaufhängung von Hinterachsen zugeordnet werden, welche ein Ausschlussverfahren detektiert. Da diese Probleme in einer sehr späten Entwicklungsstufe erkannt werden, muss auf kostspielige Abhilfemaßnahmen zurückgegriffen werden. Hierzu zählen die Anpassung von Umformwerkzeugen, zusätzliche form- oder stoffschlüssige Verbindungen bis hin zum Wechsel des gesamten Bauteilkonzepts.

Zur Identifikation einer passenden Abhilfemaßnahme werden wiederum subjektive Beurteilungen durchgeführt. Dies ist dadurch bedingt, dass die zur Beurteilung erforderlichen objektiven Größen nicht bekannt sind. Teilweise resultieren aus den Versuchen kontroverse Beurteilungen. Zudem besteht eine enorme Unschärfe: Während der Fahrwerksumbauten ist der Austausch von Teilen der Radaufhängung unvermeidbar, wodurch nicht immer sichergestellt werden kann, ob der Umbau selbst schon zu einer Veränderung des Fahrverhaltens – trotz einer Justierung des Achssystems – führt. Da die Problembauteile meist Bestandteil einer Baugruppe mit Komponenten sind, welche selbst einer gewissen Streuung unterliegen, ergeben sich hierbei weitere Hürden. Eine Demontage der Bauteile kann ebenfalls zu einer Eigenschaftsänderung führen. Der größte Nachteil besteht jedoch darin, dass kein Aufschluss über die Kausalität des Problems vorliegt und somit keine objektive Entscheidungsgrundlage besteht.

1.2. ZIELSETZUNG

Die Aufschlüsselung der jeweiligen Wirkzusammenhänge zwischen der Gestaltung der Bauteile einer Hinterachse und der Fahrdynamik stellt das primäre Ziel dieser Arbeit dar. Als Grundlage soll eine Analyse bestehender Ausführungen von Fahrwerkslenkern durchgeführt werden.

Des Weiteren soll untersucht werden, inwiefern Bauteilmodifikationen messtechnisch erfasst werden können. Dies soll sowohl auf der Gesamtfahrzeugebene bis hin zu den jeweiligen Komponenten erfolgen.

Zudem sollen geeignete Modelle und Methoden zur weiteren Untersuchung der Wirkzusammenhänge erstellt werden, welche die messtechnisch erfassten Effekte abbilden können. Diese sollen auch in der Lage sein, etwaige Wechselwirkungen der Wirkketten und deren Effekte auf die Fahrdynamik nachzustellen.

1.3. VORGEHENSWEISE

Um die definierte Zielsetzung zu erreichen, wird eine Vorgehensweise, wie sie in Abbildung 1.1 dargestellt ist, angewendet. Die theoretischen Grundlagen bilden die Basis und vermitteln die notwendigen Kenntnisse zum Themengebiet Fahrwerk als auch zur Simulation mit dem Schwerpunkt auf die spezifischen Modellierungsansätze.

Eine Recherche auf dem Gebiet der geometrischen Gestaltung von Komponenten der Radführung dokumentiert konstruktive Lösungen entsprechend dem Stand der Technik. Zudem werden bestehende Beurteilungsmethoden aufgezeigt, welche mögliche Ansätze zur Lösung der Problemstellung bieten.

Zur Analyse der Problemstellung wird eine Top-down-Methode in Kapitel 4 angewendet. Im Rahmen eines Gesamtfahrzeugversuchs werden exemplarisch anhand eines Audi Q7 Modelljahr 2015 mehrere verschiedene Hinterachsbauteilvariationen während diverser Fahrdynamikmanöver betrachtet. Ein sukzessives Herunterbrechen von der Achssystemebene bis auf die Komponentenebene erfolgt im Anschluss. Statische und dynamische Versuche an einer Hinterachse mit verschiedenen Bauteilvarianten auf einem Elastokinematik-Prüfstand ermöglichen Untersuchungen auf Achssystemebene. Eine weitere experimentelle Achssystemanalyse unter Verwendung eines optischen Messsystems befähigt Beobachtungen an einzelnen Komponenten unter Anregung des Achssystems vorzunehmen. Die Funktionsgruppen des Achssystems werden im Anschluss aus dem Gesamtsystem herausgelöst und separat mit uniaxialen statischen und dynamischen Belastungen beaufschlagt. Untersuchungen auf Komponentenebene mit Elastomerlagern mit dem Fokus auf die Elastomerlageranbindung sowie mehraxiale Belastungszustände schließen die experimentellen Analysen ab.

Anschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse aus den Experimenten durch virtuelle Methoden nachvollzogen und weiter beleuchtet. Die Synthese der Beobachtungen aus den Versuchen wird mithilfe numerischer Simulationen vorgenommen. Hierbei wird die Bottom-up-Methode verwendet, sodass von der einzelnen Komponente bis hin zum Gesamtfahrzeug die Wirkzusammenhänge weiter aufgeschlüsselt werden können.

Anhand der Finite-Elemente-Methode (FEM) erfolgen die Untersuchungen auf Komponenten- und Funktionsgruppenebene in Kapitel 5. Zunächst werden Modelle von Elastomerlagern und deren Anbindungen erstellt. Die validierten Lagermodelle vermitteln ein Verständnis über den Zusammenhang der Lageranbindungen und deren Eigenschaften und ermöglichen zudem Parameterstudien bezüglich der Anbindungsgeometrien.

Die Mehrkörpersystem (MKS)-Simulation wird in Kapitel 6 für die Analysen auf Achssystem- und Gesamtfahrzeugebene verwendet. Es werden die Modellierung und Parametrierung des Elastokinematikmodells der Achssysteme als auch des Gesamtfahrzeugsystems beschrieben. Neben der Validierung des Achsmodells anhand der Versuche mit dem Elastokinematikprüfstand werden kinematische Sensitivitätsanalysen, dynamische Achsanalysen als auch die Auswirkungen verschiedener Bauteilgestaltungen auf die Achseigenschaften untersucht. Im Rahmen der Gesamtfahrzeugsimulation werden die realen Versuche virtuell nachgebildet und die Effekte verschiedener Bauteile auf Komponenten-, Funktionsgruppen-, Achssystem- und Gesamtfahrzeugebene ausgewertet. Um zusätzlich spezielle Untersuchungen vorzunehmen, wird ein abstraktes Achsmodell erstellt, welches den Effekt eines offenen Lenkerblechprofils sowie eines gekröpften Lenkers nachbilden soll. Auch die aus der Elastomerlageranbindung resultierenden Effekte werden durch eine spezielle Parametrierung eines Elastokinematikmodells beleuchtet. Zudem wird ein neues MKS-Element entwickelt, das in Kombination mit einem Achsmodell die Beurteilung der Auswirkungen mehraxial belasteter Elastomerlager auf die Fahrdynamik ermöglicht.

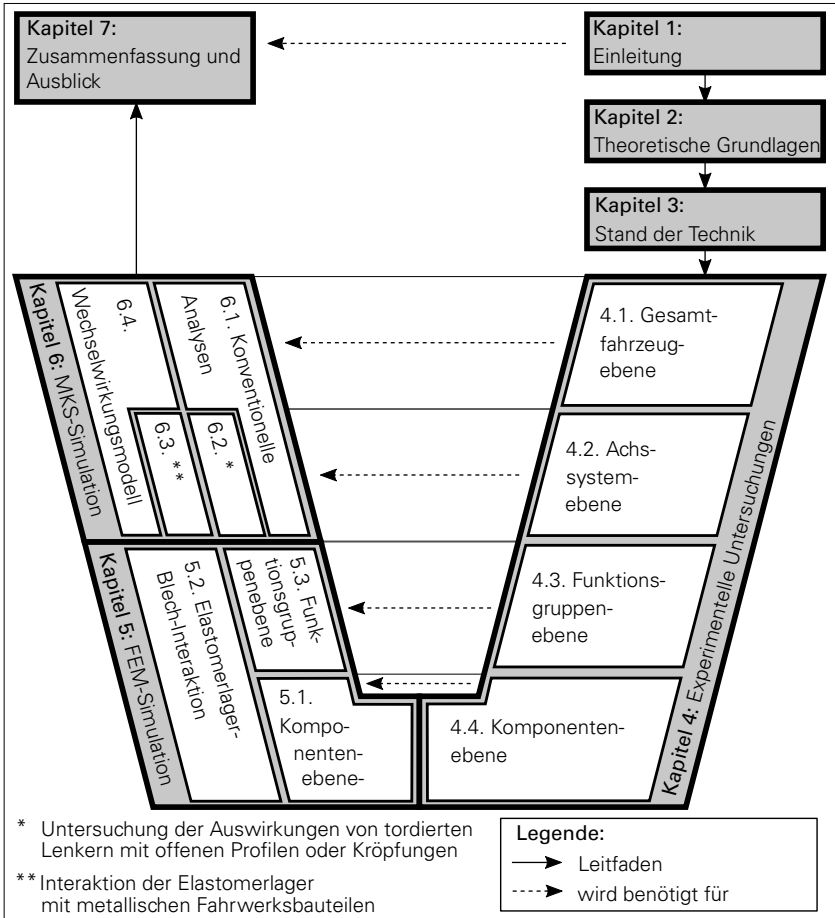
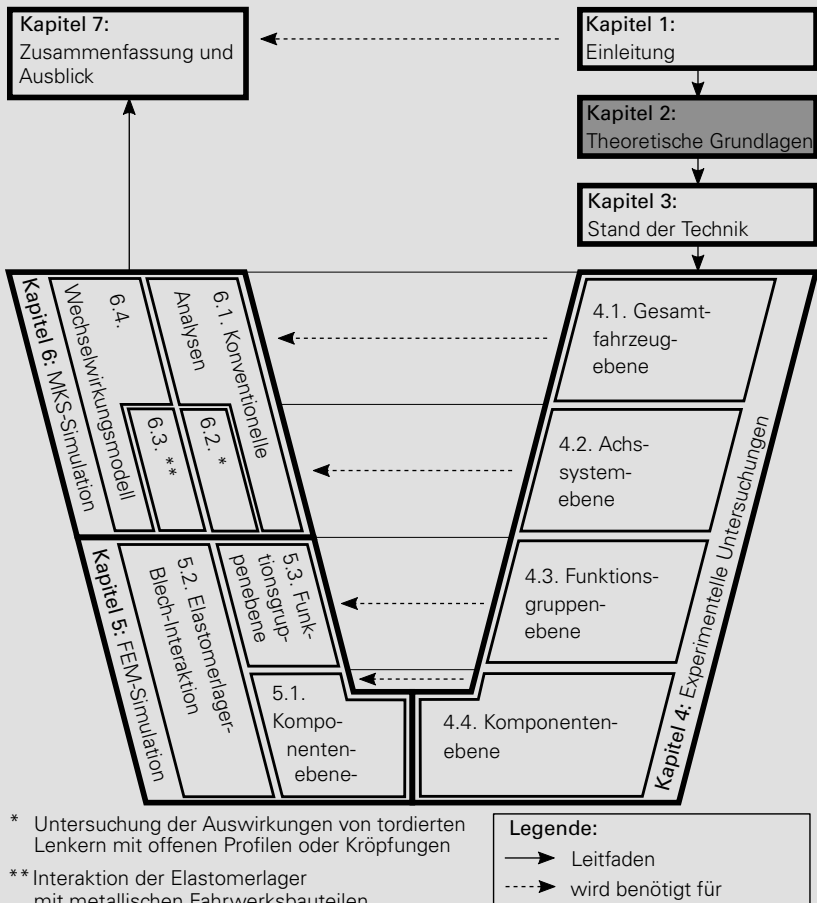


Abbildung 1.1. Vorgehensweise

2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN



2.1. ENTWICKLUNGSPROZESS IM FAHRWERK

Während des Produktentstehungsprozesses in der Fahrwerksentwicklung ist es notwendig, verschiedene Handlungsschritte zu koordinieren. Hierfür existieren diverse Werkzeuge, mit denen die jeweiligen Abläufe geplant und kontrolliert werden können. Zu diesen zählen unter anderem auch die Vorgehensmodelle [PL11, S. 17 ff.].

Für das Vorgehen bezüglich der allgemeinen Entwicklung und Konstruktion dient beispielsweise die VDI Richtlinie 2221. In dieser wird eine Abarbeitung der notwendigen Entwicklungsschritte in sequenzieller Reihenfolge vorgeschlagen [VDI93]. LINDEMANN stellt das Münchner Vorgehensmodell vor, in welchem die Produktentwicklung als Prozess der Problemlösung abgebildet wird. Die Struktur besteht hierbei aus vernetzten sowie sich überschneidenden Elementen. Der sprunghafte Verlauf und auch der oftmals fließende Übergang von realen Prozessen soll auf diese Weise besser nachgebildet werden [Lin09, S. 46 ff.]. Die VDI-Richtlinie 2206 stellt eine Erweiterung des V-Modells der Softwareentwicklung für mechatronische Systeme dar. Das V-Modell beschreibt das generische Vorgehen aus definierten Anforderungen bis hin zur Konkretisierung eines technischen Systems mit dem Produkt als Resultat [VDI04]. Dieses Modell wird ebenfalls im Fahrwerksentwicklungsprozess eingesetzt. Abbildung 2.1 visualisiert einen Makrozyklus des V-Modells.

Die einzelnen Handlungsschritte des V-Modells erstrecken sich über verschiedene Ebenen, bei denen das Gesamtsystem in Teilsysteme heruntergebrochen wird. Hierbei entspricht die Gesamtfahrzeugebene der Systemebene und verkörpert die Gesamtheit aller Teilsysteme. Der Fahrer und seine Umwelt bilden im Wesentlichen die Schnittstellen dieser Ebene. Beispielsweise stellt dabei die Hinterachse eines Fahrzeugs ein Subsystem des Gesamtfahrzeugs dar. Die Achssystemebene erfasst somit alle Bestandteile des Subsystems Hinterachse. Subsysteme werden wiederum in einzelne Funktionsgruppen unterteilt. Unter einer Funktionsgruppe wird die Zusammenfassung von Elementen zu einer selbstständig verwendbaren Funktionseinheit verstanden. Diese gleicht einer konstruktiven Baugruppe, deren Funktionen in Wechselwirkung zueinander stehen [DIN12a]. Eine Fahrwerkslenker-Baugruppe, bestehend aus deren Lagern und dem Lenker selbst, entspricht nach dem Zusammenbau einer Funktionseinheit. Die unterste Ebene bildet die Komponentenebene, wobei eine Komponente dadurch spezifiziert ist, dass diese nicht weiter zerlegt werden kann, ohne grundlegende Eigenschaften zu verändern oder zu verlieren [DIN12a]. Ein Elastomerlager mit aufvulkanisierter Außen- und Innenhülse korrespondiert mit einer Komponente, da dieses nur durch Zerstörung des Lagers selbst zerlegt werden kann.

Häufig wird auf die Funktionsgruppenebene verzichtet und lediglich zwischen System, Subsystem und Komponente unterschieden [Ang17]. Um die Wechselwirkungen der Bauteilgestaltung zu identifizieren, muss jedoch die Funktionsgruppenebene mit berücksichtigt werden, da die Interaktionen der Komponenten zueinander signifikant sind.

Während des Systementwurfs wird ein domänenübergreifendes Lösungskonzept erarbeitet. Die Gesamtfunktion wird in die Teilfunktionen unterteilt. Der domänenspezifische Entwurf beinhaltet die Konkretisierung eines gemeinsamen Lösungskonzepts. Als Domänen werden hier exemplarisch die Themenbereiche des Maschinenbaus Konstruktion, Festigkeit und Akustik angeführt. Weitere Domänen wie die Informations- und Elektrotechnik werden für mechatronische Fahrwerksysteme benötigt. Die detaillierte Auslegung und Berechnung der einzelnen Domänen erfolgt teilweise unabhängig, aber auch eng vernetzt. In einem nächsten Schritt werden die Ergebnisse der Domänen zusammengeführt, sodass die Integration zu einem Gesamtsystem erfolgt. Auf diese Weise wird das Zusammenwirken näher betrachtet. Eine kontinuierliche Eigenschaftsabsicherung ist notwendig, um die spezifizierten Lösungskonzepte des linken Astes des V-Modells zu überprüfen. Hierbei werden experimentelle aber auch virtuelle Methoden eingesetzt. Die Modellbildung und -analyse während der einzelnen Schritte ist wichtiger Bestandteil auf allen beschriebenen Ebenen.

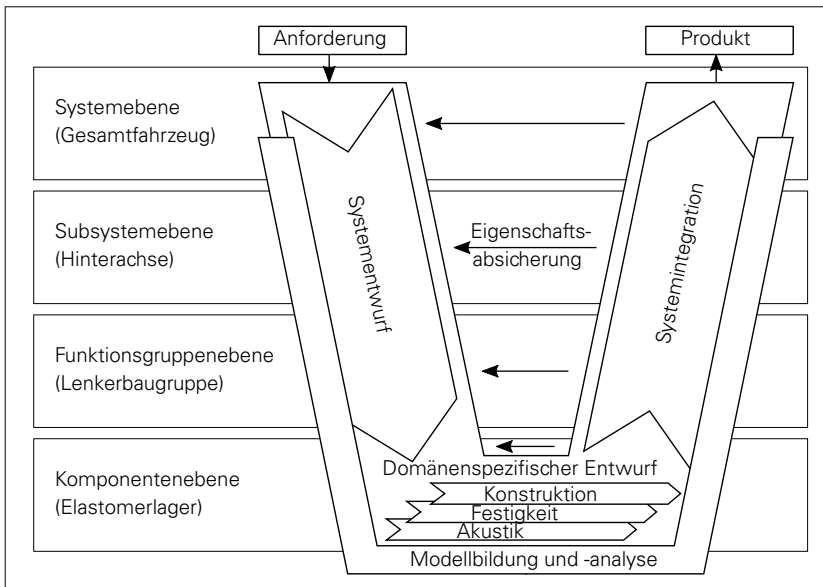


Abbildung 2.1. V-Modell in der Fahrwerksentwicklung nach [VDI04]

Ohne die entwicklungsbegleitende Simulation ist das komplexe System Gesamtfahrzeug nur schwierig zu beherrschen. Nach dem Durchlaufen eines Makrozyklus resultiert als Ergebnis ein Produkt. Dieses muss nicht zwingend aus einem finalen und bereits existierenden Fahrzeug bestehen, sondern kann auch einem Reifegrad des zukünftigen Produkts entsprechen. Ein Gesamtfahrzeug entsteht somit durch das Durchlaufen mehrerer Makrozyklen. Zu den entstandenen Produkten zählen unter anderem Versuchsträger, Technikträger, Prototypen, Vorserien- und Serienfahrzeuge [VDI04].

2.2. FAHRDYNAMISCHE BEZUGSSYSTEME

Die Fahrdynamik ist ein spezielles Anwendungsgebiet der Dynamik, welches sich mit den Bewegungsgrößen in Längs-, Quer- und Vertikalrichtung eines Fahrzeugs oder Fahrzeugzugs befasst. Um diese Bewegungsgrößen genau zu beschreiben, ist es notwendig, Koordinatensysteme zu definieren. Die für diese Arbeit wichtigsten Koordinatensysteme orientieren sich an der Norm DIN ISO 8855 [DIN13]. Abbildung 2.2 zeigt die verwendeten Koordinatensysteme auf Gesamtfahrzeugebene, die im Folgenden kurz erörtert werden.

Zunächst existiert ein ortsfestes Koordinatensystem, dessen Achse Z_E entgegen der Erdbeschleunigung gerichtet ist. Auf dem Fahrzeugaufbau befinden sich mehrere fahrzeugfeste Koordinatensysteme. Die Koordinatensysteme unterscheiden sich unter anderem in Bezug auf ihren Fahrzeugreferenzpunkt. Die X_{HA} -Achse des fahrzeugfesten Koordinatensystems mit dem Ursprung auf der Verbindungslinie der Radmittelpunkte der Hinterachse wird aus den Winkelhalbierenden der Spurwinkel der hinteren Räder gebildet und entspricht der geometrischen Fahrachse. Die Z_{HA} -Achse zeigt in Ruhelage des Fahrzeugs auf ebener Fahrbahn in Richtung der Z_E -Achse des ortsfesten Koordinatensystems. Dieses Koordinatensystem wird vor allem für die Messung von Radstellungsgrößen im Fahrversuch benötigt, da ei-

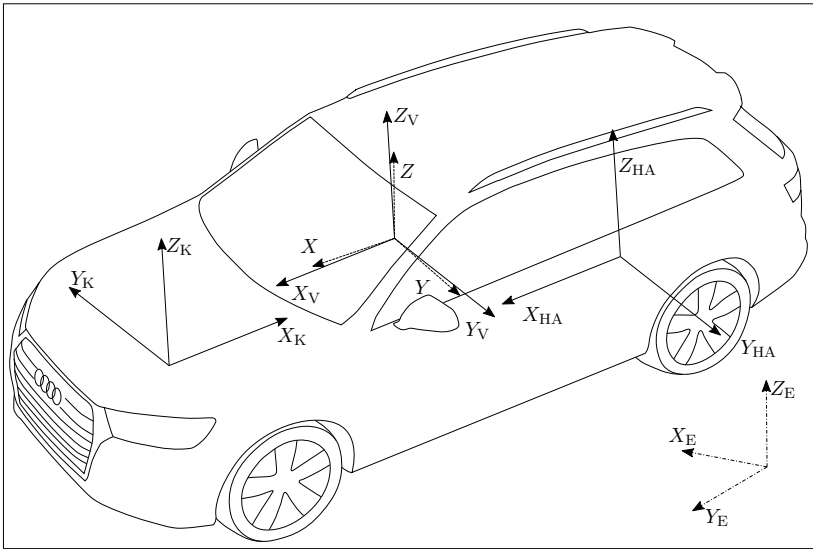


Abbildung 2.2. Koordinatensysteme des Gesamtfahrzeugs

ne Bewegung entlang der X_{HA} -Achse einer rein translatorischen Bewegung ohne jeglicher Kurvenfahrt entspricht.

Die $X_V Z_V$ -Ebene des fahrzeugfesten Koordinatensystems im Schwerpunkt von gefederter und ungefederter Fahrzeugmasse nach DIN ISO 8855 ist parallel zur Fahrzeuglängsmittlebene, welche aus den Verbindungspunkten der Mittelpunkte von Vorder- und Hinterachse gebildet wird und zudem senkrecht zur Fahrbahnebene ausgerichtet ist [DIN13]. Die X_V -Achse zeigt in Richtung Fahrzeugfront und die Z_V -Achse in Richtung des Fahrzeugdaches. Das horizontierte Koordinatensystem besitzt denselben Ursprung. Die XY -Ebene des horizontierten Koordinatensystems ist jedoch stets parallel zur $X_E Y_E$ -Ebene des ortsfesten Koordinatensystems, wobei die X -Achse aus der Projektion der X_V -Achse in diese Ebene entsteht. Der durch die beiden Achsen X und X_V aufgespannte Winkel um die Y -Achse entspricht dem Nickwinkel. Die Verdrehung vom ortsfesten zum horizontierten Koordinatensystem um die Z_E -Achse beschreibt den Gierwinkel. Der Wankwinkel entspricht dem Winkel der Y -Achse zur Y_V -Achse um die X_V -Achse.

Ein weiteres, nicht direkt für die Fahrdynamik, aber für die Modellierung der Fahrdynamik wichtiges Koordinatensystem ist das Fahrzeugkonstruktionskoordinatensystem. In diesem werden während der Fahrzeugentwicklung einheitlich alle Koordinaten der einzelnen Fahrzeugbestandteile definiert. Bei der Erstellung von mechanismenorientierten Modellen wird dieses oft beibehalten, um die Komplexität und somit auch Fehleranfälligkeit zu minimieren. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Ursprung des Fahrzeugkonstruktionskoordinatensystems in der Mitte der Vorderachse. Die X_K -Achse zeigt in Richtung der Hinterachse und bildet mit der Y_K -Achse eine parallele Ebene zur $X_E Y_E$ -Ebene des ortsfesten Koordinatensystems. Das Fahrzeugniveau wird hierbei durch eine definierte Fahrzeugkonditionierung festgelegt. Die Y_K -Achse ist den bereits beschriebenen fahrzeugfesten Koordinatensystemen entgegen gerichtet. Ein weiteres, nicht direkt für die Fahrdynamik, aber für die Modellierung der Fahrdynamik wichtiges Koordinatensystem ist das Fahrzeugkonstruktionskoordinatensystem. In diesem werden während der Fahrzeugentwicklung einheitlich alle Koordinaten der einzelnen

Fahrzeugbestandteile definiert. Bei der Erstellung von mechanismenorientierten Modellen wird dieses oft beibehalten, um die Komplexität und somit auch Fehleranfälligkeit zu minimieren. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Ursprung des Fahrzeugkonstruktionskoordinatensystems in der Mitte der Vorderachse. Die X_K -Achse zeigt in Richtung der Hinterachse und bildet mit der Y_K -Achse eine parallele Ebene zur $X_E Y_E$ -Ebene des ortsfesten Koordinatensystems. Das Fahrzeugniveau wird hierbei durch eine definierte Fahrzeugkonditionierung festgelegt. Die Y_K -Achse ist den bereits beschriebenen fahrzeugfesten Koordinatensystemen entgegen gerichtet.

2.3. TECHNISCHE MECHANIK IN DER FAHRWERKSENTWICKLUNG

Die Positionierung des Reifens gegenüber der Fahrbahn während der unterschiedlichsten Situationen ist ein maßgebender Stellhebel zur Beeinflussung der Fahrdynamik. Die Zielsetzung der Kinematik und Elastokinematik besteht darin, dies bestmöglich umzusetzen.

Nach GROSS, SCHRÖDER und WALL stellt die **Kinematik** die Lehre des geometrischen und zeitlichen Bewegungsablaufs dar, ohne dabei auf den kausalen Zusammenhang der wirkenden Kräfte und der Bewegungen einzugehen [GSW15]. Im Kontext der Fahrdynamik wird unter dem Begriff der Kinematik primär die statische Ausrichtung und Lage der Räder während einer Änderung des Federwegs oder der Vorgabe eines Lenkwinkels verstanden, sodass das Rad gegenüber dem Fahrzeugaufbau einen Freiheitsgrad (FHG) oder im Fall von lenkbaren Rädern zwei FHGs besitzt.

In der Realität wirken jedoch bereits im statischen Fahrzeugzustand Kräfte, welche Auswirkungen auf die Radstellung mit sich bringen. Da sich diese Belastungen während verschiedener Fahrsituationen ändern können, ist es notwendig, die auftretenden Verformungen zu berücksichtigen. In der **Elastostatik** werden die Deformationen von elastischen Tragwerken unter der Berücksichtigung von Kräften untersucht [GSW17]. In der Fahrwerksentwicklung existiert eine spezifische Bezeichnung, welche die Elastostatik und Kinematik vereint, die sogenannte **Elastokinematik**. Nach MATSCHINSKY wird der Begriff der Elastokinematik als die Kompensation und Steuerung der durch äußere Belastungen hervorgerufenen Verformungen eines Achssystems aufgefasst. Hierbei fließen nicht nur die Elastizitäten aller Achskomponenten, sondern auch die topologische Gestaltung eines Achssystems mit ein [Mat07]. Für die Belastungen

- Radaufstandskraft,
- Längskraft im Radaufstandspunkt,
- Längskraft im Radmittelpunkt,
- Moment um die Radhochachse als auch
- Seitenkraft

muss das elastokinematische Verhalten dahin gehend optimiert werden [Mat07].

Sowohl die Kinematik als auch die Elastokinematik im Sinne der Fahrdynamik beschäftigen sich mit ausschließlich statischen Zuständen. Die Untersuchung der Auswirkungen von transienten Ereignissen auf die Achssystemebene gewinnt bezüglich des Fahrverhaltens zunehmend an Bedeutung, sodass die Berücksichtigung der **Kinetik** notwendig wird. Die Kinetik ist ein Teilgebiet der **Dynamik** und befasst sich im Gegensatz zur **Statik** mit tatsächlichen Bewegungen und den dabei auftretenden Kräften [GSW15].