

1 EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION

Die Automobilwirtschaft hat mit immer größeren Herausforderungen, wie z. B. neuen Umweltgesetzgebungen, demographischem Wandel etc., zu kämpfen [SR08], [Bra13], [MBK12]. Insbesondere die Premiumautomobilhersteller müssen diesen wechselnden Randbedingungen und den höheren Kundenwünschen gerecht werden. Die Premiumautomobilhersteller reagieren auf diese neuen Marktanforderungen mit einer Erweiterung des Produktportfolios und der Schließung von bestehenden Segmentlücken [Ren07]. Abbildung 1.1 zeigt einen Überblick über die Entwicklung der Fahrzeugderivateanzahlen des deutschen Automobilherstellers BMW AG inklusive der Submarke BMW i und den Marken Mini sowie Rolls-Royce.

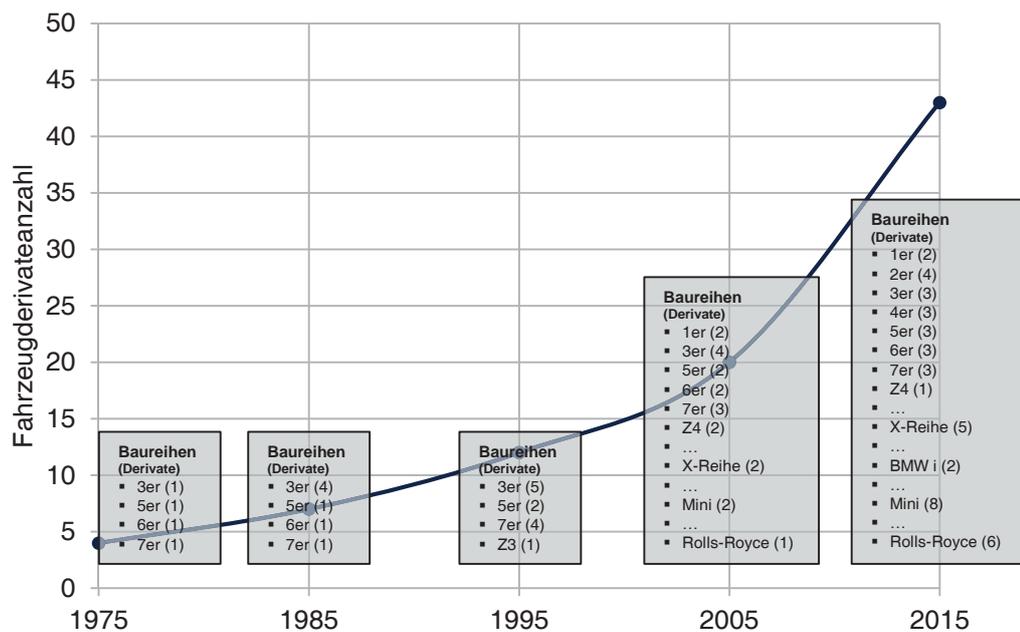


Abbildung 1.1: Entwicklung der Fahrzeugderivateanzahl der BMW AG über der Zeit

Der zuvor beschriebene Trend ist deutlich erkennbar. Im Zeitraum von 1975 bis 1995 stieg die Zahl der Fahrzeugderivate nur gering an. Ab 1995 ist ein deutlicher Anstieg der Zahl der Derivate erkennbar und erlebt im Jahr 2015 mit 43 Fahrzeugen vorerst einen Höhepunkt. Innerhalb dieser Auswertung sind weder Motorvarianten noch spezielle Fahrzeugderivate für den chinesischen Markt berücksichtigt, die eine weitere Dimension von Komplexität und Varianz darstellen.

Die Automobilunternehmen benötigen Lösungen und Strategien, um die Entwicklungszyklen zu verkürzen und die Entwicklungskosten zur Sicherstellung der Unternehmensrentabilität zu senken, da sonst die hohe Fahrzeugderivateanzahl nicht handhabbar ist. Es sind daher Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, die eine effiziente Fahrzeugentwicklung ermöglichen und etablierte Entwicklungsprozesse und Paradigmen teilweise in Frage stellen bzw. neu definieren.

Ein weiterer Trend ist der Einsatz von Fahrwerkregelsystemen, um den Zielkonflikt zwischen Fahrdynamik sowie Fahrkomfort aufzulösen [MW04], [HEG11] und so die Kundenfunktionalität weiter zu steigern [Ise06], [LKS00]. In Abbildung 1.2 ist ein Überblick über die Anzahl der Fahrwerkregelsysteme bei der BMW AG über der Zeit dargestellt. Somit hat sich die Fahrwerkregelsystemanzahl von 1975 bis 2015 versiebenfacht. Im Jahr 1975 existierten die hydropneumatische Niveauregulierung (Hydr. Niv.) und das Antiblockiersystem (ABS) bei der BMW AG. Heutzutage sind elektromechanische oder hydraulische Fahrwerkregelsysteme, wie z. B. eine elektromechanische Lenkung (EPS), elektronisches Stabilitätsprogramm (DSC) oder aktive Wankstabilisatoren (ARS), nicht mehr wegzudenken.

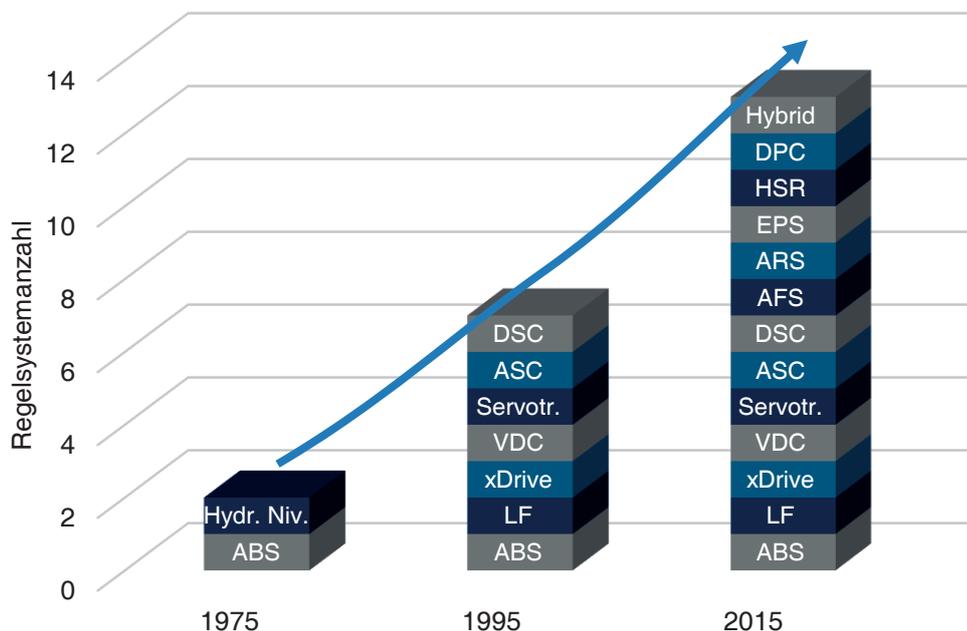


Abbildung 1.2: Entwicklung der Regelsystemanzahl bei der BMW AG über der Zeit

Um den maximalen Kundennutzen darzustellen, ist eine Vernetzung der Fahrwerkregelsysteme notwendig, um so Synergien zu ermöglichen und Schwächen zu kompensieren. Somit steigt die Komplexität innerhalb der Fahrzeugentwicklung und ist streng

genommen gegenläufig zu dem Ziel der Verkürzung von Entwicklungszyklen [MW13], [Die09].

Zur Erreichung eines effizienten Entwicklungsprozesses trotz steigender Fahrzeug- bzw. Derivateanzahlen und steigender Komplexität durch Fahrwerkregelsysteme bekommen numerische Simulationsmethoden immer höhere Bedeutung, da so ein Frontloading innerhalb des Entwicklungsprozesses möglich ist und die Entwicklungszeit reduziert werden kann [VWB⁺09], [Wal95], [SR08]. Ein Grund für den Einsatz numerischer Simulationsmethoden ist die stetig steigende Rechenkapazität [Moo65] und damit die effiziente Anwendbarkeit solcher Werkzeuge. Darüber hinaus können Simulationsmethoden wesentlich früher und kostengünstiger in der frühen Entwicklungsphase eingesetzt werden, um so die Entwicklungsreife innerhalb der Konzeptentwicklungsphase zu steigern sowie eine Beschleunigung des Entwicklungsprozesses zu erreichen. Hinsichtlich der steigenden Komplexität ermöglicht der Einsatz virtueller Methoden eine effiziente Möglichkeit, Wissen über das Zusammenspiel unterschiedlicher Fahrwerkregelsysteme etwa durch Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen aufzubauen. Weiterhin bietet die virtuelle Betrachtung eine ganzheitliche Beurteilungs- und Bewertungsmöglichkeit von Fahrzeugarchitekturen und deren Derivaten. So ist es möglich, Entwicklungszeit, aber auch die Anzahl kostenintensiver Prototypen und deren Nutzungsdauer zu reduzieren. Eine Abschaffung von Prototypen kann dabei kein Ziel sein, da Simulationsmodelle immer eine Abstraktion der Realität darstellen [Sta73], [VWB⁺09].

Zusammenfassend ist eine Neugestaltung des Entwicklungsprozesses notwendig, der die klassische Entwicklung im Fahrzeug mit den neuen Möglichkeiten numerischer Simulationsmethoden in Einklang bringt. Ebenso ist der zunehmenden Bedeutung von Fahrwerkregelsystemen innerhalb des Entwicklungsprozesses Rechnung zu tragen. Eigenheiten und Charakteristika der Regelsysteme müssen berücksichtigt werden. Ein weiterer offener Punkt ist die Fokussierung auf die Konzeptentwicklung, da in dieser Entwicklungsphase oft noch Potenziale für eine effiziente Entwicklung ungenutzt sind. Der frühzeitigere Einsatz virtueller Methoden ermöglicht frühe Entscheidungen und spart teure Änderungskosten in der Serienentwicklung. Ein weiterer Aspekt ist die Reduzierung von kostenintensiven Fahrzeugprototypen durch die Möglichkeit einer ganzheitlichen Betrachtung der Fahrzeugarchitektur.

1.2 ZIELSETZUNG

Bevor auf die detaillierte Darstellung der Ziele dieser Arbeit eingegangen wird, sollen zunächst die Prämissen und die Grundvoraussetzungen erläutert werden. Die Arbeit setzt eine Objektivierung der Fahrzeugeigenschaften voraus, d. h. es existiert eine objektive Beschreibung der Fahrzeugcharakteristika, die sowohl für passive als auch aktive Fahrzeuge gültig ist. Die verwendeten Fahrzeug- und Systemmodelle sind z. B. in [KPD⁺06] validiert worden und dienen daher als Grundlage bzw. Referenzverhalten für die Erstellung dieser Arbeit.

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung von Methoden und Werkzeugen zur effizienteren Auslegung von Fahrwerkregelsystemen für Fahrzeugarchitekturen in der frühen Entwicklungsphase. Die Effizienzsteigerung wird zum Einen durch die Systematisierung

des linken Astes des V-Modells erreicht und ergänzt die etablierte Entwicklungsmethodik, die den Standard für die Fahrwerksentwicklung im Automobilbereich darstellt. Zum Anderen sollen die Erweiterungen eine zielgerichtete und geführte Auslegung von Fahrwerkregelsystemen und den frühzeitigeren Einsatz von Regelsystemmodellen ermöglichen. Somit wird eine ganzheitliche Betrachtung der Fahrwerkregelsysteme im Kontext der Fahrzeugarchitekturen möglich.

Die vorgestellten Weiterentwicklungen sollen unmittelbar in der frühen Entwicklungsphase eingesetzt werden und ergänzen den bestehenden Entwicklungsprozess.

Das Hauptziel einer Systematisierung des linken Astes des V-Modells lässt sich somit in folgende Teilziele gliedern:

- Erarbeitung einer funktionsorientierten Entwicklungsmethodik für Fahrwerkregelsysteme
- Integration der neuentwickelten Methoden und Werkzeuge in den existierenden Entwicklungsprozess
- Entwicklung eines generischen Vorgehens zur systematischen Auslegung von Fahrwerkregelsystemen in der frühen Entwicklungsphase
- Entwicklung eines Wissensmanagementsystems für Regelsystemfunktionen wie auch Regelsysteme
- Entwicklung von Methoden zur Ableitung der phasenadäquaten Modellierungstiefe und -genauigkeit
- Berücksichtigung von Robustheitsanforderungen innerhalb der Gesamtfahrzeugauslegung

1.3 AUFBAU DER ARBEIT

Ein Gesamtüberblick über die vorliegende Arbeit wird in Abbildung 1.3 gegeben. Insbesondere werden auch hier die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Kapiteln dieser Arbeit gezeigt.

Im Einleitungskapitel (Kapitel 1) wird die Motivation zur Durchführung und zur Notwendigkeit dieser Arbeit dargestellt. Kapitel 1 gibt einen Literaturüberblick über fachverwandte Themen und eine Abgrenzung zu den existierenden Arbeiten. Anhand der Motivation und des Literaturüberblicks wird die Zielsetzung der Arbeit definiert. Des Weiteren werden die zum Verständnis der Arbeit notwendigen Begrifflichkeiten erläutert.

In Kapitel 2 wird die in der Automobilentwicklung etablierte Entwicklungsmethodik vorgestellt, mit welcher der Übergang zur funktionsorientierten Sicht und die Integration der Fahrwerkregelsystemcharakteristika vollzogen werden. Letztlich wird die funktionale Grundausslegung mit ihren Methoden und Prozessen in die neue funktionsorientierte Entwicklungsmethodik zur effizienten Fahrwerkregelsystemauslegung eingegliedert.

Kapitel 3 greift eine neue Methode der funktionalen Grundausslegung auf. Insbesondere werden ein Rahmenwerk zur Entwicklung eines Wissensmanagementsystems für

Fahrzeugregelungsfunktionen und Fahrwerkregelsysteme definiert und die Anwendung des Rahmenwerks anhand praxisrelevanter Anwendungsbeispiele dargestellt.

Das vierte Kapitel führt eine generische Methode zur Entwicklung einer stationären Funktionsauslegung ein. Das Konzept und das Vorgehen werden anhand von drei Anwendungsbeispielen erläutert und bestätigt.

In Kapitel 5 wird die Methodik zur Generierung von dynamischen Funktionsmodellen erläutert. Mittels der generischen Methode und nützlicher Analysemethoden werden drei Funktionsmodelle für die Funktionen adaptive Niveauregulierung, aktive Wankstabilisierung und adaptive Aufbaubedämpfung entwickelt.

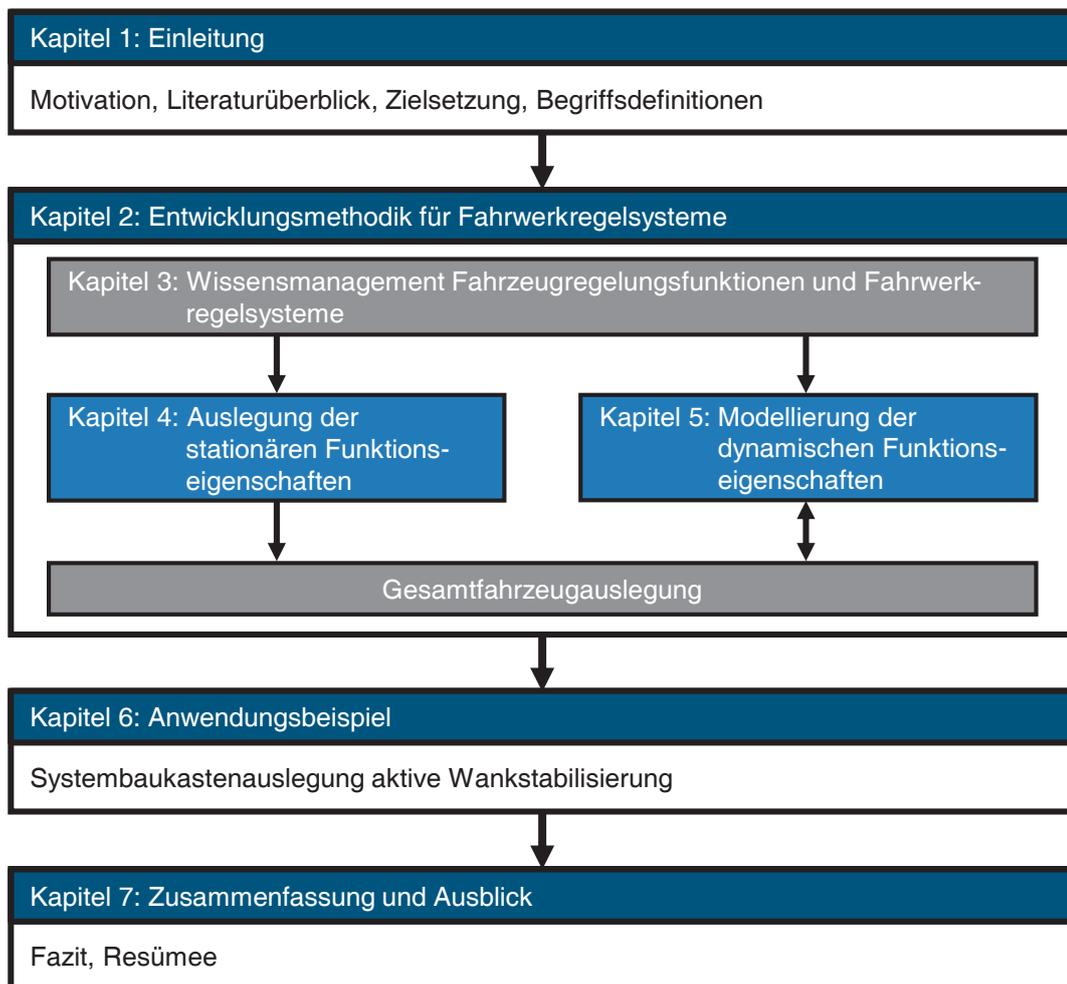


Abbildung 1.3: Struktur der Arbeit

Abschließend werden die neue funktionsorientierte Entwicklungsmethodik für Fahrwerkregelsysteme und insbesondere das Zusammenspiel der Elemente der funktionalen Grundauslegung innerhalb eines Anwendungsbeispiels in Kapitel 6 gezeigt. Beim Anwendungsbeispiel werden die Systemanforderungen für die Funktion aktive Wankstabilisierung für zwei Fahrzeugprojekte von Fahrzeugzieleigenschaften abgeleitet. Die Vorteile der neuen Methoden werden entsprechend erläutert und die Gesamtmethodik bestätigt.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick für weitere Arbeiten in Kapitel 7. Die Ergebnisse werden diskutiert und die wichtigsten Erkenntnisse dargelegt.

1.4 BEGRIFFSDEFINITIONEN

Eigenschaft

Eine Eigenschaft stellt eine Charakterisierung des Systems oder der Funktion dar. Notwendige Eigenschaften werden in Form von Anforderungen festgehalten [LMB09]. Innerhalb dieser Arbeit werden Eigenschaften als realisierungsunabhängig betrachtet. Sie sind quantifizier- sowie messbar und repräsentieren physikalische Systemeigenschaften.

Funktion

In [PL11] umfassen Funktionen eine lösungsneutrale Beschreibung des Systemzwecks oder -elements. Im Kontext der Fahrwerkregelsysteme ist unter dem Funktionsbegriff eine Regelungsfunktion auf Fahrzeugebene zu verstehen, die Systemanforderungen (Funktionsausgang) in Abhängigkeit von Fahrzeuggrößen (Funktionseingang) bestimmt. LÜCKEL et al. nennen in [LKS00] die Regelfunktion auch Informationsverarbeitung in ihrer hierarchischen Struktur auf Systemebene, d. h. verkoppelte Grundbausteine mechatronischer Systeme. Eine Funktion kann durch mehrere Teilfunktionen realisiert sein [PBF⁺05], [Ehr95], [PL11].

Funktionale Anforderung

Die geforderten Eigenschaften eines Produkts werden als Anforderung bezeichnet [PL11]. Eine Anforderung kann dabei z. B. geometrische, funktionale oder andere Eigenschaften umfassen [ERZ14], [Par10]. Die funktionale Anforderung umfasst ausschließlich die funktionalen Eigenschaften des Systemverhaltens.

Führungs- und Störverhalten

Das Führungsverhalten bezeichnet das Verhalten des Standardregelkreises zwischen Führungsgröße bzw. Eingang $u(t)$ und der Regelgröße resp. Ausgang $y(t)$ unter Vernachlässigung der Störgröße $z(t) = 0$ [DIN12]. Mithilfe der Laplace-Transformation lautet die Führungsübertragungsfunktion im Frequenzbereich:

$$G_{\text{Fuehrung}}(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}. \quad (1.1)$$

Entsprechend wird das Störverhalten des Standardregelkreisverhaltens zwischen Störgröße $z(t)$ und Regelgröße $y(t)$ unter Vernachlässigung der Führungsgröße $u(t) = 0$ definiert [DIN12]. Im Frequenzbereich lautet die Störübertragungsfunktion:

$$G_{\text{Stoerung}}(s) = \frac{Y(s)}{Z(s)}. \quad (1.2)$$

Die entsprechenden Größen sind in Abbildung 1.4 im Standardregelkreis inklusive der Bestandteile des Regelkreises Regler, Regelstrecke und Messeinrichtung bzw. Sensor dargestellt [Föl08].

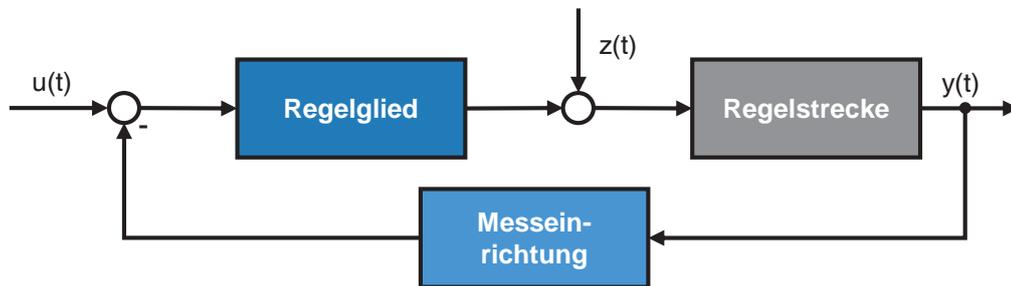


Abbildung 1.4: Standardregelkreis in Anlehnung an [Föl08]

Sowohl das Führungs- als auch das Störverhalten dienen zur elementaren Charakterisierung von mechatronischen Systemen und Regelkreisen.

Grundausslegung

Die Grundausslegung ist ein Teil des im V-Modell definierten Systementwurfs [VDI04]. Ziel der Grundausslegung ist ein erster Konzeptentwurf des Systems und die Definition der wesentlichen funktionalen Systemanforderungen für das Systemlastenheft.

Mechatronisches System

Ein mechatronisches System gliedert sich nach [VDI04] in die vier notwendigen Bestandteile Grundsystem, Aktoren, Sensoren und Informationsverarbeitung. Diese vier Grundbausteine können miteinander interagieren und sind über Energie-, Informations- und Stofffluss verknüpft [PBF⁺05]. Die Grundstruktur des mechatronischen Systems ist in Abbildung 1.5 dargestellt.

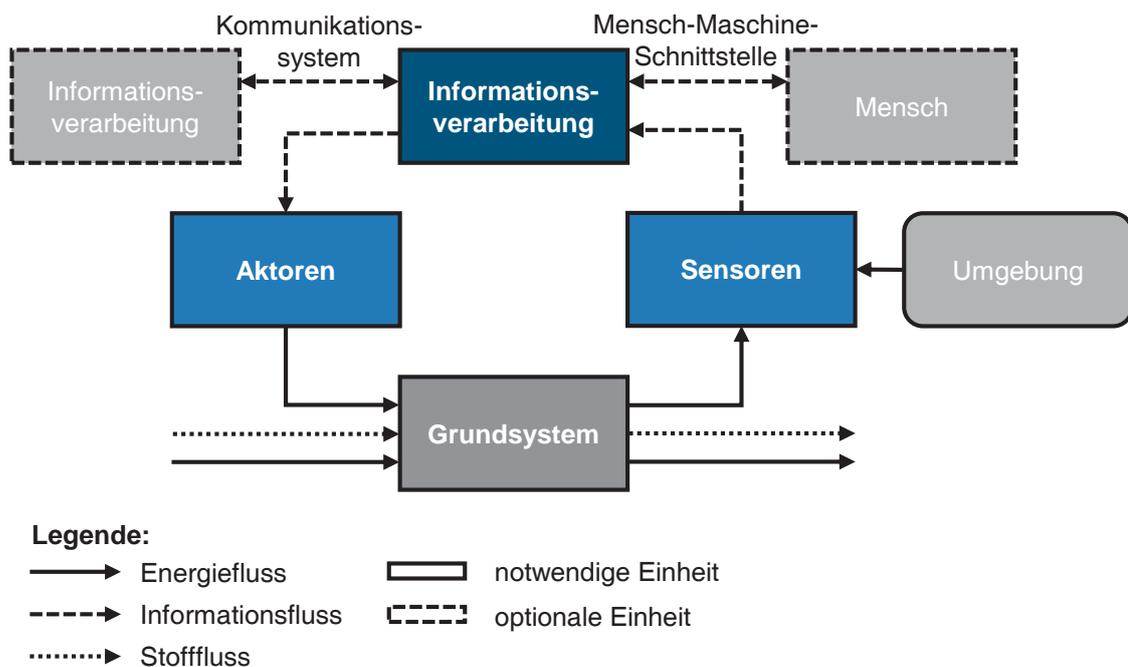


Abbildung 1.5: Grundstruktur eines mechatronischen Systems in Anlehnung an [VDI04]

Weitere optionale Einheiten sind die Fahrprogrammauswahl durch den Menschen oder auch weitere Informationsverarbeitungen auf höheren Hierarchieebenen, wie z. B. Car2X-Kommunikation.

System

Ein System stellt eine Menge von interagierenden Elementen dar, die durch eine Hüllfläche gegenüber der Umgebung abgegrenzt sind [DIN12]. Die Hüllfläche wird auch als Systemgrenze bezeichnet. Ein System besitzt einen Eingang $u(t)$ und einen Ausgang $y(t)$, die eine Verknüpfung mit weiteren Systemen ermöglichen. Der innere Zustand $x(t)$ charakterisiert die Systemeigenschaften innerhalb der gewählten Systemgrenze. Die Systemdefinition wird in Abbildung 1.6 veranschaulicht.

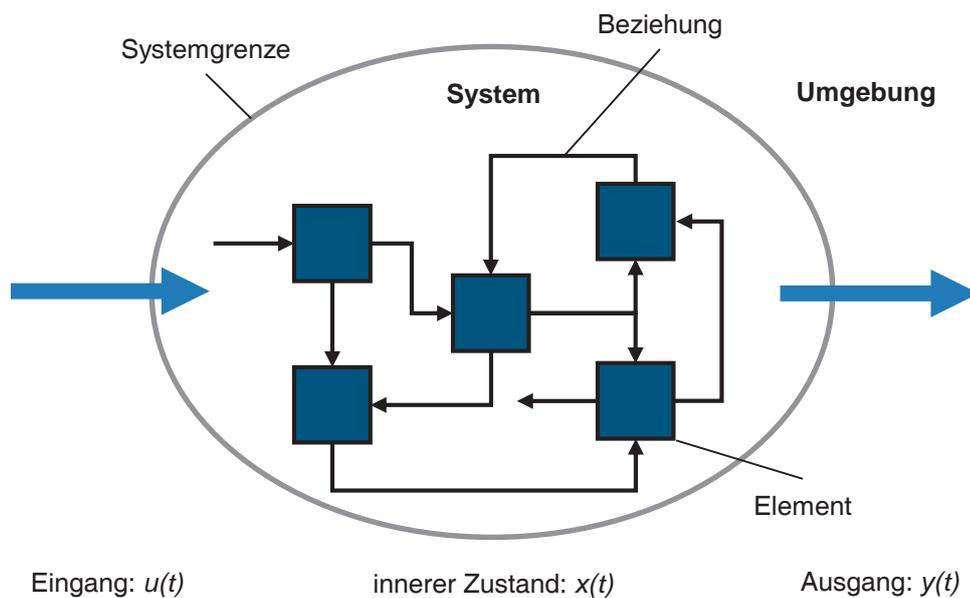


Abbildung 1.6: Veranschaulichung der Systemdefinition

Wirkkette

Eine Wirkkette beschreibt den physikalischen Zusammenhang zwischen einer Eingangs- und einer Ausgangsgröße über unterschiedliche Hierarchieebenen und ggf. deren Systemgrenzen hinweg. Die Detaillierungsstufen der Wirkkette werden anwendungsspezifisch abgeleitet. Eine Nutzung aggregierter Eigenschaften ist möglich.

1.5 FAHRMANÖVER UND FAHRDYNAMIKOBJEKTIVIERUNG

Die Fahrdynamikobjektivierung umfasst die durchgeführten Fahrmanöver und die jeweiligen charakteristischen Fahrzeuggrößen (CV) des Fahrmanövers zur Bewertung des Fahrzeugverhaltens. In [ISO13] werden die Koordinatensysteme des Fahrzeugs definiert, die innerhalb dieser Arbeit eingesetzt werden. Von den stationären bzw. quasi-stationären Fahrmanövern hin zu dynamischen Fahrmanövern wird die Beurteilung der relevanten Fahrdynamik erläutert. Die dritte Gruppe stellen die Manöver zur Beurteilung des Fahrkomforts dar.

STATIONÄRE KREISFAHRT

Das Fahrmanöver stationäre Kreisfahrt dient der Beurteilung der stationären Fahreigenschaften, und die Durchführung ist in [ISO04] genormt. Auf einem fest vorgegebenen Kreisradius R werden verschiedene Fahrzeuggeschwindigkeiten v_x bei unterschiedlichen Lenkradwinkeln δ_H zur Erreichung unterschiedlicher Querbeschleunigungen a_y gefahren. Die Geschwindigkeitssteigerung findet so lange statt, bis das Fahrzeug nicht mehr in der Lage ist, der Kreisbahn zu folgen. Folgende Fahrzeuggrößen über der Querbeschleunigung werden zur Bewertung des Fahrzeugverhaltens herangezogen:

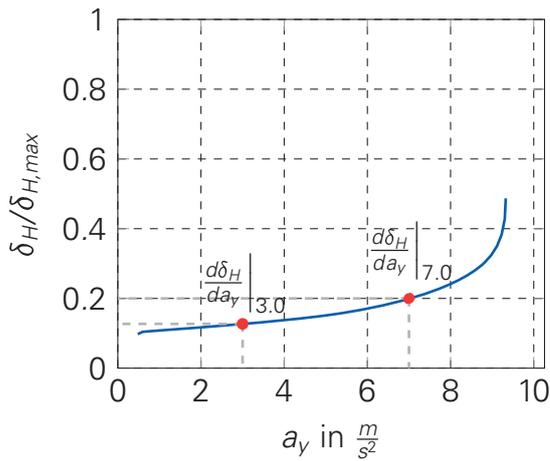
- Lenkradwinkel δ_H ,
- Schwimmwinkel β und
- Wankwinkel φ .

Ein exemplarisches Fahrzeugverhalten ist in Abbildung 1.7 gezeigt. Innerhalb der Fahrzeugtechnik werden objektive charakteristische Werte (CV) zur Beurteilung des subjektiven Fahrverhaltens eingesetzt [HB02]. Innerhalb des Fahrmanövers werden unterschiedliche Querbeschleunigungsbereiche, wie der Linear- und der Grenzbereich, durchfahren.

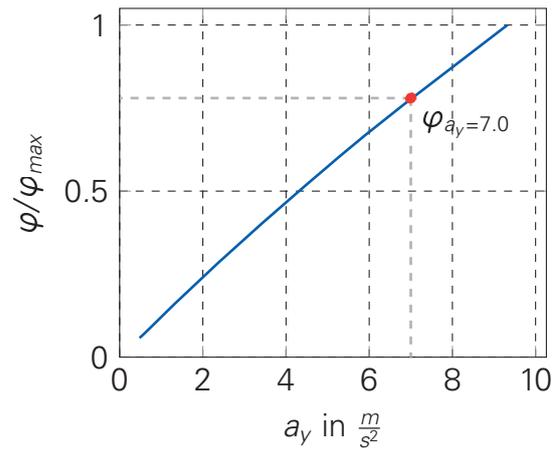
Für das Manöver einer stationären Kreisfahrt werden z. B. folgende Kennwerte in den erwähnten Bereichen ermittelt [MW04], [DSH+06]:

- Lenkradwinkelgradient im Linear- $\left. \frac{d\delta_H}{da_y} \right|_{3.0}$ und im Grenzbereich $\left. \frac{d\delta_H}{da_y} \right|_{7.0}$,
- Schwimmwinkelgradient im Linearbereich $\left. \frac{d\beta}{da_y} \right|_{3.0}$,
- Schwimmwinkel bei der maximalen Querbeschleunigung $\beta_{a_y,max}$,
- Wankwinkelgradient im Linearbereich $\left. \frac{d\varphi}{da_y} \right|_{3.0}$,
- Wankwinkel bei den diskreten Querbeschleunigungen $\varphi_{a_y=4.0}$ und $\varphi_{a_y=7.0}$ sowie
- maximale Querbeschleunigung $a_{y,max}$.

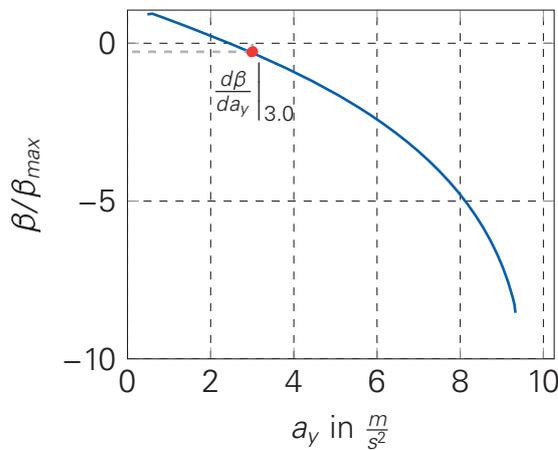
Alternativ zur stationären Kreisfahrt kann eine Lenkradwinkelrampe als Fahrmanöver zur Bewertung der stationären Fahrzeugeigenschaften genutzt werden. Die Geschwindigkeit wird bei diesem Manöver konstant gehalten und der Lenkradwinkel entsprechend gesteigert [Zom91].



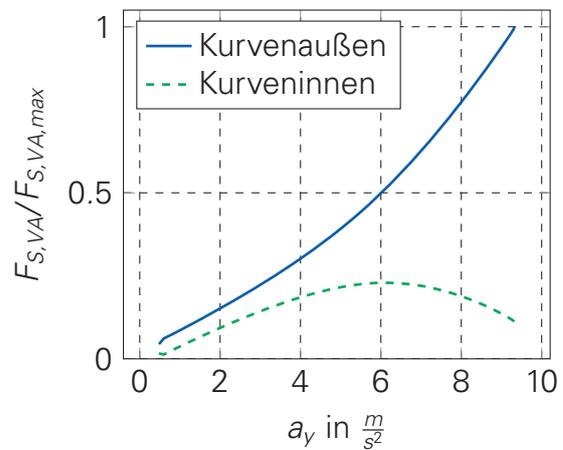
(a) Lenkradwinkel über Querbeschleunigung



(b) Wankwinkel über Querbeschleunigung



(c) Schwimmwinkel über Querbeschleunigung



(d) Seitenkraft über Querbeschleunigung

Abbildung 1.7: Exemplarisches Fahrzeugverhalten bei einer stationären Kreisfahrt