

1. Einleitung

Die zunehmenden Kundenansprüche an Sicherheit, Handlungseigenschaften und Fahrkomfort von Fahrzeugen lassen sich zukünftig nur durch den Einsatz aktiver mechatronischer Regelsysteme realisieren. Diese Anforderungen können durch die bisherigen passiven Fahrwerke nicht mehr bzw. nur noch mit sehr hohem Aufwand umgesetzt werden.

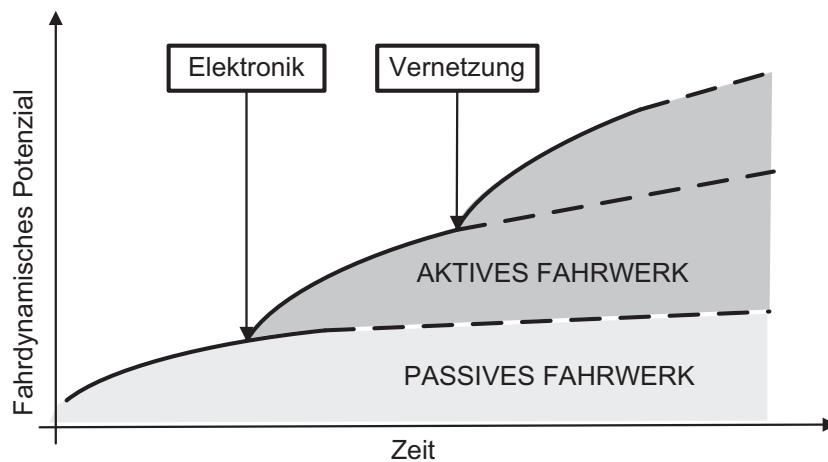


Bild 1.1: Technologiekurve des fahrdynamischen Potenzials im Wandel der Zeit [1–4]

Die Entwicklung des fahrdynamischen Potenzials zeigt Bild 1.1. Dieses ist bei konventionellen, passiven Fahrwerken weitestgehend ausgeschöpft. Innovationen in diesem Bereich lassen sich nur noch mit sehr hohem personellem und finanziellem Aufwand realisieren. Permanent steigende Anforderungen (Kundenanspruch, Testmethoden der Journalisten, Gesetze usw.) führen dazu, dass in der Fahrzeugentwicklung ein Technologiesprung vom passiven zum aktiven Fahrwerk vollzogen werden muss, um sich gegenüber dem Wettbewerb weiter differenzieren und die Sicherheit von Fahrzeugen weiter steigern zu können.

Durch den Einsatz der Mechatronik lassen sich neue innovative Funktionalitäten darstellen. Zielkonflikte und Kompromisse, die bei der Entwicklung klassischer mechanischer Fahrwerke in Kauf genommen werden müssen, lassen sich dadurch auflösen. Eine zunehmende Vernetzung der aktiven fahrdynamischen Regelsysteme ermöglicht eine gesamtheitliche Optimierung der Fahrdynamik.

Durch den Einsatz von aktiven fahrdynamischen Regelsystemen steigen die Komplexität und die Sicherheitsanforderungen, die an solche Systeme zu stellen sind. Diese gilt es im Produktentwicklungsprozess zu beherrschen, um sicherheitskritische Fehlfunktionen im Feld zu vermeiden. In Anlehnung an die Entwicklungsmethoden und -normen anderer Branchen (Luftfahrt, Raumfahrt, Schienenverkehr...) gibt es derzeit Bestrebungen, diese auf den automobilen Entwicklungsprozess zu adaptieren und zertifizieren. Dabei steht die Automobilindustrie noch am Anfang, vor allem was die Sicherheitsintegrität aus Sicht des Fahrers betrifft.

Im Fokus dieser Arbeit steht ein sicherheitsgerichteter Entwicklungsprozess der Gesamtfahrzeugeigenschaften aus Sicht des Fahrers. Dieser wird am Beispiel eines aktiven Lenksystems aufgezeigt. Der Fahrer erwartet durch den Einsatz von aktiven fahrdynamischen Regelsystemen einen deutlichen Mehrwert des Fahrzeugs und des Fahrverhaltens. Dieser kann durch erweiterte Funktionalitäten zur Erhöhung der Qualität und Sicherheit generiert werden. Für den Entwickler gilt es die Sicherheits- bzw. Fahreranforderungen an die jeweiligen Regelsysteme zu ermitteln und den Zielkonflikt zwischen Verfügbarkeit und Sicherheit zu minimieren.

1.1 Motivation

Die Herausforderung in der Entwicklung aktiver fahrdynamischer Regelsysteme im Allgemeinen und aktiver Lenksysteme im Speziellen wird am Beispiel eines Überlagerungslenkensystems, Bild 1.2, deutlich.

Im Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Fahrdynamikregelung ist der Fahrer als Regler für die Kurshaltung verantwortlich. Um dem Soll-Kurs (Straßenverlauf) zu folgen, gibt der Fahrer über das Lenkrad einen Lenkradwinkel vor, der durch das Lenksystem in einen Radlenkwinkel umgesetzt wird. Dies führt zu einer Reaktion des Fahrzeugs, das einem Ist-Kurs folgt. Über optische, kinästhetische und haptische Informationen ermittelt der Fahrer die Regeldifferenz zwischen Soll-Kurs und Ist-Kurs und versucht diese zu minimieren.

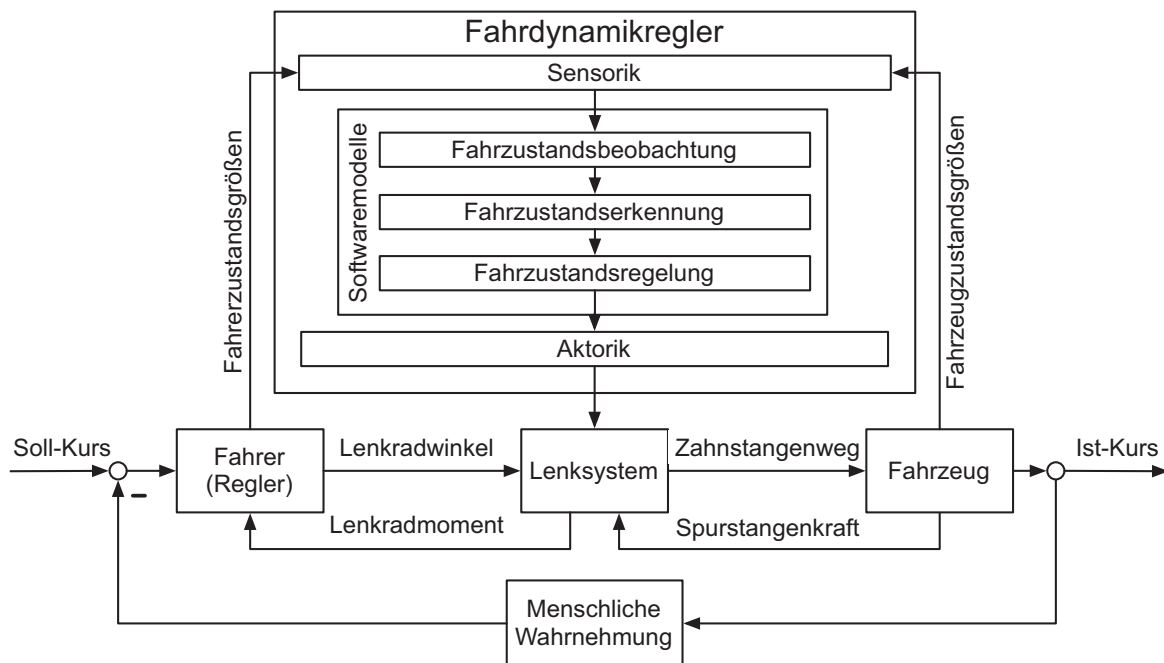


Bild 1.2: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Fahrdynamikregelung (in Anlehnung an [5])

Bei der Integration eines Fahrdynamikreglers für ein Überlagerungslenkensystem ist der Fahrer nicht mehr der alleinige Regler im System. Durch steuernde (z.B. variable Lenkübersetzung, Vorhaltelenkung etc.) und regelnde (z.B. Gierratenregelung) Anteile optimiert der Fahrdynamikregler die Lenkvorgaben des Fahrers, siehe auch Kapitel 3.

Reagiert das System fehlerhaft, muss der Fahrer in der Lage sein, das Fahrzeug unter Kontrolle zu behalten. So muss ein Systemfehler über eine geeignete Fail-Safe Strategie in einen „sicheren Zustand“ überführt werden. Dieser liegt vor, wenn die Stabilität des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug erhalten bleibt. Es muss die Fahraufgabe unter vorgegebenen Bedingungen für ein gegebenes Zeitintervall **innerhalb eines Akzeptanzbereichs** ausgeführt werden können [6, 7]. Da bisher wenige Erkenntnisse über die Reaktion des Fahrers auf Störungen eines aktiven Lenksystems und dessen Auswirkungen auf die Stabilität des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug vorliegen, wird in dieser Arbeit eine Versuchsreihe konzipiert, um diese Wechselwirkungen zu untersuchen. Darin werden die von Normalfahrern maximal tolerierten Systemfehler eines Überlagerungslenksystems, sowohl im Normalfahrbereich, als auch im Bereich der Fahrdynamikregelung ermittelt. Abgeleitet aus diesen Ergebnissen wird ein Ansatz zur Objektivierung der subjektiven Beurteilung von Lenksystemstörungen vorgestellt, der eine einfache Überprüfung von Lenksystemfehlern in zukünftigen Anwendungen und Fahrzeugen ermöglicht, sowie die Ableitung technischer Anforderungen an die Sensorik von Überlagerungslenksystemen gewährleistet.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Ansatzes zur Ermittlung der sicherheitsrelevanten Anforderungen an ein aktives fahrdynamisches Regelsystem – aktives Überlagerungslenksystem – aus Sicht des Fahrers.

Auf der Basis von Probandenstudien wird ein im Stand der Technik bekanntes Objektivierungsverfahren vorgestellt und diskutiert, sowie ein neues entwickelt. Dieses ermöglicht die objektive Ermittlung sicherheitsrelevanter Fehlfunktionen eines Überlagerungslenksystems aus den in den Probandenstudien gewonnenen subjektiven Fahrereinschätzungen. Abschließend wird ein Ansatz vorgestellt, der die Ableitung konkreter Anforderungen an Sensorik, Signaldatenaufbereitung (SDA) und Überwachungsfunktionen an ein Überlagerungslenksystem ermöglicht.

Aus der dargestellten Motivation ergeben sich für diese Arbeit folgende Zielsetzungen und Fragestellungen:

- Welche Systemfehler und Rückfallebenen eines Überlagerungslenksystems im Normalfahrbereich und in fahrdynamisch kritischen Situationen sind für den Normalfahrer tolerierbar und welches Optimierungspotenzial lässt sich daraus ableiten?
- Welche Informationsgrößen sind für den Fahrer wesentlich, um sich ein Urteil zur Bewertung der Kritikalität von Systemfehlern eines Überlagerungslenksystems bilden zu können und wie können diese mit dem Ziel eines objektiven Testverfahrens abgebildet werden?
- Welche Anforderungen müssen auf der Basis der erarbeiteten Erkenntnisse an Sensorik, Signaldatenaufbereitung (SDA) und Überwachungsfunktionen gestellt werden?

Die Vorgehensweise zur Beantwortung der gestellten Fragestellungen ist im Folgenden aufgeführt.

Im Kapitel 2 wird der Stand der Technik als Basis dieser Arbeit in vier Themengebieten erläutert. Ausgehend von einer umfassenden Beschreibung der Kfz-Lenkungstechnik und der Klärung der Rolle des Fahrers als Regler in der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, wird in einem

weiteren Themengebiet die Entwicklung sicherheitsrelevanter Systeme erörtert. Die Darstellung etablierter Entwicklungsmethoden, Standards und der derzeitigen Normenlandschaft im Rahmen eines sicherheitsgerichteten Entwicklungsprozesses auch aus funktionaler Sicht erfolgt abschliessend.

Kapitel 3 zeigt den Aufbau und möglichen Funktionsumfang eines Überlagerungslenksystems. Anhand von schematischen Darstellungen werden die Komponenten und deren Anordnung erklärt. Der Funktionsumfang wird in die Bereiche Agilitäts-, Stabilitäts- und Fahrerassistenzfunktionen untergliedert und hinsichtlich der Auswirkungen auf die Fahrdynamik vorgestellt.

In Kapitel 4 wird die empirische Untersuchung von Lenksystemstörungen eines Überlagerungslenksystems aus Fahrersicht im Normalfahrbereich und in fahrdynamisch kritischen Situationen vorgestellt. Basierend auf Untersuchungshypothesen, wird die allgemeine Untersuchungsmethodik zur Quantifizierung maximal tolerierbarer Fehlerbilder und Rückfallebenen eines Überlagerungslenksystems erläutert. Dabei werden die Anforderungen an die Untersuchungsmethodik und deren Umsetzung vorgestellt sowie die subjektiven und objektiven Bewertungskriterien im Zusammenhang mit dem Auswertungsprozedere der Versuchsdaten aufgezeigt. Im Weiteren werden der Versuchsaufbau und das Versuchsdesign zur Ermittlung der maximal tolerierbaren Fehlerbilder und Rückfallebenen eines Überlagerungslenksystems im Normalfahrbereich und in fahrdynamisch kritischen Situationen beschrieben. Dabei werden das fahrsituationsspezifische Versuchsdesign im Detail erläutert und die relevanten Fehlerbilder aufgezeigt. Die sich daraus ergebenden subjektiven und objektiven Bewertungen der jeweiligen Fehlerbilder werden im Folgenden dargestellt und im Einzelnen diskutiert. Abschließend werden auf der Basis eines bereits im Stand der Technik bekannten Bewertungsverfahrens objektive Grenzwerte ermittelt und die Ergebnisse in einer Zusammenfassung kritisch gegenübergestellt.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 4 wird in Kapitel 5 ein Objektivierungsverfahren vorgestellt, das die Überprüfung von Fehlerbildern eines Überlagerungslenksystems in Open-Loop Fahrmanövern ermöglicht, um Anzahl an Probandenstudien zu vermeiden. Auf der Basis der Messwerte aus der in Kapitel 4 durchgeführten Probandenstudie werden aus fahrzeug- und fahrerrelevanten Kennparametern urteilsrelevante Informationsgrößen zur Bewertung der Kritikalität von Überlagerungslenksystemfehlern im Zeit- und Frequenzbereich ermittelt. Diese werden über ein neu entwickeltes Bewertungsverfahren hinsichtlich ihrer Urteilsrelevanz analysiert und in einem Random Forest Klassifikator abgebildet. Dieser bildet die Grundlage, um Fehlerbilder von Überlagerungslenksystemen in einem Open-Loop-Ansatz zukünftig bewerten und absichern zu können.

Im Kapitel 6 wird basierend auf den tolerierbaren Systemreaktionen eines Überlagerungslenksystems ein neuer Ansatz vorgestellt, der eine simulative Ermittlung konkreter Anforderungen an Sensorik, Signaldataaufbereitung (SDA) und Überwachungsfunktionen eines aktiven fahrdynamischen Regelsystems ermöglicht.