

Fahrdynamiksimulation in der Frühen Phase zur Auslegung und Beurteilung von Regelsystemen

Dr.-Ing. **S. Beiker**, BMW Group, München

1. Einleitung

Der Standard heutiger Pkw ist u.a. durch stetig zunehmende Kundenerwartungen kontinuierlich gestiegen. Eine Differenzierung der Wettbewerber am Markt soll zunehmend durch Innovationen, also durch für den Kunden neue und erlebbare Fahrzeugsysteme, erreicht werden. Zusätzlich besteht in der Automobilindustrie die Forderung nach kürzeren Entwicklungszeiten. Aus diesen Randbedingungen ergibt sich, dass neue Fahrzeugsysteme schon zu Beginn eines neuen Fahrzeugprojektes sehr sorgfältig auszuwählen sind, da die kurzen Entwicklungszeiten kaum Möglichkeiten für grundlegende Änderungen lassen. Das gilt auch bzw. in besonderem Maße für Fahrwerksregelsysteme, deren Integration ins Fahrzeug sorgfältig vorzuplanen ist, da sie einen weitreichenden Einfluss auf das Package nehmen und zum großen Teil gemeinsam mit Zulieferern entwickelt werden. Obwohl zu Beginn eines Fahrzeugprojektes die Kenntnis über das spätere Gesamtfahrzeug noch mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet ist, können mit Simulationsrechnungen schon früh Aussagen getroffen werden, die den Entscheidungsprozess stützen. In diesem Bericht soll dieses am Beispiel fahrdynamischer Regelsysteme aufgezeigt werden.

2. Der Produktentstehungsprozess der BMW Group

Der Produktentstehungsprozess der BMW Group (vgl. Bild 1) ist in sechs Abschnitte aufgeteilt. Während die Abstimm-, Bestätigungs- und Reifephase die eigentliche Serienentwicklung beschreiben, werden bis zur Vorbereitungsphase „Schaufensterlösungen“ erarbeitet, über die dann im Rahmen eines Projektauftrages zur Serienentwicklung entschieden wird. Die Initial- und Konzeptphase wird als „Frühe Phase der Produktentwicklung“ bezeichnet, in der Varianten für das zukünftige Fahrzeug untersucht werden und letztlich das endgültige Gesamtkonzept festgelegt wird.

In der Initialphase wird zunächst ein Innovationskonzept erarbeitet, das die Anforderungen aus Markt- bzw. Kundensicht definiert und zu deren Umsetzung geeignete Innovationen vorschlägt. Zu diesem Zeitpunkt, spätestens jedoch in der anschließenden Konzeptphase, sind dementsprechend Aussagen gefordert, inwieweit die geforderten Eigenschaften durch die jeweiligen Innovationen, d.h. Fahrzeugkomponenten, zu erreichen sind und welche Kosten, Gewichte und Bauräume zu berücksichtigen sind.

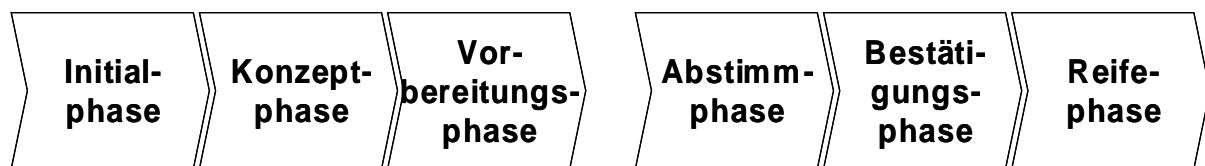


Bild 1: Phasenablauf des Produktentstehungsprozesses der BMW Group

3. Simulation fahrdynamischer Regelsysteme

An den folgenden Beispielen soll gezeigt werden, wie anhand erster Simulationsrechnungen des späteren Gesamtfahrzeugs Entscheidungen zur Auswahl fahrdynamischer Regelsysteme gestützt werden können. Es kann vorausgesagt werden, inwieweit die Fahreigenschaften des zukünftigen Fahrzeugs im Sinne des Kundennutzens beeinflussbar sind und mit welchen resultierenden Anforderungen daraus entwicklungs-, produktions- oder vertriebsseitig zu rechnen ist.

Kennlinienbasierte, modular aufgebaute Gesamtfahrzeugmodelle erlauben es, Konzeptauslegungen vergleichsweise schnell zu beurteilen. Da der Umfang der bekannten Fahrzeugparameter mit fortschreitendem Produktentstehungsprozess stetig zunimmt, kann die Abbildungsgenauigkeit des Modells laufend angepasst und die Aussagequalität gesteigert werden. Spätestens nach Definition der Radaufhängungen (Konzeptphase) ist es angebracht, fahrdynamische Regelsysteme wie Zusatzlenkungen oder Bremsregelsysteme zu evaluieren.

Neben der Modellierungsgenauigkeit ist bei der Beurteilung von Fahrzeugsystemen gleichermaßen auf die Aussagekraft der abgebildeten Fahrmanöver zu achten. Des-


wegen müssen sie so gewählt werden, dass sie möglichst umfassend die zu untersuchenden fahrdynamischen Bereiche abdecken.

Die genannten Fahrzeugmodelle lassen sich dann in eine regelungstechnische Simulationsumgebung einbinden, so dass Regelsysteme zielgerichtet analysiert und ausgelegt werden können. In einer derartigen Untersuchung ist es möglich, sowohl Grundauslegungen einzelner Systeme durchzuführen, als auch die Eigenschaften verschiedener Systeme und damit deren Kundennutzen zu beurteilen.

4. Fahrdynamische Regelsysteme und deren Zusammenwirken

In der vorliegenden Ausarbeitung [1], deren Ergebnisse hier zusammenfassend wiedergegeben werden, war zu untersuchen, wie die fahrdynamischen Eigenschaften eines Mittelklassefahrzeugs mit Standardantrieb zu verbessern sind. Da die Auslegung des passiven Fahrwerks neben dem Komfort stets einen Kompromiss zwischen Handlingeigenschaften und Stabilität treffen muss, wurde gefordert, diesen Konflikt durch aktive Systeme aufzubrechen und dem Kunden ein Höchstmaß an Fahrfreude und -sicherheit zu bieten. Darüber hinaus war zu untersuchen, inwiefern auch eine Fahrerunterstützung beim Parkieren ermöglicht werden kann.

Tabelle 1: Rechnerischer Vergleich fahrdynamischer Regelsysteme (Beispiel: Beschleunigen in der Kurve an der Grenze der Seitenführungskräfte mit den Größen Schwimmwinkel β , Gierwinkelgeschwindigkeitsänderung $\Delta\dot{\psi}$, Bahnabweichung Δs_y und Fahrgeschwindigkeitsänderung Δv)

	$\frac{ \beta _{\max}}{^\circ}$	$\frac{\Delta\dot{\psi}_{1s}}{^\circ \cdot s^{-1}}$	$\frac{\Delta s_{y5s}}{m}$	$\frac{\Delta v_{5s}}{km \cdot h^{-1}}$
Ausgangsfahrzeug	90,0	16,1	Fahrzeuge instabil	
Aktive Hinterachslenkung	90,0	13,6	keine Auswertung	
Aktive Vorderachslenkung	28,1	0,2	-4,4	6,8
Bremseneingriff	6,7	0,9	-0,2	11,6

Für diese Anwendungsfälle wurden zu Beginn des Entwicklungsprozesses aktive Lenksysteme an der Vorder- oder Hinterachse in Betracht gezogen. Von beiden Systemen wurde die Regelung der Gierwinkelgeschwindigkeit und eine Steuerung der Zusatzlenkwinkel in Abhängigkeit des Lenkradwinkels gefordert. Bei der aktiven Vor-

derachslenkung sollte der Zusatzlenkwinkel der Lenkbewegung des Fahrers mechanisch überlagert werden (Überlagerungslenkung) und wird damit, mechanisch betrachtet, ebenso unabhängig vom Lenkradwinkel wie bei der Hinterachslenkung.

Zur Beantwortung der o.g. Fragen wurde ein nichtlineares Zweispurmodell und ein regelungstechnisches Softwaresystem verwendet, um verschiedene Fahrzeugkonzepte rechnerisch zu analysieren (Beispiel s. Tabelle 1) und zur Veranschaulichung grafisch direkt gegenüberzustellen (Beispiel s. Bild 2).

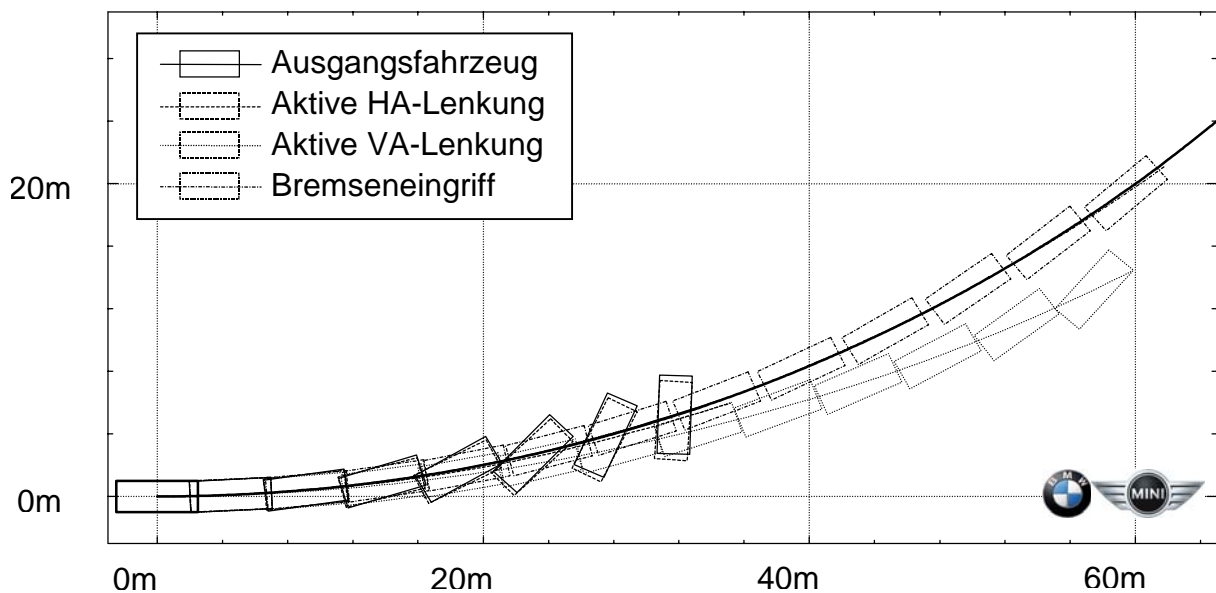


Bild 2: Grafischer Vergleich fahrdynamischer Regelsysteme (Beispiel: Beschleunigen in der Kurve an der Grenze der Seitenführungskräfte)

Im Rahmen der in [1] beschriebenen Analyse wurden neun verschiedene Manöver betrachtet. Um auch bei diesem Umfang noch eindeutige Aussagen bezüglich der gestellten Anforderungen zu erhalten, wurde ein qualitatives Auswerteverfahren verwendet. Dabei wurden die numerischen Einzelergebnisse, wie z.B. Tabelle 1 dargestellt, nach Kategorien (z.B. Handling und Stabilität) zusammengefasst und bewertet, was eine Gegenüberstellung der Regelsysteme ermöglicht (vgl. Bild 3, Bild 4 und Tabelle 2). Ein Vergleich der Einzelsysteme kann dadurch ebenso erfolgen wie die Untersuchung ihres Zusammenwirkens mit anderen Regelsystemen.

Aus Gründen der Übersicht wurde ein vereinfachter, dimensionsloser Bewertungsmaßstab verwendet:

- ++ = sehr positiver Nutzen, sehr vorteilhafter Effekt,
- + = positiver Nutzen, vorteilhafter Effekt,
- +/- = kein Nutzen, keine Auswirkung
- = negativer Nutzen, nachteiliger Effekt.

4.1. Fahrdynamik aktiver Lenksysteme

Die Analyse der Zusatzlenkungen lässt sowohl bei der aktiven Hinterachslenkung als auch bei der aktiven Vorderachslenkung einen Nutzen zur Verbesserung der Handlingeigenschaften erkennen. Dabei erzielt die Hinterachslenkung aufgrund ihres größeren Einflusses auf die querdynamischen Fahrzeugeigenschaften zunächst einen höheren Nutzwert. Die wesentlichen Unterschiede der beiden Systeme liegen in der Veränderbarkeit des Übertragungsverhaltens zwischen Vorderradeinschlag und fahrdynamischen Größen sowie in der Richtung des zusätzlichen Lenkeinschlages.

Durch ein zusätzliches Stellglied an der Hinterachse kann die Hinterachslenkung das Übertragungsverhalten zwischen Vorderradeinschlag und Querschleunigung bzw. Schwimmwinkel beeinflussen. Die Fahrzeugeigenschaften können so verändert werden, dass sich grundlegend neue Zusammenhänge ergeben und dadurch beispielsweise der Schwimmwinkel verringert wird [vgl. 2]. Demgegenüber reicht der Einfluss der aktiven Vorderachslenkung nicht über die Eingriffsmöglichkeiten eines „geübten“ Fahrers hinaus, da das Stellglied an der Vorderachse bei Fahrer und Regelsystem identisch ist.

Bei den untersuchten Manövern zur Beurteilung der Fahrstabilität ist zu erkennen, dass beide Systeme diese Eigenschaften verbessern können, jedoch erneut in unterschiedlichem Maße. Es ist zu beachten, dass die Hinterachslenkung durch die Beschränkung der Hinterachsseitenkraft und der damit verbundenen Stabilitätsgrenze in ihrer Wirkungsweise beeinträchtigt ist. Zum Stabilisieren der Gierbewegung ist an der Hinterachse eine Vergrößerung der Achsseitenkraft erforderlich, was jedoch nur bis zum Erreichen der maximalen Reifenseitenkraft möglich ist. Die aktive Hinterachs-

lenkung gewährleistet die Stabilitätsregelung deswegen nicht in dem Maße wie die aktive Vorderachslenkung.

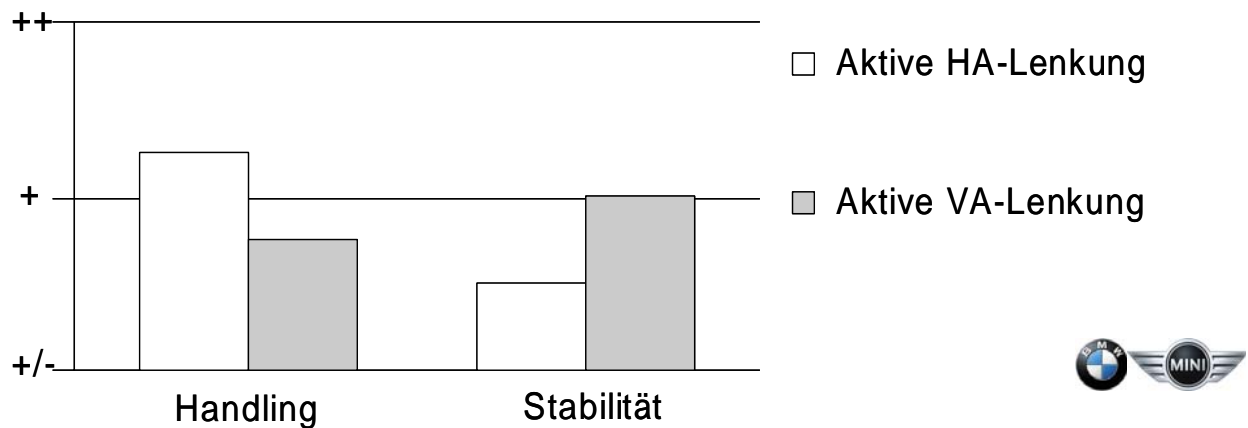


Bild 3: Übersicht über den Gesamtnutzen der betrachteten Lenksysteme (Zusammenfassung von Einzelmanövern)

Weiterhin ist in diesem Kontext die Anwendung der Wirkzusammenhänge auf Manöver zur gleichzeitigen Beurteilung der Stabilitäts- und Handlingeigenschaften besonders interessant (z.B. Fahrspurwechsel). Dazu ist der Einfluss der Zusatzlenkungen auf die Gesamtseitenkraft und die daraus resultierende Querbewegung zu betrachten. Solange die Hinterachslenkung zur Stabilitätsregelung noch eine Zunahme der Seitenkraft erreichen kann, nimmt die Querbewegung zu, und der Fahrer wird in der Ausweichbewegung noch unterstützt. Die aktive Vorderachslenkung baut dagegen zum Stabilisieren die Vorderachsseitenkraft und damit ebenso die Querbewegung ab. Dadurch wird die Ausweichbewegung gehemmt, und dieses „Gegenlenken“ entspricht letztlich dem, was ein „geübter“ Fahrer auch ausführt.

Die Ergebnisse dieser Aussagen sind in Bild 3 zusammengefasst, welches noch einmal die Vorzüge der einzelnen Systeme gegenüberstellt. Es ist zu erkennen, dass die aktive Hinterachslenkung vorrangig die Handlingeigenschaften verbessert. Die aktive Vorderachslenkung erfüllt dagegen bereits recht gut die o.g. Anforderungen an das Fahrzeugkonzept, da sie für beide Eigenschaften gleichermaßen von Vorteil ist.

4.2. Weitere Entscheidungskriterien für aktive Lenksysteme

In dem vorangegangenen Abschnitt wurden vorwiegend fahrdynamische Manöver mit Fahrgeschwindigkeiten oberhalb 30 km/h betrachtet. Für die Beurteilung des

Kundennutzens sind die diskutierten Eigenschaften zwar wichtig, aber im Rahmen des o.g. Innovations- bzw. Fahrzeugkonzepts beschreiben sie nur einen Teil der Anforderungen. Dementsprechend sind beim Langsamfahren und Parkieren zusätzliche Aspekte zu berücksichtigen (s. Tabelle 2).

Es wurde bereits ausgeführt, dass die Hinterachslenkung die grundlegenden Fahrzeugeigenschaften ändert. Dadurch kann auch der Wendekreis verringert oder ein schräges Einfahren in Parklücken (=„Krebsgang“) ermöglicht werden [vgl. 4]. Zwar kann die aktive Vorderachslenkung beim Parkieren nicht die grundlegenden Fahrzeugeigenschaften verändern, dafür dem Fahrer aber in solchen Fällen einen Teil der Lenkarbeit abnehmen (= „Kurzhublenkung“) [vgl. 3].

Besonders beim Parkieren ist zu berücksichtigen, dass das Verhalten einer Hinterachslenkung für den Kunden u.U. ungewohnt sein kann (z.B. ausschwenkendes Heck) und dieses zur Ablehnung führen könnte. Dagegen ist das Verhalten der Vorderachslenkung und damit auch jenes eines integrierten Systems vertraut, so dass der zusätzliche Eingriff als nachvollziehbare Unterstützung empfunden wird.

Tabelle 2: Parkiereigenschaften sowie Packagebelange aktiver Lenksysteme

	Aktive VA-Lenkung	Aktive HA-Lenkung
Wendekreis	+/-	+
Schräges Einparken	+/-	+
Kurzhublenkung	+	+/-
Nachvollziehbarkeit d. Stelleingriffs	+	-
Lenkbarkeit der Achse	+	+/-
Nutzung vorhandene Lenkanlage	+	-

Über die fahrdynamischen Eigenschaften hinaus sind Package-, Gewichts- und Kostenbelange zu betrachten, die sich an die Simulationsrechnungen anschließen bzw. mit diesen einhergehen sollten. Dabei ist offensichtlich, dass die aktive Hinterachslenkung die größten Auswirkungen auf ein Fahrzeugkonzept hat, da die Hinterachse lenkbar sein muss und der Lenkwinkel in den Radhäusern zu berücksichtigen ist, was im allgemeinen zu einer Beeinträchtigung des Kofferraumes führt. Es ist davon

auszugehen, dass diese Randbedingungen zu größeren Nachteilen auf der technischen und betriebswirtschaftlichen Seite führen.

Da die Vorderachse bereits über den gesamten Funktionsumfang zum Lenken der Räder verfügt (Lenkgestänge, -getriebe,...), ist der Zusatzaufwand voraussichtlich geringer als bei einer aktiven Hinterachslenkung. Besondere Beachtung verdient allerdings die geometrische Integration eines aktiven Lenkaktuators, da sich Konflikte im Bereich Lenksäule / Motorraum ergeben können. Mögliche Lösungen zur Ausführung eines derartigen Systems sind beispielsweise in [3] beschrieben.

Nicht unerwähnt bleiben darf, dass ein aktiver Eingriff zwischen Lenkradwinkel und den Vorderrädern den Einstieg in die Technologie „Steer by Wire“ vollzieht. Dieser Paradigmenwechsel hat aus Sicht des Automobilherstellers sukzessive zu erfolgen, wozu das genannte System der aktiven Vorderachslenkung einen wichtigen Qualifizierungsschritt darstellt.

4.3. Wechselwirkungen mit anderen Systemen

Bei der Integration eines aktiven Lenksystems in ein Fahrzeugkonzept ist auf Wechselwirkungen mit anderen Regelsystemen zu achten. Bei dem genannten Fahrzeugkonzept ist das aus fahrdynamischer Sicht vor allem die geregelte Bremsanlage mit der Bremsschlupfregelung (ABS) und dem Bremseneingriff zur Stabilitätsregelung (DSC bzw. ESP). Besonders die Stabilitätsregelung des DSC ist zu beachten, da, wie in Abschnitt 4.1 ausgeführt wurde, die aktiven Lenksysteme ebenso wie dieser Bremseneingriff die Giergeschwindigkeit regeln. Eine gegenseitige Beeinflussung ist nicht auszuschließen und birgt sowohl Risiken als auch Potenziale. Deswegen war in der genannten Analyse [1] zu untersuchen, welche Wechselwirkungen sich unter dem Zusammenwirken der jeweiligen Systeme ergeben, wenn diese gleichzeitig im Fahrzeug agieren. Auch dafür konnte das in Abschnitt 3 genannte Simulationsprogramm verwendet werden. Die Ergebnisse sind in Bild 4 gegenübergestellt.

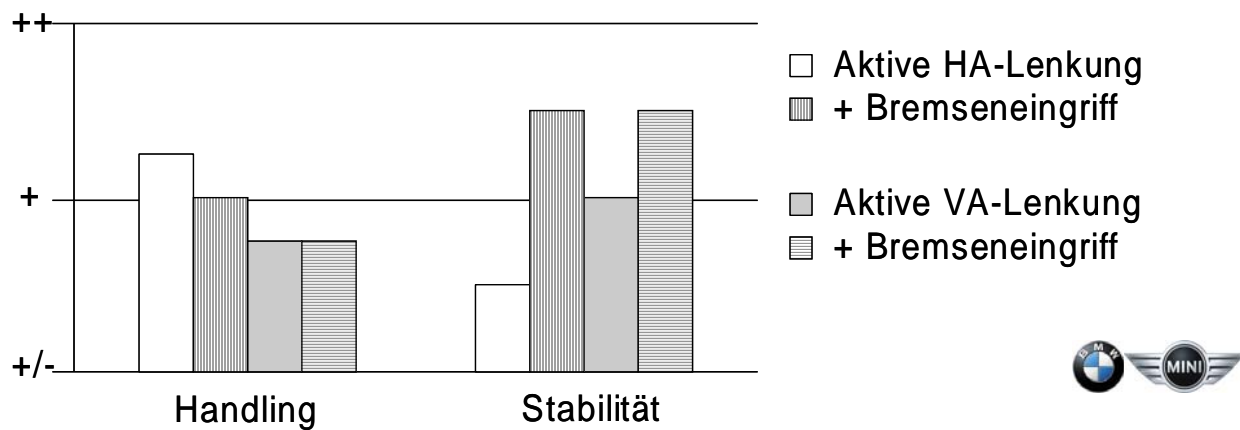


Bild 4: Übersicht über den Gesamtnutzen der Lenksysteme im Zusammenwirken mit dem Bremseneingriff (Zusammenfassung von Einzelmanövern)

Die besten Handlingeigenschaften als Einzelsystem erreicht wie zuvor beschrieben die aktive Hinterachslenkung. Das Zusammenwirken mit dem Bremseneingriff ergibt in diesen Belangen jedoch etwas ungünstigere Gesamteigenschaften. Das liegt daran, dass es in bestimmten Fällen zu negativen Interferenzen der Systeme kommt. Beispielsweise führen die hohe Verzögerung infolge der radindividuellen Bremschlupfregelung und das Einwirken der Hinterachslenkung bei Kurvenbremsungen zu einem größeren Schwimmwinkel als beim Einsatz als Einzelsystem. Das ist jedoch u.U. durch eine gezielte Abstimmung der beiden Systeme aufeinander zu vermeiden (vgl. [1]). Ohne eine Anpassung aneinander liegen die Handlingeigenschaften jedoch nur noch wenig über dem Niveau der aktiven Vorderachslenkung, die keine nachteiligen Wechselwirkungen mit dem Bremseneingriff zeigt.

Bei den Manövern zur Beurteilung der Fahrzeugstabilisierung erreichen beide Zusatzlenkungen in Kombination mit dem Bremseneingriff denselben, nun deutlich höheren Gesamtnutzen. Offensichtlich ist der Bremseneingriff deutlich besser zur Steigerung der Fahrstabilität geeignet als die Lenksysteme, da diese konstruktiv in ihrem Lenkeingriff begrenzt sind. Darüber hinaus ist dem aber auch zu entnehmen, dass sich die Lenk- und Bremseneingriffe bei der Stabilitätsregelung nicht nachteilig beeinflussen.

4.4. Systemauswahl

Zusammenfassend ist zu erkennen, dass die Anforderungen an gleichermaßen gute Handling-, Stabilisierungs- und Parkiereigenschaften am besten durch die aktive Vorderachslenkung zu erfüllen sind. Dagegen sollte bei einem Fahrzeug, bei dem vorrangig die Handlingeigenschaften verbessert werden sollen und dafür auch Package- und Kostenaufwendungen vertretbar sind (Sportwagen), die aktive Hinterachslenkung eingesetzt werden [vgl. 2].

Dabei ist unbedingt zu untersuchen, welche Wechselwirkungen sich mit anderen Regelsystemen ergeben, da die Möglichkeiten des Einzelsystems erweitert aber im negativen Fall auch begrenzt oder gar verschlechtert werden können.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ausgeführt, dass der Markterfolg eines Fahrzeugherstellers zunehmend vom gezielten, d.h. kundenorientierten, Einsatz von Innovationen geprägt ist. Dazu sind frühe Aussagen bezüglich des Nutzens neuer Systeme erforderlich. Am Beispiel fahrdynamischer Regelsysteme wurde gezeigt, wie schon in der Frühen Phase der Fahrzeugentwicklung durch Simulationsrechnungen Aussagen über den Kundennutzen einzelner Systeme getroffen werden können. Es wurden aktive Zusatzlenksysteme an Vorder- und Hinterachse verglichen sowie deren Wechselwirkungen mit dem Bremseneingriff untersucht.

Die Einzelsysteme zeigen dabei spezielle Eigenschaften. So verbessert die aktive Hinterachslenkung vorrangig die Handlingeigenschaften und die aktive Vorderachslenkung kann zusätzlich noch die Fahrstabilität erhöhen. Beide Systeme können die Parkiereigenschaften verbessern, jedoch auf unterschiedliche Arten. Die Hinterachslenkung kann den Wendekreis beeinflussen und die Vorderachslenkung die Lenkarbeit verringern.

Es wurden allerdings auch Wechselwirkungen mit anderen Regelsystemen deutlich. Bei der Hinterachslenkung ist das Zusammenwirken mit dem Bremseneingriff nicht frei von negativen Interferenzen. Eine sorgfältige Abstimmung ist deswegen von Nöten, die durch Simulationsrechnung schon früh im Entwicklungsprozess begonnen werden kann.

Weiterhin wurde ausgeführt, dass die Integration einer Hinterachslenkung in ein Fahrzeugkonzept größere Schwierigkeiten und damit auch Kostennachteile mit sich bringt als die Integration einer aktiven Vorderachslenkung. Ihr Einsatz ist deswegen eher Nischenfahrzeugen wie Sportwagen vorbehalten, um dort eine gezielte Optimierung der Handlungseigenschaften zu ermöglichen. Die aktive Vorderachslenkung kann dagegen als umfassendes System zur Verbesserung vieler Fahrzeugeigenschaften eingesetzt werden, wobei ihr nicht zuletzt durch den Übergang zum Steer by Wire eine besondere Bedeutung zukommt.

Literatur

- [1] Beiker, S. Verbesserungsmöglichkeiten des Fahrverhaltens von Pkw durch zusammenwirkende Regelsysteme, Dissertation TU Braunschweig 1999 und VDI Fortschrittberichte, Reihe 12, Nr. 418, Düsseldorf, VDI 2000

- [2] Donges, E. Funktion und Sicherheitskonzept der Aktiven Hinterachskienematik von BMW, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 92
Auffhammer, R. (1990), S. 580 - 588
Fehrer, P.
Seidenfuß, T.

- [3] Fleck, R. Active Front Steering (AFS), Das Steer-by-Wire System der
Hennecke, D. BMW-Group zur Optimierung von Lenkcomfort, Fahrzeugagi-
Pauly, A. lität und –stabilität, Tagung Haus der Technik „Pkw-
Lenksysteme – Vorbereitung auf die Technik von morgen“,
Essen, 03./04.04.2001

- [4] Richter, B. Schwerpunkte der Fahrzeugdynamik, Verlag TÜV Rheinland,
Köln, 1990