

Aktive Hinterachskinematik AKC[®] - ein Beitrag zu Fahrdynamik, Sicherheit und Komfort

Active Rear Axle Kinematics AKC[®] – Improving Driving Dynamics, Safety and Comfort

Dipl.-Ing. Marc **Wiesenthal**, Dr.-Ing. Hans F. **Collenberg**
ZF Lemförder GmbH, Dielingen

Dr. rer. nat. Horst **Krimmel**
ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen

Zusammenfassung

AKC[®] („Active Kinematics Control“) ersetzt die passiven Spurstangen von Hinterachsen durch verstellbare Lenker. Dies ermöglicht die aktive, radindividuelle Regelung der Spur beider Hinterräder. Der Aktuator beinhaltet einen Antriebstrang mit E-Motor, Getriebe, Kugelgewindtrieb, Sperre und anderen Sicherheitseinrichtungen, sowie Sensoren.

AKC[®] ermöglicht verschiedene funktionale Ausprägungen. Bei höheren Geschwindigkeiten wird die Gierdämpfung optimiert, und damit die Fahrstabilität. Handling, Agilität und Fahrspaß werden bei normalen Geschwindigkeiten signifikant verbessert, z.B. im Stadtverkehr. Durch Verkleinerung des Wendekreises um bis zu 10% wird die Manövrierbarkeit bei kleinen Geschwindigkeiten erheblich verbessert. In Summe kann das Fahrverhalten dadurch einzigartig beeinflusst werden.

Zusätzliche funktionale Vorteile entstehen, wenn AKC[®] in ein Netzwerk aktiver fahrdynamischer Systeme eingebunden wird.

Summary

AKC[®] („Active Kinematics Control“) replaces the toe-links of a multilink axle by control arms with adjustable length. This allows an active control of the toe of each rear wheel individually. The actuator comprises a drive train with electric motor, gear, ball screw and lock, additional safety features and sensors.

AKC[®] offers different functional characteristics: At high speeds, the yaw damping is optimized, thus improving active safety. Vehicle handling, agility and driving fun are enhanced significantly at normal speeds, e.g. in city traffic. At low speeds, it improves maneuverability by shortening the turning circle by approximately 10%. With this variety of functions, the vehicle behavior is influenced uniquely.

Additional functional benefits exist when AKC[®] is linked into a network of active chassis systems.

1 Einführung

Die Auslegung von Pkw-Hinterachsen hinsichtlich ihrer kinematischen und elasto-kinematischen Eigenschaften ist auch unter den heutigen, fortgeschrittenen technologischen Voraussetzungen ein von Kompromissen begleiteter Prozess.

Unterschiedliche, z. T. widersprüchliche Anforderungen an Komfort, Geräusch, Fahrdynamik und Fahrsicherheit, sind zu berücksichtigen. Diese ziehen nicht selten gegensätzliche Erfordernisse bei der Auslegung von Kinematik und Elastokinematik, von Bauteilen und ihren Eigenschaften nach sich. Entsprechend kann eine passive Hinterachse nicht alle Anforderungen optimal und in vollem Umfang erfüllen.

Diese Tatsache hat zur Initiierung des Projektes AKC[®] geführt. Es beinhaltet die aktive Beeinflussung der Spur- und Sturzwinkel von Hinterachsen. Hiermit können die oben beschriebenen Kompromisse umgangen werden. Folgende Abbildung verdeutlicht den Unterschied zwischen passiver und aktiver Kinematik:

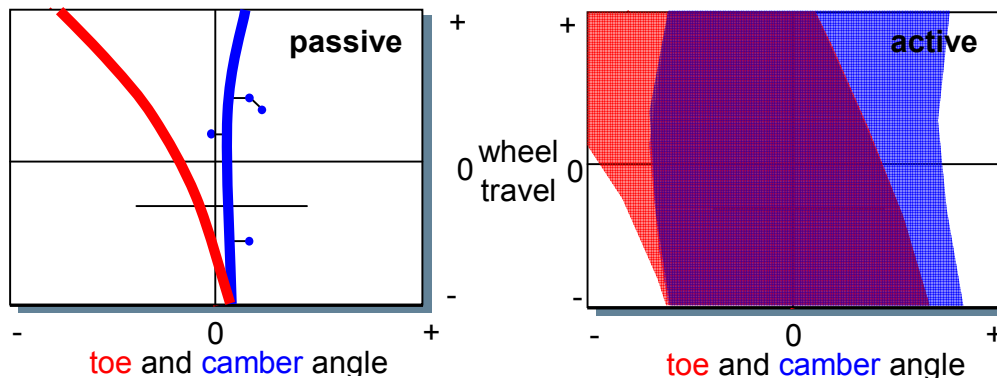


Fig. 1: Comparison of passive (left hand) and active wheel characteristics

Das Projekt wird seit mehreren Jahren durch ein Projektteam unter Leitung der ZF Lemförder GmbH mit Beteiligung von Experten aus dem ZF Konzern bearbeitet. So fließen neben der Expertise von ZF Lemförder als Entwickler und Hersteller von Achssystemen und Fahrwerk-Komponenten auch die Erfahrungen der ZF-Gruppe mit aktiven Fahrwerksystemen wie Aktivlenkung, Elektrolenkung, Torque-Vectoring (Vector-Drive), aktiven Dämpfern (CDC) und Wankstabilisierungssystemen ein.

Für den Endkunden bedeuten die daraus ableitbaren Funktionen eine deutliche Steigerung und Verbesserung der vom Fahrwerk beeinflussten Eigenschaften. So werden je nach Fahrsituation entweder insbesondere die Fahrdynamik oder der Komfort optimiert. Durch die erhöhte Agilität wird der Fahrspaß erheblich gesteigert. Fahrdynamische Eigenschaften werden damit bewusster erlebbar, und ihre gezielte Beeinflussung ist mittels AKC[®] in großem Umfang möglich.

Bei Anwendung eines aktiven Kinematiksystems auf mechanisch einfache Hinterachsen kann zudem querdynamisches Potenzial erschlossen werden. Dies stellt eine Alternative zu mechanisch aufwändigen Mehrlenkerachsen dar, welches ein zentraler Aspekt des Gesamtprojektes AKC[®] ist, wie im Weiteren gezeigt wird.

2 AKC® - Systembeschreibung

2.1 Kategorisierung

Spur- und Sturzwinkel von Hinterachsen können beispielsweise entsprechend der folgenden Systematik verstellt werden.

- Energieträger
 - o Hydraulische und elektro-hydraulische Systeme
 - o Elektromechanische Systeme
- Verstellmechanismus
 - o Längenveränderliche Aktuatoren
 - o Fußpunktverschiebung passiver Achskomponenten aufbauseitig
- Verstellgröße
 - o Spur oder Sturz isoliert
 - o Kombination getrennter Verstellungen für Spur und Sturz
 - o Kombinierte Beeinflussung von Spur und Sturz über ein Verstellsystem
- Kopplung der Räder einer Achse
 - o Radindividuelle Aktuatoren, Corner-Module
 - o Rad-koppelnde Aktuatoren, Zentralsteller
- Verstelldynamik
 - o Hochdynamische Verstellung: Beeinflussung der Fahrdynamik
 - o Quasistatische Mechanismen: Anpassung der Achskinematik

2.2 Vorentwicklung: Funktionsprototyp

In der ersten Phase der Vorentwicklung wurde bei ZF Lemförder ein System, basierend auf einer Mehrlenker-Hinterachse aus eigener Serienproduktion, aufgebaut. An dieser sind eine Spur- und Sturzverstellung umgesetzt, beide zentral elektrohydraulisch betrieben. Umgesetzt waren ein längenveränderlicher Lenker für die Spur (hohe Dynamik), sowie eine Fußpunktverstellung für den Sturz, Figure 2.

Ziel der Phase war die Ermittlung des fahrdynamischen Potenzials, ohne die technischen Umsetzung im Hinblick auf Serie zu berücksichtigen (sog. Funktionsprototyp).

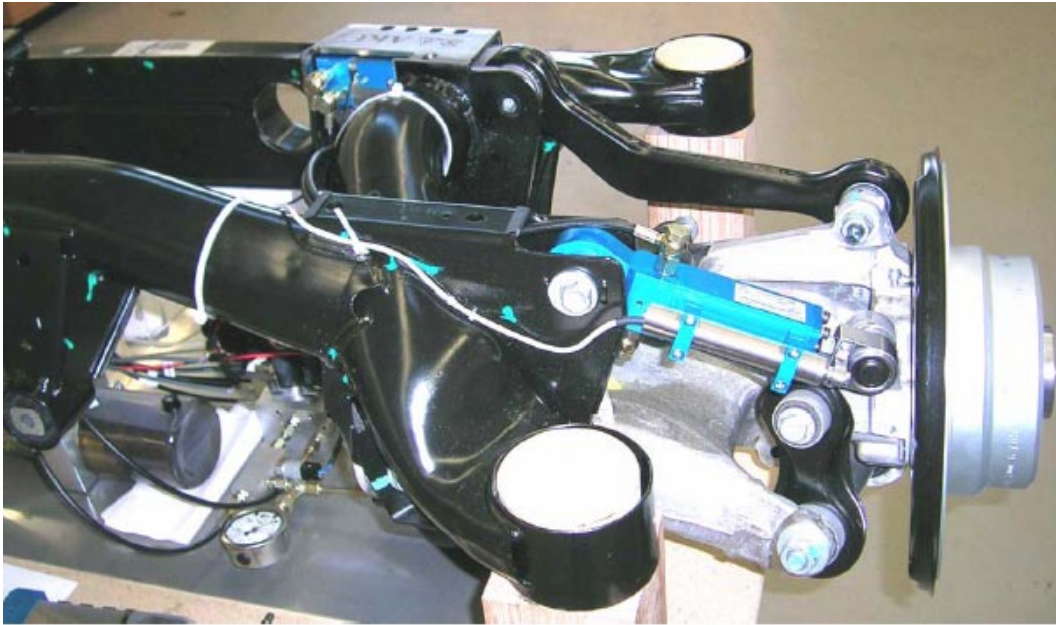


Fig. 2: *Rear Axle with Camber (rear) and Toe Adjustment Functional Prototype*

2.3 Vorentwicklung: Konzeptprototyp

In der seriennahen Vorentwicklungsphase (Konzeptprototyp) wird die Spurverstellung weiter verfolgt. Das umgesetzte System umfasst jeweils einen elektromechanischen Aktuator pro Rad, der als längenverstellbarer Spurlenker wirkt und so den Spurwinkel dynamisch verstellt. Die Leistung ist so hoch dimensioniert, dass ein großer Umfang fahrdynamischer Funktionen darstellbar ist. Entwickelt wird an einer zur ersten Phase bauähnlichen Mehrlenkerachse. Die Steller ersetzen die passiven Spurstangen und sind in den Bauraum des Serienfahrzeugs integriert, Figure 3. Dabei wird neben der Darstellung eines seriennahen mechanischen Konzeptes auch der notwendige Leistungsumfang für Steller und Gesamtsystem ermittelt. Zu den Vorteilen dieser Achskonfiguration gehört, dass durch den einfachen Ersatz eines passiven durch einen aktiven Lenker eine Plattform, bestehend aus einer passiven und einer aktiven Achse, dargestellt werden kann, wobei die passive Basisachse deswegen keine Kompromisse nötig macht.



Fig. 3: Electro-mechanical Conceptual Prototype in Rear Axle Assembly

Zusätzlich wird eine aktive Verbundlenkerachse untersucht. An dieser verstellt ein Aktuator den Spurwinkel beider Räder. Der Aktuator ist dabei als längenveränderlicher Lenker ausgeführt, Figure 4.

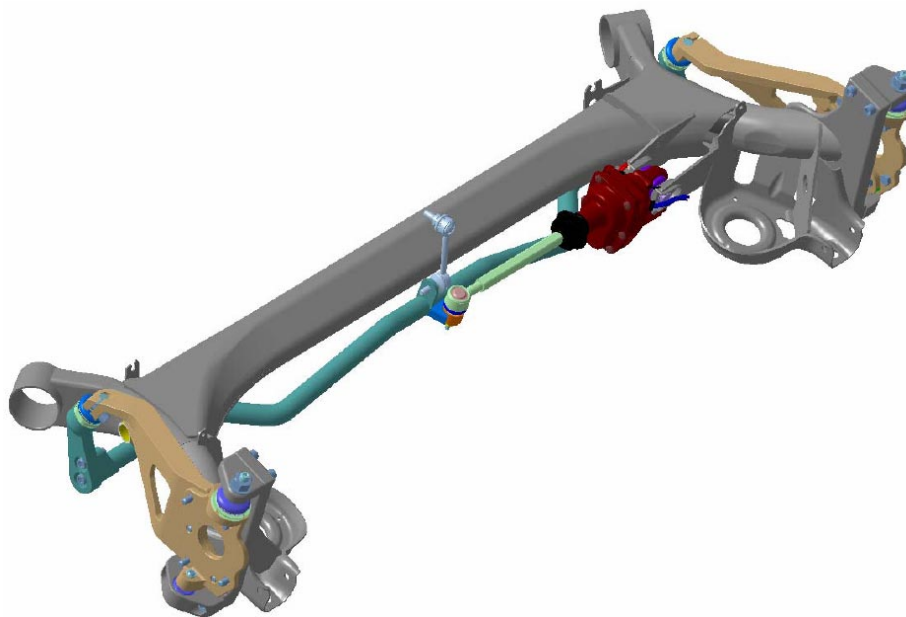


Fig. 4: AKC[®] Application on Twist-beam Axle (Single Actuator Solution)

Ziel ist es, einen Baukasten für Fahrzeugplattformen darzustellen, bei denen das Basisfahrzeug mit einer kostengünstigen Verbundlenkerachse ausgeführt ist und Premium- bzw. Performance-Varianten durch einfache Modifikationen umsetzbar sind. Mit der gewählten Gestaltung ist es gelungen, eine aktive Hinterachse mit relativ geringem Mehraufwand darzustellen.

2.4 AKC[®] - elektromechanische Stelleinheit

Der aktuell prototypisch verwendete Aktuator wurde als längenveränderliche „aktive“ Spurstange konzipiert. Er ersetzt in der Zielfahrzeug-Achse den passiven Spurlenker, Figure 5:



Fig. 5: Passive and Active Toe Links

Zur Abdeckung unterschiedlicher Kundenanforderungen wurde in der Entwicklung des Aktuators von Beginn an ein modulares Konzept umgesetzt. Zielsetzung ist es, insbesondere die kostenintensiven Hauptbaugruppen wie Elektromotor und Spindeltrieb flexibel applizieren zu können.

Der AKC[®] Baukasten beinhaltet zusätzlich zu den Basis-Stellern, bei denen je ein Steller pro Rad die Spurlenker ersetzt, auch einen Zentralsteller, Figure 6. Diverse Anbindungen an die Räder, wie z.B. die abgebildeten Spurstangen, sind möglich.



Fig. 6: AKC[®] Central Actuator Version

So gelingt es, mittels der verschiedenen Varianten von Stellern und deren flexibler Verwendbarkeit, das System AKC[®] für eine große Anzahl unterschiedlicher Hinterachskonzepte bereitzustellen.

2.5 Elektronisches Steuergerät

Im Rahmen des AKC[®]-Systems übernimmt das elektronische Steuergerät die Ansteuerung der Aktuatoren und die Auswertung der Sensorik. Wichtige Funktionsmodule sind die Betriebsstrategie, die Motorregelung und die Überwachung des Gesamtsystems.

Die Betriebsstrategie berechnet die Spurverstellung an der Hinterachse in Abhängigkeit der Fahrsituation. Dazu werden beispielsweise Lenkradwinkel und Fahrzeuggeschwindigkeit ausgewertet. Für Details der funktionalen Möglichkeiten siehe Abschnitt 3. Je nach E/E-Architektur des speziellen Fahrzeugs kann die Spurvorgabe auch auf einem anderen Steuergerät berechnet und dann über eine Schnittstelle dem AKC[®]-Steuergerät zur Verfügung gestellt werden. In diesem Falle ist das AKC[®]-System ein so genannter Intelligenter Steller oder Smart Actuator.

Zur hochdynamischen Umsetzung des Spursollwerts ist die Elektromotorregelung als zweistufige Kaskadenregelung realisiert. Die äußere Kaskade ist eine Motorlage-
regelung. Die innere Kaskade ist die Regelung des Motormoments. Basis für beide Regelkreise ist ein Motorlagesensor, der sowohl die Rotorlage als auch auf die Rotorgeschwindigkeit erfasst.

Eine zentrale Aufgabe des elektronischen Steuergerätes ist die Überwachung des Gesamtsystems, siehe auch Abschnitt 2.6. Dazu werden permanent Aktuatoren und Sensoren auf korrekte Funktion geprüft.

Ferner führt das Steuergerät kontinuierlich eine Eigendiagnose durch. Dabei werden beispielsweise die Leistungsendstufen und die korrekte Funktion der Mikrocontroller geprüft.

Die notwendige Stelldynamik kann im Rahmen der bestehenden 12 Volt Bordnetze erreicht werden. Um die ohmschen Verluste in den Leitungen zwischen Steuergerät und Stellern so klein wie möglich zu halten, sollte das Steuergerät seinen Platz in der Nähe der Hinterachse finden, z.B. im Kofferraum oder unter der Rückbank.

2.6 Sicherheit

Um den hohen Anforderungen an die funktionale Sicherheit aktiver Fahrwerksysteme Rechnung zu tragen, werden im AKC[®] verschiedene, sich ergänzende Maßnahmen umgesetzt. Zugrunde liegt die Norm zur funktionalen Sicherheit, IEC 61508 (ISO 26262 in Vorbereitung). Anhand der darin definierten Erfordernisse werden die einzelnen Systembestandteile gestaltet.

Durch Worst-Case-Betrachtungen verschiedener Ausfallszenarien und Fahrzustände mittels Simulation und Fahrversuch wurde im Rahmen der Sicherheitsbetrachtungen das sofortige Blockieren beider Steller im Fehlerfall als sicherer Zustand definiert.

Als Konsequenz daraus wurde für das System ein umfangreiches Sicherheitskonzept erstellt, das den Anforderungen an die funktionale Absicherung Rechnung trägt. Für die drei mechatronischen Systemebenen ergeben sich folgende Hauptmerkmale:

Mechanik

- Sperrenmechanismus zur Blockierung des Stellers (sicherer Zustand)
- Kurzschlussrelais am Motor zur Ausnutzung der Bremswirkung
- Redundante Sensoren zur Verbesserung von Diagnostik und Verfügbarkeit

Hardware

- SIL-3 / ASIL-D taugliche Steuergeräte (verschiedene Architekturen verfügbar)
- Kurzschlussfunktion der Leistungsendstufen im Fehlerfall
- zusätzliche übergeordnete Abschaltung

Software

- Umfangreiche Funktionen für Diagnose von Hardware und Funktion
- Überwachung von Gleichlauf und Plausibilität bei 2-Aktuatoren-Systemen

3 Funktionale Möglichkeiten und Ziele

3.1 Vorteile für den Endkunden

Das Potenzial aktiver Hinterachs-Kinematiksysteme aus Kundensicht ist im folgenden Diagramm dargestellt:



Fig. 7: *Customer Benefits of Active Kinematics Systems*

Die Ausprägung der erfahrbaren Merkmale ist wesentlich vom umgesetzten funktionalen Konzept des Systems abhängig. Hieraus ergibt sich ein großer Gestaltungsspielraum hinsichtlich der Fahrerwahrnehmung.

Vorteile im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit, insbesondere die Reduktion des Reifenverschleißes, lassen sich hauptsächlich über eine Sturzverstellung realisieren.

Nähert man sich dem funktionalen Potenzial der Spurverstellung anhand der Verstellmöglichkeiten, so ergeben sich grundsätzlich zwei Eingriffe und damit verbundene Effekte, Figure 8.

3.2 Gegenlenken

Durch gegensinniges Lenken von Hinter- und Vorderrädern verkleinert sich der Wendekreis. Anders formuliert verringert sich der Vorderachs-Lenkbedarf bei gleichem Kurvenradius und gleicher Geschwindigkeit. Theoretisch zu begründen ist dieser Effekt durch die Längsverlagerung des Momentanpols der Bewegung von der Hinterachse aus nach vorn.

Fahrdynamisch ist Gegenlenken durch verstärkten Aufbau des Giermoments bei gleichzeitig abgeschwächten Seitenführungskräften gekennzeichnet. Es wird subjektiv eine deutliche Steigerung von Wendigkeit und Agilität wahrgenommen. Dazu muss bemerkt werden, dass die Fahrzeugstabilität deutlich eingeschränkt wird, so dass Gegenlenken auf den unteren Geschwindigkeitsbereich begrenzt wird.

Des Weiteren ergeben sich Effekte im Übergangsverhalten der Querdynamik, welche bei übertriebener Verwendung des Gegenlenkens nachteilig beurteilt werden können. So hat z.B. die Seitenführungskraft an der Hinterachse vom Einleiten der Lenkbewegung hin zum stationären Kurvenzustand einen Vorzeichenwechsel. Dieser Nulldurchgang erzeugt subjektiv den Eindruck, die Hinterachse „lenke nach“, d.h. zeige einen extremen Phasenverzug, obwohl der Stellvorgang tatsächlich ohne solchen stattfindet. Hier muss im Einzelfall zwischen gewünschter Lenkunterstützung und den aufgezeigten Effekten abgewogen werden.

3.3 Mitlenken

Werden die Räder gleichsinnig gelenkt, ergibt sich ein deutlich spürbarer fahrdynamischer Sicherheitsgewinn gegenüber rein frontgelenkten Fahrzeugen. Dies liegt vor allem im gleichzeitigen Seitenkraftaufbau an beiden Achsen begründet. Die Schräglaufwinkel und damit die Seitenführungskräfte entstehen parallel. Das Giermoment ist kleiner, Gierüberschwingen wird deutlich reduziert.

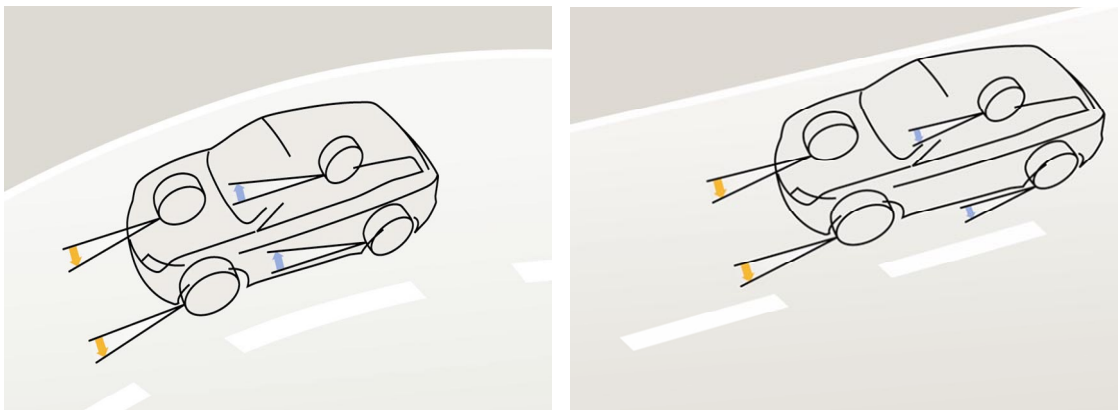


Fig. 8: Out-of-phase (left hand) and In-phase Steering of Rear Axle

Hiermit vergrößert sich – analog zum Gegenlenken - der Wendekreis, bzw. wird der Vorderachs-Lenkbedarf bei gleichem Kurvenradius und gleicher Geschwindigkeit erhöht. Durch den Aufbau der Seitenkräfte an beiden Achsen wird der von rein frontgelenkten Fahrzeugen bekannte Effekt des Übergangs von einleitender Lenkbewegung - noch ohne Seitenführung der Hinterachse - zum stationären Zustand hin erheblich reduziert.

Zur Abstimmung des Mitlenkens ist u. a. Folgendes zu beachten: Bei hochdynamischen Manövern wie Ausweichen / Spurwechseln darf der benötigte Lenkaufwand bestimmte Grenzen nicht überschreiten. Diese ergeben sich u.a. aus der Ergonomie und der Fähigkeit des Normalfahrers, am Lenkrad zu agieren. Weiterhin wird die Gierwilligkeit wie dargestellt z.T. deutlich reduziert. Im Extremfall versetzt das Fahrzeug parallel, vollführt also einen „Krebsgang“. Auch hier ist eine Abwägung notwendig, in welchem Geschwindigkeitsbereich welche maximalen stationären Gieraten zu erreichen sind, und welche Lenkwinkel hierfür akzeptabel sind.

3.4 Potenziale und Grenzen aus fahrdynamischer Sicht

Im erweiterten linearen Einspurmodell mit Hinterachslenkung ergibt sich für den Hinterachsschräglauf [1]:

$$\alpha_h = \delta_h + \beta + \frac{\dot{\psi} \cdot l_h}{v}$$

Über den zusätzlichen Lenkwinkel an der Hinterachse kann deren Schräglaufwinkel und mithin die gesamte querdynamische Balance des Fahrzeugs variiert werden.

Das Potenzial ergibt sich vor allem für untersteuerndes Fahrverhalten: Wird also die Kraftschlussgrenze bzw. die Reifenkraftsättigung an der Vorderachse erreicht, kann über die direkte Erhöhung des Hinterachs-Schräglaufs weiteres Potenzial zur Seitenführung erschlossen werden.

Im Gegensatz dazu sind Übersteuersituationen im Normalfall nicht positiv beeinflussbar, da hier das Kraftschlusspotenzial der Hinterachse bereits ausgeschöpft ist und nicht erhöht werden kann.

Unterhalb der Grenzen von Kraftschluss und linearem Reifenverhalten sind beide Situationen gleichermaßen beeinflussbar. Potenziale durch Vernetzung fahrdynamischer System werden in diesem Zusammenhang in Kapitel 4 erläutert.

Die Realisierung der fahrdynamischen Systemfunktionen kann mittels verschiedener Pfade erfolgen. Eine Übersicht zeigt Figure 9.

Die Basisfunktion zur variablen Lenkunterstützung (Komfortfunktion) wird als Vorsteuerung umgesetzt. Neben den Haupteingangsgrößen Lenkradwinkel und Fahrgeschwindigkeit wird auch die Lenkwinkelgeschwindigkeit in der Steuerstrategie berücksichtigt. Letztere dient der Erkennung transienter Fahrmanöver, die eine Anpassung der Basisstrategie erforderlich machen, z.B. schnelle Fahrspurwechsel. Weitere Adaptionen erfolgen anhand der Auswertung längsdynamischer Eingangsgrößen, wie z.B. Bremsdruck oder Gaspedalstellung.

Zur Erschließung des vollen fahrdynamischen Potenzials kommen Regler zur Anwendung. Im einfachsten Ansatz handelt es sich z.B. um einen modellbasierten Gierratenregler. Dieser generiert anhand der Abweichung des realen Fahrverhaltens von der Modellvorgabe einen korrigierenden Lenkwinkel an der Hinterachse. Hinsichtlich der o.g. Einschränkungen bei übersteuerndem Fahrverhalten kann der Regler z.B. auf Untersteuereingriffe begrenzt werden. Zur notwendigen Vernetzung des AKC[®] mit anderen querdynamischen Regelsystemen siehe folgendes Kapitel.

Auch Eingriffe bei besonderen Fahrsituationen sind möglich. Hervorzuheben ist hier insbesondere das Bremsen auf μ -split-Fahrbahnen. Durch Lenkeingriffe an der Hinterachse kann das Eindrehen und Schiefziehen des Fahrzeugs unterbunden werden. Der Fahrer wird um eine Regelaufgabe entlastet. Diese Funktion lässt sich einfach anhand der im Fahrzeug zur Verfügung stehenden Messgrößen ableiten.

Komplexere Sonderfunktionen umfassen u.a. die Kompensation von Fahrzeugreaktionen bei Seitenneigung der Fahrbahn oder Seitenwind. In beiden Fällen sind entsprechende Sensoren und Schätzmodelle notwendig, um die Fahrsituation sicher zu erkennen und ein entsprechendes Regelziel abzuleiten.

Potenzial ergibt sich durch den direkten Aufbau von Seitenkräften an der Hinterachse auch bei der Stabilisierung von Gespannen. Bei der Erkennung entsprechend kritischer Anhängerschwingungen kann mittels der Hinterräder gezielt stabilisierend und dämpfend eingewirkt werden.

Da regelnde Eingriffe der Hinterachskinematik Einfluss auf die Regelziele anderer Systeme zur fahrdynamischen Beeinflussung haben, müssen entsprechende Vernetzungen oder Koexistenz-Ansätze untersucht werden. Es sei auf das folgende Kapitel verwiesen.

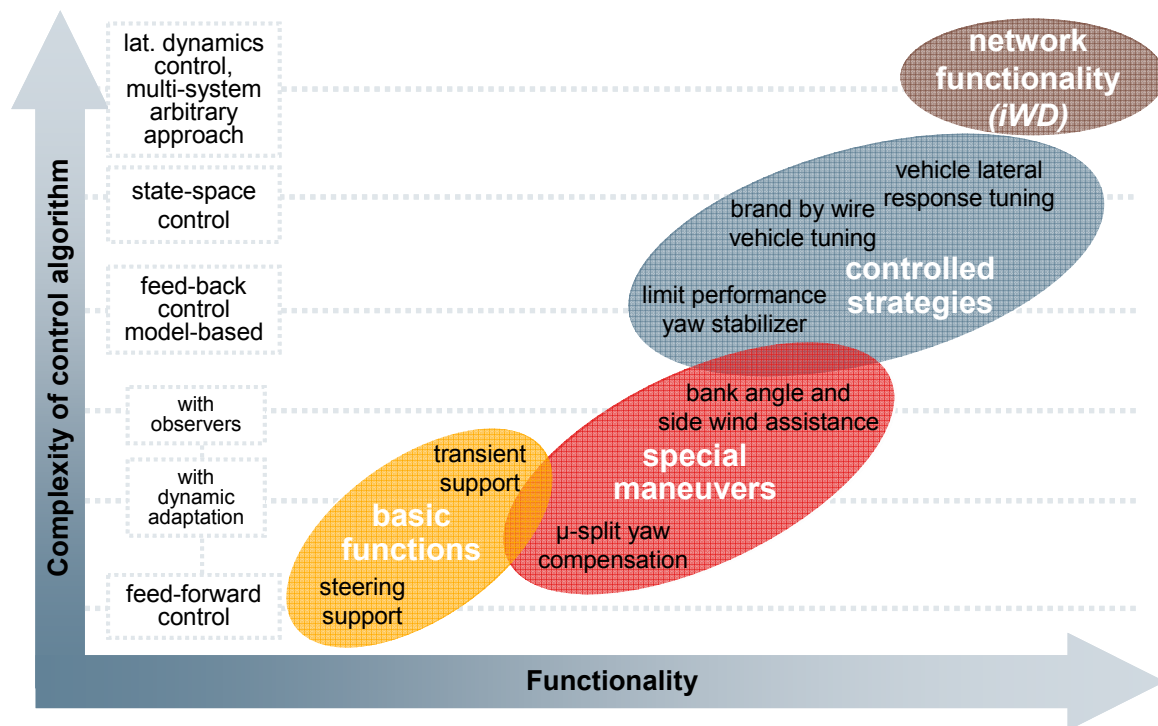


Fig. 9: Overview of Functions vs. Control Algorithms

4 Vernetzung des AKC[®] im fahrdynamischen Systemverbund

Das AKC[®] trägt wesentlich zur Querdynamik des Fahrzeugs bei. Entsprechend ist die Vernetzung des AKC[®] insbesondere mit den anderen querdynamisch relevanten Systemen sinnvoll und notwendig. Zu diesen Systemen zählen in erster Linie Elektrolenkung, Aktivlenkung und Bremse. Um die Vorteile des AKC[®] nicht nur hinsichtlich der Einzelsystemfunktionen, sondern auch in Bezug auf den durch Systemvernetzung realisierbaren Nutzen darzustellen und zu bewerten, beschäftigt sich ZF Friedrichshafen mit der Darstellung der Vernetzungsfunktionen in Versuchsfahrzeugen. Ferner werden diese Prototypfahrzeuge genutzt, um eine - gemessen an den Anforderungen auf Fahrzeugebene - im Sinne der Kosten/Nutzen-Relation sinnvolle Stelldynamik und Stellerdimensionierung zu ermitteln. Die folgenden drei Abschnitte stellen die Vernetzung des AKC[®] exemplarisch anhand der Kopplung zur Aktivlenkung und zur Bremse dar.

4.1 Vernetzung des AKC[®] mit der Aktivlenkung

Sind in einem Fahrzeug sowohl Aktivlenkung (variable Lenkübersetzung) als auch AKC[®] vorhanden, dann wird für ein optimal harmonisches Lenkverhalten die Gesamtlenkanforderung in Abhängigkeit der Fahrsituation (beispielsweise, Lenkwinkel und Fahrzeuggeschwindigkeit) auf die beiden Systeme verteilt. Diese Verteilung kann über den jeweiligen Vorsteueranteil (Lenkkennlinie) der beiden Systeme implizit berücksichtigt werden. Die Vernetzung ist für diese Funktion im Wesentlichen durch die Übermittlung von Systemzuständen und Sensorwerten wie beispielsweise Lenkradwinkel und Fahrzeuggeschwindigkeit realisiert. Ansonsten arbeiten die Systeme im Modell der so genannten „friedlichen Koexistenz“ zusammen.



Fig. 10: AKC[®] im Systemverbund von Antriebsstrang und Fahrwerk

4.2 Vernetzung des AKC[®] mit der Bremse zur Fahrzeugstabilisierung

Das AKC[®] kann sehr effizient zur Unterstützung des Fahrers in Untersteuersituationen eingesetzt werden. Erkennt der Fahrzustandsbeobachter eine Untersteuersituation, dann wird die Hinterachskinematik genutzt, um an der Hinterachse einzulenken und so die Gierrate zu erhöhen. Die Eingriffsschwelle für AKC[®] liegt niedriger als die Schwelle für den Bremsengriff. Auf diese Weise wird eine „Komfortstabilisierung“ oder „Softstabilisierung“ erreicht. Im Idealfall gelingt es dem AKC[®], die Untersteuersituation abzuwenden. Nimmt die Untersteuertendenz jedoch weiter zu, dann erfolgt zusätzlich ein Bremsengriff. Das Zusammenspiel der beiden Systeme wird im nächsten Abschnitt als Beispiel für die sogenannte Arbitrierung herangezogen.

Unsere Fahrversuchsergebnisse zeigen, dass in Untersteuersituationen ein sehr harmonisches Zusammenspiel von Bremse und AKC[®] erzielt werden kann. Der Fahrer profitiert von frühen, kaum spürbaren Eingriffen, was das Fahrzeug sehr agil und dynamisch wirken lässt.

4.3 Arbitrierung der Stelleingriffe in der Domäne Querdynamik

Eine der wesentlichen Herausforderungen bei der Systemvernetzung, die nach wie vor besteht, ist die Koordination mehrerer gleichzeitig auf einen Steller oder ein Regelziel wirkender Funktionen. Hier muss ein Arbitrierer die Stellwünsche der einzelnen Funktionen und die Zugriffswünsche mehrerer Steller auf ein einzelnes Aggregat regeln. Ist das AKC[®] beispielsweise in eine Fahrdynamikstabilisierung und eine Giermomentkompensation eingebunden, die gleichzeitig einen zusätzlichen Lenkwinkleingriff an der Hinterachse anfordern, dann muss die Priorisierung bzw. die Art der Kombination beider Eingriffe definiert sein.

Im Zuge unserer Untersuchungen verwenden wir einen Arbitrierungsansatz, bei dem der Arbitrierer die Systeme in Abhängigkeit von der Fahrsituation priorisiert und dann bei Eingriff des höher priorisierten Systems die Eingriffsstärke des geringer priorisierten Systems reduziert. Das bedeutet für oben genanntes Beispiel Folgendes: Bei Untersteuerneigung startet das AKC[®] mit Lenkeingriff an der Hinterachse. Reicht dieser Eingriff nicht aus, um ein weiteres Ansteigen der Untersteuerneigung zu verhindern, dann greift die Bremse ein. Die Bremse ist in dieser Fahrsituation wegen des mit der Bremse größeren realisierbaren Giermoments höher priorisiert. Das heißt, bei nochmals steigender Untersteuerneigung reduziert der Arbitrierer den Lenkeingriff entsprechend der zunehmenden Eingriffsstärke der Bremse.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der aktiven Verstellung der Kinematik von Hinterachsen im Projekt AKC[®] - Active Kinematics Control - ist es möglich, Kompromisse hinsichtlich der passiven Achsauslegung zu umgehen. Hierzu wurde ein elektro-mechanisches Stellerkonzept entwickelt. Mit dem zugrunde liegenden Baukastensystem wurde ein Mittel geschaffen, Applikation an verschiedensten Achskonzepten umsetzen zu können. Ein übergreifendes Sicherheitskonzept deckt die hohen Erfordernisse zur funktionalen Sicherheit seitens OEM und Gesetzgeber ab.

Hinsichtlich der Funktionen ergeben sich weitgreifende Möglichkeiten, das querdynamische Fahrverhalten zu verändern.

So sind der Komfort bei Manövrieren, die Fahrsicherheit bei Ausweichmanövern, hohen Geschwindigkeit und Grenzbereichsmanövern, sowie gleichfalls der Fahrspaß beim Handling mit moderaten Fahrgeschwindigkeiten in weiten Grenzen zu variieren. Verschiedene regelungstechnische Konstrukte stehen hierfür zur Verfügung.

Die volle Ausnutzung des systemischen Potenzials ergibt sich mit der Vernetzung des AKC[®] und anderen Systemen zur Beeinflussung der Fahrdynamik. Ansätze dazu werden bei der ZF im Rahmen des Konzernprojektes iWD (intelligent Wheel Dynamics) untersucht und bewertet.

6 Formelzeichen und Indizes

α_h	Schräglaufwinkel der Hinterachse
δ_h	Lenkwinkel der Hinterachse
β	Schwimmwinkel des Gesamtfahrzeugs
$\dot{\psi}$	Gierwinkelgeschwindigkeit
l_h	Abstand Schwerpunkt zu Hinterachse in Fahrzeug-Längsrichtung
v	Fahrgeschwindigkeit

7 Literatur

- [1] HEISSING, B.; ERSOY, M. (Hrsg.).
Fahrwerkhandbuch
Vieweg Verlag
Wiesbaden, 2007