

Fahrwerk

Dynamiklenkung im Audi Q5

WOLFGANG DICK | MARNIX LANNOIJE | JÜRGEN SCHULLER | MIRKO REUTER



Ein sportliches Fahrerlebnis und hohe Fahrsicherheit sind bereits heute Kerneigenschaften der Fahrzeuge von Audi. Mit der neuen Dynamiklenkung, die erstmals im Audi A4 und Audi A5 zum Einsatz kam, wird in diesen Disziplinen auch bei Geländefahrzeugen wie dem Audi Q5 ein neues, bisher unerreichtes Niveau erzielt.

1 Einleitung

Die Audi-Dynamiklenkung verändert die Lenkübersetzung in Abhängigkeit zur Fahrzeuggeschwindigkeit und löst damit den bisher durch die reine Mechanik vorgegebenen Kompromiss einer konstanten Lenkübersetzung ab. Bei hohem Autobahntempo bietet sie durch eine indirektere Übersetzung größtmögliche Ruhe und einen hervorragenden Geradeauslauf.

Unterstützt wird dieser Komfort- und Sicherheitsgewinn durch eine gezielte Anhebung des Lenkmomentes über die Servotronic. Ist der Fahrer hingegen auf kurvenreichen Strecken im niedrigen und mittleren Geschwindigkeitsbereich unterwegs, dann steht eine direktere Übersetzung zugunsten der Lenkpräzision und der schnellen Reaktionsmöglichkeit zur Verfügung. Im Parkierbereich ermöglicht die direkte Übersetzung maximalen Komfort, da hierbei das erforderliche Lenkmoment über die Servotronic deutlich abgesenkt wird.

Die Dynamiklenkung ist Teil des Eigenschaftssystems Audi drive select. Je nach Modusauswahl – Comfort, Auto oder Dynamic – wird lenkungsseitig die passende Kennlinie für die Übersetzung (Lenkwinkelbedarf) und die Unterstützung (Lenkmomentenbedarf) aktiviert. Im Bezug auf die aktive Sicherheit erschließen sich dem elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP) mit der Dynamiklenkung völlig neue Möglichkeiten der Fahrzeugstabilisierung, da ein kombinierter Brems- und Lenkeingriff deutlich schneller und komfortabler ungewünschten Gierreaktionen entgegenwirken kann. Durch die Position des Stellers innerhalb der Lenksäule konnten unabhängig vom Achs- und Antriebskonzept alle wesentlichen Bauteile des Systems aus dem Audi A4 übernommen werden. Fahrzeugspezifische Bauteile, wie beispielsweise die Konsole der Lenksäule, wurden in das Audi Q5-Basismodell integriert, **Bild 1**.

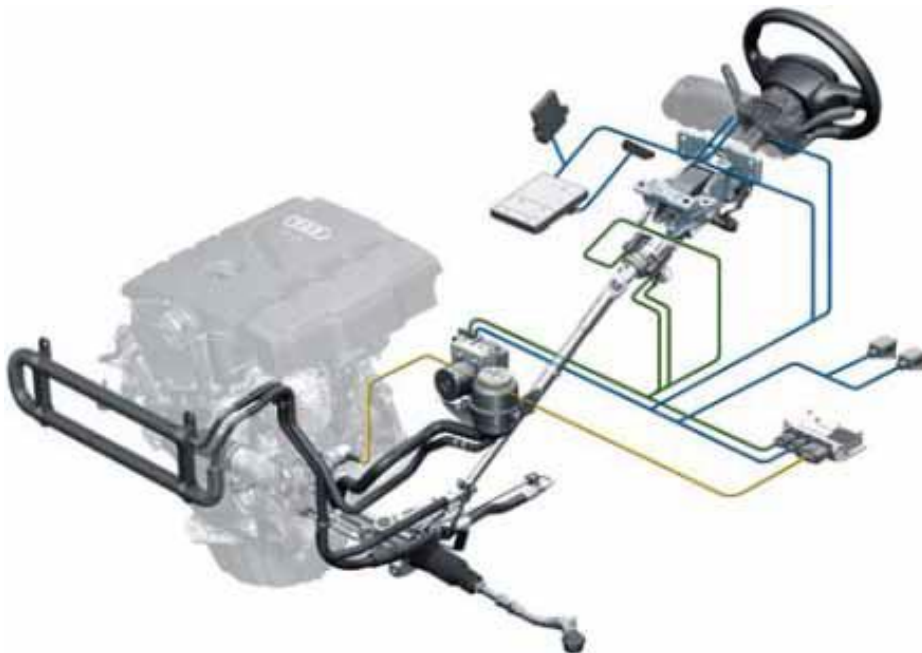


Bild 1
Systemüberblick
Dynamiklenkung im
neuen Audi Q5

2 Funktionen der Dynamiklenkung

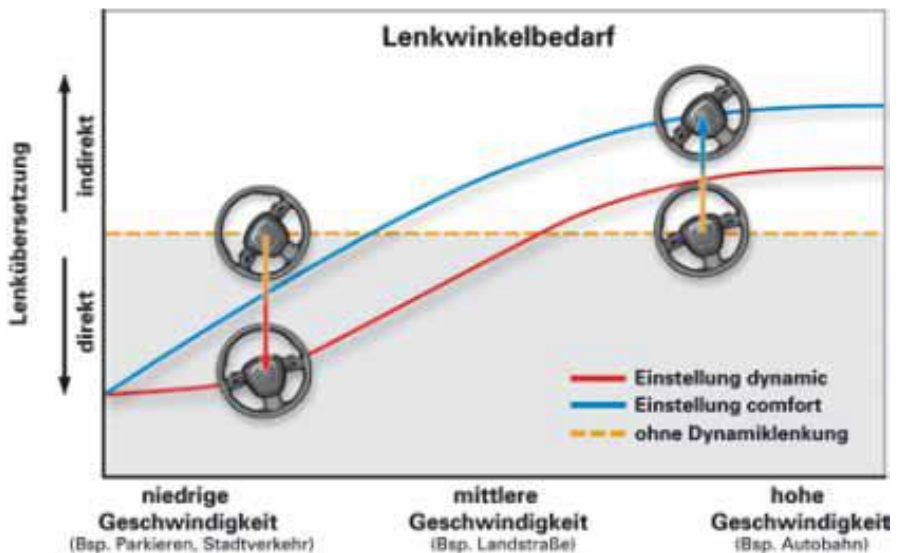
Als wichtigste Bedienschnittstelle zwischen Fahrer und Fahrzeug ist die Lenkung maßgeblich verantwortlich für Fahrspaß, Fahrkomfort und Fahrsicherheit. Zur Optimierung dieser Eigenschaften muss der Lenkaufwand bezüglich Lenkwinkelbedarf (Betätigungswinkel) und Lenkmomentenbedarf (Betätigungskraft) für alle Fahrsituationen frei einstellbar sein. Die Dynamiklenkung ermöglicht erstmals beide Freiheitsgrade. Gegenüber der bekannten Servotronic werden damit im Audi Q5 neue Funktionen wie die variable Lenkwinkelübersetzung und verschiedene Möglichkeiten zur aktiven Fahrzeugstabilisierung umgesetzt.

2.1 Variable Lenkwinkelübersetzung

Zur optimalen Lenkwinkelübersetzungsauslegung wurde die Lenkaufgabe für die drei charakteristischen Fahrgeschwindigkeitsbereiche Parkieren, Fahren im

niedrigen bis mittleren Geschwindigkeitsbereich (Stadt und Überland) und Fahren im hohen Geschwindigkeitsbereich (Autobahn) betrachtet, **Bild 2**. Auslegungsziel beim Parkieren ist es, dem Fahrer das Rangieren durch wenig Lenkwinkelbedarf zu erleichtern. Um das Lenkrad vom einen zum anderen Anschlag zu drehen, sollte der Fahrer möglichst selten umgreifen müssen. Die Lenkübersetzung muss in diesem Geschwindigkeitsbereich somit sehr direkt gewählt werden. Beim Fahren in der Stadt und über Land sollte das Abbiegen und die Kurvenfahrt, auch auf Passfahrten, ohne Umgreifen möglich sein. Für die meisten Fahrer handelt es sich hierbei um den Bereich kleiner $\pm 90^\circ$ am Lenkrad. Dies ist auch der Lenkwinkelbedarf, mit dem der Normalfahrer in Grenzsituationen, zum Beispiel bei Ausweichmanövern, in der Lage ist, durch Gegenlenken korrigierend einzugreifen. Die Annahme, dass auch im niedrigen bis mittleren Geschwindigkeitsbereich eine möglichst direkte Lenkwinkelübersetzung anzustreben ist, liegt zunächst nahe. Eine hohe Direktheit, wie sie im Parkierbe-

Bild 2
Prinzipverlauf
Lenkübersetzung



trieb vorteilhaft ist, führt aber mit steigender Geschwindigkeit zu Fahrzeugnerosität, so dass die Dynamiklenkung die Lenkübersetzung unter Einhaltung der genannten Auslegungsziele geschwindigkeitsabhängig anhebt.

Für mittlere bis hohe Geschwindigkeiten mit geringen Kurvenradien muss die Lenkübersetzung so gewählt werden, dass der Fahrer das Fahrzeug möglichst feinfühlig führen kann. Dies erfordert eine deutlich indirektere Übersetzung als die im niedrigen bis mittleren Geschwindigkeitsbereich eingestellte.

Basierend auf den Erfahrungen aus dem Audi A4 und Audi A5 wurden die Kennlinien für Lenkübersetzung und Lenkmoment für den Audi Q5 entsprechend den besonderen Anforderungen und dem breiten Nutzspektrum des Fahrzeugtyps angepasst. Hierbei standen speziell das Anlenkverhalten, die Progression und der Übergang zu hohen Radeinschlagswinkeln im Vordergrund. Über die Integration der Dynamiklenkung in Audi drive select kann der Fahrer modusabhängig Kennlinien auswählen und so das Fahrzeugverhalten beeinflussen.

2.2 Aktive Fahrzeugstabilisierung

Bei Fahrzeugen mit Dynamiklenkung stabilisiert das ESP das Fahrzeug in fahrdynamisch kritischen Situationen nicht nur durch das Bremsen einzelner Räder, sondern greift nun auch mit zusätzlichen Radlenkwinkeln korrigierend ein, **Bild 3**. Hierdurch ergeben sich zwei Hauptvorteile: Erstens wird die Gesamtstabilität des Fahrzeuges durch gleichzeitige Brems- und Lenkungseingriffe verbessert, das heißt die aktive Sicherheit wird deutlich erhöht. Dies gilt insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten (>100 km/h), da hier die Dynamiklenkung ihren Vorteil der sehr schnellen Reaktionszeit voll ausspielen kann. Zweitens kann in weniger kritischen Fahrsituationen entweder teilweise oder sogar vollständig auf die Bremseneingriffe verzichtet werden, was die Fahrzeugstabilisierung harmonischer und komfortabler macht. Das Fahrzeug fährt sich durch die Reduktion der Bremseneingriffe gerade auf Fahrbahnen mit niedrigem Reibwert (zum Beispiel Schnee) bei gleicher Fahrstabilität spür-

Bild 3
Fahrzeugstabilisierung durch Bremsen- und Lenkungseingriffe



bar agiler als ein Fahrzeug, das nur über Bremseneingriffe stabilisiert wird. Das ESP nutzt die Funktion der Dynamiklenkung bei übersteuerndem und untersteuerndem Fahrzeug, sowie beim Bremsen auf Fahrbahnen mit unterschiedlichen Reibwerten (μ -split).

2.2.1 Übersteuerndes Fahrzeug

Beim Übersteuern stabilisiert das ESP das Fahrzeug über die Dynamiklenkung durch ein gezieltes Gegenlenken, was ein Ausbrechen des Fahrzeughecks verhindert. Ein aufwändiges Arbitrierungskonzept sorgt für eine optimale Aufteilung des erforderlichen Stabilisierungsmoments auf Bremse und Lenkung, deren Eingriffe vollständig einander integriert sind. Eine Situation, in der ein Fahrzeug leicht ins Übersteuern gerät, ist das schnelle Ausweichmanöver, auch Fahrspurwechsel genannt, **Bild 4**.

Beim Zurücklenken auf der neuen Fahrspur kann das Heck ausbrechen, insbesondere bei hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten. Der Normalfahrer leitet das erforderliche Gegenlenken meist zu spät oder gar nicht ein. Die Folge sind starke Bremseneingriffe des ESP, **Bild 4** oben. Mit der Dynamiklenkung erfolgt das stabilisierende Gegenlenken automatisch und vom Fahrer unbemerkt. Dadurch reduziert sich der Lenkaufwand für den Fahrer, der lediglich die in einer vergleichbaren stabilen Fahrsituation notwendigen Lenkwinkel aufbringen muss. Die Bremseneingriffe des ESP werden ebenfalls deutlich reduziert, da sie das Gierverhalten des Fahrzeuges nur noch dämpfen müssen. So ergibt sich bei einem Spurwechsel neben der besseren Fahrzeugstabilität auch eine höhere Durchfahrgeschwindigkeit, **Bild 4** unten.

2.2.2 Untersteuerndes Fahrzeug

Beim Untersteuern stellt das ESP die Übersetzung der Dynamiklenkung indirekter,

so dass der Fahrer den Punkt des maximalen Kraftschlusses nicht so schnell überlenkt, beziehungsweise ihn selbst besser einstellen kann. Die Agilität des Fahrzeuges verbessert sich hierdurch spürbar.

Bild 5 zeigt das Funktionsprinzip der Untersteuerfunktion. Beim Fahrzeug ohne Dynamiklenkung wird der Punkt des maximalen Kraftschlusses an der Vorderachse durch einen zu großen Lenkwinkel überschritten. Das Fahrzeug wird über die Vorderräder aus der Kurve herausgeschoben. Im Fahrzeug mit Dynamiklenkung wird die Untersteuersituation erkannt und durch eine gezielte Übersetzungsänderung der Lenkung ein Überziehen der Lenkung durch den Fahrer vermieden.

2.2.3 Bremsen auf Fahrbahnen mit unterschiedlichen Reibwerten (μ -split)

μ -split-Oberflächen sind dadurch gekennzeichnet, dass der Fahrbahnreibwert auf einer Fahrzeugseite hoch ist (zum Beispiel Asphalt) und auf der anderen Fahrzeugseite niedrig (zum Beispiel Eis). Solche Fahrbahnen findet man beispielsweise dann vor, wenn verschneite oder vereiste Oberflächen teilweise aufgetaut sind oder wenn nasses Laub auf einer sonst trockenen Fahrbahn liegt. Wird auf einer derartigen Fahrbahn gebremst, dann ziehen die höheren Bremskräfte der Hochreihwertseite das Fahrzeug in diese Richtung (Fahrzeugschiefziehen). Um weiter geradeaus fahren zu können, muss der Fahrer eines Fahrzeuges ohne Dynamiklenkung einen Lenkradwinkel einstellen, der das Schiefziehen kompensiert. Bei einem Fahrzeug mit Dynamiklenkung wird dieser Lenkwinkel vom ESP selbständig eingeregelt, so dass der Fahrer das Lenkrad weitgehend in Geradeausstellung, also der Stellung seiner Wunschfahrtrichtung, belassen kann. Da das ESP den erforderlichen Lenkwinkel schneller und genauer ein-

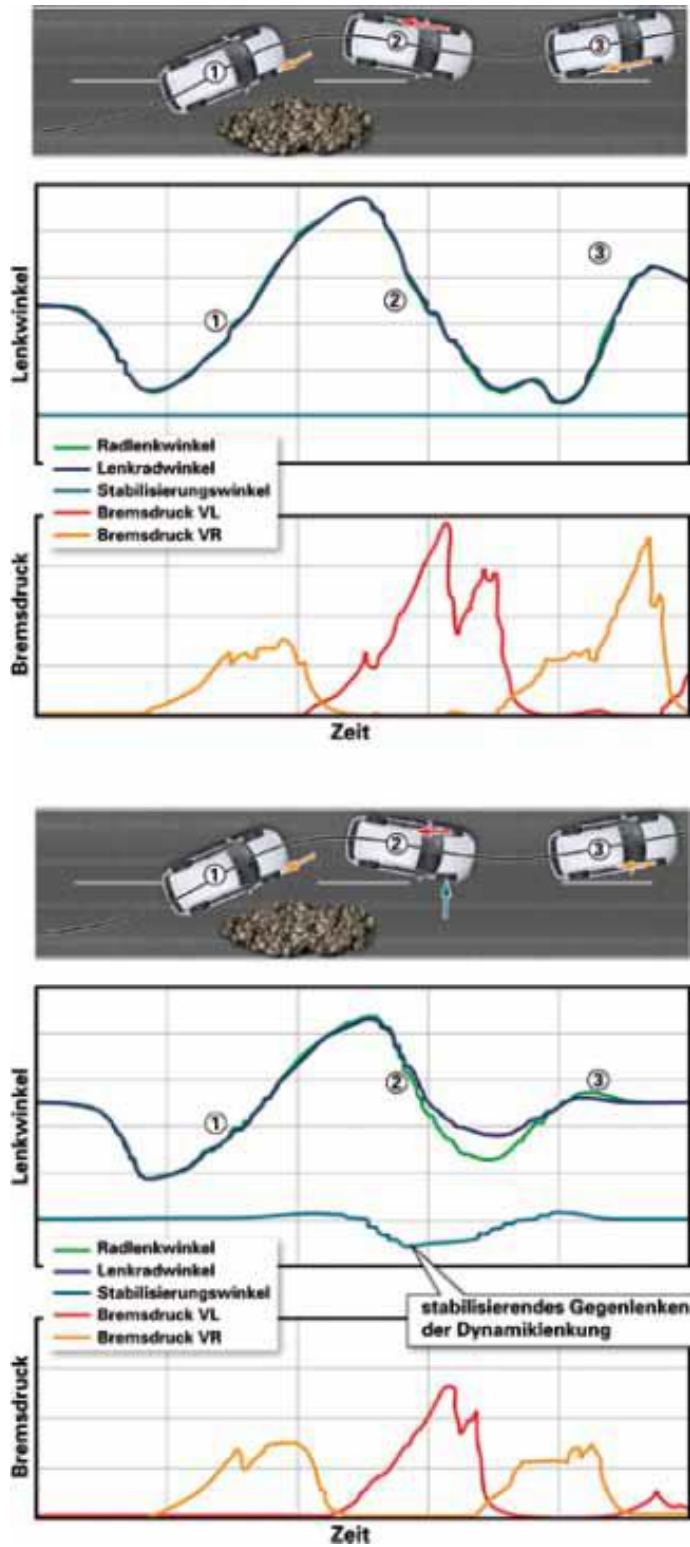


Bild 4
Lenk- und Bremsen-
eingriffe bei über-
steuerndem Fahr-
zeug ohne und mit
Dynamiklenkung

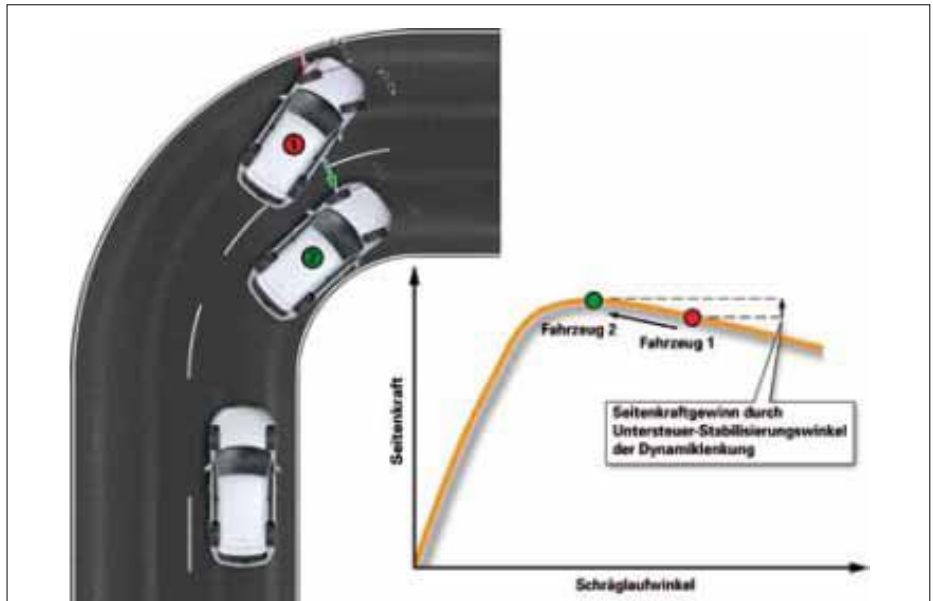


Bild 5
Funktionsprinzip der Untersteuerfunktion

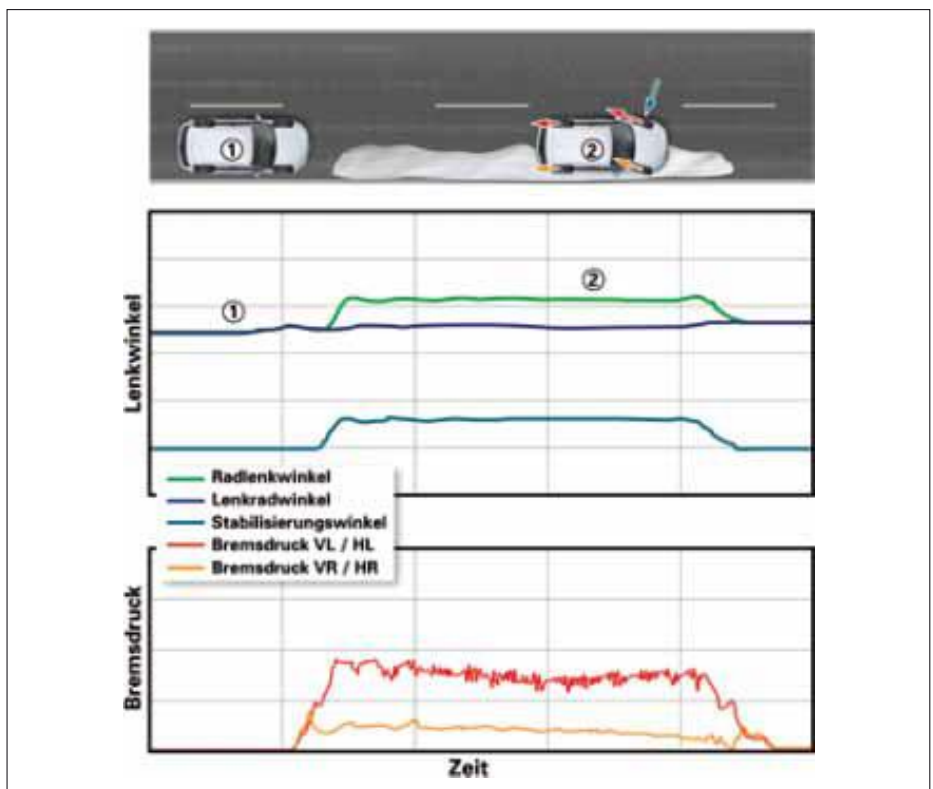


Bild 6
Lenk- und Bremseneingriffe beim Bremsen auf μ -split

stellt, als es der Fahrer normalerweise tut, ergeben sich in dieser Fahrsituation mit Dynamiklenkung im Durchschnitt kürzere Bremswege als ohne dieses System. **Bild 6** zeigt ein solches μ -split-Manöver mit Dynamiklenkung. Diese Funktion kommt ohne zusätzliche Radbremsdrucksensorik aus. Die Stabilisierungsfunktionen der Dynamiklenkung sind an den Taster des ESP gekoppelt (siehe Kapitel ESP).

3 Systemaufbau

3.1 Systemarchitektur

Die Funktionen der Überlagerungslenkung verteilen sich auf eine Vielzahl von mechanischen und elektronischen Komponenten. **Bild 7** zeigt die prinzipielle Architektur, sowie die Systemgrenze der neu entwickelten Bauteile und Softwaremodule.

3.2 Aufbau des Überlagerungsstellers

Der in der Lenksäule integrierte Steller besteht aus einem elektronisch kommu-

tierten Elektromotor mit Lagesensorik, dem Überlagerungsgetriebe und einer Sperre, die den Elektromotor im stromlosen Zustand verriegelt und so den direkten Durchgriff zwischen Lenkrad und Lenkgetriebe herstellt. Das in dieser Form eingesetzte sogenannte Wellgetriebe bietet für die Anwendung in der Dynamiklenkung gegenüber anderen Getriebeprinzipien entscheidende Vorteile:

- kompakte, koaxiale Bauform mit hoher Übersetzung und hoher Momentenkapazität
- geringes Gewicht
- hohe Torsionssteifigkeit
- Spielfreiheit
- sehr geringe Reibung.

Das Wirkprinzip des Wellgetriebes ist dem eines Planetengetriebes sehr ähnlich. Zur Überlagerung eines Winkels dreht der Elektromotor den elliptisch ausgeformten Innenläufer (WG). Dieser verformt über ein flexibles Dünnrings-Kugellager (FB) das mit der Lenkeingangswelle (lenkradseitig) verbundene dünnwandige Sonnenrad (FS). Das Sonnenrad steht an den Hochachsen der Antriebsellipse des Innenläufers im Eingriff mit einem Hohlrad (CS), das mit der

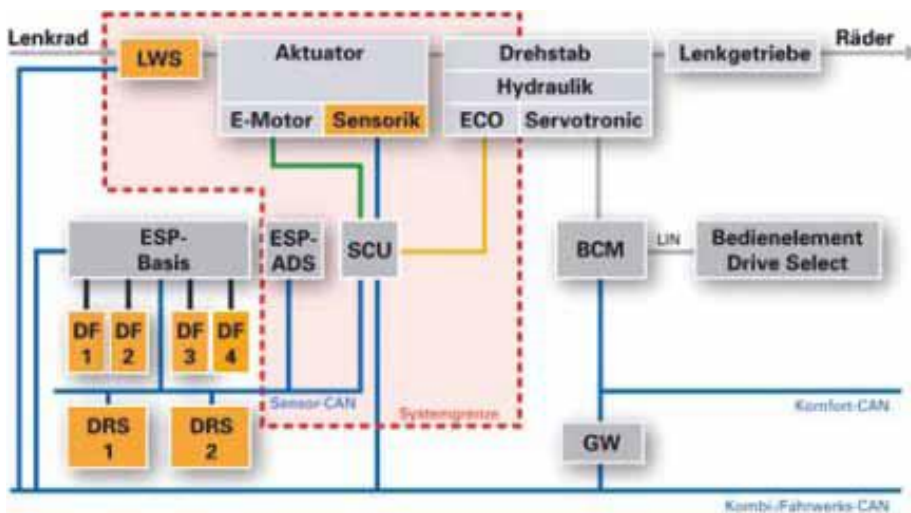


Bild 7
Systemarchitektur

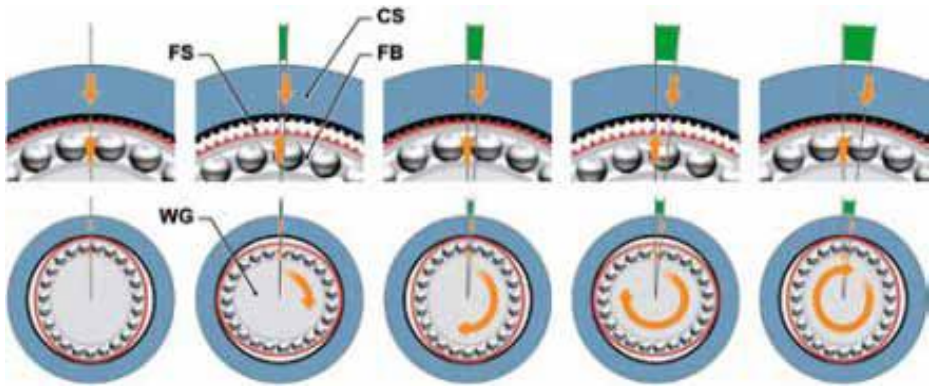


Bild 8
Funktionsprinzip
Harmonic Drive

Lenkausgangswelle verbunden ist. Aufgrund des Zahnzahlunterschiedes zwischen Sonnenrad und Hohlrad (lenkgetriebeseitig) kommt es beim Rotieren der Antriebsellipse zu einer Überlagerung, **Bild 8**.

3.3 Hydraulik

Schon zu Beginn der Entwicklung wurden die erhöhten Anforderungen der Dynamiklenkung konzeptionell im hydraulischen Lenksystem berücksichtigt. Aufbauend auf dem Modularen Längsbaukasten mussten nur wenige Bauteile für den Einsatz im Audi Q5 angepasst werden. Bedingt durch die größere Kolbenfläche der Zahnstangenlenkung wurden jeweils motorspezifisch leistungsfähigere Pumpen, im Wesentlichen elektronisch volumenstromgeregelter Ausführungen, gewählt. Im Gesamtpaket Audi drive select wurden die ebenfalls geschwindigkeitsabhängigen Servotronic-Kennlinien passend zu den Übersetzungskennlinien abgestimmt und so für den Kunden ein Optimum an Komfort und Agilität bereitgestellt. Die Gesamtüberarbeitung des Lenkungssystems ermöglicht die Erfüllung heutiger Anforderungen der Energieeffizienz bei gleichzeitiger Maximierung des Fahrspaßes.

3.4 Elektronik

Vor dem Hintergrund der Gewichts- und Bauraumdiskussion ergeben sich auch für die Elektronik erhöhte Anforderungen im Steuergerätedesign. Bei der Dynamiklenkung ist es gelungen, das elektronische Steuergerät sehr kompakt auszuführen und durch ein kombiniertes Halter- und Entwärmungskonzept auf kleinstem Raum im Fahrzeug zu integrieren. Dabei wird die Verlustleistung direkt über den mechanischen Halter in die Karosse eingeleitet. Um den Sicherheitsanforderungen gerecht zu werden, wird bei der Dynamiklenkung auf ein 1-Prozessorkonzept mit einem Smart-Watchdog gesetzt. Kombiniert mit einem robusten Schaltungsdesign, einer hohen Diagnose- und Überwachungsabdeckung, sowie einer hohen EMV-Festigkeit (EMV = Elektromagnetische Verträglichkeit) bildet das Steuergerät eine leistungsfähige Elektronikplattform für sicherheitsrelevante Anwendungen.

3.5 Softwarearchitektur

Bild 9 zeigt den funktionalen Signalfloss der Steering Control Unit (SCU). Das Datenaufbereitungsmodul bereitet die notwendigen Eingangssignale wie Lenkradwinkel und Radgeschwindigkeits-

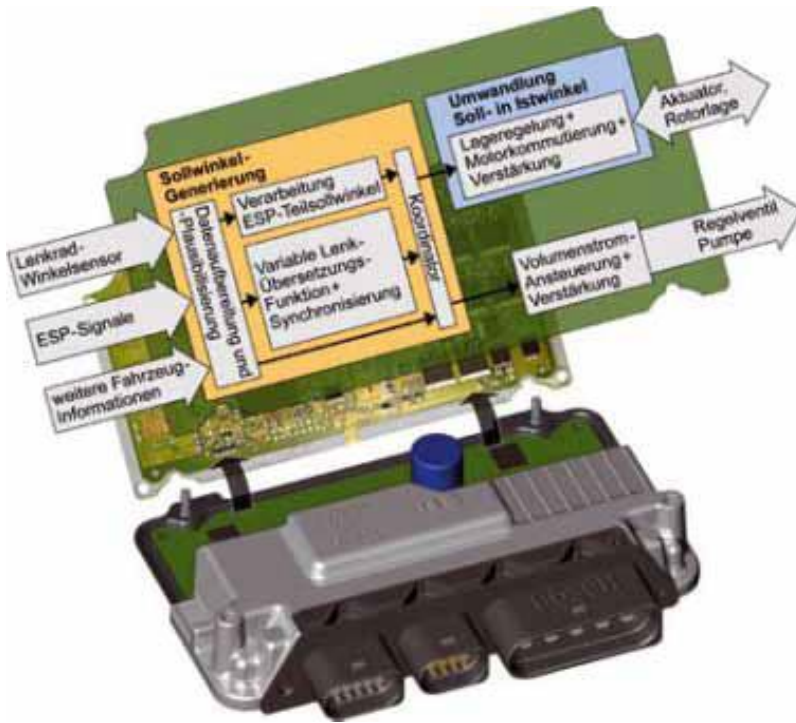


Bild 9
Steuergerät SCU
mit Software-
Architektur

informationen auf und gleicht eventuell vorhandene kleine Signal-Offset-Fehler aus. Außerdem berechnet es eine Fahrgeschwindigkeit, die sowohl für Front- als auch für quattro-Fahrzeuge die erforderliche Güte in allen Fahrsituationen sicherstellt. Die variable Lenkübersetzungsfunktion liest diese Signale ein und berechnet die gewünschte Lenkwinkelüberlagerung. Zusätzlich ist in diese Funktion eine harmonische Winkelsynchronisierung integriert. Eine Asynchronität zwischen Lenkrad und Vorderachse kann entstehen, wenn im inaktivem Zustand, zum Beispiel bei ausgeschaltetem Verbrennungsmotor, große Lenkradbewegungen stattgefunden haben. Die Summe der ersten beiden Signale wird zusammen mit dem verarbeiteten ESP-Lenkeingriff im Koordinator zu einem Gesamt-Sollwinkel addiert. Die zweite Aufgabe des Koordinators ist das Sicherstellen einer geeigneten Fail-Safe-Reak-

tion in Abhängigkeit zum ausgegebenen Status aus der Datenplausibilisierung. Lageregelung und Motorkommutierung haben die Aufgabe, die Sollwinkel mit der erforderlichen Regelgüte an den Endstufentreiber weiterzuleiten. Neben den klassischen Anforderungen ergab die Einbaulage des Überlagerungsgetriebes zwischen Lenkventil und Lenkrad erhöhte Anforderungen an die zulässigen Momentenprünge im Motor.

4 Sicherheitskonzept

Das Steuergerät muss neben der Erfüllung von funktionalen Anforderungen, wie zum Beispiel die Überlagerung und Ansteuerung des Anteils der variablen Lenkübersetzungsfunktion und des extern berechneten Stabilisierungsanteils, auch Fehlfunktionen elektronisch verhindern. Die abgeleiteten Sicherheits-

anforderungen an die SCU für die zu verhindernden Fehlfunktionen sind:

- Vermeiden von reversiblen und irreversiblen Stellfehlern, die durch die SCU, den Elektromotor oder den Motorlagesensor verursacht werden können
- Überwachen der extern berechneten, stabilisierenden Eingriffe und das Einleiten von geeigneten Maßnahmen, damit die maximalen Stellfehler nicht erreicht werden
- Sicherstellen, dass im Fehlerfall der maximal tolerierbare Übersetzungssprung nicht auftritt.

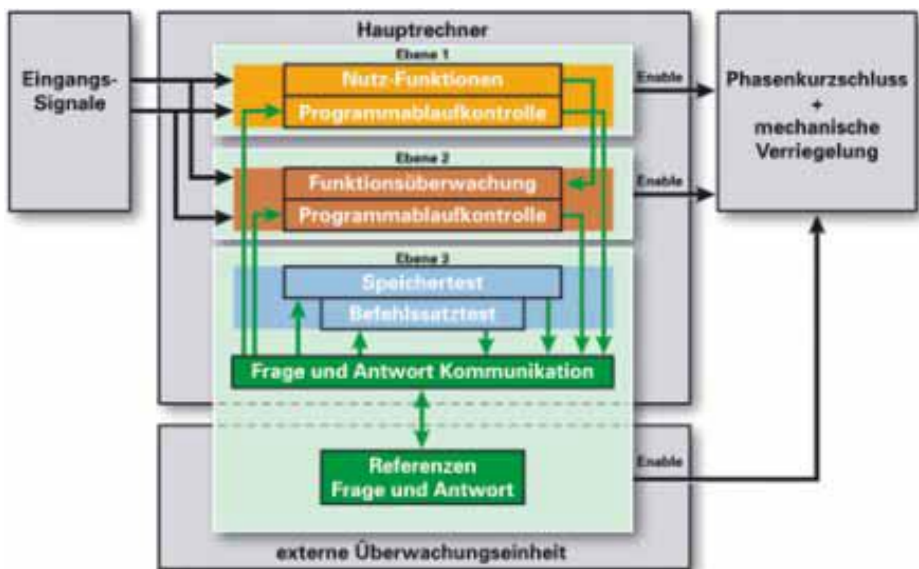
Bild 10 zeigt das gewählte Drei-Ebenen-Prinzip der SCU. In Ebene 1 sind alle notwendigen Softwaremodule integriert, die aus funktionaler Sicht notwendig sind, einschließlich der Signalplausibilisierung und der Fehlerstrategie. Alle kritischen Pfade, die zu einer Fehlfunktion führen können, werden in Ebene 2 diversitär gerechnet, **Bild 11**. Hierdurch wird sichergestellt, dass systematische Fehlerursachen (zum Beispiel Programmierfehler)

oder sporadische RAM-Fehler nicht zu einer Fehlfunktion führen können. Die dritte Ebene stellt beispielsweise den Programmablauf und ein korrektes Ausführen des Befehlsatzes sicher. Um eine hohe Verfügbarkeit zu gewährleisten, muss in Abhängigkeit des aufgetretenen Fehlers eine schrittweise Degradierung der Systemfunktionalität vorgenommen werden:

- Ansteuern einer konstanten Lenkübersetzung bei fehlender Fahrgeschwindigkeitsinformation
- Sperrung externer stabilisierender Eingriffe bei absehbarer geringer Performance, zum Beispiel durch Bordnetzschwankungen
- Systemdeaktivierung im Nulldurchgang bei Fehlerverdacht, um ein schiefes Lenkrad zu vermeiden
- vollständige Systemdeaktivierung.

Weiterhin kann die Verfügbarkeit auch nach schwerwiegenden externen Fehlern, wie zum Beispiel nach einem schlagartigen Spannungsverlust, durch eine Initialisierungsphase wieder hergestellt

Bild 10
Das Drei-Ebenen-Prinzip der SCU



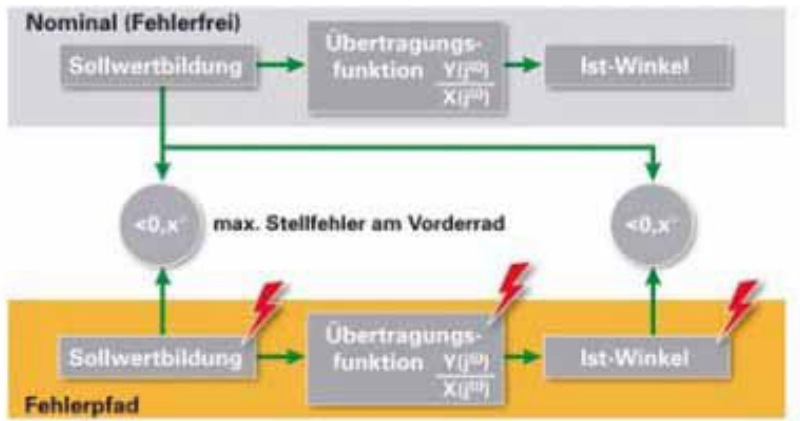


Bild 11
Überprüfung der
Lageregelung

werden, ohne dass eine Werkstatt aufgesucht werden muss. Neben dem Verhindern von Fehlfunktionen muss die SCU auch kontinuierlich sicherheitsrelevante Signale für die restlichen Fahrzeugsysteme liefern. Für jedes gesendete Signal wird das erforderliche Sicherheitsniveau eingehalten.

5 Zusammenfassung

Mit der Dynamiklenkung ist es gelungen, basierend auf dem aus dem A4 und A5 bekannten Konzept aus Aktuatorik, Steuergerät, Sensorik und Vernetzungskomponenten eine fahrzeuggerechte Implementierung darzustellen, ohne wesentliche Komponenten verändern oder neu entwickeln zu müssen. Zudem verbindet das System maximalen Kundennutzen mit hoher Kosteneffizienz.

Fahrwerk

Die Achsen des neuen Audi Q5

CLAUS LACHER | HARALD ELSÄSSER | WILFRIED LEITNER | SIEGFRIED FISCHER |
THOMAS CONRAD | RUBEN GOLDBERG



Vorgabe bei der Entwicklung der Audi Q5-Achsen war es, neue Maßstäbe im SUV-Segment zu setzen. Das Bauprinzip und die Komponenten der Achsen entstammen dem Modulen Längsbaukasten, aus dem sich auch die Baureihen A5 und A4 bedienen. Bei der Konzeption dieses Achsbaukastens wurden neben den bekannten markenspezifischen Fahrwerksattributen wie Komfort, Sportlichkeit und Fahrstabilität auch die Erfüllung SUV-typischer Fahrwerkseigenschaften wie Bodenfreiheit, Traktion und Robustheit berücksichtigt. Deshalb bewältigt der Audi Q5 den Spagat zwischen sportlichem Alltagsfahrzeug und Geländewagen in einzigartiger Weise.

1 Konstruktive Auslegung

Für die Entwicklung des Modularen Längsbaukastens wurden bei der Bauteilkonstruktion die neuesten Entwicklungsmethoden eingesetzt und neue Werkzeuge entwickelt beziehungsweise optimiert, um Entwicklungsgüte und Entwicklungszeit zu verbessern. Alle Achsbauteile wurden mit den Finite-Elemente-Methoden der Topologie- und Shape-Optimierung hinsichtlich minimalen Materialeinsatzes gestaltet. **Bild 1** zeigt am Beispiel des Schwenklagers der Vorderachse wie der Bereich zwischen der Anbindung des Radlagers und der unteren Lenkerebene in mehreren Schritten gestaltet wurde. Durch Vorgabe der Randbedingungen, wie die im Fahrbetrieb eingeleiteten Kräfte, und der zur Verfügung stehende maximale Bau- raum konnte mit Hilfe der Topologie- optimierung eine gewichtsoptimierte 3D-Geometrie generiert werden. Im Computer Aided Design (CAD) wurde dann unter Berücksichtigung der fertigungstechnischen Randbedingungen ein gewichts- und funktionsoptimiertes Bauteil ausgelegt. Erstmals wurde ein CAD-Datenbanksystem eingesetzt, mit dem bereichsübergreifend und tages- aktuell CAD-Daten der Achsen inklusive der Umgebungsgeometrie mit allen Bewegungsinformationen zur Verfügung gestellt werden können. Für das CAD-

System Pro/Engineer wurde das Werkzeug Custom-Animation entwickelt, mit dem sich umfangreiche Untersuchungen und Simulationen im CAD durchführen lassen. Mit Custom-Animation werden Bewegungsinformationen, die mit der Achskinematiksimulation ADAMS ermittelt wurden, in die Achsbaugruppen eingefügt und mit den Bauteilen verknüpft. Dadurch können alle Betriebsstellungen der Achse im CAD angefahren und untersucht werden. Mit diesem Werkzeug wurden automatisiert dynamische Bauteilhüllen generiert, sowohl als absolute Hüllen im Fahrzeugkoordinatensystem als auch als relative Hüllen zu benachbarten Bauteilen. Deutliche Verbesserungen wurden im Ablauf von Freigangs- und Kollisionsuntersuchungen erreicht, da die Analysen automatisiert durchgeführt und dokumentiert werden konnten. Durch den Einsatz dieser virtuellen Entwicklungsmethoden erreichte das Fahrwerk schon im Frühstadium der Entwicklung einen hohen Reifegrad. Trotz kurzer Entwicklungszeit blieb somit ausreichend Spielraum für Feinabstimmungen und Optimierungen.

Die für die Geländetauglichkeit erforderlichen Bodenfreiheiten und das SUV-typische Fahrzeuerscheinungsbild werden vor allem über die großen Räder und über ausgefederte Radpositionen innerhalb der großen Federwege erreicht, **Tabelle 1** und **Tabelle 2**. Die Schwerpunktlage eines SUV, und somit auch die des Audi Q5, ist deutlich höher als die

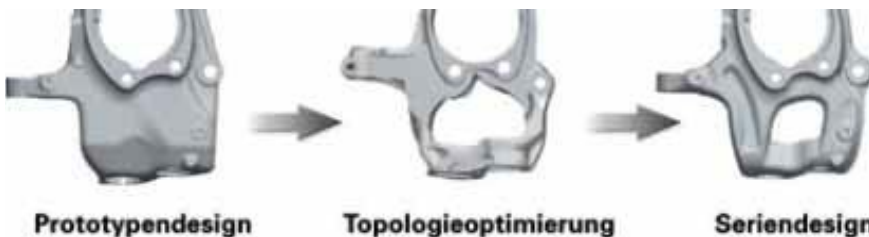


Bild 1
Topologie-
optimierung des
Schwenklagers

Kennwerte der Vorderachskinematik		
Einpresstiefe	[mm]	39
Spurweite	[mm]	1617
Sturz	[min]	-25
Vorspur (gesamt)	[min]	20
Spreizung	[°]	4,6
Nachlaufwinkel	[°]	3,9
Nachlaufstrecke	[mm]	23,3
Nachlaufversatz	[mm]	-0,2
Lenkrollradius	[mm]	-9,5
Störkrafthebelarm	[mm]	130,6
Höhe Momentanzentrum	[mm]	86,3
Schrägfederung	[°]	1,1
Einfederweg	[mm]	123
Ausfederweg	[mm]	92
Federübersetzung		0,68
Dämpferübersetzung		0,68
Bremsstützwinkel	[°]	9,1

Tabelle 1
Kennwerte der Vorderachskinematik

Kennwerte der Hinterachskinematik		
Einpresstiefe	[mm]	39
Spurweite	[mm]	1613
Sturz	[min]	-80
Vorspur (gesamt)	[min]	20
Höhe Momentanzentrum	[mm]	91,1
Schrägfederung	[°]	9
Einfederweg	[mm]	135,0
Ausfederweg	[mm]	95,0
Federübersetzung		0,86
Dämpferübersetzung		1,0
Bremsstützwinkel	[°]	26,6

Tabelle 2
Kennwerte der Hinterachskinematik

eines normalen Pkw. Zur Kompensation der daraus resultierenden höheren Wankneigung wurden zusätzlich zu modifizierten Feder-Dämpfer- und Stabilisatorabstimmungen die Momentanzentren der Vorder- und Hinterachse relativ hoch angeordnet. Die großen Spurweiten an Vorder- und Hinterachse ergeben einen sehr günstigen Static Stability Factor. Ein wichtiges Maß für die Traktionsfähigkeit eines Fahrwerks im Gelände ist neben der Bodenfreiheit die diagonale Achsverschränkung. Ermittelt wird die Achsverschränkung mit zwei Rampen, die vor zwei diagonal gegenüberliegende Räder gestellt werden. Das Fahrzeug fährt auf die beiden Rampen, bis eines der entlasteten Räder gerade noch Bodenkontakt hat. Das Maß der Radaufstandsfläche zur Ursprungsfahrbahn ist als diagonale Achsverschränkung definiert. Der Audi Q5 erreicht mit 160 mm einen Wert, der in der Klasse der sportlich ausgelegten SUV neue Maßstäbe setzt, **Bild 2**. Die speziellen Einsatzbedingungen eines SUV auch auf sehr unebenen Fahrbahnen bewirken zwangsläufig einen höheren Energieeintrag in die Achsen als bei normaler Straßenfahrt. Schon in der Basis-



Bild 2
Diagonale Achsverschränkung

ausführung sind die Stoßdämpfer deshalb in Heavy-Duty-Qualität ausgeführt: Sie haben gegenüber einem normalen Pkw ein vergrößertes Ölvolumen, wärmebeständige Dichtungen und, bedingt durch die große Oberfläche, eine höhere Wärmeabgabe. Die großdimensionierten Radlager wurden bezüglich Lebensdauer und Steifigkeit speziell für diesen Einsatz ausgelegt.

2 Vorderachse

Bei der Fünflenker-Vorderachse des Audi Q5 wird das Rad über vier Querlenker und die Spurstange, die alle am Schwenklager befestigt sind, geführt. Das untenliegende Lenkgetriebe wurde vor der Radmitte angeordnet, wodurch die Lenkbefehle sehr direkt in das Rad eingeleitet werden können, was zu einer spontanen und präzisen Lenkansprache führt, **Bild 3**. Durch die Position der oberen und unteren Querlenker im Raum entsteht eine virtuelle Lenkachse, die nahe

der Radmitte positioniert ist. Dadurch erreicht man einen geringen Störkrafthebelarm und Lenkrollradius, womit die Einflüsse durch Antriebs-, Bremskräfte und Unwuchtanregungen im Gelände minimiert werden konnten, was besonders bei den großen SUV-Rädern positiv zum Tragen kommt.

Die Bewegung der virtuellen Lenkachse wurde beim Federn und Lenken so definiert, dass sich ein geringer Radraumbedarf und auch ein geringer Wendekreis ergibt. Das ermöglicht den Einsatz von Reifen der Durchmesserklasse 750 mm trotz der kompakten Fahrzeugaußenmaße.

Durch die große Abstützbasis der oberen und unteren Lenkerebene in Kombination mit dem an der Karosserie starr verschraubten Hilfsrahmen wird eine hohe Sturzsteifigkeit erreicht, was der sportlichen Fahrwerksauslegung zu Gute kommt. Der Traglenker, der nahezu senkrecht zur Fahrzeugmittenebene angebracht ist, nimmt über ein steifes Gummi-Metall (GM)-Lager die Seitenkräfte auf.



Bild 3
Ansicht Fünflenker-Vorderachse

Längskräfte werden hauptsächlich über den Führungslenker aufgenommen, der als Druckstrebe ausgeführt ist. Das GM-Lager im Führungslenker ist als Komfortlager ausgeführt und reduziert die von außen induzierten Schwingungen auf ein für den Fahrer nicht mehr wahrnehmbares Maß. Der eingesetzte Modulare Längsbaukasten erlaubt die Querverschiebung der oberen und unteren Lenkerebene, wodurch die Anschraubebene des Rades um 29 mm nach außen positioniert werden konnte und somit den Einsatz von breiten SUV-Reifen ermöglicht. Erreicht wurde das in der oberen Lenkerebene durch die Verschiebung der karoserieseitigen Befestigungspunkte des Lagerbocks und in der unteren Lenkerebene durch die Verlängerung der Aluminium-Gussknoten des Vorderachsträgers. Der Gesamtfederweg des Fahrzeugs von 215 mm bietet hervorragende Voraussetzungen für komfortable Fahreigenschaften und eine für diese Fahrzeugklasse außergewöhnlich gute Geländetauglichkeit. Der Gesamtfederweg der Vorderachse teilt sich aus der Trimm-

lage leer auf in 118 mm Einfederweg und 97 mm Ausfederweg. Ein weiterer Schwerpunkt bei der Entwicklung war die Reduzierung der Bauteilmassen. So wurden der Hilfsrahmen, das Schwenklager, der Lagerbock und alle Querlenker als Aluminium-Bauteile ausgeführt. Durch die Gewichtsreduzierungsmaßnahmen konnten im Vorderwagenbereich die ungefederten Massen gering gehalten werden, was für den hohen Komfortanspruch des Fahrzeugs vorteilhaft ist.

3 Hinterachse

Die Trapezlenkerachse kombiniert eine kompakte Bauweise in idealer Weise mit hervorragenden Fahr- und Komforteigenschaften, **Bild 4**. Der Trapezlenker, das namensgebende Bauteil der Achse, überträgt als biege- und verwindungssteifes Aluminium-Hohlprofil alle Momente um die Radachse und einen hohen Anteil der Längs- und Querkkräfte auf den Achsträger. Dadurch reduziert sich die obere Lenkerebene auf einen einzelnen Stab-

Bild 4
Ansicht Trapez-
lenker-Hinterachse





Bild 5
Elastomergelenk

lenker. Der so ermöglichte geradlinige Längsträgerverlauf trägt maßgeblich zur Steifigkeit des Hinterwagens und damit zu einem sehr guten Crashverhalten bei. Die räumliche Anordnung von Trapezlenker und Spurstange, sowie die Ausrichtung und Steifigkeiten der Elastomerlager bewirken spurstabilisierende Radstellungsänderungen bei Längs- und Seitenkräften. Dies führt bei hervorragendem Handling zu hoher Fahrsicherheit und Stabilität bis in den fahrdynamischen Grenzbereich. Der modulare Aufbau des Längsbaukastens, aus dessen Komponenten sich die Achse des Audi Q5 zusammensetzt, sieht den Einsatz von verschiedenen breiten Achsträgern, Stabilisatoren und unterschiedlichen Bauteilelastgruppen vor.

Beim Audi Q5 wurde die größere Spurweite gegenüber den Vorgängerachsen im A4 und A5 durch eine Verbreiterung des Achsträgers und Stabilisators um 62 mm realisiert. Die Quertraversen sind verlängert, die Längsrohre und der gesamte Aufbau des Achsträgers blieben

gleich. Die am Achsträger befestigten Lenker und die Spurstange konnten somit geometrisch unverändert aus dem Baukasten übernommen werden. Radträger und Trapezlenker wurden wegen der höheren Momente aus den großen Rädern und wegen des Fahrzeuggewichts stärker dimensioniert. Der Stabilisator wurde durch Verlängerung des geraden Mittelstücks der Spurweite angepasst.

Alle Lenker und der Radträger sind aus Aluminium gefertigt. Die daraus resultierenden geringen ungefederten und gefederten Massen tragen zu den hervorragenden Komfoteigenschaften und der Agilität des Audi Q5 bei.

Die sehr gute Abkoppelung des Hinterwagens gegen Fahrbahnanregungen und Schwingungen trägt neben der elastischen Lagerung des Achsträgers die ausschließliche Verwendung von hochdämpfenden Elastomerlagern an den Lenkeranbindungen bei. Als Verbindungsgelenk zwischen Radträger und Trapezlenker wurde ein neuartiges Elastomergelenk entwickelt, **Bild 5**. Es kombiniert höchste



Bild 6
Hydraulisch
dämpfende
Gummi-Metall-
Lager

translatorische Federsteifigkeiten, die an dieser Stelle kinematisch erforderlich sind, mit geringer rotatorischer Steifigkeit, kleiner Masse, guter Geräuschisolation und hoher Robustheit. Das Gelenk ist aus drei mehrschichtigen Elastomergelenken mit hoher innerer Vorspannung aufgebaut, die als Baueinheit in einem Gehäuse zusammengefasst sind.

An der vorderen Lagerstelle des Achsträgers werden konventionelle GM-Lager, an der hinteren als Schwingungskomfortmaßnahme hydraulisch dämpfende GM-Lager eingesetzt, **Bild 6**.

Achsträgerlager werden in Querrichtung aus fahrdynamischen Gründen möglichst steif, in Hochrichtung zur akustischen Entkoppelung möglichst weich ausgelegt.

Bauartbedingt konnte bisher bei hydraulischen Lagern mit herkömmlicher Lagertechnik nur eine Kennlinienspreizung bis zu einem Steifigkeitsverhältnis von 1:6 erreicht werden.

Durch den Einsatz weiterführender Techniken bei Design und Fertigung wurden die hydraulischen Lager so entwickelt, dass eine Spreizung von 1:13 realisiert werden konnte. Eine sehr breite Elastomerspur, die gleichmäßig über die gesamte Lagerhöhe verläuft, und das zusätzliche Kalibrieren des Käfigs, das Druckspannung auf das Elastomer erzeugt, erlauben den Einsatz von sehr weichen Gummiqualitäten mit geringen dynamischen Verhärtungen ohne Lebensdauereinbußen.

Sicherer Ratgeber für die richtige Entscheidung bei Fragen zum Qualitätsmanagement



Walter Geiger | Willi Kotte

Handbuch Qualität

Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme – Perspektiven

5., vollst. überarb. u. erw. Aufl. 2008. XXVI, 596 S. mit 210 Abb. Geb. EUR 49,90

ISBN 978-3-8348-0273-6

Qualitätsmanagement ist Querschnittsaufgabe und ist daher in Wirtschaft, Verwaltung, Gesundheitswesen, Bankwesen, Versicherungswirtschaft usw. wahrzunehmen. Das vorliegende Handbuch Qualität dient dabei als Helfer und sicherer Ratgeber für richtige Entscheidungen. Dieses Fachbuch gibt dem Leser zu den Grundlagen und zu fast jedem Teilgebiet eine fundierte und in sich geschlossene Orientierung in der kaum noch überblickbaren fachlichen Meinungsvielfalt. Das Handbuch Qualität zeichnet sich durch eine unmissverständliche, zielführende Terminologie für alle behandelten Grundlagen und Teilgebiete des Qualitätsmanagements aus.

In der vorliegenden Auflage wurde besonderer Wert auf Normenaktualität gelegt, textliche Verbesserungen vorgenommen und die Aussagekraft der Abbildungen erhöht.

Autoren | Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Walter Geiger ist seit vielen Jahren im Qualitätsmanagement engagiert. Er war in leitender Industrie- und universitärer Position und langjährig in der universitären Lehre tätig. Er arbeitet heute als Beratender Ingenieur, in der Normung und in der Deutschen Gesellschaft für Qualität.

Dipl.-Ing. Willi Kotte war Qualitätsbeauftragter in einem großen deutschen Unternehmen der Computer-Herstellung und ist jetzt Beratender Ingenieur auf Spezialgebieten des Qualitätsmanagements, beispielsweise Six Sigma.

Pressestimmen

„Insgesamt zeichnet sich das Buch durch gute Lesbarkeit sowie klare und zielführende Darstellungen der Sachverhalte aus. Ein Abkürzungsverzeichnis sowie eine kurz gehaltene Gegenüberstellung englischer und deutscher Fachbegriffe sind eine dem Leser sicher willkommene Bereicherung des Werkes.“ RDV 1/2008

„Dieses Buch gilt Branchen unabhängig. Sein Inhalt gründet sich auf mehr als drei Jahrzehnte Wissenssammlung und Erfahrungen, national und international, in Praxis und Theorie.“

www.pro-manager.de, 04.01.2006

Einfach bestellen:

buch@viewegteubner.de Telefax +49(0)611. 7878-420

TECHNIK BEWEGT.


**VIEWEG+
TEUBNER**

Fahrwerk

Aggregatelagerung

STEFAN VOLLMANN



Für die Entwicklung der Aggregatelagerung des Audi Q5 galt die Prämisse, die für den Modularen Längsbaukasten entwickelten Bauteile konsequent einzusetzen. Die im Audi A4 eingeführte karosseriefeste Drei-Punkt-Lagerung konnte übernommen und die einzelnen Abstimmenteile hinsichtlich Schwingungskomfort und Akustik für den SUV angepasst werden. Der Einsatz von Motorlagern mit integriertem Zuganschlag und die Ausrüstung mit quattro-Antrieb macht eine separate Abstützung der Antriebsmomente überflüssig.