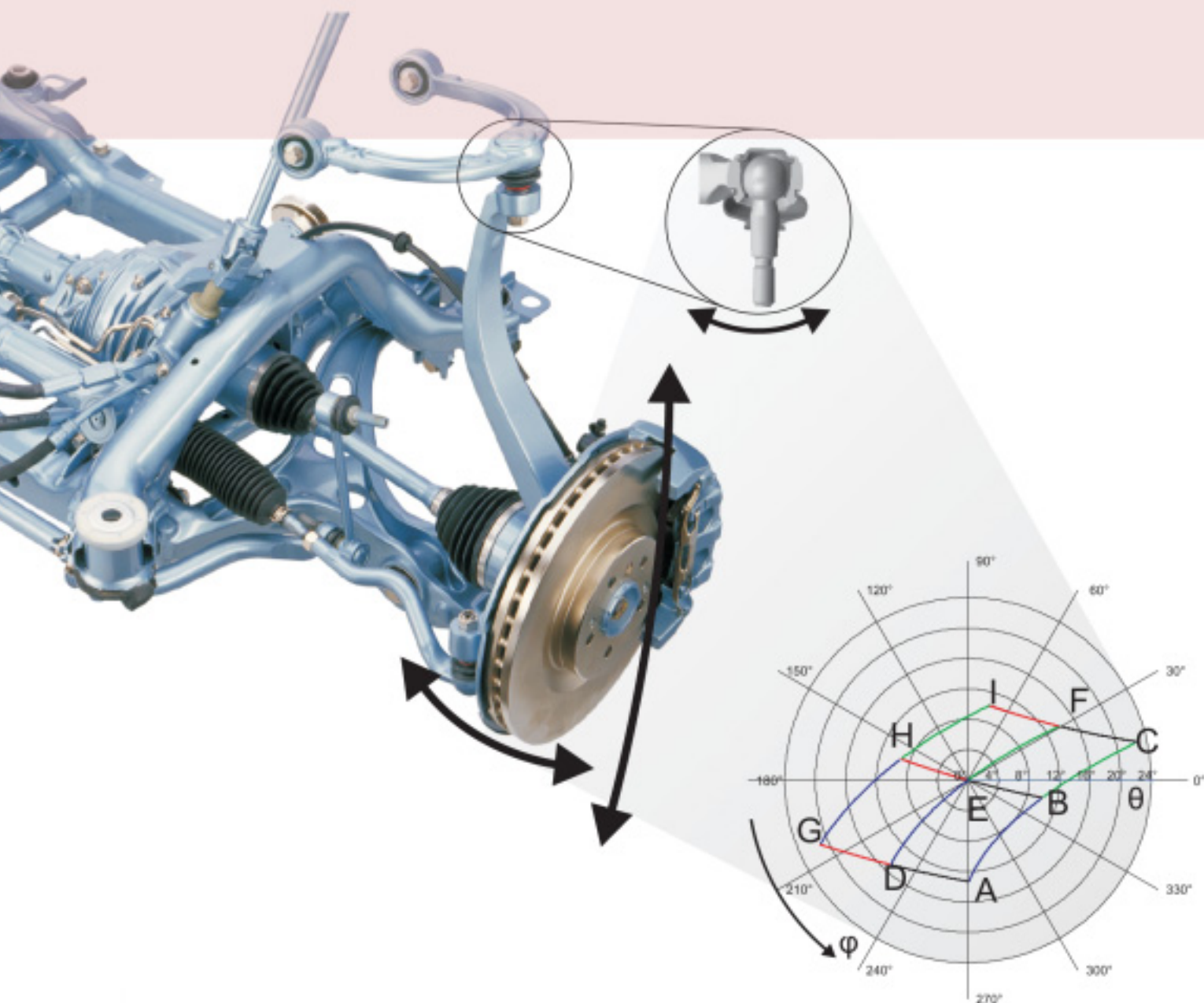


Berechnung und Darstellung von Gelenkwinkeln im Fahrwerk

Immer kürzere Entwicklungszeiten und höhere Anforderungen an die Funktionalität von Fahrwerksystemen erfordern einen effizienten Entwicklungsprozess. Eine sorgfältige Vorentwicklung stellt sicher, dass Parameter frühzeitig eingebunden werden und dass Bedingungen für die folgende Entwicklung schnell und zuverlässig postuliert werden können. Zusammen mit ZF Lemförder Fahrwerktechnik hat das Institut für Kraftfahrwesen Aachen (ika) ein Berechnungsprogramm für den Einsatz in der Achsvorentwicklung erstellt.



1 Einführung

Zur starrkinematischen Vorauslegung von Achssystemen ist das Berechnungstool ABE entwickelt worden. Dieses ist modular gestaltet und wurde stetig weiterentwickelt. Bei ABE handelt es sich um ein bewährtes und eigenständiges Entwicklungswerkzeug, das die schnelle kinematische Analyse und Vorauslegung von Achsen ermöglicht.

Nun wurde ABE um ein Modul zur Berechnung der Gelenkwinkel von Kugelgelenken und Gummilagern bei starrkinematischen Bewegungen des Achssystems erweitert. Das neue Gelenkwinkel-Modul ist in der Lage, bei den in einem Achssystem entstehenden Bewegungsabläufen mit den beiden Freiheitsgraden „Federbewegung“ und „Lenkbewegung“ die relativen Gelenkstellungen auszuwerten und anschaulich darzustellen.

2 Das Basistool ABE

Das Softwaretool ABE wurde zur kinematischen Analyse, zum Vergleich beziehungsweise Benchmark und zur schnellen Vorauslegung von Achssystemen erstellt. Nach Eingabe der kinematisch relevanten Anlenkpunkte der Achse (Hardpoints) werden alle starrkinematischen Fahrwerkskennwerte innerhalb kürzester Zeit berechnet und dargestellt. Schnelle Parametervariationen und Benchmarkanalysen von Achssystemen sind möglich. Das Berechnen von aufgelösten Lenkerverbunden beziehungsweise räumlichen Achskinematiken (zum Beispiel Mehrlenkerachsen) wurde ermöglicht. ABE ist in der Programmiersprache Visual Basic for Applications (VBA) unter Microsoft Excel realisiert und kann lizenzfrei auf nahezu jedem PC eingesetzt werden. Besonders der schnelle Aufbau eines Achssystems und die

intuitive Bedienung machen das Programm für die Akquisition auch beim Kunden vor Ort interessant, **Bild 1**.

Der Berechnungsalgorithmus basiert auf einem mathematischen Ansatz von Matschinsky [1, 2]. Dieser ist in [3] umgesetzt sowie deutlich erweitert worden. Mit diesem Ansatz wird der translatorische und rotatorische Geschwindigkeitszustand des Radträgers berechnet. Positionen und Geschwindigkeiten aller beteiligten Punkte innerhalb der Radaufhängung, wie zum Beispiel des Radaufstandspunktes oder Radmittelpunktes, liegen damit explizit vor und werden für die Berechnung der Kinematikennwerte [1, 2, 3] herangezogen, **Tabelle**.

Ein allgemeiner Fünflenker-Mechanismus bildet die Basis der Berechnungen in ABE, womit sich eine Vielzahl verschiedener Radaufhängungen beschreiben lassen (Doppelquerlenker, Mehrlenkerachse etc.). Weitere Achstypen wie zum Beispiel McPherson-Aufhängungen lassen sich mittels geometrischer und kinematischer Formulierungen ebenfalls mit ABE berechnen. Die Beschreibung der Lenkachsengeometrie auch bei ideellen Lenkachsen sowohl bei Hub- als auch bei Lenkbewegungen erfordert erweiterte Methoden, die in [3] vollständig beschrieben sind.

3 Gelenkbewegung

Wenn eine Radaufhängung bewegt wird, entstehen Bewegungen der Lenker, die in ABE als Zweipunkt-Lenker aufgefasst werden. Damit verbunden resultieren Bewegungen in den Gelenken, mit denen die Lenker entweder am Fahrzeugaufbau oder am Radträger befestigt sind. In diesem Artikel wird exemplarisch einer der gängigen Fälle betrachtet, bei dem der Lenker fahrzeugseitig mit einem Gummilager an der Karosserie

Die Autoren



Dipl.-Ing. Ingo Albers ist am Institut für Kraftfahrwesen Aachen im Geschäftsbereich Fahrwerk organisatorischer Leiter „Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik“.



Dr.-Ing. Christoph Elbers ist Leiter Vorentwicklung Achsen bei der ZF Lemförder Fahrwerktechnik, Lemförde.

und radträgerseitig mit einem Kugelgelenk befestigt ist. Andere Konfigurationen sind ebenfalls denkbar.

Für jede Radaufhängung werden verschiedene Kugelgelenke und Gummilager benötigt. Neben der Lastabhängigkeit, die nicht Thema dieses Artikels sein soll, ist die Auslegung insbesondere von den kinematischen Anforderungen an das Gelenk abhängig. Ein Achslieferant wie ZF Lemförder liefert hauseigene Gelenke und Lager und kann somit in der Achsauslegung und -vorentwicklung bereits wichtige Erkenntnisse für die hausinterne Komponentenentwicklung generieren. So ist zum Beispiel für ein Kugelgelenk relevant, welche Winkelbereiche maximal erreicht werden und welche Gelenkstellungen über einen definierten Bewegungszyklus angefahren werden. Diese Erkenntnisse beeinflussen maßgeblich das Design des Kugelgelenks. Bei einem Kugelge-

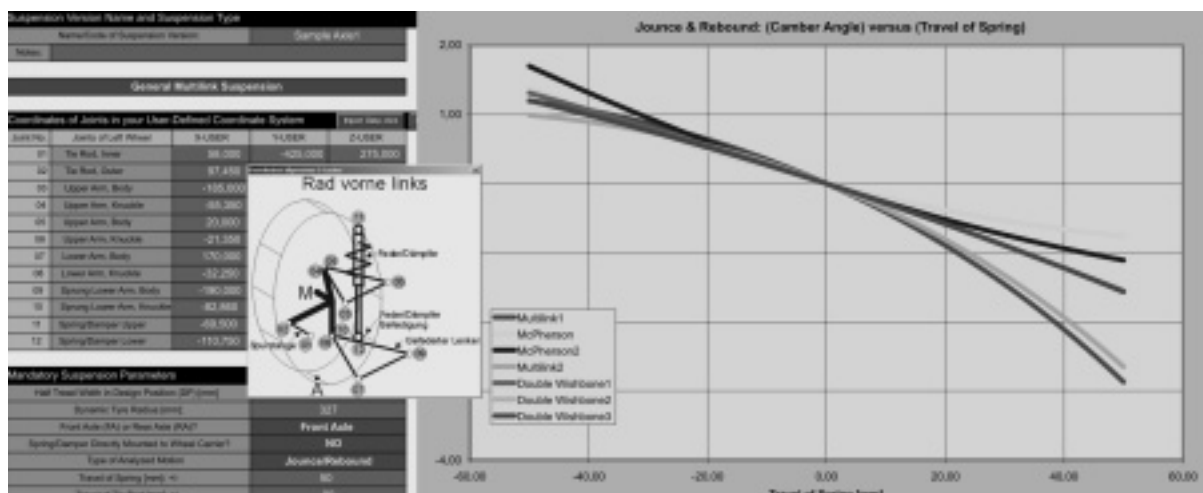


Bild 1: Eingabemaske (links) und Kinematikergebnisse im Vergleichsdiagramm **Figure 1:** User input interface (left) and comparative diagram of kinematic results

Tabelle: Auszug aus Liste der berechneten Kinematikwerte in ABE

Table: Excerpt from the list of characteristic kinematic values calculated in ABE

Federweg am Feder-/Dämpferelement [mm]	Nachlaufwinkel [°]
Weg am Rad (vertikaler Radhub) [mm]	Nachlaufstrecke [mm]
(Vor-)Spurwinkel [°]	Nachlaufversatz [mm]
Spurstangenweg [mm]	Spreizungswinkel [°]
Radlenkwinkel [°]	Lenkrollradius [mm]
Radsturzwinkel [°]	Spreizungsversatz [mm]
Spurweite [mm]	Störkrafthebelarm Bremsen [mm]
Wankpol-Lage bei Hub- und Wankfedern [mm]	Störkrafthebelarm Antrieben [mm]
Optimaler Bremsabstützwinkel [°]	Radlenkwinkel innen [°]
Tatsächlicher Bremsabstützwinkel [°]	Radlenkwinkel außen [°]
Bremsnickausgleich [%]	Mittlerer Radlenkwinkel [°]
Optimaler Anfahrabstützwinkel [°]	Spurdifferenzwinkel [°]
Tatsächlicher Anfahrabstützwinkel [°]	Ackermann-Winkel (außen) [°]
Anfahrnickausgleich [%]	Ackermann-Anteil [%]
Schrägfederungswinkel [°]	Lenkradwinkel [°]
Federübersetzung (Federweg / Radhub) [-]	Lenkübersetzung [-]

lenk ist die Bewegung zwischen Gelenkzapfen und Gelenkgehäuse kinematisch relevant, während bei einem Gummilager die Bewegung zwischen der Innen- und Außenhülse von Interesse ist, **Bild 2**.

4 Gelenkwinkeldarstellung

Die relativen Gelenkbewegungen werden entweder in Polarkoordinaten oder in einer

projizierten Zwei-Ebenen-Gelenkwinkeldarstellung anschaulich ausgegeben. In der Polarkoordinatendarstellung ist die direkte Erfassung des absoluten Öffnungswinkels möglich. Gleichzeitig wird mit dem Positionswinkel angegeben, an welcher rotatorischen Position sich die jeweilige Gelenköffnung ergibt. Bei der Zwei-Ebenen-Darstellung wird die Stellung des ausgelenkten Gelenks relativ zur Ausgangsstellung über

zwei Projektionswinkel beschrieben. Damit wird ein Großteil der in der Industrie üblichen Darstellungsweisen für Gelenkwinkel abgedeckt, **Bild 3**.

Weiterhin wird die Rotation des Gelenks um die eigene Hauptachse (Eigenrotation) berechnet und dargestellt. Bei einem Kugelgelenk hat die Eigenrotation um die Gelenkzapfenachse Einfluss auf den Gelenkverschleiß. Bei einem Gummilager kann die Angabe dieses Gelenkwinkels darüber hinaus für die Berechnung des Rückstellverhaltens beziehungsweise Rückstellmomentes mit Kenntnis des Materialverhaltens weiterverwendet werden.

Ob in der Polarwinkeldarstellung oder in der Zwei-Ebenen-Projektion: Für jeden Bewegungszustand des Achssystems beziehungsweise des Radträgers kann die jeweilige Gelenkstellung eindeutig abgelesen werden.

5 Bewegungsablauf der Radaufhängung

Um eine eindeutige Zuordnung der Gelenkwinkelergebnisse zum jeweiligen Bewegungszustand sowie die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, ist ein standardisierter Bewegungsablauf realisiert. Nach Eingabe von maximalem Einfederweg sowie maximaler Spurstangenauslenkung durch den Benutzer wird ein Bewegungsplan erzeugt, der sukzessive alle maximalen Stellungen anfährt. Die Feder kann maximal ein- oder ausgefedert werden, die Spurstange maximal nach rechts und links bewegt werden. Zusammen mit der Ausgangsstellung, der Konstruktionslage, ergeben sich neun verschiedene Endpositionen. Daraus ergeben sich insgesamt zwölf Bewegungsbahnen, die durchfahren werden, **Bild 4**.

Damit werden auf effiziente Weise alle extremen kinematischen Gelenkzustände erfasst, die sich über den gesamten Bewegungsbereich einer Radaufhängung ergeben können. So können bereits in der Vorentwicklung die notwendigen kinematischen Winkelbereiche der einzelnen Gelenke vordimensioniert werden. Die Farben der jeweiligen Bewegungsrichtungen sowie die Bezeichnungen der jeweiligen Eckpositionen im Bewegungsplan finden sich zur besseren Orientierung auch in den Ergebnisdarstellungen wieder, siehe Kapitel 11.

6 Grundsätzliche Voraussetzungen zu den erforderlichen Rechenoperationen

Um die genannten Gelenkwinkel in Polarkoordinaten, in kardanischen Zwei-Ebenen-Projektionen sowie die Eigenrotation zu berechnen, ist es notwendig, für die beiden re-

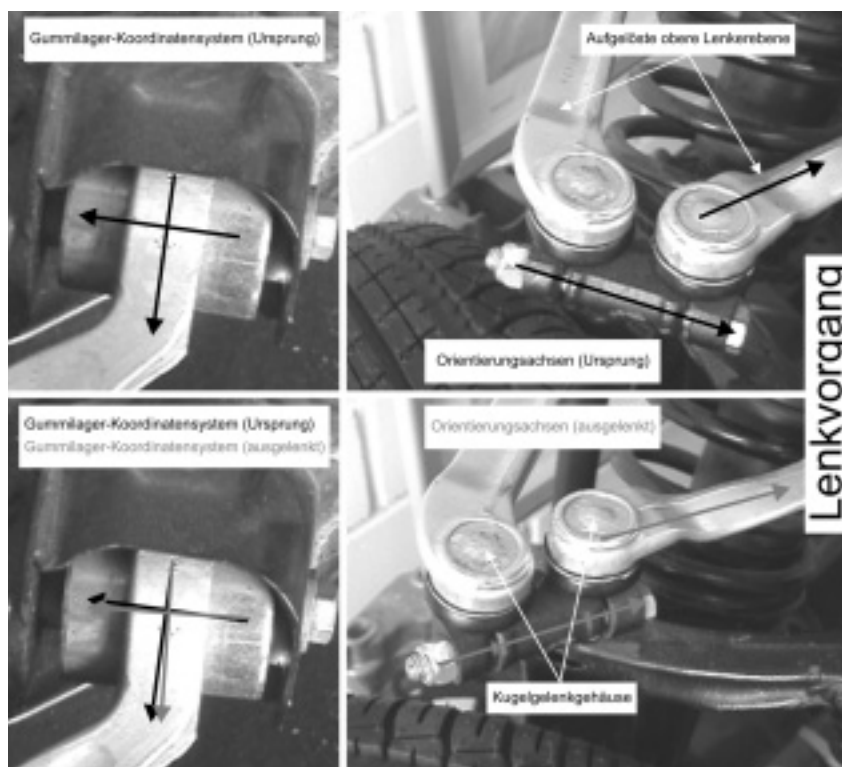


Bild 2: Ausgangs- und Zielstellung von Gummilager (links) und Kugelgelenk

Figure 2: Initial and target position of bushing (left) and ball joint

TITELTHEMA

Der neue Biturbo-DI-Ottomotor von Volkswagen



Mit dem neuen 125-kW-Motor im Golf GT setzt Volkswagen einen Meilenstein bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung. Die Fahrleistungen leistungsgleicher Motoren werden bei gleichzeitig deutlich reduziertem Kraftstoffverbrauch weit übertroffen. Dieses Ergebnis wird durch die Kombination von Downsizing, Direkteinspritzung und Doppelaufladung erzielt, die einen zuschaltbaren Kompressor mit einem Abgasturbolader kombiniert.

WEITERE THEMEN

ENTWICKLUNG

Glühkerzenintegrierter piezokeramischer Brennraumdrucksensor für Dieselmotoren

Vom Aluminium- zum Stahlgroßkolben bei Lastwagen und Schiffen

Wärmemanagement des Reihensechszylinder-Ottomotors von BMW

Auslegung eines Kühlsystems mit elektrischer Kühlmittelpumpe

Fahrbahnunebenheiten durch numerische Simulation der Beanspruchung von Abgassystemen

Kolbenringe für moderne Pkw-Dieselmotoren

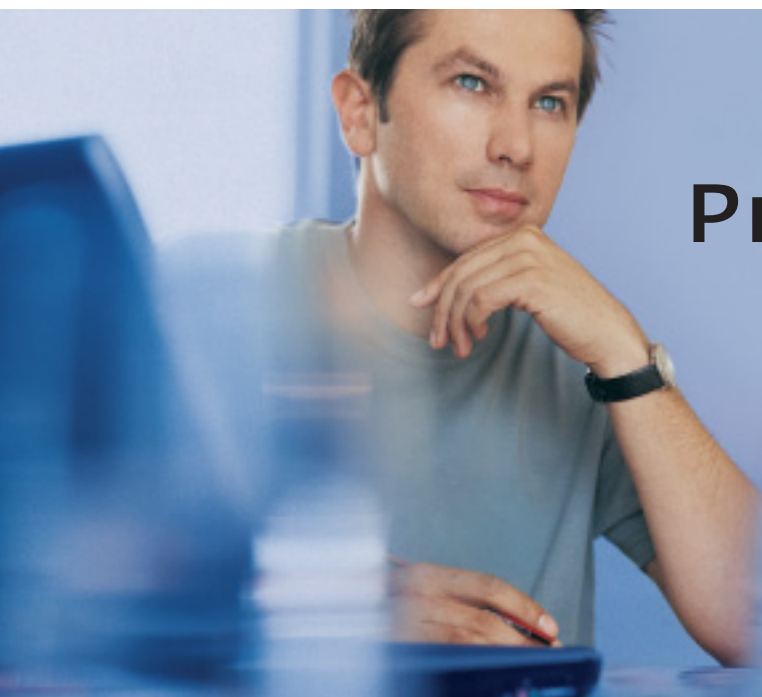
Fahrzeugapplikation mit alternativer Dieselerverbrennung

FORSCHUNG

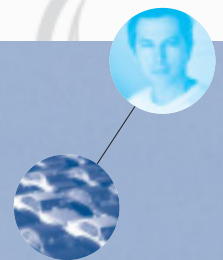
Dieselmotorkonzept zur Erfüllung der Tier-2- bis Tier-5-Emissionsgesetzgebung der USA



precision4success



Präzision. Für Ihren Erfolg.



Unser Ziel ist klar definiert: **Präzision.** Dies zeigt sich in allem, was wir tun. In der umfassenden Entwicklungsarbeit. In der Fertigung von höchst zuverlässigen Dichtungen, Dämpfungs- und Entkopplungs-Elementen. Aus Elastomer-, Elastomer-Kunststoffverbund- und Elastomer-Metallverbund-Materialien. **Das Ergebnis:** die langjährige Partnerschaft mit zufriedenen Kunden.

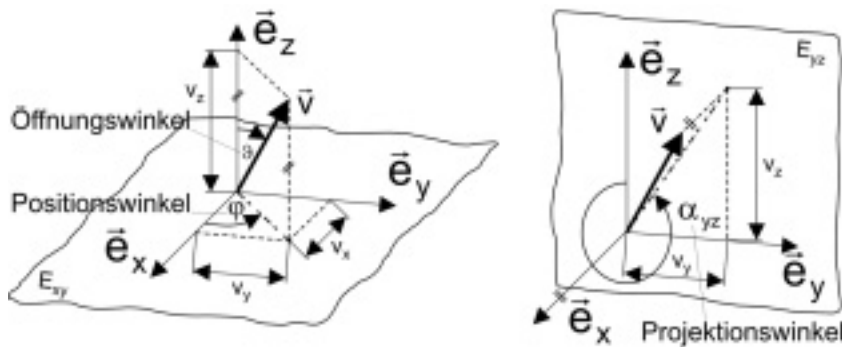


Bild 3: Gelenkwinkel: Polarwinkel (links) sowie Projektionswinkel (beispielhaft)

Figure 3: Joint angles: Polar angle (left) and projection angle (example)

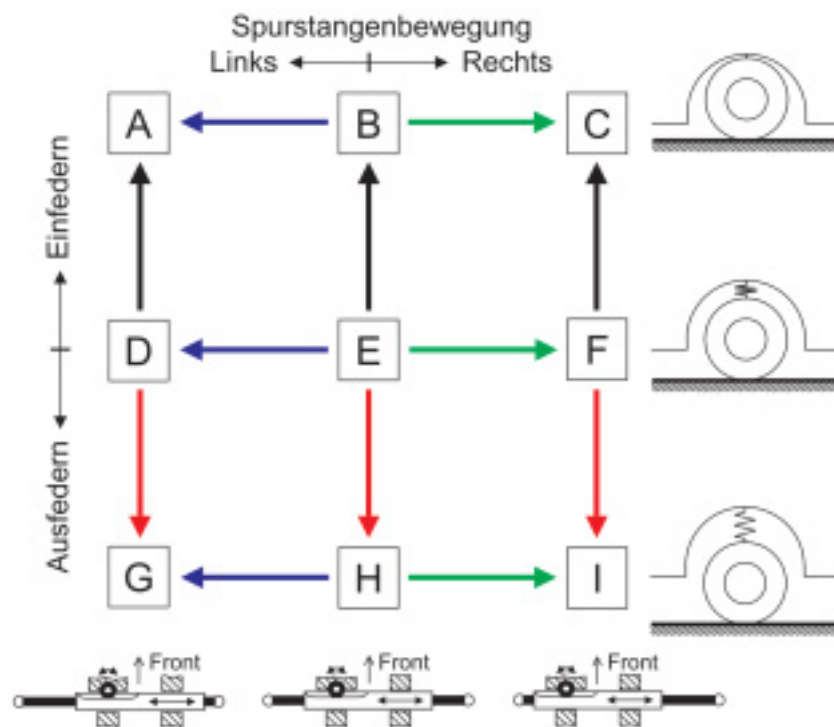


Bild 4: Standardisierter Bewegungsplan zur Berechnung der Gelenkwinkel

Figure 4: Standardized movement plan for calculating joint angles

lativ zueinander bewegten Gelenkkomponenten jeweils ein körperfestes Koordinatensystem festzulegen. Diese Koordinatensysteme werden sich bei einer Bewegung der Radaufhängung relativ zueinander bewegen. Von kinematischer Relevanz sind dabei nur die jeweiligen lokalen Rotationen und nicht die translatorischen Bewegungen.

Sind zwei Koordinatensysteme mit gleichem Ursprung im Inertialsystem bekannt, so lässt sich die Relativbewegung beider Systeme dadurch ermitteln, dass das ausgelenkte Koordinatensystem im Koordinatensystem des Ausgangszustandes dargestellt wird. Dann ist es möglich, beispielsweise die Auslenkung der z-Achse des Zielsystems zu beschreiben, was der absoluten Auslenkung

des zu beschreibenden Gelenks entspricht.

Im vorliegenden Fall wird die Ausgangslage mit dem Index „1“ und die ausgelenkte Lage mit dem Index „2“ versehen.

Eine allgemeine Abbildungsmatrix $\underline{A}^{12}$ rotiert das Koordinatensystem von der Ausgangslage „1“ in die Ziellage „2“:

$$\underline{KS}_2^{(1)} = \underline{A}^{12} \cdot \underline{KS}_1^{(1)} \quad \text{Gl.1}$$

Die Notation für Rotation, Abbildung und Koordinatentransformation ist [4] entnommen. $\underline{KS}_2^{(1)}$ bedeutet dabei, dass das Koordinatensystem mit der Nummer „2“ im lokalen, nicht inertialen Koordinatensystem „1“ per Koordinatentransformation dargestellt wird.

Soll das Zielkoordinatensystem „2“ auf das lokale Koordinatensystem „1“ bezogen werden, so gilt:

$$\underline{KS}_2^{(1)} = \underline{A}^{12} \cdot \underline{KS}_2^{(2)} \quad \text{Gl. 2}$$

Mit Hilfe von $\underline{A}^{12}$ kann man also nicht nur Vektoren oder Koordinatensysteme im Raum von einer Ausgangslage in eine Ziellage abbilden, sondern auch Vektoren oder Matrizen in verschiedenen Koordinatensystemen darstellen.

Die Matrix $\underline{A}^{12}$ ist wie alle in diesem Algorithmus verwendeten Rotationsmatrizen orthonormal (orthogonal und normiert) und unterliegt dadurch der günstigen Eigenschaft, dass die inverse der transponierten Matrix entspricht:

$$(\underline{A}^{12})^{-1} = (\underline{A}^{12})^T \quad \text{Gl. (3)}$$

7 Besetzung der Koordinatensysteme

Um die Bewegung der Gelenke berechnen zu können, müssen die körperfesten Koordinatensysteme der Gelenkkomponenten eindeutig festgelegt sein. Im Fall des fahrzeugseitigen Gummilagers wird die Orientierung der Gelenkhauptachse durch den Gelenkmittelpunkt sowie der Angabe eines zweiten Punktes auf der Hauptachse eindeutig festgelegt. Alternativ kann sich der Benutzer für die ersten Betrachtungsschritte einen Vorschlag zur Gelenkorientierung vorgeben lassen. Die Gelenkhauptachse wird gemäß gängiger Konvention als z-Achse betrachtet. Diese z-Achse sowie der Richtungsvektor des mit dem Gelenk verbundenen Lenkers spannen eine Ebene auf. Per Kreuzprodukt werden die x- und y-Achse des Ausgangssystems eindeutig festgelegt. Damit ist das Koordinatensystem $\underline{B}_1$ (Gummilagersystem) durch die Eingabe eines einzelnen Punktes auf der Gelenkhauptachse eindeutig festgelegt.

Für das Kugelgelenk gilt die gleiche Vorgehensweise: der Benutzer legt neben dem Gelenkmittelpunkt einen zweiten Punkt auf der Gelenkzapfenachse (z-Achse) fest. Der Lenkervektor legt zusammen mit der z-Achse die Grundebene des Gelenks fest und die einzelnen Achsen des Koordinatensystems werden eindeutig bestimmt, **Bild 5**. Damit ist $\underline{K}_1$ (Kugelgelenksystem) ebenfalls festgelegt.

8 Beschreibung der relevanten Körperrotationen

Wie beschrieben, durchläuft die Radaufhängung einen vorgegebenen Bewegungsplan. In jedem Schritt wird die Auslenkung der Gelenke relativ zum Ausgangszustand berech-

TITELTHEMA

3D-Vibrometrie – Schneller zum NVH-optimierten Fahrzeug



Hochauflösende Schwingungsmessungen für die experimentelle Modalanalyse an Fahrzeugkomponenten erfordern ein dichtes Messgitter mit einer entsprechend hohen Anzahl von Messpunkten. Bei der Daimler Chrysler AG in Sindelfingen wurden deshalb die hier beschriebenen Untersuchungen an einer Karosserie mit einem 3D-Laser-Vibrometer von Polytec durchgeführt.

WEITERE THEMEN

UNTERNEHMEN

TNO: Integriertes Konzept zur Fahrzeugsicherheit

PROTOTYPING & VERSUCH

Lastmomentorientierte Fahrstrategie
im Doppelkupplungsgetriebe

Untersuchungen zur Betriebsfestigkeit von
Fahrwerkssteilen durch elektrodynamische Shaker

SIMULATION & BERECHNUNG

Simulationsrechnungen zur Ermittlung optimaler
Einspritzparameter an DI-Ottomotoren

MESS- & PRÜFTECHNIK

Jury-Tests für Geräuschqualität und Psychoakustik

Ultraschnelle Messtechnik an Motorenprüfständen

ELEKTRONIK

CMMI in der Hardwareentwicklung

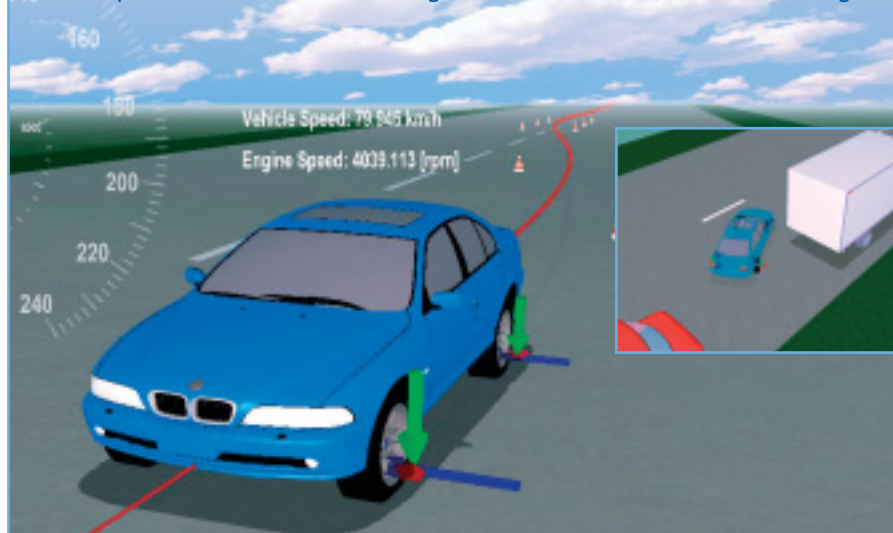
TESIS DYNAware

ve-DYNA®
DYNAanimation



Mit Simulation der Wirklichkeit voraus.

Das Expertenteam für echtzeitfähige Simulation von virtuellen Fahrzeugen.



Neue Möglichkeiten für Simulation und Visualisierung mit veDYNA 3.9.2

Für Steer-by-Wire-Anwendungen wurde das veDYNA Modell um Hinterachslenkung sowie unabhängige Lenkung des rechten und linken Rades erweitert. Außerdem können nun Achsnachgiebigkeiten (compliances) noch detaillierter beschrieben werden – bei uneingeschränkter Echtzeitfähigkeit des Programms!

Die neuen veDYNA Features auf einen Blick:

- Plattformunterstützung für ADI, dSPACE, ETAS, NI, Opal-RT, Syscon, xPC
- Hinterachslenkung
- Unabhängige Lenkung des rechten und linken Rades
- Lenkübersetzung als Funktion des Lenkwinkel und der Fahrzeuggeschwindigkeit
- Asymmetrie sowie erweiterte Nichtlinearität der Achsnachgiebigkeit
- Unterstützung des Matlab Automation Mode

DYNAanimation bietet eine schnelle und grafisch exzellente Visualisierung des dynamischen Fahrzeugverhaltens. Erstellen Sie eindrucksvolle Präsentationen Ihrer Simulationsergebnisse nur mit einigen Mausklicks.

TESIS DYNAware GmbH

Baierbrunner Straße 15 • D - 81379 München
Fon +49 (0) 89 - 747377-0 • Fax +49 (0) 89 - 747377-99
dynawareline@tesis.de • <http://www.tesis.de>

Weitere Informationen und eine kostenlose Version des DYNAanimation Viewers unter
www.tesis.de/dynaanimation

Alle Marken, Warenzeichen und registrierten Warenzeichen sind Eigentum des jeweiligen Inhabers.

net und dargestellt. Die Ausgangskoordinatensysteme sind festgelegt. Die Koordinaten der Hardpoints liegen aus dem ABE-Basis-Algorithmus vor. Da der Kugelgelenkzapfen fest mit dem Radträger verschraubt ist, sind auch diese Koordinaten explizit bekannt.

Der jeweils betrachtete Lenkervektor ist sowohl in Ausgangs- als auch in Zielstellung aus dem ABE-Algorithmus bekannt. Das Kugelgelenkgehäuse sowie die Gummilager-Außenhülle sind fest mit dem Lenker verbunden und erfahren daher die Gesamtrota-tion des Lenkers.

Für den hier dargestellten Fall ergeben sich Gelenkbewegungen, wie sie in **Bild 6** bei einer ebenen Einfederbewegung exemplarisch gezeigt werden.

Die Abbildung zeigt einen Querlenker, der aus seiner Konstruktionslage (schwarz) heraus durch eine Einfederbewegung der Radaufhängung nach oben in seine aktuelle Zielposition (weiß) gedreht wird. In dieser Abbildung ist nur eine ebene Drehung sichtbar. Das Gelenk wird im Allgemeinen überlagerte und räumliche Rotationen erfahren, die in diesem Algorithmus vollständig berechnet und als kardanische Gelenkbewegungen bezeichnet werden.

Das Inertialsystem der Radaufhängung wird mit (0) gekennzeichnet, das System (1) bezeichnet die Ausgangsstellung der Gelenke. Mit (2) beziehungsweise (3) werden die Zielsysteme beschrieben.

Man erkennt, dass das hier dargestellte Kugelgelenk mehrere Bewegungen erfährt. Zunächst wird das Gelenkgehäuse ($\underline{K}_1$) mit der Gesamtrota-tion des Lenkers mitrotiert. Ohne relative Gelenkbewegung hätte das Kugelgelenk die hellgrau dargestellte Stellung ($\underline{K}_2$). Da der Gelenkzapfen aber im Radträger verschraubt ist, wird dieser in eine neue Zielposition (dunkelgrau, $\underline{K}_3$) bewegt, so dass die Relativbewegung des Kugelgelenks zwischen den beiden Stellungen $\underline{K}_2$ und $\underline{K}_3$ ermittelt wird.

Durch diese überlagerte Rotation muss das Bezugssystem des Kugelgelenkgehäuses zunächst mit der Gesamtrota-tionsmatrix in die entsprechende Stellung $\underline{K}_2$ abgebildet werden:

$$\underline{K}_2^{(1)} = \underline{D}^{12} \cdot \underline{K}_1^{(1)} \quad \text{Gl. (4)}$$

Das System $\underline{K}_3$ beschreibt den ausge-lenkten Kugelgelenkzapfen und wird durch den ABE-Basisalgorithmus bestimmt. $\underline{K}_3$ ist wie $\underline{K}_2$ nach der Gesamtrota-tion bekannt und wird nun zu $\underline{K}_3^{(2)}$ transformiert, um die relevante Gelenkbewegung relativ zu $\underline{K}_2$ zu bestimmen:

$$\underline{K}_3^{(2)} = (\underline{K}_2^{(0)})^{-1} \cdot \underline{K}_3^{(0)} = (\underline{K}_2^{(0)})^T \cdot \underline{K}_3^{(0)} \quad \text{Gl. (5)}$$

Das gummilagerfeste Koordinatensystem $\underline{B}_2$ muss als $\underline{B}_2^{(1)}$ dargestellt werden:

$$\underline{B}_2^{(1)} = (\underline{B}_1^{(0)})^{-1} \cdot \underline{B}_2^{(0)} = (\underline{B}_1^{(0)})^T \cdot \underline{B}_2^{(0)} \quad \text{Gl. (6)}$$

Man erkennt, dass für den jeweils betrachteten Lenker alle Matrizen außer der Abbildungsmatrix $\underline{D}^{12}$ bekannt sind.

9 Lenkerbewegung beziehungsweise -rotation

Verschiedene Anordnungen der Lenker und Gelenke sind möglich. Bei der hier dargestellten Konfiguration mit Gummilager und Kugelgelenk sind zunächst zwei unterschiedliche Versionen denkbar. Falls zwei Zweipunkt-Lenker zu einem Dreiecklenker

zusammengefasst sind, ist die Bewegung bei einer Feder- oder Lenkbewegung einfach beschrieben: Durch die beiden beteiligten auf-bauseitigen Gummilager verläuft die Momentanachse der Bewegung (Version 1). Durch die Angabe der Hardpoints ist diese Momentanachse direkt im globalen Koordinatensystem bekannt. Da der Dreiecklenker idealerweise keine Eigenrotation der beiden beteiligten Streben zulässt, ist die Rotation von der Ausgangs- in die Zielposition sehr einfach beschrieben.

Bilden die beiden Lenker keinen Dreiecklenker, müssen die Lenker einzeln betrachtet werden. Dadurch ist grundsätzlich neben der eigentlichen Bewegung in die Zielposition eine Eigenrotation des Lenkers möglich (Version 2). Die Eigenrotation beein-

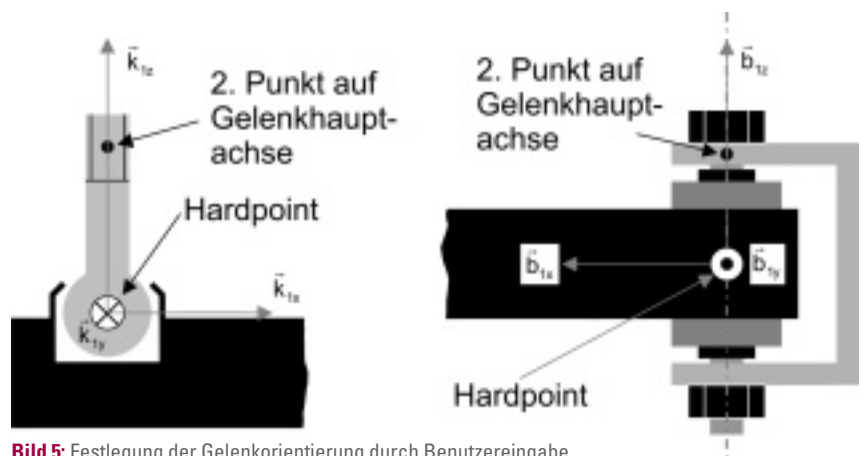


Bild 5: Festlegung der Gelenkorientierung durch Benutzereingabe

Figure 5: Definition of joint orientation via user input

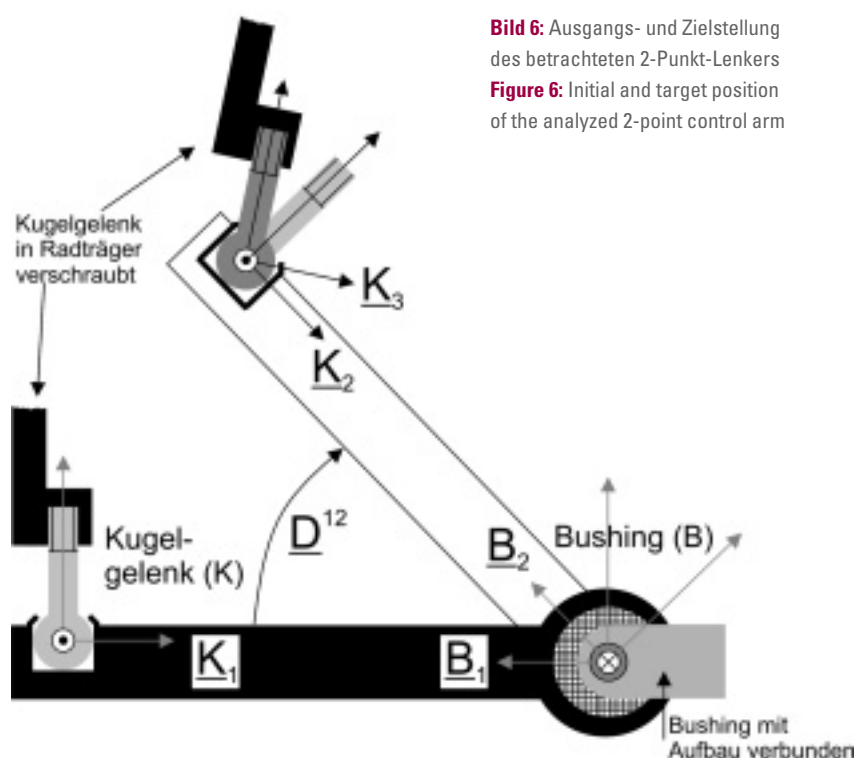


Bild 6: Ausgangs- und Zielstellung des betrachteten 2-Punkt-Lenkers

Figure 6: Initial and target position of the analyzed 2-point control arm

flusst maßgeblich die zu berechnenden Gelenkwinkel. Wird ein Lenker um seine eigene Achse gedreht, so ist diese Drehung ohne eine weitere überlagerte Bewegung direkt als Projektionswinkel α_{yz} beziehungsweise als Öffnungswinkel ϑ der beteiligten Gelenke ablesbar.

Deshalb muss eine Abbildungsmatrix gefunden werden, die den Lenker derart aus der Ausgangsstellung in die ausgelenkte Stellung rotiert, dass die dazugehörige Eigenrotation sinnvoll ist und der Realität entspricht.

Da im hier betrachteten System ein Gummilager eingesetzt wird, wird eine entscheidende Eigenschaft ausgenutzt: das Gummilager hat mehraxiale Federungseigenschaften und wird daher bei einer beliebigen Auslenkung ein Rückstellmoment liefern, welches das Gelenk in die ursprüngliche Stellung zurückzubewegen versucht. Daher wird in diesem Algorithmus die Annahme getroffen, dass die Eigenrotation des Lenkers genau so groß ist, dass ausgehend von der Grundstellung des Gelenks die kleinstmögliche absolute Gummilager-Auslenkung stattfindet.

Bei anderen Lenker- und Gelenkkonfigurationen als den hier dargestellten stellt sich eine weitere Möglichkeit der Eigenrotation dar. Wenn die Strebe an beiden Seiten mit nicht einschränkenden Kugelgelenken montiert ist, ist die freie Bewegung der Strebe um die eigene Achse ohne kinematische Auswirkungen auf den Gesamtmechanismus der Radaufhängung möglich (Version 3). Dies ist bei gängigen Spurstangen der Fall. Um dennoch eine Aussage über die relativen Gelenkwinkel zu treffen, wird hier die Bedingung gesetzt, dass der verbindende Lenker bei der Gesamtbewegung keine Rotation um seine eigene Achse aufweist. Die damit entstehenden Gelenkwinkel sind daher als die minimal notwendigen Winkel für die beteiligten Gelenke anzusehen.

Im Berechnungsalgorithmus liegt der Ausgangsvektor des Lenkers als $\vec{a}_1$ vor.

Wird die Radaufhängung in eine Position innerhalb des Bewegungsplans bewegt, so ist der Zielvektor dieses Lenkers als $\vec{a}_2$ bekannt. Gesucht wird die Abbildungsmatrix $\underline{D}^{12}$, mit der gilt:

$$\vec{a}_2^{(1)} = \underline{D}^{12} \cdot \vec{a}_1^{(1)} \quad \text{Gl. (7)}$$

mit

$$\vec{a}_1^{(1)} = (\underline{B}_1^{(0)})^{-1} \cdot \vec{a}_1^{(0)} = (\underline{B}_1^{(0)})^T \cdot \vec{a}_1^{(0)} \quad \text{Gl. (8)}$$

und

$$\vec{a}_2^{(1)} = (\underline{B}_1^{(0)})^{-1} \cdot \vec{a}_2^{(0)} = (\underline{B}_1^{(0)})^T \cdot \vec{a}_2^{(0)} \quad \text{Gl. (9)}$$



Nutzen Sie kompetentes NVH-Engineering zu Ihrem Wettbewerbsvorteil!

NVH-Engineering ist heute eine wichtige Anforderung im Automobil Entwicklungsprozess. Aber wie können Automobilhersteller ihre Produkte hinsichtlich NVH-Aspekten optimieren, Kosten senken und Gewährleistungsrisiken minimieren? Wie können Zulieferer zuverlässig Komponenten und Subsysteme liefern, die diesen NVH-Anforderungen entsprechen?

Die Antwort: LMS-Lösungen für NVH-Engineering!

→ Simulationssoftware für Vibroakustik

→ Mobile und stationäre NVH-Testsysteme

→ NVH Engineering Services



Fordern Sie unter www.lmsintl.com Ihren kostenfreien LMS Solutions Guide an.

B_1 ist bekannt, ebenso die Tatsache, dass $\vec{a}_2$ im neuen Koordinatensystem B_2 die gleichen Koordinaten besitzt wie $\vec{a}_1$ in B_1 :

$$\vec{a}_2^{(2)} = \vec{a}_1^{(1)} \quad \text{Gl. (10)}$$

9.1 Version 1: Dreiecklenkerkonfiguration

Für den Dreiecklenker mit den beiden bekannten aufbauseitigen Hardpoints (hier P_3 sowie P_5) kann die Abbildungsmatrix direkt aus den Matrizen der lenkerfesten Koordinatensysteme D_{D1} in Grundstellung sowie D_{D2} in Zielstellung gebildet werden:

$$D^{12} = D_{D2} \cdot D_{D1}^{-1} \quad \text{Gl. (11)}$$

$$D_{D1} = \{\vec{d}_{1x}, \vec{d}_{1y}, \vec{d}_{1z}\} \quad \text{Gl. (12)}$$

Mit dem normierten Vektor Gl. (13), liegt die Momentanachse des Dreiecklenkers durch die beiden aufbauseitigen Gummilager fest:

$$\vec{d}_{1z} = \left(\vec{p}_3 - \vec{p}_5 \right)_n = \frac{\vec{p}_3 - \vec{p}_5}{\left| \vec{p}_3 - \vec{p}_5 \right|} \quad \text{Gl. (13)}$$

$\vec{a}_1^{(1)}$ und $\vec{d}_{1z}$ spannen die Basisebene des Gummilagers auf, auf der $\vec{d}_{1y}$ senkrecht steht:

$$\vec{d}_{1y} = \left(\vec{d}_{1z} \times \vec{a}_1^{(1)} \right)_n \quad \text{Gl. (14)}$$

Schließlich ergibt sich $\vec{d}_{1x}$ direkt zu Gl. (15), so dass die Matrix D_{D1} vollständig bekannt und orthonormal ist.

$$\vec{d}_{1x} = \vec{d}_{1y} \times \vec{d}_{1z} \quad \text{Gl. (15)}$$

Unter der Voraussetzung, dass die Momentanachse aufbaufest ist, wird analog und in der gleichen Reihenfolge D_{D2} besetzt:

$$D_{D2} = \{\vec{d}_{2x}, \vec{d}_{2y}, \vec{d}_{2z}\} = \left\{ \vec{d}_{2y} \times \vec{d}_{2z}, \left(\vec{d}_{2z} \times \vec{a}_2^{(1)} \right)_n, \vec{d}_{2z} \right\} \quad \text{Gl. (16)}$$

Nur für den Fall, dass der Benutzer die Hauptachsen der beteiligten Gummilager in Richtung der Momentanachse $\vec{d}_{1z}$ des Dreiecklenkers setzt, gilt:

$$D_{D1} = B_1^{(0)} \quad \text{Gl. (17)}$$

$$D_{D2} = B_2^{(0)} \quad \text{Gl. (18)}$$

Weichen die Hauptachsen von dieser Dreiecklenker-Momentanachse ab, werden die Gummilager kinematische Verzwängungen bei einer Bewegung der Radaufhängung

erfahren. Dieses kann bewusst eingesetzt oder aber bewusst vermieden werden.

9.2 Version 2: freie Lenkerkonfiguration

Etwas umfangreicher zeigt sich die Berechnung der Abbildungsmatrix für Version 2. Zunächst wird das Koordinatensystem für das Gummilager in Ausgangsstellung beschrieben:

$$B_1^{(0)} = \{\vec{b}_{1x}, \vec{b}_{1y}, \vec{b}_{1z}\} \quad \text{Gl. (19)}$$

$\vec{b}_{1z}$ wird durch die Lage des Gelenkmittelpunktes sowie der Benutzerangabe zum 2. Punkt auf der Gelenkhauptachse festgelegt:

$$\vec{b}_{1z} = \left(\vec{p}_{HP} - \vec{p}_{axis} \right)_n \quad \text{Gl. (20)}$$

Auch hier spannen der Lenkervektor und die Gelenkhauptachse die Gelenkgrundebene auf, Gl. (21), so dass der letzte verbleibende Einheitsvektor berechnet werden kann:

$$\vec{b}_{1y} = \left(\vec{b}_{1z} \times \vec{a}_1^{(1)} \right)_n \quad \text{Gl. (21)}$$

$$\vec{b}_{1x} = \vec{b}_{1y} \times \vec{b}_{1z} \quad \text{Gl. (22)}$$

Die nun folgende Abbildungsrotation des Vektors $\vec{a}_1^{(1)}$ zu $\vec{a}_2^{(1)}$ wird ähnlich wie bei einer Euler-Rotation in mehrere Basisrotationen um jeweils eine Achse unterteilt, um die Matrizen eindeutig und zuverlässig beschreiben zu können.

Um zu gewährleisten, dass das Gummilager die kleinstmögliche Auslenkung erfährt, wird $\vec{a}_1$ zunächst um die z-Achse von B_1 in eine Zwischenlage „P“ abgebildet. Diese Lage hat die Eigenschaft, dass $\vec{b}_{1z}$ und der Zielvektor $\vec{a}_2^{(1)}$ die xz-Ebene der Zwischenlage aufspannen.

Damit kann die erste Teilrotation (von 1 nach P) beschrieben werden:

$$T_1 = \{\vec{t}_{1x}, \vec{t}_{1y}, \vec{t}_{1z}\} \quad \text{Gl. (23)}$$

Da um die z-Achse rotiert wird, gilt:

$$\vec{t}_{1z} = (0 \ 0 \ 1)^T \quad \text{Gl. (24)}$$

Aufgrund der oben genannten Bedingung für die xz-Ebene in P gilt Gl. (25), womit sich der letzte Einheitsvektor automatisch per Kreuzprodukt ergibt, Gl. (26).

$$\vec{t}_{1y} = \left(\vec{t}_{1z} \times \vec{a}_2^{(1)} \right)_n \quad \text{Gl. (25)}$$

$$\vec{t}_{1x} = \vec{t}_{1y} \times \vec{t}_{1z} \quad \text{Gl. (26)}$$

Diese Rotationsmatrix bildet $\vec{a}_1^{(1)}$ in die Zwischenposition ab:

$$\vec{a}_p^{(1)} = T_1 \cdot \vec{a}_1^{(1)} \quad \text{Gl. (27)}$$

Mit dieser Rotation liegen nun der Zwischenlage-Vektor $\vec{a}_p^{(1)}$ und der Zielvektor $\vec{a}_2^{(1)}$ in einer gemeinsamen Ebene, in der xz-Ebene des Systems P. Die nächste Rotation findet daher um die y-Achse $\vec{p}_y$ statt, um $\vec{a}_p$ auf $\vec{a}_2$ korrekt abzubilden. Dazu werden zunächst beide Vektoren im System P dargestellt:

$$\vec{a}_2^{(p)} = T_1^{-1} \cdot \vec{a}_2^{(1)} \quad \text{Gl. (28)}$$

$$\vec{a}_p^{(p)} = \vec{a}_1^{(1)} \quad \text{Gl. (29)}$$

Diese Rotation ließe sich mit Hilfe einer Rotationsmatrix mit Winkelfunktionen direkt auflösen. Da solche Richtungskosinusse aber unter Umständen nicht richtungseindeutig sind, wird aus Gründen der universellen Programmierung die Variante der Rotation mit Einheitsvektoren verwendet. Dazu wird $\vec{a}_p$ zunächst mit T_{21} auf eine Basisachse zurückrotiert, um anschließend von dieser Basisachse mit eindeutigen Einheitsvektoren und T_{22} in die Zielposition gedreht zu werden:

$$T_{21} = \{\vec{t}_{21x}, \vec{t}_{21y}, \vec{t}_{21z}\} = \left\{ \vec{a}_p^{(p)}, (0 \ 1 \ 0)^T, \vec{t}_{21x} \times \vec{t}_{21y} \right\} \quad \text{Gl. (30)}$$

$$T_{22} = \{\vec{t}_{22x}, \vec{t}_{22y}, \vec{t}_{22z}\} = \left\{ \vec{a}_2^{(p)}, (0 \ 1 \ 0)^T, \vec{t}_{22x} \times \vec{t}_{22y} \right\} \quad \text{Gl. (31)}$$

Die Gesamtabbildungsmatrix im System P lautet demnach:

$$T_2 = T_{22} \cdot T_{21}^{-1} = T_{22} \cdot T_{21}^T \quad \text{Gl. (32)}$$

Damit ist der Ausgangsvektor $\vec{a}_1$ schrittweise unter Berücksichtigung der notwendigen Eigenrotation des Lenkers in den Vektor $\vec{a}_2$ abgebildet worden, die Abbildungsmatrix ist also eindeutig festgelegt:

$$\vec{a}_2^{(1)} = D^{12} \cdot \vec{a}_1^{(1)} = T_1 \cdot T_2 \cdot \vec{a}_1^{(1)} \quad \text{Gl. (33)}$$

9.3 Version 3:

Freie, nicht gefesselte Lenkerrotation

Für die Version 3 gilt, dass die Eigenrotation des Lenkers komplett unterbunden wird. Dafür wird die Abbildungsmatrix vom Ausgangszustand in den Zielzustand in Basisrotationen unterteilt. Wie erwähnt kann dies ähnlich zu Eulerrotationen geschehen. Hier wird allerdings eine Rotation mit Bryant-Winkeln gewählt [4], die im Gegensatz zum Beispiel zur häufig verwendeten Euler-x-Konvention (z, x, z- beziehungsweise 3, 1, 3-Rotation) [5] eine Rotationsreihenfolge aufweist, die alle drei Raumachsen (x, y, z- be-

ziehungsweise 1, 2, 3) betrifft. Damit ist es möglich, das aufbauseitige Koordinatensystem B_1 zunächst so zu drehen, dass dem Lenkervektor eine lokale Raumachse zugewiesen wird, um dann eine solche Bryant-Rotation anzuwenden. Diejenige Rotationsmatrix, die um die Lenkerachse dreht, wird dann zur Einheitsmatrix gesetzt. So findet also nur eine zweimalige Basisrotation ohne Lenkereigenrotation statt.

10 Ergebnisdarstellung

Wenn für die einzelnen Lenker die Abbildungsmatrix der Lenkerbewegung bekannt ist, können die relativen Gelenkbewegungen ermittelt werden, Bild 3.

Aus den Komponenten des Vektors, der die z-Achse beschreibt, kann man nun folgende Winkel ablesen: den Öffnungswinkel ϑ , den Positionswinkel φ sowie die projizierten Auslenkungswinkel, α_{yz} und α_{zx} . Da die Länge des Vektors normiert ist, genügen jeweils die zwei Polarwinkelangaben oder die beiden Projektionswinkel zur vollständigen und eindeutigen Beschreibung der Gelenkstellung im Raum.

Die z-Achse sei beschrieben durch:

$$\vec{z} = (z_x \ z_y \ z_z)^T \quad \text{Gl. (34)}$$

Dann ergeben sich folgende Winkelberechnungen:

Öffnungswinkel:

$$\vartheta = \arctan \frac{\sqrt{z_x^2 + z_y^2}}{z_z} \quad \text{Gl. (35)}$$

$$\vartheta = [0, 180^\circ] \quad \text{Gl. (36)}$$

Positionswinkel:

$$\varphi = \arctan \frac{z_y}{z_x} \quad \text{Gl. (37)}$$

$$\varphi = [0, 360^\circ] \quad \text{Gl. (38)}$$

Projektionswinkel in der yz-Ebene:

$$\alpha_{yz} = \arctan \frac{z_z}{z_y} \quad \text{Gl. (39)}$$

$$\alpha_{yz} = [0, 360^\circ] \quad \text{Gl. (40)}$$

Projektionswinkel in der zx-Ebene:

$$\alpha_{zx} = \arctan \frac{z_x}{z_z} \quad \text{Gl. (41)}$$

$$\alpha_{zx} = [0, 360^\circ] \quad \text{Gl. (42)}$$

φ , α_{yz} und α_{zx} sind dabei abschnittsweise definiert.

Wichtig für die Bewertung und Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist die Definiti-

on des Winkelursprungs. Die Rotationsrichtung der Winkelangaben folgt den mathematisch positiven Richtungen des Koordinatensystems.

11 Ergebnisbeispiel und Beurteilung

Beispielhaft ist in **Bild 7** das Ergebnis einer Gelenkwinkelberechnung für ein radträgerseitiges Kugelgelenk einer Mehrlenker-Achse dargestellt.

Die Bezeichnungen stammen aus dem Bewegungsplan, die vier unterschiedlichen Farben kennzeichnen die jeweilige Bewegungsrichtung der Radaufhängung. Auf dem linken Bild sind die Polarwinkel ϑ und φ dargestellt, auf dem rechten Bild die beiden projizierten Gelenkwinkel α_{yz} und α_{zx} . Aus diesen Diagrammen können dem Komponentenentwickler wichtige Ergebnisse wie zum Beispiel die maximale absolute Auslenkung des Gelenks (hier: Punkt C) oder die Form der Gelenköffnungsblende mitgeteilt werden. Ein weiteres Ergebnisdiagramm zur Rotation des Gelenks um die eigene Hauptachse liefert weitere, wichtige Erkenntnisse.

Weiterhin kann die Darstellung der über einen kompletten Bewegungsplan entstehenden Gelenkwinkel Aufschluss darüber liefern, ob das jeweilige Gelenk in der Konstruktionslage vorgewinkelt werden muss, um eine optimierte und effizientere Gelenkbewegung zu realisieren. Verschleißminimierte oder kinematisch günstigere Gelenkbewegungen sind die Folge.

Mit dem hier beschriebenen Ansatz zur Berechnung und Darstellung von Gelenkwinkeln im Fahrwerk ist es dem Entwickler möglich, bereits im Vorentwicklungsprozess auf elegante und effiziente Weise wichtige Informationen für den weiteren Entwicklungsprozess der Fahrwerkelenke zu liefern.

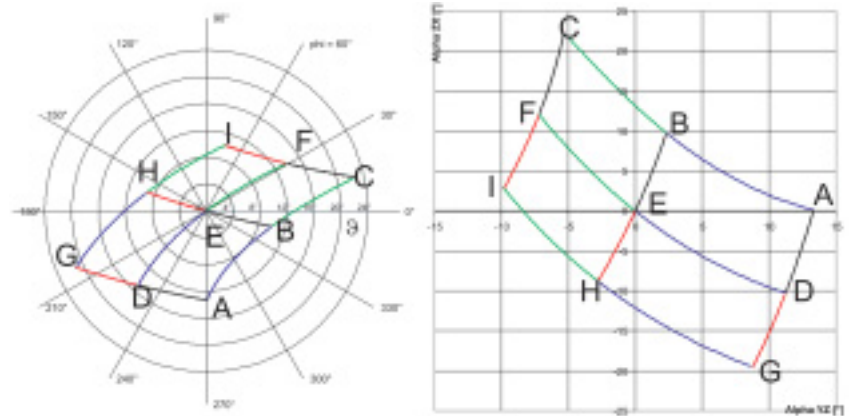


Bild 7: Ergebnisse in Polarwinkeln (links) sowie in Zwei-Ebenen-Projektionswinkeln

Figure 7: Results in polar angles (left) and in two-plane projection angles

Literaturhinweise

- [1] Matschinsky, W.: Radführungen der Straßenfahrzeuge. Berlin, Springer, 1998
- [2] Matschinsky, W.: Bestimmung mechanischer Kenngrößen von Radaufhängungen. Universität Hannover, Dissertation, 1992
- [3] Albers, I.: Erstellung eines Berechnungstools zur starrkinematischen Analyse von Einzelradaufhängungen. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Diplomarbeit, 2003
- [4] Wittenburg, J.: Dynamics of systems of rigid bodies. Stuttgart, Teubner, 1977
- [5] Weisstien, E. W.: Euler Angles. Mathworld, A Wolfram Web Resource, 1999

For an English version of this article, see **ATZ worldwide**. For information on subscriptions, just call us or send an E-mail or fax.

ATZ Vieweg Verlag Postfach 1546 D-65173 Wiesbaden Tel. +49 5241 80-1968 | E-mail: vieweg@abo-service.info

