

Fahrdynamik-Testmanöver:

Stationäre Kreisfahrt

Ziel des Fahrmanövers

Ziel dieses Fahrdynamiktests ist die Ermittlung von Daten zur **Bestimmung des stationären Fahrverhaltens** von Fahrzeugen. Im Mittelpunkt steht die Aufgabe, den Lenkradwinkel, den Wank- und Schwimmwinkel als Funktion der Querbeschleunigung zu erfassen, um damit Aussagen über das **Eigenlenkverhalten** sowie der **Komfortbeurteilung** treffen zu können.

Versuchsdurchführung

Bei der stationären Kreisfahrt handelt es sich um einen „**Open-Loop-Test**“, bei dem entweder der Kreisbahnradius oder der Lenkradwinkel oder die Fahrgeschwindigkeit konstant eingestellt werden müssen.

In diesem Beispiel handelt es sich um rechts- und linkssinnige Kreisfahrten mit dem konstanten **Radius von 100 m mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit**. Die Versuche werden in den Gangstufen zwei oder drei gefahren, wobei mit der üblichen Schrittbreite von 1 m/s^2 Querbeschleunigungen von $a_{\text{quer}} = 1 \text{ m/s}^2$ bis zum fahrdynamischen Grenzbereich eingestellt werden. Während der stationären Versuchsphase sind **Lenkradwinkel**



und Fahrpedalstellung konstant zu halten. In jeder Querbeschleunigungsstufe müssen die stationären Bedingungen über die Messdauer von drei Sekunden eingehalten bleiben und zum Nachweis der Wiederholbarkeit und Ermittlung der Durchschnittswerte drei Mal durchgeführt werden. Die **Messgrößen** (Lenkwinkel, Schwimmwinkel, Wankwinkel, u.a.) werden über die Querbeschleunigung aufgetragen. Es wird empfohlen, die **Reifentemperaturen** aufzuzeichnen, wenn hohe Querbeschleunigungen über längere Versuchsdauer herrschen. Ansonsten müssen die Reifen zwischen den einzelnen Versuchen abgekühlt werden, um vergleichbare Bedingungen sicherzustellen.

Alternativ kann die stationäre Kreisfahrt in der Form gefahren werden, dass bei kontinuierlicher Datenaufzeichnung der konstante Kreisradius von 100 m mit langsam ansteigender Geschwindigkeit in der Form gefahren wird, dass die Querbeschleunigung $\leq 0,1 \text{ m/s}^2/\text{s}$ zunimmt (**quasi-stationäre Kreisfahrt**).

Messgrößen

- Lenkradwinkel
- Lenkraddrehmoment
- Querbeschleunigung
- Längsbeschleunigung
- Quergeschwindigkeit
- Längsgeschwindigkeit
- Giergeschwindigkeit
- Schwimmwinkel
- Spurwinkel
- Schräglaufwinkel
- Radkräfte und Radmomente
- Reifentemperatur

Auswahl von Messsystemen zur Ermittlung der relevanten Kenngrößen aus dem fahrdynamischen Test „stationäre Kreisfahrt“:

Messlenkrad MSW

Das Messlenkrad MSW von CORRSYS-DATRON wurde entwickelt zur **simultanen Erfassung** von **Lenkraddrehwinkel**, **Lenkmoment** und **Lenkwinkelgeschwindigkeit**. Der Lenkwinkel und die daraus abgeleitete Lenkwinkelgeschwindigkeit werden mit einem berührungslosen, optischen Sensor erfasst. Der Lenkwinkel kann in zwei Messbereichen ($\pm 200^\circ$ oder $\pm 1250^\circ$) bei einer Winkelauflösung von $0,05^\circ$ gemessen werden, für die Lenkwinkelgeschwindigkeit steht ein Bereich von $\pm 1000^\circ/\text{s}$ zur Verfügung. Das Messlenkrad lässt sich einfach an die Lenksäule durch eine zentrale Bohrung montieren, die Einbautiefe ist relativ gering. CORRSYS-DATRON Artikelnummer: 14256.

Strap-Down-Kreiselmessgerät mit GPS

Herzstück der Strap-Down-Inertial-Messplattform ADMA von GeneSys sind drei faseroptische Kreisel zur **Messung der Drehgeschwindigkeit** um die x-, y- und z-Achse und drei Beschleunigungsgeber für die drei horizontalen Koordinaten. Die Beschleunigungssignale werden gleichzeitig dazu genutzt, das System analytisch im horizontalen Zustand zu halten, indem Bezug auf den Erdschwerkraftvektor genommen wird. Mit den Kreiseln lassen sich alle Winkel in drei Dimensionen berechnen. Die hauptsächlichen Vorteile dieses Systems liegen in der **hohen Bandbreite** (50...400 Hz), in der **geringen Datenlatenz**, und in der Bereitstellung von aller **translatorischen und rotatorischen Zustandsgrößen** in jeweils drei Raumachsen. Diese sind: Beschleunigung, Geschwindigkeit, Position, Drehgeschwindigkeit und Winkel, die sowohl im fahrzeugfesten, im horizontalen und im erdbezogenen Koordinatensystem ausgegeben werden. Mit Unterstützung von GPS werden kontinuierlich Driftfehler eliminiert und mit DGPS sogar eine **Positionsgenauigkeit im Zentimeterbereich** erzielt. GeneSys Artikelbezeichnung: ADMA-G (Automotive Dynamic Motion Analyzer mit DGPS).

Radkraft-Dynamometer RoaDyn P650

Das Radkraft-Dynamometer von Kistler gibt es in den Ausführungsformen mit DMS-applizierten Messdosen und steif ausgelegten, vorgespannten piezoelektrischen Messsensoren. Das Messsystem RoaDyn P650 nutzt die **piezoelektrische Messtechnik** und ist gekennzeichnet durch eine **hohe Eigenfrequenz** bis 2 kHz und durch eine hohe Empfindlichkeit über den gesamten Messbereich ($F_x = 45 \text{ kN}$, $F_y = 24 \text{ k}$, $F_z = 45 \text{ kN}$). Es ist alterungsbeständig und verfügt über eine ausgezeichnete Stabilität und eine hohe Linearität. Mit dem Radkraft-Dynamometer wird die **Radkraftverteilung** in Umfangs-, Quer- und Vertikalrichtung sowie das Antriebs-, Sturz- und Rückstellmoment gemessen. Die Datenübertragung geschieht telemetrisch vom Rotor zum Stator, im Rotor eingebrachte Magnete erlauben durch Nutzung des Halleffektes die **Bestimmung des exakten Raddrehwinkels**. Die Bordelektronik System 2000 erlaubt die Selbstidentifizierung der eingesetzten Messradsensoren und berechnet online die genannten Messgrößen. Zusätzlich lassen sich noch weitere Analogsignale am Radkraftdynamometer anschließen (z.B. Temperatursignale vom T³M-Messsystem vom TÜV SÜD Automotive). Kistler Artikelnummer 9298B1Q03. Für die Absicherung von ABS-Systementwicklungen werden alternativ Drehmoment-Messräder P103/P106 eingesetzt. Kistler Artikelnummer 9294B11.

Nick- und Wankwinkel-Messsystem

Das Messsystem basiert auf der Abstandsmessung von drei ausgewählten Karosseriepunkten gegen die Fahrbahn. Der **Nickwinkel** θ ist der Winkel zwischen der Fahrzeuglängsachse und derer Projektion auf die Fahrbahn, der **Wankwinkel** φ ist definiert als der Winkel zwischen der Fahrzeugquerachse und derer Projektion zur Fahrbahn.

Die Winkel θ und φ lassen sich als arctan-Funktionen aus den trigonometrischen Abstandsbeziehungen berechnen. Für den Geschwindigkeitsbereich von 0 – 250 km/h beträgt der Messbereich für Nick- und Wankwinkel $\pm 40^\circ$ bei einer Auflösung von $0,1^\circ$.

Der Höhenstandssensor HF 500 C von CORRSYS-DATRON arbeitet nach dem **optischen Triangulationsprinzip**. Dabei wird ein sichtbarer roter Laser auf das Objekt projiziert und das reflektierte Licht auf einer CCD-Zeile abgebildet. Bei bekannter Strahlrichtung und bekanntem Abstand zwischen CCD-Zeile und Lichtquelle kann so der Abstand vom Objekt zur CCD-Zeile mit einem Signalprozessor berechnet werden. Der Abstand CCD-Zeile zur Lichtquelle sowie die beiden Strahlen vom und zum Objekt bilden ein Dreieck (Triangulation). CORRSYS-DATRON Artikelnummer 15380.

Reifentemperaturmessung

Es wurde eine spezielle Methode zur Messung der Temperatur in der Reifenstruktur entwickelt, die „**TÜV Tire Temperature Method T³M**“. Dabei wird die Reifentemperatur mit eingebrachten Pt-100-Widerstands-Sensoren in der Lauffläche bzw. in der Reifenschulter gemessen.

Dabei gibt es speziell folgende **Ziele**:

- Optimierung des Reifens im Betrieb
- Thermische Analyse und Abstimmung der Reifen- und damit auch Fahrzeugperformance

Mit einer vom TÜV entwickelten **Telemetrielösung** können die Messdaten vom rotierenden Rad zu einem fahrzeugfesten Empfänger übertragen werden. Die Thermospannungen für den Temperaturbereich von $-130^{\circ}\text{C} \dots +179^{\circ}\text{C}$ werden als DTA-Lösung im Messrad verstärkt, digitalisiert, telemetrisch auf den Stator übertragen und als LAN-Protokoll an die Messdatenerfassung weitergegeben. Artikelbezeichnung TÜV-SÜD: T³M (Tire Temperature TÜV SÜD).

Kenngößen für die stationäre Kreisfahrt

Bei steigender Fahrgeschwindigkeit ist die **Schräglaufwinkeldifferenz** Vorderachse zur Hinterachse bei einem Einspurmodell von signifikanter Bedeutung. Bei positiver Differenz $\alpha_v - \alpha_h$ muss der Lenkwinkel vergrößert, bei negativer verkleinert werden. Die **folgenden Definitionen** sind festgelegt worden:

$\alpha_v - \alpha_h \geq 0$ untersteuerndes Eigenlenkverhalten

$\alpha_v - \alpha_h = 0$ neutrales Eigenlenkverhalten

$\alpha_v - \alpha_h \leq 0$ übersteuerndes Eigenlenkverhalten

Die gleichen Definitionen gelten auch für den Eigenlenkgradienten.

Im **stationären Fahrzustand** muss jede Achse Seitenkräfte zur Abstützung der Trägheitskraft $m \cdot a_y$ aufbauen. Die Achse mit dem größeren Schräglaufwinkel bewegt sich in Querrichtung mehr. Ist das **Eigenlenkverhalten untersteuernd**, dann treten die größeren Schräglaufwinkel an der Vorderachse auf. Das Fahrzeug schiebt über die Vorderachse nach außen. Bei einem **übersteuernden** Fahrzeug besitzt die Hinterachse die größeren Schräglaufwinkel, die bei hohen Werten zur Instabilität führen können.

$$EG = \frac{d\delta_H}{da_{quer}} \cdot \frac{l}{i_s} \quad \begin{array}{l} l = \text{Achsabstand,} \\ i_s = \text{Lenkübersetzung} \end{array}$$

Der **Eigenlenkgradient** entspricht der Steigung der Kurve $\delta_H = f(a_{quer})$. Im linearen fahrdynamischen Bereich bis 4 m/s^2 ist der Eigenlenkgradient eine Konstante, darüber verändert er sich in Abhängigkeit von der Querbeschleunigung.

Für die Giergeschwindigkeit gilt: $\frac{\dot{\psi}}{\delta_H} = \frac{v}{i_s \cdot l + i_s \cdot EG \cdot v^2}$

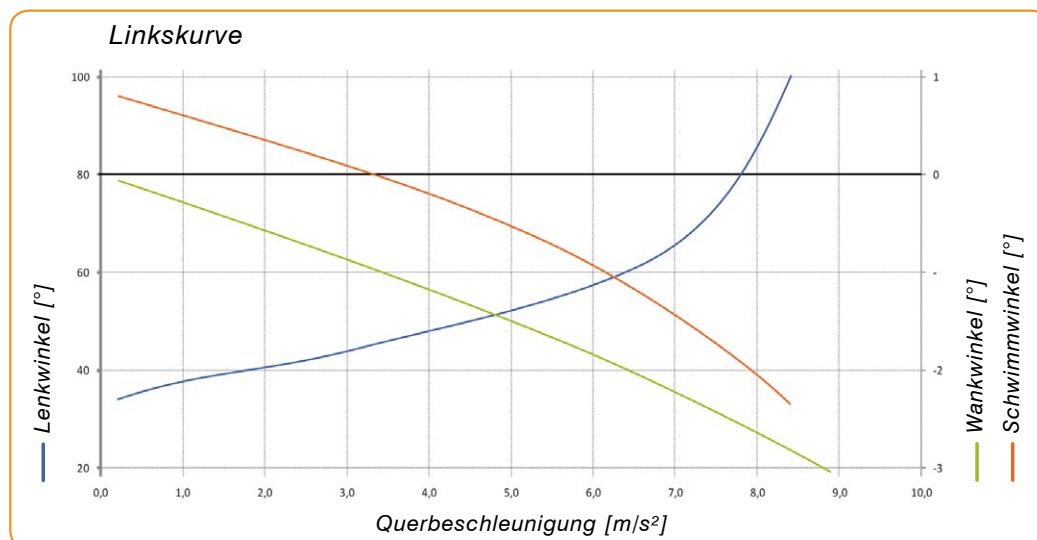
Das **DTA Messfahrzeug** besitzt ein untersteuerndes Eigenlenkverhalten ($EG > 0$). Hier gilt der charakteristische Funktionsverlauf, dass die Gierverstärkung mit zunehmender Geschwindigkeit zunächst ansteigt, dann ein Maximum erreicht, um schließlich wieder abzunehmen. Die dem Maximum entsprechende Geschwindigkeit wird charakteristische Geschwindigkeit genannt.

$$v_{ch} = \sqrt{\frac{l^2 \cdot C_v \cdot C_h}{m \cdot (C_h \cdot l_h - C_v \cdot l_v)}} \quad \begin{array}{l} C_v, C_h = \text{Schräglaufsteifigkeit VA, HA;} \\ l_v, l_h = \text{Abstände Schwerpunkt zur VA, HA;} \\ m = \text{Masse} \end{array}$$

Die **Gierverstärkung** kennzeichnet die stationären Eigenschaften eines Fahrzeugs nachdrücklich und ist ein Maßstab dafür, wie intensiv das Fahrzeug auf Lenkwinkeländerungen reagiert.

Datenauswertung

Für die Auswertung der **quasi-stationären Kreisfahrt** hat der TÜV SÜD eine Routine entwickelt, die anhand festgelegter Kriterien die jeweils eingestellten stationären Zustände identifiziert und über die Messdauer die Werte für Lenkwinkel und Querbeschleunigung als Durchschnittswerte ausgibt. Diese einzelnen Werte werden mit Hilfe einer mathematischen Interpolationsfunktion zu einer Grafik verarbeitet.



Anhand des bei **Linksfahrt** ermittelten positiven Steigungswertes der Kurve wird für den stationären Bereich bis zu 4 m/s^2 ein positiver Wert für den Eigenlenkgradienten $EG = 3,35 \frac{\text{rad s}^2}{\text{m}}$ berechnet, das bedeutet **untersteuerndes Eigenlenkverhalten**. Ab einer Querbeschleunigung von 5 m/s^2 nimmt der Lenkwinkelbedarf spürbar zu, um den konstanten Kurvenradius (100 m) einzuhalten. Gleichzeitig nimmt das Lenkmoment ab (hier nicht dargestellt). Der Wankwinkel nimmt kontinuierlich mit steigender Querbeschleunigung zu. Die charakteristische Geschwindigkeit beträgt **112 km/h**.

Mit dem **Schwimmwinkel** lässt sich die Ausrichtung des Fahrzeugs relativ zu seiner Bahrtangente charakterisieren. Mit ihm lassen sich die **Fahrstabilität** und **Beherrschbarkeit des Fahrzeugs** bis zum Grenzbereich beurteilen. Bei der hier gezeigten Linksfahrt besitzt der Schwimmwinkel bis zu einer Querbeschleunigung von $3,5 \text{ m/s}^2$ positive Werte, d.h., das Fahrzeug ist mit seiner Längsachse nach kurvenaußen orientiert. Der Schwimmwinkel ist gemäß dem Einspurmodell bestimmt zu

$$\beta = \frac{l_h}{R} - \alpha_h$$

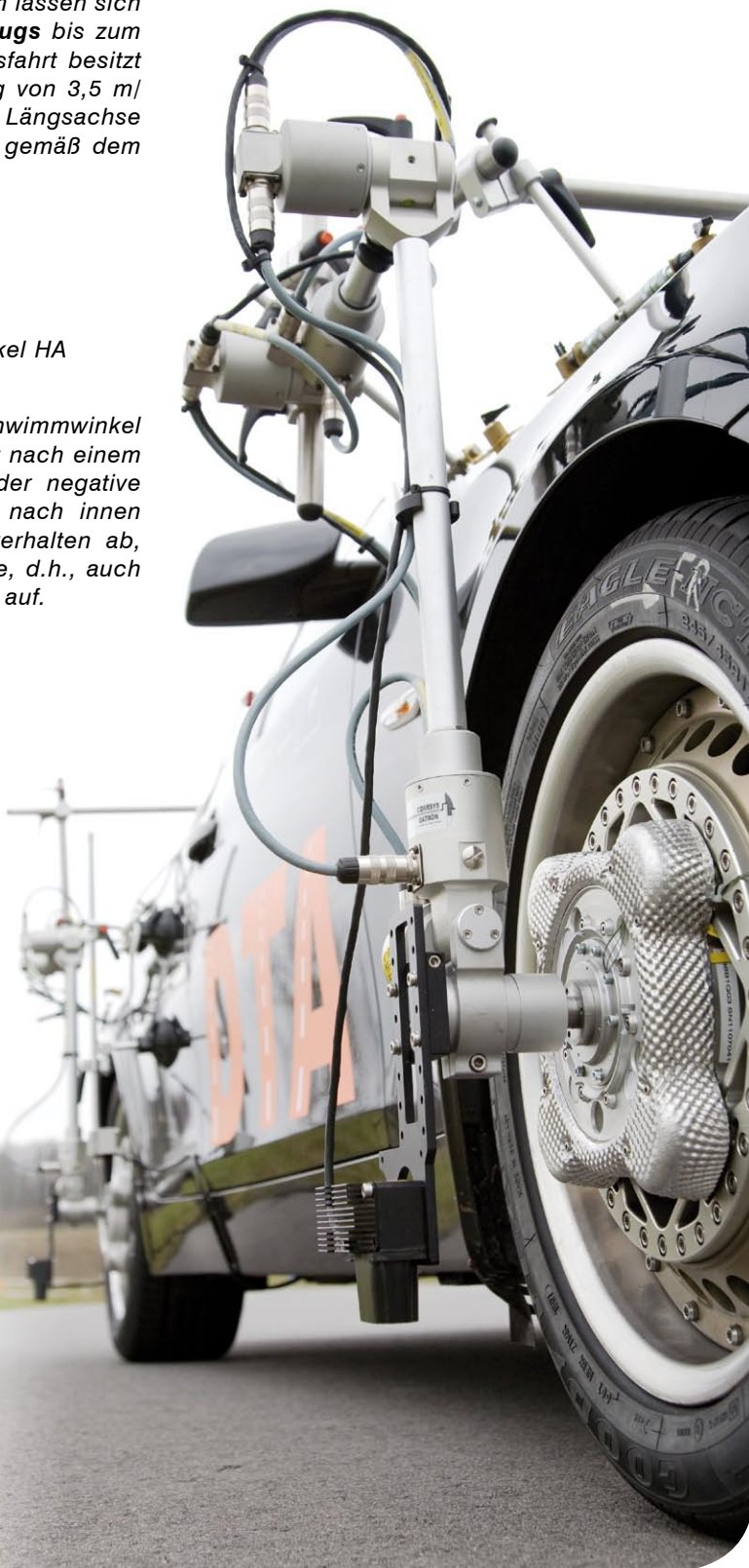
l_h = Abstand Schwerpunkt zur HA; α_h = Schräglaufwinkel HA

Bei der **Fahrt auf konstantem Radius** nimmt der Schwimmwinkel mit steigendem Schräglaufwinkel weiter ab und nimmt nach einem Nulldurchgang negative Werte an. Dabei bedeutet der negative Schwimmwinkel, dass die Fahrzeuggängsachse nun nach innen zeigt. Dieses Verhalten hängt nicht vom Eigenlenkverhalten ab, sondern nur vom Schräglaufwinkel an der Hinterachse, d.h., auch untersteuernde Fahrzeuge weisen diese Charakteristik auf.

Resümee

Der **Verlauf des Lenkradwinkels** über die Querbeschleunigung ist ein wichtiges Beurteilungskriterium für das **Eigenlenkverhalten** des Fahrzeugs. Seine Zunahme mit steigender Querbeschleunigung beweist ein untersteuerndes Verhalten. Aus Gründen der Fahrstabilität und des **Sicherheitsempfindens** des Fahrers wird ein untersteuerndes bis neutrales Eigenlenkverhalten angestrebt. Die Signalverläufe von Schwimmwinkel und Wankwinkel charakterisieren die Parameter Komfort und Sicherheit.

Die stationäre Kreisfahrt gehört zu den Standardtests zur **Validierung von Reifenmodellen**. Hierfür werden folgende radbezogene **Messgrößen** in Abhängigkeit von der Querbeschleunigung erfasst: Radsturzwinkel, Schräglaufwinkel, Längs- und Quergeschwindigkeit, Radlast, Rückstell- und Sturzmoment sowie das Antriebsmoment. Zur Transformation der radbezogenen Kennfeldgrößen in das fahrzeugfeste Koordinatensystem werden weitere Messgrößen benötigt: Längs-, Quer- und Giergeschwindigkeit, Nick- und Wankwinkel sowie die Radhübe. Die **DTA** ist dazu in der Lage, alle zur Erfassung der aufgeführten Messgrößen erforderlichen Messmittel als **Gesamtlösung** bereitzustellen.



Mail: info@driveability-testing-alliance.com

Web: www.driveability-testing-alliance.com