



# Charaktertest für die Lenkung

Entwicklung und Abstimmung von elektrischen  
Lenksystemen mit mechatronischen HiL-Verfahren



Kann man unter Laborbedingungen das Lenkverhalten eines Fahrzeugs schon realitätsnah „erfahren“? Mit einem geeigneten mechatronischen Prüfstand ist das machbar. Genau dies hat die Dr. Ing. h.c. F. Porsche Aktiengesellschaft realisiert und optimiert auf effiziente Weise den Lenkcharakter neuer Lenksysteme bereits in sehr frühen Phasen der Entwicklung.

Die Lenkung ist in modernen Fahrzeugen weit mehr als nur eine simple Komponente zur Richtungsänderung. Unterstützt durch Servomotoren und zahlreiche Assistenten, ist sie heute ein integraler Bestandteil des Sicherheitssystems und trägt effektiv zu einer Entlastung des Fahrers im Straßenverkehr bei. Auf der Rennstrecke entscheidet sie nicht selten sogar über Sieg und Niederlage. Gerade für einen Sportwagenhersteller wie die Porsche AG ist es daher naheliegend, der Entwicklung von Lenksystemen eine hohe Bedeutung beizumessen. Dabei geht es nicht nur um eine präzise und schnelle Umsetzung der Lenkbewegung auf die Räder, sondern – quasi in Gegenrichtung – um eine unmittelbare Rückmeldung des Fahrzustands. Beides zusammen ermöglicht eine intuitive, sichere Fahrzeugführung. Als maßgeblich vom Fahrer erlebbare Komponente bietet das Lenksystem außerdem ideale Möglichkeiten, um sich gegenüber Wettbewerbern abzuheben. Ein Porsche-typischer Lenkcharakter, der agiles und direktes Lenkverhalten gewähr-

leistet, steht daher im Pflichtenheft der Entwickler ganz oben. Selbstverständlich stellt der Motorsport gegenüber den Straßenkonfigurationen noch weitergehende und speziellere Anforderungen an die Lenkmomente und -charakteristik – und das bis über die fahrdynamischen Grenzbereiche von straßenzugelassenen Fahrzeugen hinaus.

### Elektromechanisches Lenken

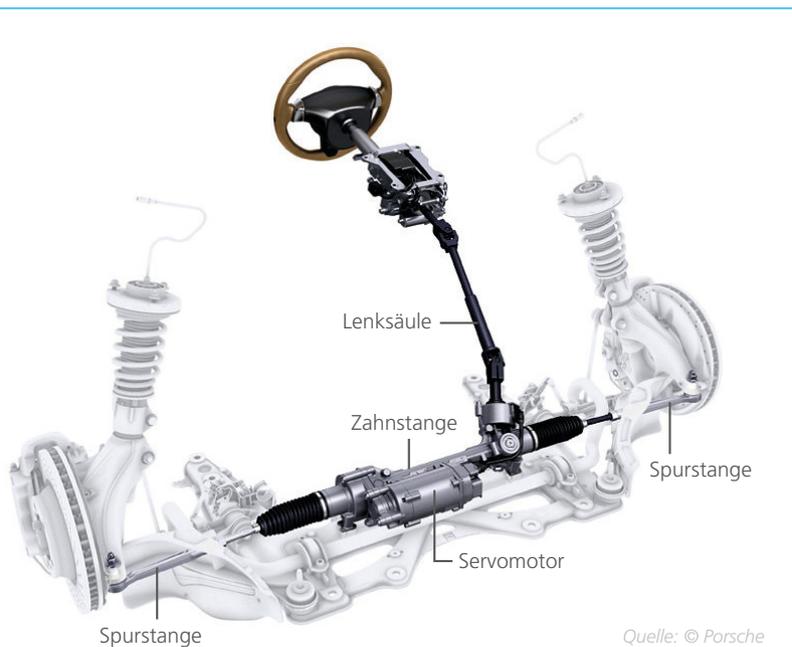
Stand der Technik sind mittlerweile elektromechanische Lenksysteme, die meist unter der Bezeichnung Electric Power Steering (EPS) verwendet werden (Abbildung 1). Bei diesen Systemen stellt ein Elektromotor eine zusätzliche Kraft auf die Spurstangen und unterstützt so aktiv den vom Fahrer gewünschten Lenkeinschlag. Gegenüber der Vorgängergeneration, den hydraulischen Lenksystemen, verfügen EPS-Systeme über deutliche Vorteile hinsichtlich Energieverbrauch und Regelbarkeit. Beispielsweise lassen sich im integrierten EPS-Steuergerät Lenk-, Komfort-, und Assistentenfunktionen implementieren; dazu gehören geschwindigkeitsabhängige Lenkunter-

stützung, aktive Lenkungsrückstellung und Spurhalteassistenten. Ein Nachteil der EPS-Systeme ist jedoch, dass die Fahrzustände aufgrund der Massenträgheit der Unterstützungseinheit sowie der Übersetzungsverhältnisse zur Zahnstange nur unzureichend an den Fahrer rückgemeldet werden. Dies führt zu besonderen Herausforderungen bei der Auslegung des wichtigen Rückmeldeverhaltens und damit bei der Wahrung des Porsche-Charakters.

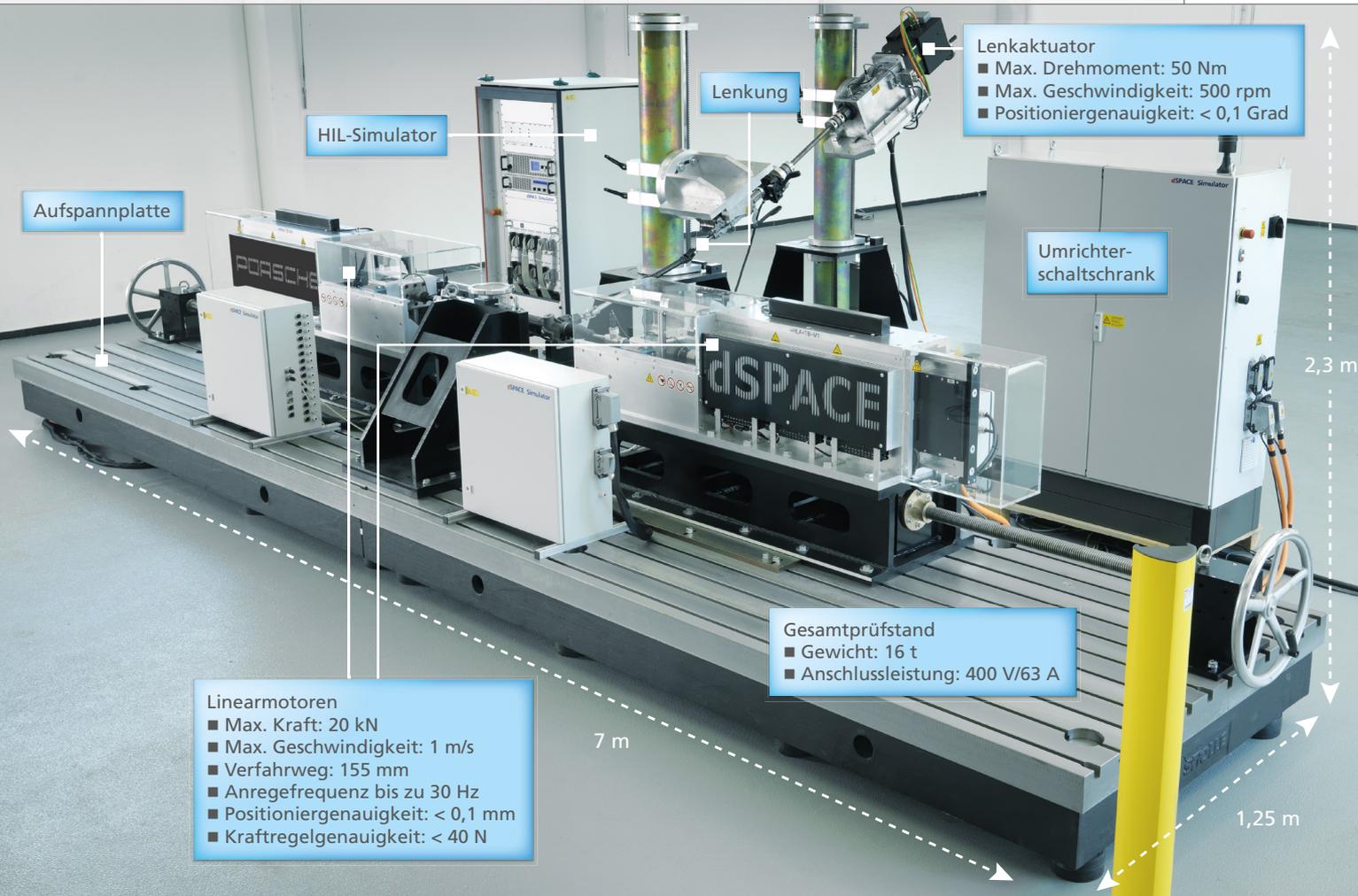
### Absicherung des Lenksystems

Neben subjektiv wahrgenommenen Komfort- oder Charaktereigenschaften müssen Lenksysteme aber auch ganz handfeste Kriterien erfüllen. Nicht ohne Grund zählen sie zu den sicherheitskritischen Fahrzeugkomponenten, denn ihr Ausfall kann zu einer gefährlichen Fahrsituation führen. Die Absicherung der Mechanik und Elektronik erfolgt daher nach den höchsten Sicherheitsstandards. Wachsende Software-Umfänge, neue Fahrerassistenzsysteme und die optionale Ausstattung des Fahrzeugs um eine Hinterachslenkung erhöhen den Prüfbedarf bei der Lenksystementwicklung jedoch enorm. Daher sind geeignete Methoden erforderlich, um trotz aller Komplexität die geforderte Qualität effizient sicherzustellen. Reproduzierbare Tests, leicht erweiterbare Testumfänge und individuell steigerbare Testtiefen sind mit dem etablierten Hardware-in-the-Loop (HIL)-Verfahren für Steuergeräte realisierbar. Weitere Effizienzoptimierungen gelingen, wenn das Gesamtsystem getestet und die Reglerauslegung frühzeitig mit entwicklungsbegleitenden Tests unterstützt werden kann. Daher setzt man bei Porsche auf einen mechanischen Prüfstand, um das Lenksystem inklusive Steuergerät im eigenen Labor zu prüfen. Die mechanische Anregung des Lenksystems durch geeignete Aktuatoren ermöglicht es, ein Systemverhalten zu testen, das mit einer realen Testfahrt in einem Prototypenfahrzeug vergleichbar ist. Dabei lassen sich aber auch synthetische An-

Abbildung 1: Aufbau eines elektromechanischen Lenksystems. Der Elektromotor zur Lenkunterstützung ist hier parallel zur Zahnstange verbaut und übt eine translatorische Kraft auf die Spurstangen aus.



Quelle: © Porsche



Aufspannplatte

HIL-Simulator

Lenkung

Lenkaktuator  
 ■ Max. Drehmoment: 50 Nm  
 ■ Max. Geschwindigkeit: 500 rpm  
 ■ Positioniergenauigkeit: < 0,1 Grad

Umrichterschaltschrank

Gesamtprüfstand  
 ■ Gewicht: 16 t  
 ■ Anschlussleistung: 400 V/63 A

Linearmotoren  
 ■ Max. Kraft: 20 kN  
 ■ Max. Geschwindigkeit: 1 m/s  
 ■ Verfahrweg: 155 mm  
 ■ Anregefrequenz bis zu 30 Hz  
 ■ Positioniergenauigkeit: < 0,1 mm  
 ■ Kraftregelgenauigkeit: < 40 N

7 m

2,3 m

1,25 m

Abbildung 2: Aufbau und technische Daten des Lenkungsprüfstands.

regungsformen über alle mechanischen Schnittstellen des Lenksystems einprägen, sodass vollumfängliche Tests mit dem Prüfstand realisierbar sind. Auf diese Weise können die Entwickler neue Funktionen schon in frühen Phasen erproben, wichtige Parameter identifizieren und beispielsweise fahrdynamische Grenzen gefahrlos ausloten. Nicht zuletzt lässt sich so wertvolles Know-how im Unternehmen aufbauen.

### Flexibles Prüfstandkonzept

Der in Zusammenarbeit zwischen dSPACE und der Porsche AG entwickelte Lenkungsprüfstand ist so aufgebaut, dass er eine vollständige Lenkung inklusive Lenksäule, Servomotor, Zahn- und Spurstangen aufnehmen kann (Abbildung 2). Er zeichnet sich durch eine variable Aufspannplatte mit diversen Skalen für die Ausrichtung der einzelnen Komponenten aus. Darüber hinaus existieren definierte Schnittstellen für die Energie-

und Signalübertragung zwischen Lenksystem und Prüfstand. All dies gewährleistet eine hohe Flexibilität und folglich eine optimale Anpassbarkeit an unterschiedliche Lenksysteme und garantiert außerdem geringe Rüstzeiten und damit einen effizienten Betrieb.

### Effiziente elektrische Antriebe

Das Herzstück des Lenkungsprüfstands sind die dynamischen elektrischen Antriebe in Form von zwei Linearmotoren, welche die Lenkung mechanisch stimulieren. Dadurch bilden sie die Kräfte nach, die im realen Fahrzeug von den Rädern auf die beiden Spurstangen übertragen werden. Am anderen Ende der Lenkung befindet sich ein Lenkaktuator (Elektromotor), um die Lenkwinkel dynamisch einzustellen und damit den Fahrer nachzumahen. Die beiden Linearmotoren sowie der Lenkaktuator werden über geregelte Antriebsumrichter mit Energie versorgt. Die Ansteuerung der Linearmotoren ist so ausgelegt,

dass sowohl hohe Kräfte als auch präzise Auflösungen darstellbar sind. Die Umrichter aller Motoren sind über einen gemeinsamen Spannungszwischenkreis gekoppelt. Dieser wird über eine aktive Einspeiseeinheit aus dem elektrischen Netz mit Energie versorgt. Durch die Kopplung der Umrichter müssen lediglich die Verluste des Prüfstands gedeckt werden, der Großteil der Energie fließt im „Kreis“. Dadurch wird eine deutlich höhere Energieeffizienz im Vergleich zu den Hydraulikprüfständen erreicht, die bisher bei Porsche zum Einsatz kamen. Die externe Versorgung reduziert sich auf eine Standard-Drehstromsteckdose (63 A). Weitere Medien wie Kühlwasser oder Druckluft sind nicht notwendig.

### Aufbau und Funktion des Simulators

Die Regelung der Motoren, die Überwachung des Prüfstands und die Messwerterfassung werden mit einem dSPACE HIL-Simulator realisiert. >>

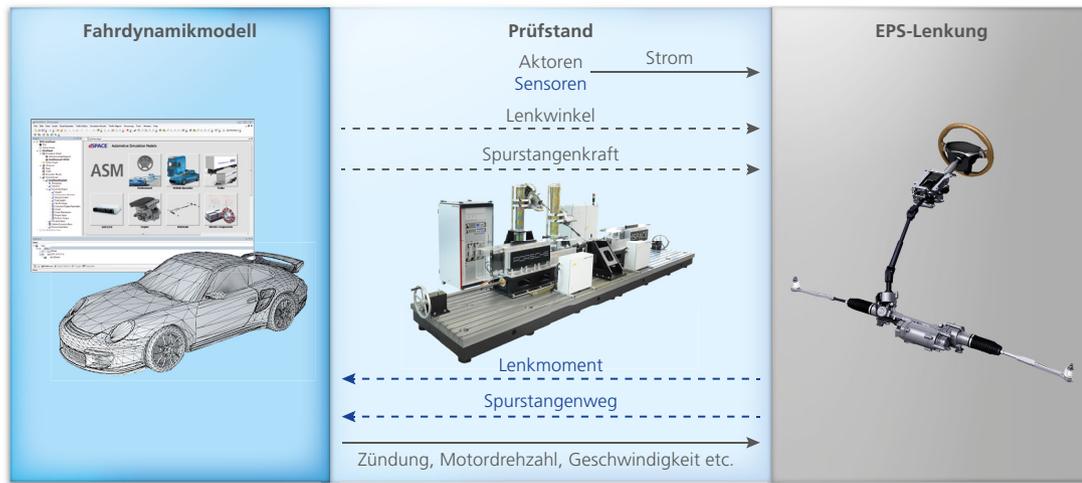


Abbildung 3: Komponenten, Signale, Aktoren und Sensoren des Prüfstands.

Dieser enthält den Echtzeitprozessor, die benötigte I/O und die entsprechende Signalkonditionierung. Die Ansteuerung der Antriebsumrichter erfolgt über das TWINSync-Protokoll der Firma LTi Motion und garantiert so eine Übermittlung der Sollwerte an den Umrichter in einem 125- $\mu$ s-Raster. Dieses Regelungskonzept erlaubt eine hohe Stellgenauigkeit auch bei hochdynamischen Anregungen bis 30 Hz, was etwa einer schnellen Fahrt über Kopfsteinpflaster entspricht. Außerdem bildet der Simulator auch den Restbus nach, und zwar je nach Lenkungstyp für CAN- oder für FlexRay. Zur Echtzeitsimulation der fahrdynamischen Eigenschaften eines Fahrzeugs kommt die Toolsuite dSPACE ASM (Automotive Simulation Models) zum Einsatz. Die echte Lenkung ist dadurch beispielsweise mit dem Fahrzeugmodell ASM Vehicle Dynamics gekoppelt, sodass ein Closed-Loop-Betrieb realisiert wird (Abbildung 3). Die Parametrierung der unterschiedlichen Porsche-Fahrzeugmodelle erfolgt mit der grafischen Benutzeroberfläche dSPACE ModelDesk, in der auch Straßen und Manöver für die virtuellen Testfahrten definiert werden. Um das Fahrzeugverhalten sofort visuell bewerten zu können, kommt die 3D-Animationssoftware dSPACE MotionDesk

zum Einsatz (Abbildung 4). Die Prüfstandsteuerung erfolgt mit der Experimentier- und Instrumentiersoftware dSPACE ControlDesk. Mithilfe der Testautomatisierungssoftware dSPACE AutomationDesk kann Porsche seine Prüfabläufe darüber hinaus komfortabel automatisieren.

#### Bestandteile der EPS-Tests

Der Lenkungsprüfstand wird bei Porsche zum einen für die Identifikation mechanischer Lenkungsparameter verwendet, zum anderen dafür, das Übertragungsverhalten des Lenksystems zu analysieren. Dazu wird mithilfe der Versuche zur Parameteridentifikation die durch den Lenksystem-Lieferanten erfolgte Umsetzung der Mechanik-Anforderungen nachvollzogen. Darüber hinaus liefern wiederholte Messungen mit dem gleichen Bauteil Erkenntnisse über dessen Verschleißeigenschaften. Während der Versuche identifizierte Parameter:

- Übersetzungsverhältnis zwischen Ritzelwinkel und Zahnstangenweg
- Übersetzungsverhältnis zwischen Motorwinkel und Zahnstangenweg
- Steifigkeiten des Lenkstrangs (Drehstab und Lenksäule)
- Steifigkeit der Motorübertragung

(Riemetrieb und Kugelgewindetrieb)

- Reibung von Lenkgetriebe und Lenksäule
- Motorkennfeld (Leistung, Energieverbrauch und Wirkungsgrad)

Durch den Einsatz von AutomationDesk können Messabläufe komfortabel automatisiert werden. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Bestimmung der Reibung in Lenkgetriebe und Lenksäule oder die Ermittlung des Motorkennfelds, wofür jeweils eine Reihe unterschiedlicher Messungen notwendig sind. So wird zur Bestimmung der Steifigkeiten im Lenkstrang mit dem Lenkaktuator ein drehmomentgeregeltes Dreieckssignal in Form automatisierter Tests abgefahren. Aus den gemessenen Größen Lenkradmoment  $M_L$  und Lenkradwinkel  $\delta_L$  lässt sich die Steifigkeit  $c$  ableiten (Abbildung 5, (3)). Durch die Analyse des Übertragungsverhaltens einer elektrischen Lenkung lassen sich die Eigenschaften des Unterstützungsmotors identifizieren. Dabei wird in Abhängigkeit der Anregungsfrequenz untersucht, wie gut der Servomotor die an ihn gestellten Unterstützungsanforderungen umsetzt. Des Weiteren lässt sich das Rückmeldeverhalten der Lenkung analysieren. Es wird durch die Entwickler

maßgeblich mithilfe der Software des Lenkungsreglers beeinflusst und Porsche-typisch ausgelegt. In Abhängigkeit der Frequenz wird dabei das Übertragungsverhalten von Kräfteinwirkungen an der Zahnstange zu Momenten am Drehstab untersucht. Analytisierte Übertragungskriterien:

- Übertragungsverhalten von Motor-moment zu Zahnstangenkraft
- Übertragungsverhalten von Zahnstangenkraft zu Drehstabmoment

Abbildung 5 (4, 5) zeigt, wie sich eine Anregung an der Zahnstange in eine Reaktion am Drehstabmoment überträgt. Die Kurvenverläufe „passiv“

beschreiben das rein mechanische Übertragungsverhalten der Lenkung ohne Servounterstützung. Die Verläufe „aktiv“ stellen das Verhalten der Lenkung mit aktivierter Unterstützung dar. Es ist deutlich erkennbar, dass die Verläufe „aktiv“ bezüglich der Amplitude unterhalb der Verläufe „passiv“ liegen. Ursache hierfür ist die Servofunktion der Lenkung, welche die vom Fahrer aufzubringenden Handmomente auf ein komfortables Maß reduziert. Die weitgehende Übereinstimmung der jeweiligen Kurvenverläufe „#1“ und „#2“ verdeutlicht die hohe Reproduzierbarkeit der Messungen mit dem Lenkungsprüfstand von dSPACE.

### Test des Gesamtsystemverhaltens

Für die Untersuchung des Gesamtsystemverhaltens bietet der Prüfstand zwei unterschiedliche Analysemethoden. Zum einen können vordefinierte Signale, beispielsweise aus einer Fahrversuchsmessung, als Testvektoren an den Prüfstand übergeben und abgefahren werden. Diese Methode hat den Vorteil, dass die Testvektoren nur einmalig aufgezeichnet werden müssen und anschließend beliebig oft wiederverwendbar sind. Zur Untersuchung unterschiedlicher Software-Stände ist es folglich nicht notwendig, das Fahrmanöver erneut mit dem Realfahrzeug durchzuführen. Zum anderen kann mithilfe des Simulationsmodells ASM

>>

„Mit seinen hochdynamischen Eigenschaften stellt der mechatronische Prüfstand von dSPACE für uns ein wichtiges Entwicklungswerkzeug dar, das sich hervorragend in die Porsche-Lenkssystementwicklung mit ihren hohen Anforderungen einfügt.“

Anton Uselmann, Porsche AG

Abbildung 4: Der mechatronische Prüfstand samt Bedienplatz mit ControlDesk zur Steuerung der Tests (links) und MotionDesk zur Visualisierung der Fahrmanöver (rechts).



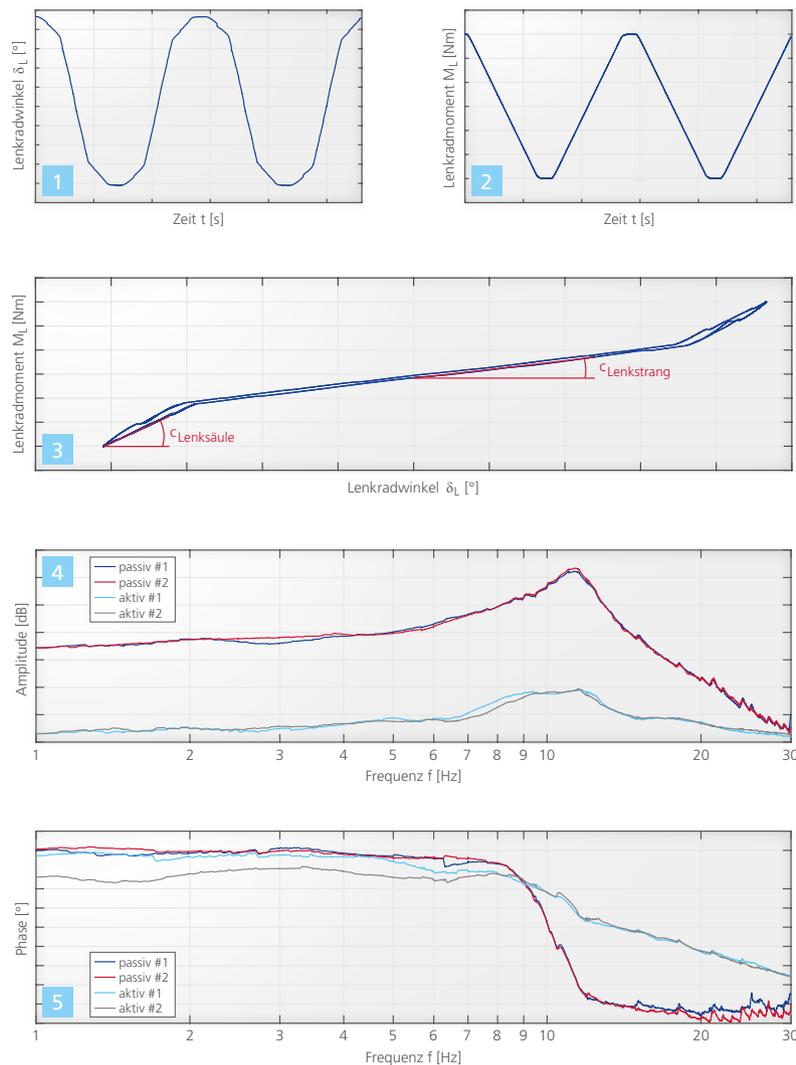


Abbildung 5: Verschiedene während der Lenkradttests aufgenommene Messwerte.

1, 2: Anregung des Lenkstrangs mit Lenkradwinkel  $\delta_L$  und Lenkradmoment  $M_L$  über der Zeit  $t$ .

3: Die Steifigkeiten des Lenkstrangs  $c$  lassen sich aus der Steigung des Lenkradmoments  $M_L$  über dem Lenkradwinkel  $\delta_L$  ablesen.

4, 5: Übertragungsverhalten der Lenkung mit rein mechanischer Übertragung („passiv“) und aktivierter Unterstützungseinheit („aktiv“). Die jeweiligen Kurvenverläufe „#1“ und „#2“ verdeutlichen die hohe Reproduzierbarkeit der Messungen mit dem dSPACE Prüfstand.

Vehicle Dynamics das Verhalten der Lenkung im Gesamtsystem Fahrzeug analysiert werden. Dazu ist es erforderlich, ASM Vehicle Dynamics mit den Fahrzeugparametern des zu untersuchenden Porsche-Modells zu bedaten. Darüber hinaus können mit ModelDesk

verschiedene Fahrsituationen definiert werden. Dabei lassen sich diverse Größen variieren, beispielsweise die Streckentopologie oder die Reibwerte der Fahrbahn. Sowohl die Verwendung der Testvektoren als auch Simulationen mit ASM Vehicle Dynamics können den

Fahrversuch im Realfahrzeug bei der Systemanalyse unterstützen. Besonders aus der Unabhängigkeit von Fahrer- und Umwelteinflüssen resultiert dabei eine hohe Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Untersuchungen (Abbildung 6).

### Projektverlauf und Abstimmung

Während des gesamten Projekts – von den ersten Gesprächen in der Angebotsphase bis zur Inbetriebnahme und Endabnahme – bestand ein enger Kontakt und ständiger Austausch zwischen den Projektbeteiligten von Porsche und dSPACE. In der ersten Projektphase ging es zunächst darum, die Anforderungen von Porsche in eine Prüfstandkonstruktion umzusetzen. Grundlage bildete ein 3D-Modell des mechanischen Aufbaus, das in mehreren Schritten überarbeitet wurde. Beispielsweise wurde durch konstruktive Maßnahmen sichergestellt, dass die Eigenfrequenzen des Prüfstands mit allen geplanten Anwendungsszenarien kompatibel sind – also nicht im Frequenzbereich der Anregung liegen. Ebenso musste die Auslegung der Linearmotor-Läufer für die geforderte hohe Dynamik optimiert werden. Regelmäßige Telefonkonferenzen und Termine vor Ort, entweder bei dSPACE in Paderborn oder im Porsche-Entwicklungszentrum in Weissach, waren fester Bestandteil des Projekts. Dadurch blieb der Projektstatus jederzeit transparent. Letztlich konnte der Prüfstand termingetreu angeliefert und in Betrieb genommen werden. Da der gesamte Prüfstand aus einer Hand stammt und schlüsselfertig geliefert wurde, entstanden weder Reibungsverluste noch Kommunikationsprobleme mit Dritten.

### Fazit und Ausblick

Der Lenkungsprüfstand sorgt bei Porsche für eine höhere Flexibilität und eine exakte Reproduzierbarkeit von

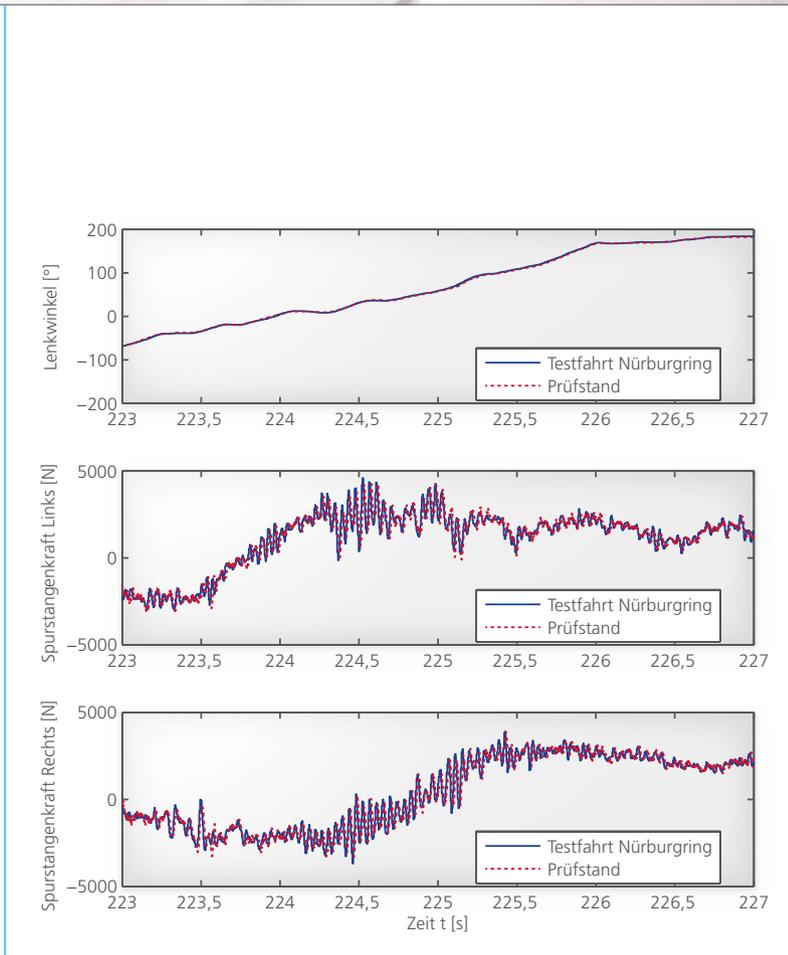


Abbildung 6: Während einer realen Fahrt auf dem Nürburgring gewonnene Messdaten für den Lenkwinkel und die korrespondierenden Spurstangenkräfte (blau) im Vergleich mit den am Lenkungsprüfstand gemessenen Größen (rot).

## „Mithilfe des Echtzeitsimulationsmodells ASM Vehicle Dynamics analysieren wir das Verhalten einer realen Lenkung im virtuellen Fahrzeug.“

Benedikt Schrage, Porsche AG

Tests und steigert auf diese Weise die Effizienz bei der Entwicklung und Absicherung der Lenksysteme. Auch nach dem Abschluss des Projekts besteht intensiver Kontakt zwischen den Projektteams beider Firmen. So arbeitet dSPACE zurzeit daran, die Regelalgorithmen für Lenkungsprüfstände weiter zu optimieren. In der nächsten Ausbaustufe geht es darum, gemeinsam eine Hinterachslenkung in die Prüfstandumgebung zu integrieren. Die Erweiterung um eine Steer-by-Wire-Architektur ist ebenso denkbar. Wei-

terhin plant Porsche die Integration einer Temperatorkammer für den Prüfstand, wobei die Schnittstellen am HIL-Simulator bereits vorgesehen sind. ■

Anton Uselmann, Eric Preisling, Benedikt Schrage, Dario Düsterloh, Porsche AG



Im Video erfahren Sie mehr über die Arbeitsweise des Prüfstands: [www.dspace.com/gol/dMag\\_20162\\_mHIL\\_D](http://www.dspace.com/gol/dMag_20162_mHIL_D)

### Anton Uselmann

Anton Uselmann ist zuständig für die Funktionsentwicklung von Lenksystemen bei der Porsche AG in Weissach.



### Eric Preisling

Eric Preisling ist Fachreferent für Fahrwerkprüfstände im Prüffeld der Porsche AG in Weissach.



### Benedikt Schrage

Benedikt Schrage ist Versuchsingenieur im Bereich Fahrwerkprüfstände und zuständig für den Lenkungsprüfstand bei der Porsche AG in Weissach.



### Dario Düsterloh

Dario Düsterloh ist Doktorand bei der Porsche AG in Weissach und beschäftigt sich mit der Funktionsoptimierung und Komplexitätsbeherrschung im Entwicklungsprozess der Lenkung.

