



Entwicklungsumgebung zur Validierung von Steer-by-Wire-Systemen

© IPG Automotive GmbH

Steer-by-Wire-Systeme stellen einen Paradigmenwechsel in der Lenkungsentwicklung dar. Der Verzicht auf die mechanische Verbindung eröffnet zwar neue Freiheitsgrade bei Konstruktion und Funktionsgestaltung, erfordert jedoch zugleich eine umfassende Validierung von Sicherheit, Fahrkomfort und Systemintegration. Mit einem speziell entwickelten Prüfstand und der virtuellen Gesamtfahrzeugsimulation CarMaker bietet IPG Automotive ein Testsystem, das diese Herausforderungen ganzheitlich adressiert.

Die Einführung von Steer-by-Wire(SbW-)Systemen markiert einen grundlegenden Techniksprung in der Fahrzeugentwicklung. Im Gegensatz zu konventionellen Lenksystemen mit starrer mechanischer Verbindung in Form der Lenksäule zwischen Lenkrad und den Rädern sowie fester Lenkübersetzung eröffnen SbW-Systeme völlig neue Perspektiven. Dies gilt insbesondere für die gezielte Abstimmung von Lenkgefühl und -bedarf, der Fahrzeugquerdynamik sowie des automatisierten Fahrens [1, 2]. Zudem ermöglichen sie innovative Bedien-

konzepte und Fahrerschnittstellen, beispielsweise in Form von Joysticks oder alternativen Eingabegeräten [3]. Mit dieser technischen Freiheit wachsen jedoch auch die Anforderungen an Sicherheit, Verlässlichkeit und die Authentizität des Lenkgefühls.

Um diese SbW-Systeme entsprechend kalibrieren und absichern zu können, wurde ein weitreichendes Prüfstandskonzept entwickelt. Dieses führt die Kernelemente der SbW-Technik – elektronische Steuergeräte (Electronic Control Units, ECUs), Software und Regelfunk-

tionen, Signalübertragung sowie Sensoren und Aktoren – in einer integrierten Entwicklungs- und Testumgebung zusammen und stellt sie für die Systemvalidierung bereit.

TECHNISCHES GRUNDKONZEPT

Bei einem SbW-System wird die mechanische Verbindung durch Sensoren, ECU-Algorithmen und elektrische Aktoren ersetzt [1]. Dies ermöglicht eine gezielte Anpassung der Lenkreaktionen an unterschiedliche Fahrsituationen,



Dr. Alexander Ahlert

ist Lead Consultant und Branch Manager Stuttgart bei der IPG Automotive GmbH in Karlsruhe.



Martin zur Heiden

ist Lead Engineer Test Systems & Engineering bei der IPG Automotive GmbH in Karlsruhe.



Philipp Schmidt

ist Senior Engineer Test Systems & Engineering bei der IPG Automotive GmbH in Karlsruhe.



Henning Kemper

ist Senior Specialist Editor bei der IPG Automotive GmbH in Karlsruhe.

etwa mit reduzierter Lenkarbeit beim Parken, erhöhter Präzision bei hohen Geschwindigkeiten oder gezielter Dämpfung von externen Störeinflüssen auf die Lenkung. Dabei sind zwei Architekturen üblich, **BILD 1**. Bei der ersten Architektur existiert weiterhin eine Zahnstange, die über einen zentralen Aktor mit dazugehöriger ECU angesteuert wird – im Folgenden als Powerpack bezeichnet. Die zweite Architektur verwendet radindividuelle Powerpacks, die über ein Getriebe sowie eine Spurstange mit den Rädern verbunden sind. Beide Architekturen weisen unterschiedliche Vor- und Nachteile auf, die im Rahmen dieses Beitrags nicht näher erläutert werden [1, 4].

Um SbW-Systeme unter realitätsnahen Umständen im Labor erproben zu können, kommt ein speziell entwickelter Prüfstand zum Einsatz. Dieser verknüpft die wesentlichen Steuerungselemente des SbW-Systems – reale Powerpacks inklusive Signalübertragung – mit Simulationsmodellen, die weitere Komponenten wie die Zahnstange und das Lenkrad sowie bei Bedarf das Gesamtfahrzeugverhalten in einer virtuellen Umgebung abbilden.

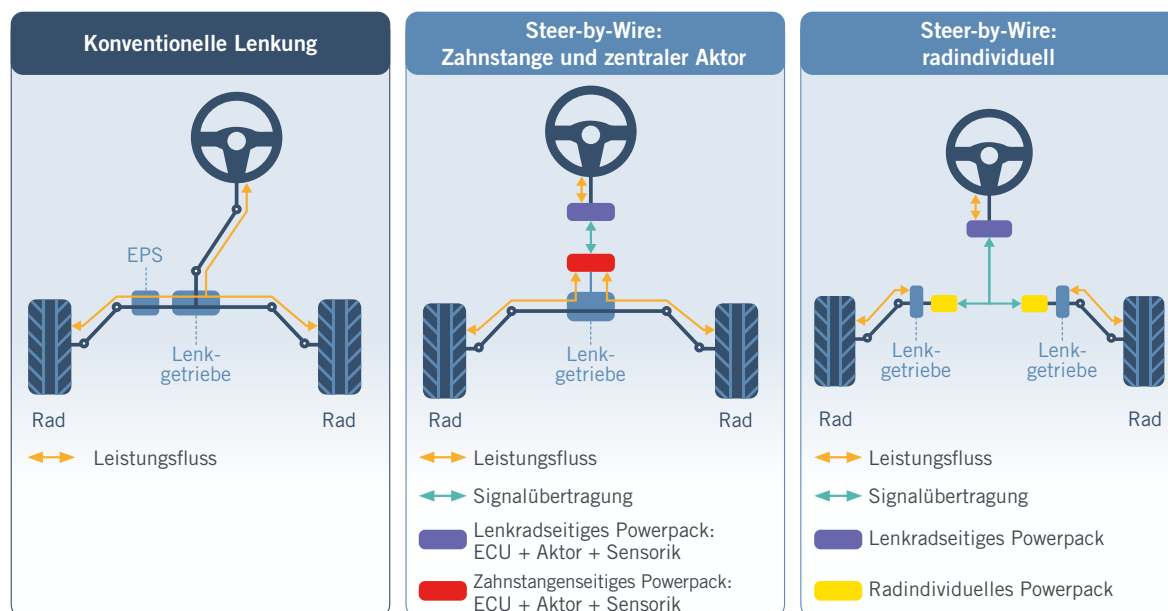
Je nach SbW-Konfiguration variiert der Aufbau des Prüfstands, das Kern-

prinzip bleibt jedoch identisch. Kernbestandteile des SbW-Prüfstands sind Drehmomentaktoren (Servomotoren), die über Drehmomentsensoren mit den Powerpacks des realen SbW-Systems verbunden sind. Dies gilt sowohl für den lenkradseitigen Aufbau als auch für den radseitigen Teil. Dabei kann die Zahl der Powerpacks je nach Architektur unterschiedlich sein – bis hin zu einer radindividuell gesteuerten Vorder- und Hinterachslenkung [1]. Die Prüfstandsaktoren können sowohl signalbasiert betrieben werden als auch als Schnittstelle zur virtuellen Umgebung fungieren.

Ein zentraler Prüfstandsrechner (Xpack Real-time System von IPG Automotive als Hardware-in-the-Loop(HiL)-System) übernimmt die Regelung der prüfstandsseitigen Aktoren, die Messdatenverarbeitung, die Buskommunikation mit dem SbW-System und der Prüfstandshardware sowie die Gesamtfahrzeugsimulation inklusive Echtzeitsynchronisation, **BILD 2**.

Während der Prüfstand einzelne Lenkungs-komponenten realistisch nachbildet, entfaltet sich der volle Nutzen erst in der Kopplung mit einer Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung wie CarMaker [5]. So können Systemtests und -analysen in hochkomplexe, realitätsnahe Fahrscena-

BILD 1 Architekturbeispiele und Funktionsprinzip – konventionelle Lenkung (links) im Vergleich zu den zwei SbW-Systemen zentrales Powerpack (Mitte) und radindividuelles Powerpack (rechts) (EPS = Electric Power Steering, elektrische Servolenkung; ECU = Electronic Control Unit, elektronisches Steuergerät) (© IPG Automotive GmbH)



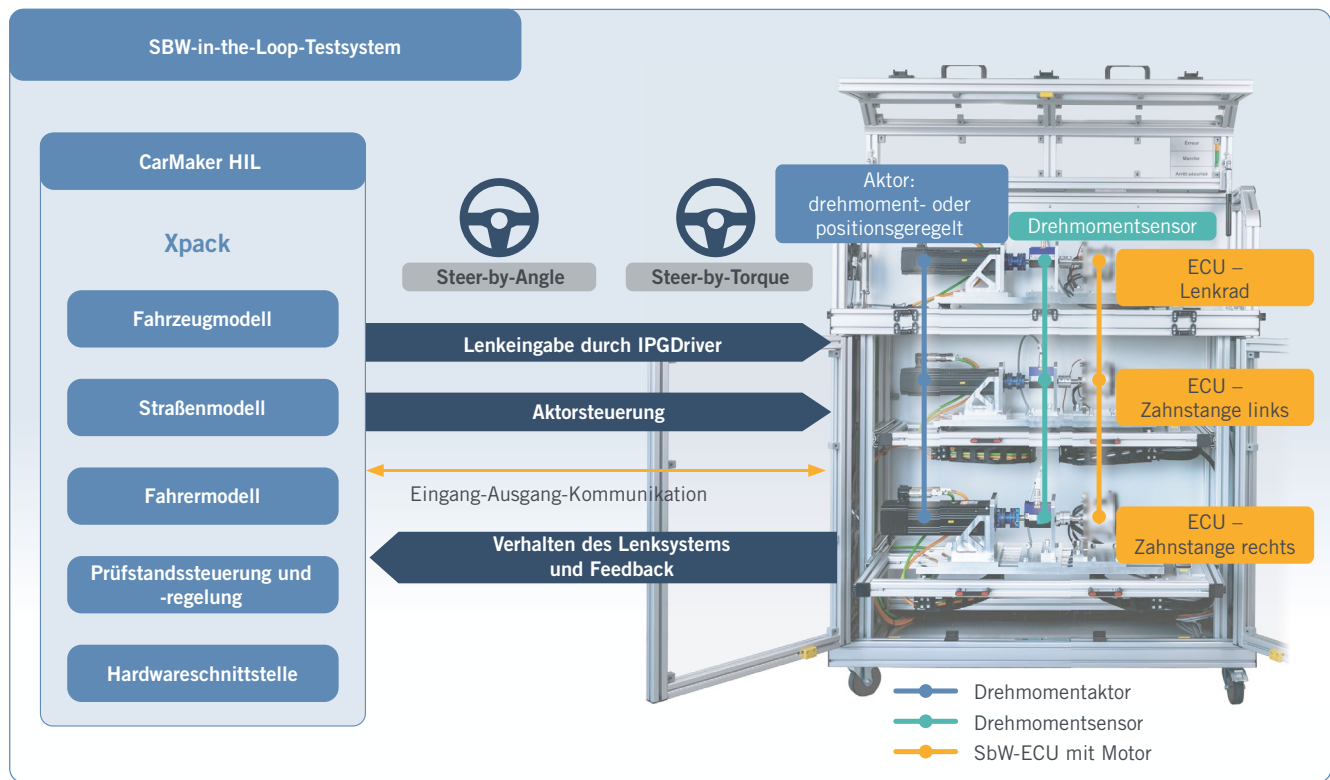


BILD 2 Konzept des SBW-in-the-Loop-Testsystems (© IPG Automotive GmbH)

rien eingebunden und Wechselwirkungen mit allen relevanten Subsystemen berücksichtigt werden.

WIRKKETTE, REGELUNG UND TESTMÖGLICHKEITEN

Am Beispiel einer SbW-Konfiguration mit drei Powerpacks und einer zentralen Zahnstange wird die Wirkkette im Zusammenspiel mit der Simulationsumgebung erläutert. Der Prüfstand kann auf zwei Arten angesteuert werden: entweder durch einen vorgegebenen Lenkwinkel (Steer-by-Angle) oder durch ein Lenkmoment (Steer-by-Torque). Ein virtueller Fahrer übernimmt dabei die Steuerung. Die physikalischen Eigenschaften von Lenkrad und Lenksäule, wie zum Beispiel Trägheit, Dämpfung und Reibung, werden simuliert. Daraus ergibt sich eine Stellgröße für den Prüfstandsaktor, der das physische Powerpack mit Drehmoment oder Drehwinkel anregt. Das Powerpack reagiert abhängig von der simulierten Fahrzeugreaktion und der SbW-Funktionslogik mit einem Lenkrückstellmoment. Ein Drehmomentsensor erfasst das resultierende Moment, das zur Prüfstandsregelung zurückgeführt wird.

Die ECUs des SbW-Systems kommunizieren miteinander: So sendet das lenkradseitige Powerpack ein Reaktionssignal an die Powerpacks an der Zahnstange. Im realen Fahrzeug würden diese in der Folge ein Drehmoment erzeugen, das über das Lenkgetriebe auf die Zahnstange wirkt und somit die Räder bewegt.

Am Prüfstand wird ab den Powerpacks die gesamte weitere Wirkkette – einschließlich Lenkgetriebe, Zahnstange, Radaufhängung, Reifen und Gesamtfahrzeugreaktion – virtuell abgebildet. Die am Prüfstand gemessenen Drehmomente zwischen den zahnstangenseitigen Prüfstandsaktoren und den Powerpacks werden in der Simulation über ein virtuelles Lenkgetriebe in Kräfte umgerechnet, die auf die simulierte Zahnstange wirken.

Unter Berücksichtigung der wirkenden, relevanten Kräfte und Momente wird die Bewegung der Zahnstange auf Basis von Simulationsmodellen berechnet. Dabei fließen Massen- und Trägheitseffekte, Reibungs- und Dämpfungsmodelle sowie die Rückstellkräfte und -momente aus dem Reifen- und Gesamtfahrzeugverhalten ein. Hieraus ergeben sich Zahnstangenbeschleunigung, -geschwindigkeit und -position, die

in Echtzeit an die Prüfstandsregelung zurückgeführt werden. Die zahnstangenseitigen Prüfstandsaktoren regeln daraufhin unter Berücksichtigung des virtuellen Lenkgetriebes den resultierenden Winkel am Powerpack ein. So entsteht eine realitätsnahe Rückmeldung an das SbW-System mit geschlossener Regelschleife und durchgängiger Wirkkette.

Mit diesem Ansatz kann das SbW-System unter realistischen Bedingungen auf Gesamtfahrzeugebene getestet und validiert werden. Dabei bleiben alle relevanten Wechselwirkungen zwischen Fahrer, Lenkung, Radaufhängung, Reifen und Fahrzeugverhalten erhalten. So lassen sich Komfort, Dynamik und Sicherheit bereits in frühen Entwicklungsphasen gezielt optimieren, die SbW-Software und Signalübertragung umfassend absichern und verschiedene Fahrzeug- und Lenkungskonfigurationen flexibel testen.

Für einfachere Tests wie Plausibilitätsprüfungen oder Basisfunktionstests können die Prüfstandsaktoren einzeln und signalbasiert betrieben werden. Mithilfe eines Fail-Safe-Testers können zudem gezielt ausgewählte Aktoren, Sensoren oder interne Datenleitungen physisch getrennt werden. Dadurch lassen sich

automatisiert verschiedene Betriebszustände, Fehlerfälle und Ausfallszenarien simulieren und das Verhalten des SbW-Systems bewerten. Das dargestellte Prüfstands-konzept ermöglicht folglich die zuverlässige Verifizierung und Validierung der hohen Anforderungen moderner Lenkungsarchitekturen.

ANWENDUNGSFÄLLE UND EINSATZMÖGLICHKEITEN

Ein praxisnahes Kundenszenario verdeutlicht die erhöhten Anforderungen an SbW-Systeme: Da die mechanische Verbindung zwischen Lenkrad und Zahnstange beziehungsweise den gelenkten Rädern entfällt, ist beim Aufstartverhalten des Fahrzeugs eine geeignete Systeminitialisierung und Synchronisation der Powerpacks erforderlich. Im Test wird untersucht, wie sich das SbW-System beim Starten verhält, wenn der Fahrer das Lenkrad verdreht, während das Fahrzeug ausgeschaltet ist.

Ein dazugehöriger Akzeptanztest könnte wie folgt aussehen: Nach dem Abstellen des Fahrzeugs wird die Posi-

tion des Lenkrads verändert. Beim erneuten Einschalten über die Starttaste muss das System sicherstellen, dass die Positionen von Lenkrad und Zahnstange wieder übereinstimmen. Dazu dreht das lenkradseitige Powerpack das Lenkrad in die korrekte Position zurück, bevor die Steuerung an den Fahrer übergeht. Am Prüfstand kann dieses Verhalten automatisiert und reproduzierbar getestet und abgesichert werden. **BILD 3** zeigt den möglichen Zeitverlauf eines entsprechenden Tests.

Dem Szenario entsprechend werden nach dem Ausschalten des simulierten Fahrzeugs drei Lenkradwinkel (20°, 80°, 160°) durch den Prüfstandsaktor eingestellt. Nach etwa 12 s wird das Fahrzeug erneut eingeschaltet. Im Rahmen des Aufstartverhaltens stellt das SbW-System ein geeignetes Drehmoment bereit. Die gemessenen Drehmomente und Lenkradwinkel zeigen, dass das Powerpack das Lenkrad ohne Eingriff des Prüfstandsaktors in die Nulllage zurückführt, während die Zahnstange ihre Position beibehält. Da das SbW-System das erwartete Verhalten zeigt, gelten alle drei Tests als bestanden.

Darüber hinaus lassen sich erweiterte Situationen untersuchen, die in der realen Nutzung oder bei Fehlbedienung auftreten können – etwa, wenn der Fahrer während der Synchronisation eingreift. Die Vielzahl möglicher Kombinationen und Varianten, selbst bei scheinbar einfachen Abläufen wie dem Aufstartverhalten, verdeutlicht den steigenden Testaufwand bei SbW-Systemen.

Neben spezifischen Validierungsszenarien können am SbW-Prüfstand auch klassische Fahrmanöver (Open- und Closed-Loop) zur Bewertung des Lenkverhaltens und der Fahrzeugeigenschaften [1, 6, 7] durchgeführt werden. **BILD 4** zeigt auf Basis eines nicht-validierten Modells exemplarisch das Open-Loop-Beispielmanöver „Sine with Dwell“ nach ISO 19365 (jedoch nur bis zu einer maximalen Querschleunigung von circa 3 m/s², um im linearen Querdynamikbereich zu bleiben), bei dem der virtuelle Fahrer definierte Lenkradwinkelvorgaben umsetzt. Diese werden über den lenkradseitigen Prüfstandsaktor eingeregelt.

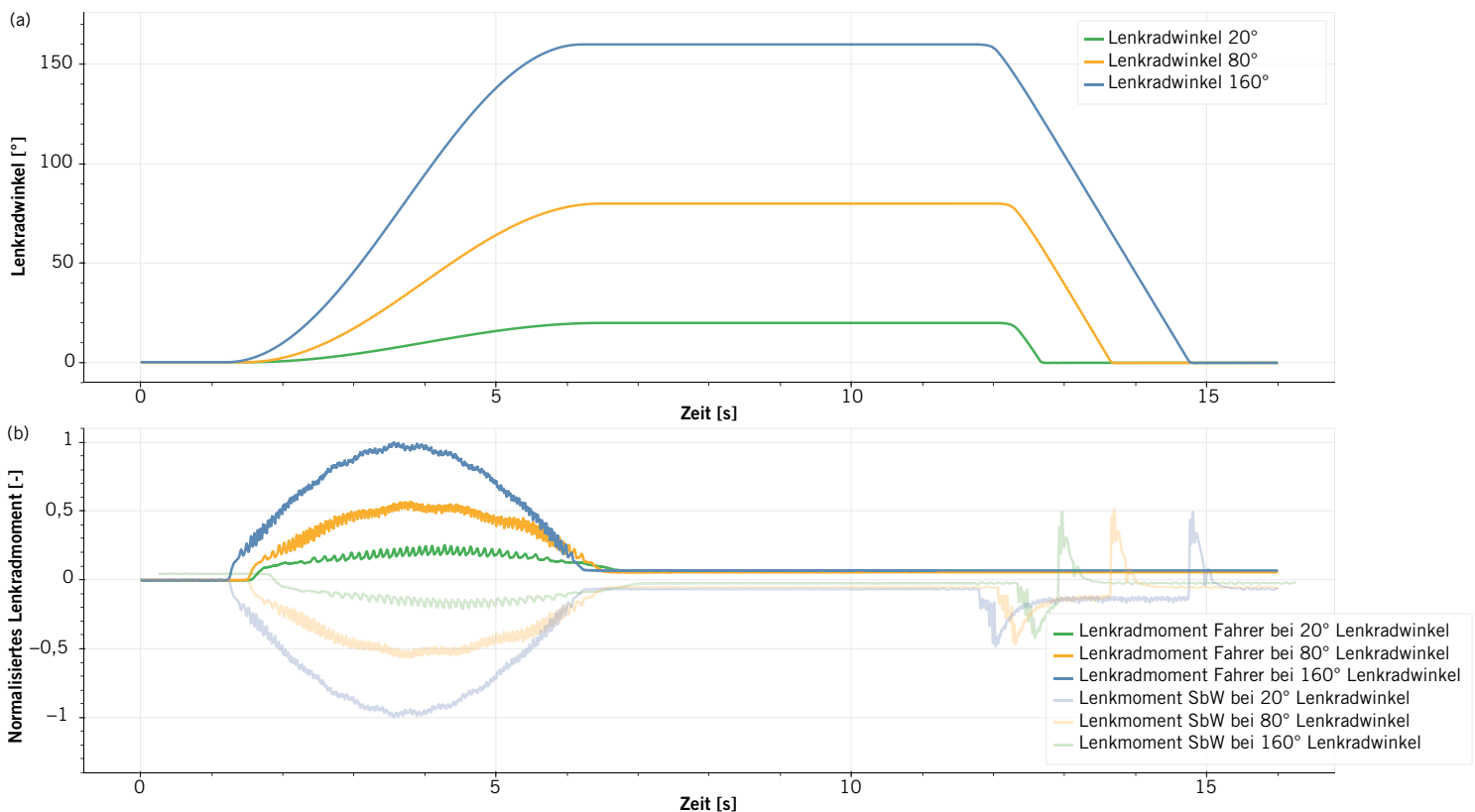


BILD 3 Startverhalten eines SbW-Systems für den Lenkradwinkel (a) und das Lenkradmoment (b) im Vergleich zu einer starren mechanischen Verbindung; im linken Abschnitt lenkt der menschliche Fahrer (bis circa Sekunde 7), rechts das SbW-System (© IPG Automotive GmbH)

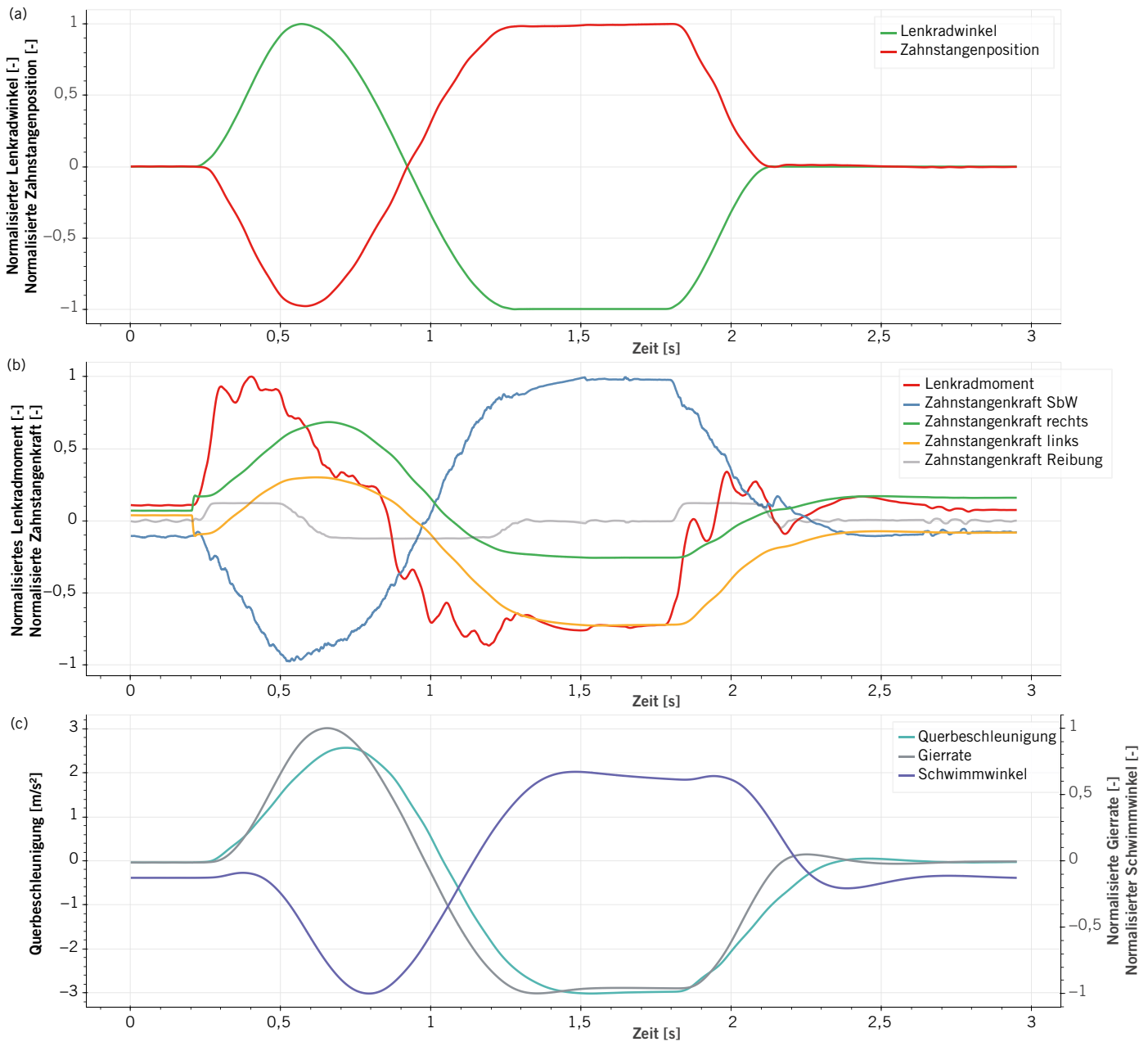


BILD 4 Sine-with-Dwell-Test nach ISO 19365, dargestellt für Lenkradwinkel (a), Lenkradmoment (b) und Querbeschleunigung (c) (© IPG Automotive GmbH)

BILD 4 (a) zeigt den Lenkradwinkel und die resultierende, simulierte Zahnstangenposition. In **BILD 4** (b) sind das vom Fahrer aufgebraachte Lenkradmoment sowie die auf die virtuelle Zahnstange wirkenden Kräfte zu sehen, während **BILD 4** (c) die dazugehörigen, relevanten Fahrzeugreaktionsgrößen im Fahrzeugschwerpunkt darstellt. Das Beispiel verdeutlicht, wie sich das Systemverhalten am Prüfstand unter variablen Randbedingungen transparent analysieren lässt – von einzelnen Parametern oder Reibungseffekten bis hin zur Interaktion im Gesamtfahrzeug.

Mithilfe der Simulationsumgebung CarMaker können darüber hinaus auch Closed-Loop-Manöver wie der doppelte Spurwechsel nach ISO 3888-1 durch ein virtuelles Fahrermodell in einer virtuellen Umgebung getestet werden. **BILD 5** (a) bis (c) zeigt ein Beispielergebnis; die Darstellung der Größen entspricht **BILD 4**.

ZUSAMMENFASSUNG

Die enge Verzahnung des Steer-by-Wire-Prüfstands mit der Gesamtfahrzeugsimulation CarMaker von IPG Automotive

ergibt ein leistungsfähiges Werkzeug für die Entwicklung und Validierung. Die Lösung vereint reproduzierbare Prüfstandsbedingungen mit realitätsnahen Fahrzenarien und beschleunigt somit den Absicherungsprozess neuer Lenksysteme. Software, ECUs, Sensorik und Aktorik eines SbW-Systems können frühzeitig, effizient und realitätsnah im Gesamtfahrzeugkontext getestet werden. In Kombination mit ganzheitlichen Teststrategien lassen sich beispielsweise Unit-, Integrations-, Fail-Safe- sowie erste System- und Akzeptanztests skalierbar

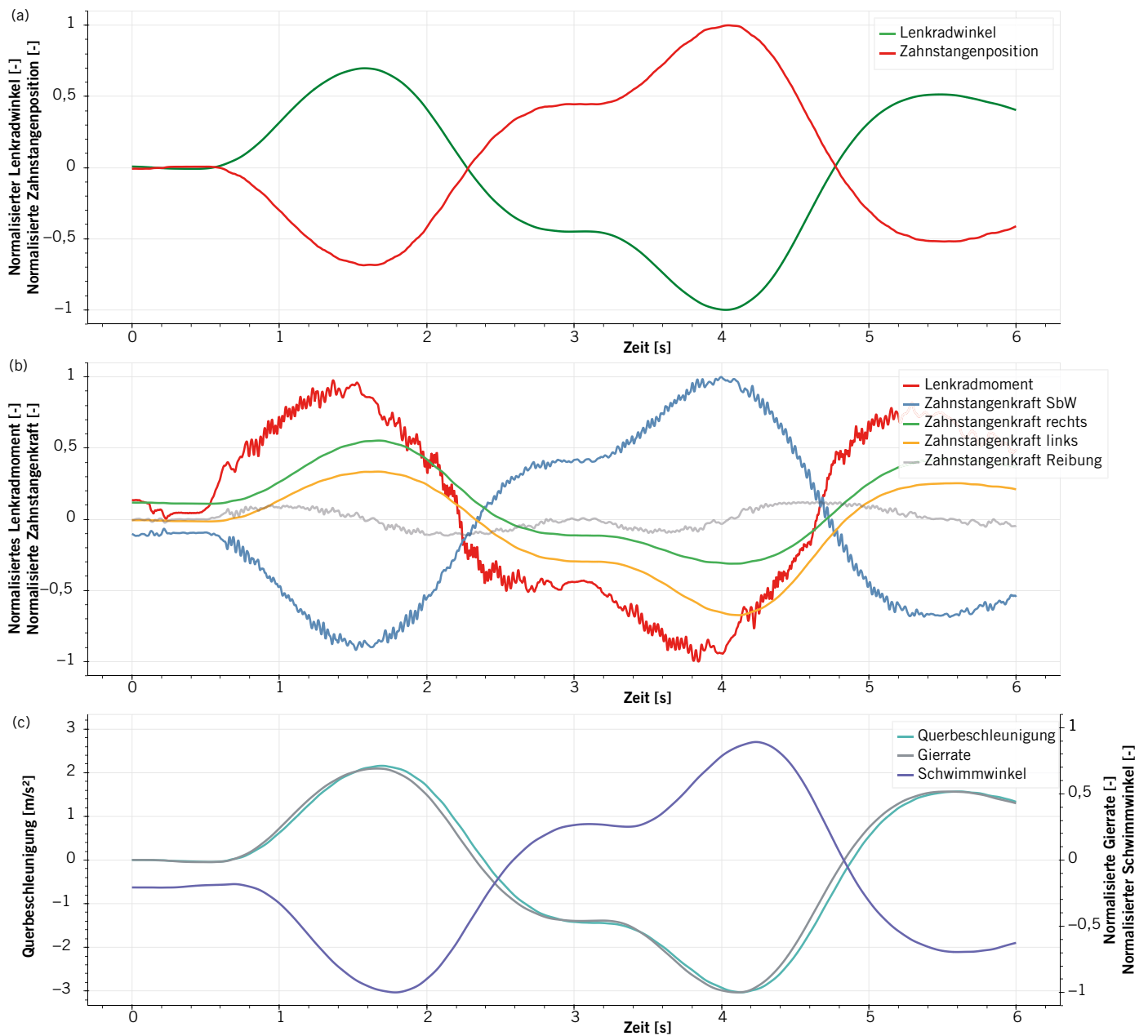


BILD 5 Doppelter-Spurwechsel-Test nach ISO 3888-1, dargestellt für Lenkradwinkel (a), Lenkradmoment (b) und Querbeschleunigung (c) (© IPG Automotive GmbH)

und im Dauerbetrieb durchführen, ohne dass vollständige Hardware oder ein reales Fahrzeug benötigt wird. Dadurch ergeben sich für die Entwicklung und Absicherung von SbW-Systemen Vorteile wie eine höhere Effizienz, eine gesteigerte Sicherheit und die Möglichkeit, das Potenzial softwaredefinierter Lenkungssysteme voll auszuschöpfen.

LITERATURHINWEISE

[1] Pfeffer, P.; Harrer M.: Lenkungshandbuch. Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen. Wiesbaden, Springer Vieweg, 2013

[2] Wesche, M.: Development of dependable Steer-by-Wire steering systems. Dissertation, Clausthal, Technische Universität, 2025

[3] Kiriwara, K.: Steer-by-Wire – Zukünftiges Bediensystem statt Lenkrad. In: ATZ 127 (2025), Nr. 6, S. 28-33

[4] Nievelstein, M.; Sandmann, T.; Olschewski, I.; Wegener, D.: Steer-by-Wire – Rethinking the steering system to realize improved performance, layout and comfort. Whitepaper, Online: https://fka.de/images/Steer_by_Wire_Whitepaper.pdf, aufgerufen: 30. September 2025

[5] Tosolin, G.: Fitting ESP hydraulic parameters using CarMaker for Simulink and optimization algorithm. Vortrag, Apply & Innovate, Tech Weeks, Karlsruhe, 2020

[6] Meyer-Tuve, H.: Modellbasiertes Analysetool zur Bewertung der Fahrzeugquerdynamik anhand von objektiven Bewegungsgrößen. Dissertation, München, Technische Universität, 2008

[7] Ersoy, M.; Stefan, G. (Hrsg.): Fahrwerkhandbuch: Grundlagen – Fahrdynamik – Fahrverhalten – Komponenten – Elektronische Systeme – Fahrerassistenz – Autonomes Fahren – Perspektiven. Springer-Verlag, Wiesbaden, 2017



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: www.atz-worldwide.com