

Untersuchung von ESP-Systemen bei Brems- und Schleudervorgängen sowie Spurzeichnung und Signalmanipulation

Dr. rer. nat. Ingo Holtkötter
Schimmelpfennig + Becke, Münster, Deutschland

Abstract

Modern electronic stability control systems (ESC) like ESP, VSA, PSM, DSTC etc. are intended to ensure optimal traction of the tyres on the road surface and the stability of the driving process under any circumstances while allowing the driver's intervention. In a series of tests observing braking and skidding processes of a modern vehicle with a current ESC system, engine- and sensor-CAN-bus data are documented in order to study the mode of operation of such systems, taking into consideration potentially critical situations as well as technical malfunctions. These investigations provide a deep technical insight not only into the mode of operation of these systems but also into driving physics. The data include, for example, the individual wheel speeds, the brake system pressure, the steering angle or the yaw rate.

Deliberate manipulation of the sensor data is used to examine whether technical interferences of the ESC system can cause unintentional and dangerous interventions in the stability of the driving process. With regard to accident reconstruction, the formation of tyre marks in spite of integrated ABS and ESC systems is also documented and analysed.

Zusammenfassung

Moderne Fahrdynamikregelungen wie ESP, ESC, VSA, PSM, DSTC etc. sollen für stets optimalen Kraftschluss der Reifen mit der Fahrbahn, Fahrvorgangstabilität sowie eine dauerhafte Eingriffsmöglichkeit durch den Fahrer sorgen. Um die Funktionsweise solcher Systeme, auch in Bezug auf mögliche Problemsituationen oder technische Fehlfunktionen, untersuchen zu können, erfolgte eine Dokumentation der Motor- und Sensor-CAN-Bus-Daten bei einer Versuchsreihe zu Brems- und Schleudervorgängen eines modernen Fahrzeugs mit aktueller Fahrdynamikregelung. Hierbei wird ein tiefer technischer Einblick in die Funktionsweise der Systeme und der Fahrphysik möglich. Die Daten umfassen z.B. die Radgeschwindigkeiten, den Bremssystemdruck, den Lenkwinkel oder die Gierrate.

Durch gezielte Manipulation der Sensordaten wird untersucht, ob technische Störungen an der Fahrdynamikregelung zu ungewollten und gefährlichen Eingriffen in die Fahrstabilität führen können. In Hinblick auf die Unfallrekonstruktion wird außerdem das Entstehen von Spurzeichnungen trotz integriertem ABS und ESP dokumentiert und analysiert.

Einleitung

Aktuelle Fahrzeuge sind mit elektronischen Fahrstabilitätssystemen ausgestattet, die einen instabilen Fahrvorgang des Fahrzeugs verhindern sollen.

Um solche Systeme auf mögliche Problemsituationen oder technische Fehlfunktionen untersuchen zu können, ist es zunächst erforderlich, unabhängig von den Versprechungen der Hersteller zu prüfen, wie gut diese Systeme in der Praxis tatsächlich funktionieren. Eine auftreten-

de Spurzeichnung trotz Fahrdynamikregelung, auch im Hinblick auf eine mögliche Unfallrekonstruktion, wird anhand von Fahrversuchen dokumentiert und diskutiert.

Funktion ESP

Eine Fahrdynamikregelung wie ESP (Elektronisches Stabilitätsprogramm) dient zur Kontrollierbarkeit des Fahrzeuges in Grenzsituationen. Ob ein Eingriff durch das System erfolgt, wird anhand der Korrespondenz des Lenkwinkels und der Gierrate bzw. der einzelnen Radge-

schwindigkeiten entschieden. Dabei gibt der Lenkwinkelsensor Informationen über die beabsichtigte Fahrtrichtung, und der Gierratensensor erfasst die tatsächliche Fahrtrichtung. Die Fahrdynamikregelung erfolgt über die Regulierung der Bremskräfte an den einzelnen Rädern und ggfs. die Drosselung der Motorleistung. Die stabilisierende Funktion des Bremseingriffs an einzelnen Rädern ist in **(Abb. 1)** verdeutlicht. Im oberen Teil der Grafik ist eine Kurvenfahrt dargestellt, die aufgrund mangelnder Haftreibung im Falle eines Fahrzeugs ohne Fahrdynamikregelung (schwarze Linie) zu einem Übersteuern des Fahrzeuges führt: Das Fahrzeugheck bricht aus. Bei einem Fahrzeug mit Fahrdynamikregelung (orange farbene Linie) wird die ungewünschte Drehung um die Hochachse durch einen gezielten Bremseingriff kompensiert (siehe markiertes Rad vorn rechts), so dass das Fahrzeug dem durch den Lenkwinkel vorgegebenen Spurverlauf folgt und auf der Fahrbahn gehalten wird.

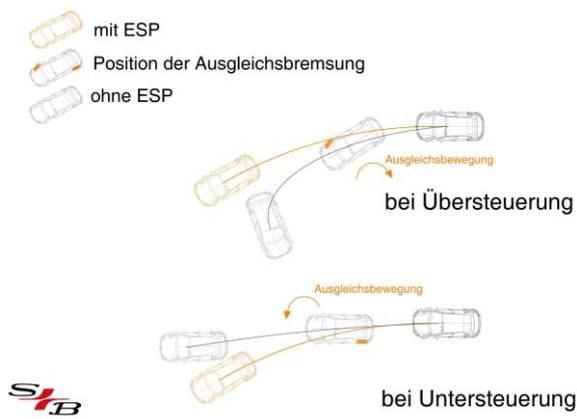


Abb. 1: Stabilisierender Bremseingriff des ESP-Systems bei übersteuerndem (oben) oder untersteuerndem Fahrvorgang (unten)

Der stabilisierende Eingriff der Fahrdynamikregelung erfolgt auch im Falle der Untersteuerung, wie im unteren Teil der Abbildung dargestellt. Dabei schiebt das Fahrzeug über die Vorderachse. Durch Abbremsen des hinteren linken Rades wird das Fahrzeug auf der Kurvenbahn gehalten und ein Abweichen vom gewünschten Kurvenverlauf verhindert. Zusammenfassend führt die Fahrdynamikregelung dazu, dass das Fahrzeug ständig entlang der durch das Lenkrad vorgegebenen Fahrtrichtung stabilisiert wird und eine unerwünschte Drehung um die Hochachse, das Ausbrechen des Fahrzeugs, unterdrückt wird. Dabei können die physikalischen Grenzen nicht überwunden

werden, so dass bspw. bei ungünstigen Fahrbahnverhältnissen wie Eis oder Schotter auch Situationen denkbar sind, in denen das Fahrzeug trotz Fahrdynamikregelung nicht mehr stabilisiert werden kann.

Analyse der fahrzeugeigenen Sensordaten

Um die Funktionsweise und Reaktion des Systems in verschiedenen Fahrsituationen zu analysieren, ist es sinnvoll, zunächst die fahrzeugeigenen Sensordaten aufzuzeichnen, welche die Basis eines Systemeingriffs darstellen.



Abb. 2: Verwendetes Testfahrzeug: Audi A6, Baujahr 2006

Beim verwendeten Testfahrzeug (**Abb. 2**) ist der Sensorcluster mit Gierraten- und Querberechleunigungssensor über einen eigenen CAN-Bus an das ESP-Steuergerät angebunden. Da die wichtigsten Daten außerdem auf dem Motor-CAN-Bus ausgetauscht werden, erfolgte das Abgreifen der Steuersignale am ESP-Steuergerät im Motorraum, wie in **Abb. 3** gezeigt ist.



Abb. 3: Abgreifen der Signale im Motorraum

Ein Mitlesen der beiden CAN-Busse (Motor- und Sensor-CAN-Bus) ermöglicht die Dokumentation z.B. der Radgeschwindigkeiten, der Gierrate, der Querberechleunigung, des Lenkwinkels, des Bremszustands, des Bremsdrucks, der Motordrehzahl und der Fahrpedalstellung.



Abb. 4: Messrechner & Sensorik (unten) bzw. die Verarbeitung der Messdaten (oben)

Im Testfahrzeug wurden der Übersichtlichkeit halber zusätzlich zu den CAN-Bus-Daten synchronisierte Videos, GPS-Daten, die triaxiale Beschleunigung/Gierate und die Fahrzeugbewegung über einen Magnetkompass aufgezeichnet (**Abb. 4**).

Analyse ASR- und ABS-Regelung

Abb. 5 zeigt ein einfaches Beispiel der aufgezeichneten Daten, die ausschließlich auf den fahrzeugeigenen CAN-Bus-Daten basieren. Die drei Diagramme zeigen die Messwerte in Grup-

pen gegen die Zeit auf der x-Achse aufgetragen: das Aufleuchten der ESP-Tachoanzeige und der Bremsdruck im oberen Diagramm, die Stellung des Fahrpedals und die Motordrehzahl im mittleren Diagramm sowie die vier Radgeschwindigkeiten nebst Tachoanzeige im unteren Diagramm.

Im dargestellten Versuch wurde das Fahrzeug zunächst stark bis 60 km/h beschleunigt und dann maximal verzögert. Es lässt sich ablesen, dass beim starken Beschleunigen die Geschwindigkeiten der beiden angetriebenen Vorderräder (VL \rightarrow /VR \leftarrow) gegenüber den Hinterrädern nach 0,5 s und 2,5 s stark ansteigen, d.h. die Vorderräder drehen durch. Aufgrund der Antriebsschlupfregelung (ASR) werden die Räder mit zu hoher Drehzahl abgebremst und der zu hohe Schlupf wird verringert. Der ASR- bzw. ESP-Eingriff ist durch das periodische Aufleuchten der ESP-Tachoanzeige (\square) erkennbar. Dabei ist das Aufleuchten der ESP-Anzeige nicht zwangsläufig mit der Anzahl der getätigten Eingriffe gleichzusetzen.

Beim Bremsvorgang bei 6 s Fahrzeit regelt das Antiblockiersystem (ABS) ebenfalls die Radgeschwindigkeiten in umgekehrter Richtung. Fällt eine Radgeschwindigkeit zu stark ab, droht also das Blockieren eines Rades, wird der Bremsdruck verringert, so dass das Rad wieder rollen kann. Bei der Vollbremsung war nur eine ABS-Regelung der Vorderräder zu erkennen, da an den Hinterrädern kein kritischer Blockiervorgang vorlag.

Beim Bremsen in Rückwärtsfahrt neigen ebenfalls die Vorderräder zum Blockieren und werden nachgeregelt (**Abb. 6**). Im Gegensatz dazu zeigt eine Bremsung auf ungleichem Untergrund (Asphalt links, Rasen rechts) nach **Abb. 7**, dass durch das ABS auch die Hinterräder geregelt werden. Es zeigt sich, dass die beiden rechten Rädern (VR \leftarrow /HR \leftarrow) auf Gras häufiger nachgeregelt als die linken Räder (VL \rightarrow /HL \rightarrow).

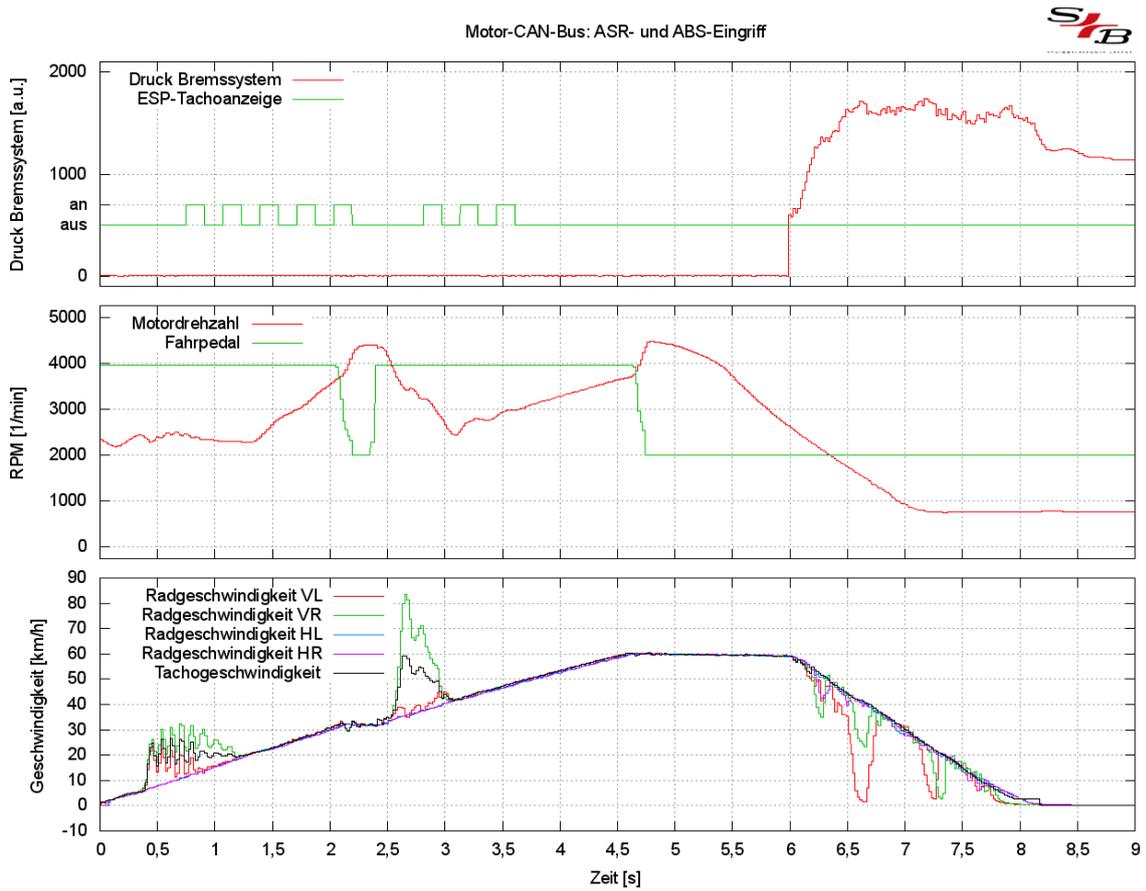


Abb. 5: Aufgezeichnete Daten bei einem ASR- und einem ABS-Eingriff bei Beschleunigung und Bremsung aus 60 km/h.

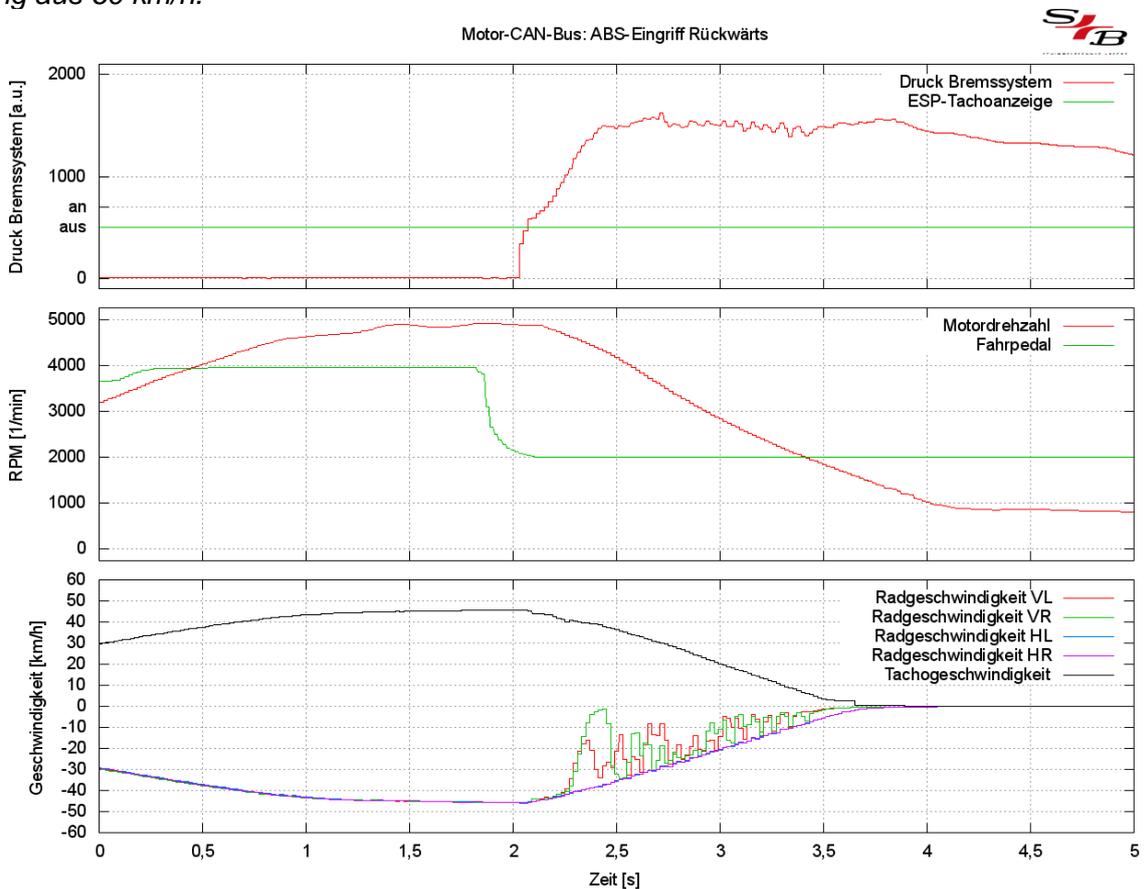


Abb. 6: ABS-Regelung bei Rückwärtsbremsung aus 45 km/h.

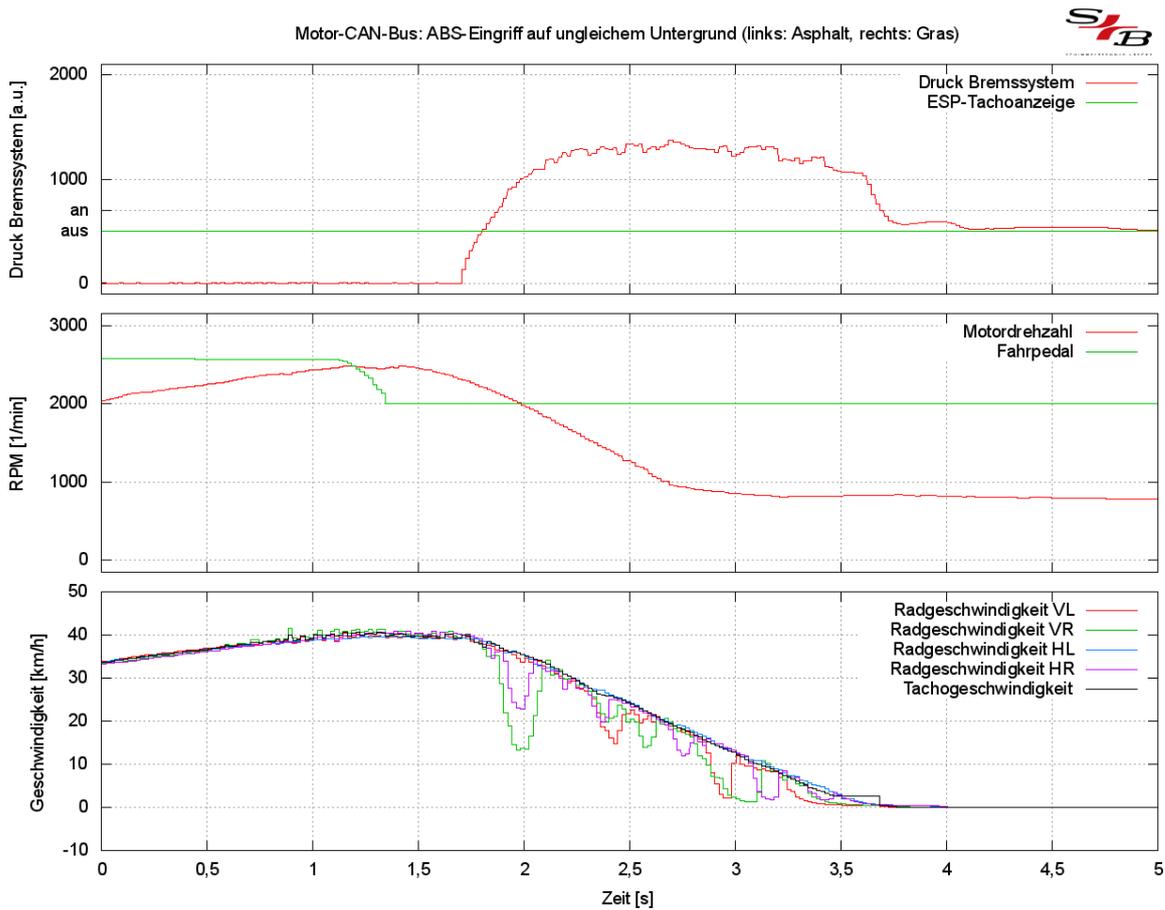


Abb. 7: ABS-Regelung auf ungleichem Untergrund (linke Räder auf Asphalt, rechte Räder auf Gras)

ESP-Eingriff bei einer Kreisfahrt

Wird das Fahrzeug mit ESP unter einem konstanten Lenkeinschlag in einem Kreis gefahren und die Geschwindigkeit kontinuierlich bis zur maximalen Pedalstellung erhöht, so wird die Motorleistung begrenzt und die Radgeschwindigkeit einzelner Räder angepasst, um eine stabile Kreisbahn zu garantieren (Abb. 8). Die nach etwa 9 s beginnende Instabilität des Fahrvorgangs zeigt sich durch einen starken Anstieg der Radgeschwindigkeit des kurveninneren Vorderrades (VL →). Durch den ESP-Eingriff wird das Rad VL abgebremst und die Motordrehzahl sowie die gefahrene Gesamtgeschwindigkeit trotz voll betätigtem Fahrpedal auf rund 1800 U/min bzw. 32 km/h (Tachogeschwindigkeit →) geregelt. Die weitgehend konstanten Werte für AVZ (Giergeschwindigkeit) und ACY (Querbeschleunigung) zeigen den

stabilen geregelten Fahrvorgang in der Kreisbahn.

Bei deaktiviertem ESP und gleichem Fahrmanöver (Abb. 9) steigt nach etwa 6 s die Radgeschwindigkeit VL stark an, was den Beginn der Instabilität des Fahrvorgangs signalisiert. Durch die fehlende Nachregelung steigt die Radgeschwindigkeit weiter an, und die Gierrate AVZ nimmt ab: Der gefahrene Radius wird größer. Die Motordrehzahl erreicht rd. 3000 U/min, was eine Gesamtgeschwindigkeit von rd. 55 km/h während der Kreisfahrt zulässt, so dass das Fahrzeug noch stärker nach außen aus der idealen Kreisbahn getragen wird. Der instabile Fahrvorgang wurde im Versuch durch manuelles Betätigen der Bremse abgebrochen.

Das Aufleuchten der ESP-Tachoanzeige während des ganzen Fahrvorgangs signalisiert in diesem Zusammenhang, dass das ESP zuvor deaktiviert wurde.

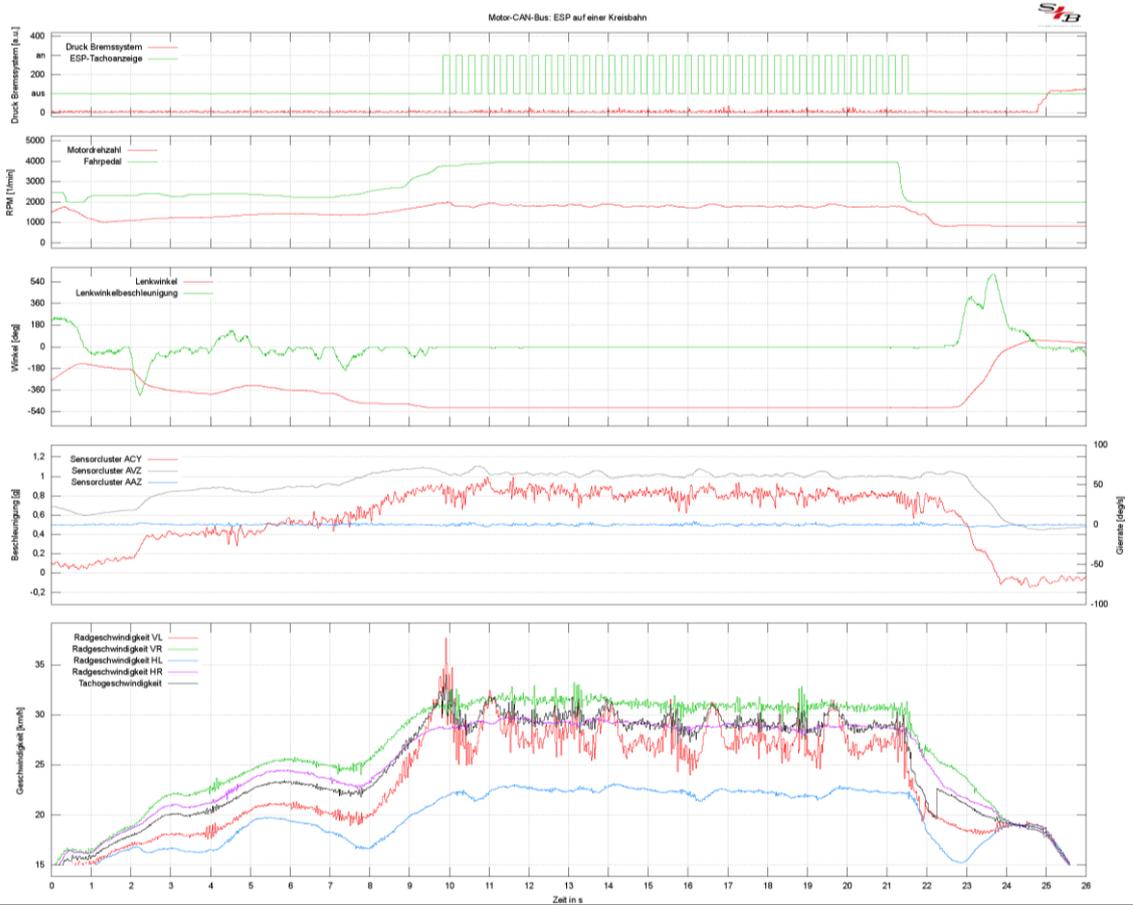


Abb. 8: ESP-Regelung für eine stabile Kreisbahn im Grenzbereich

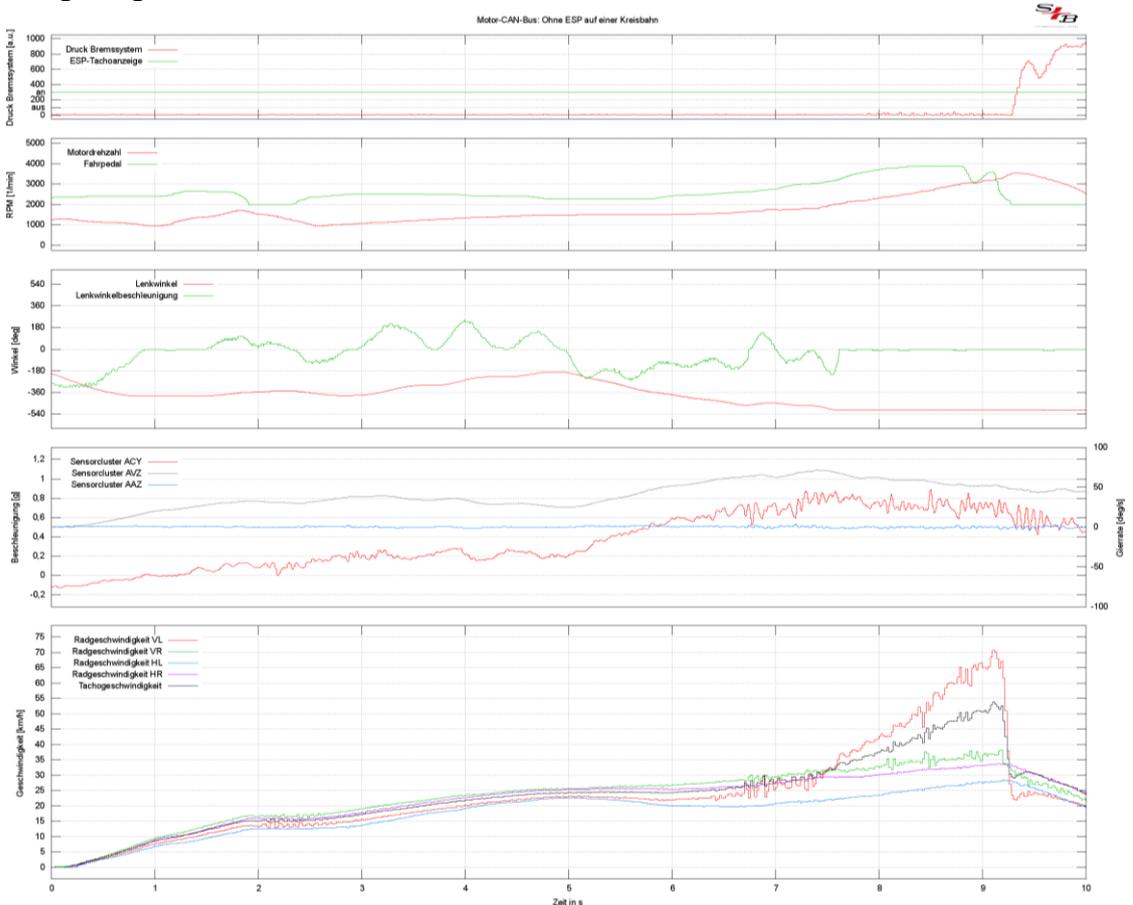


Abb. 9: Kreisfahrt im Grenzbereich ohne ESP mit instabilem Fahrvorgang

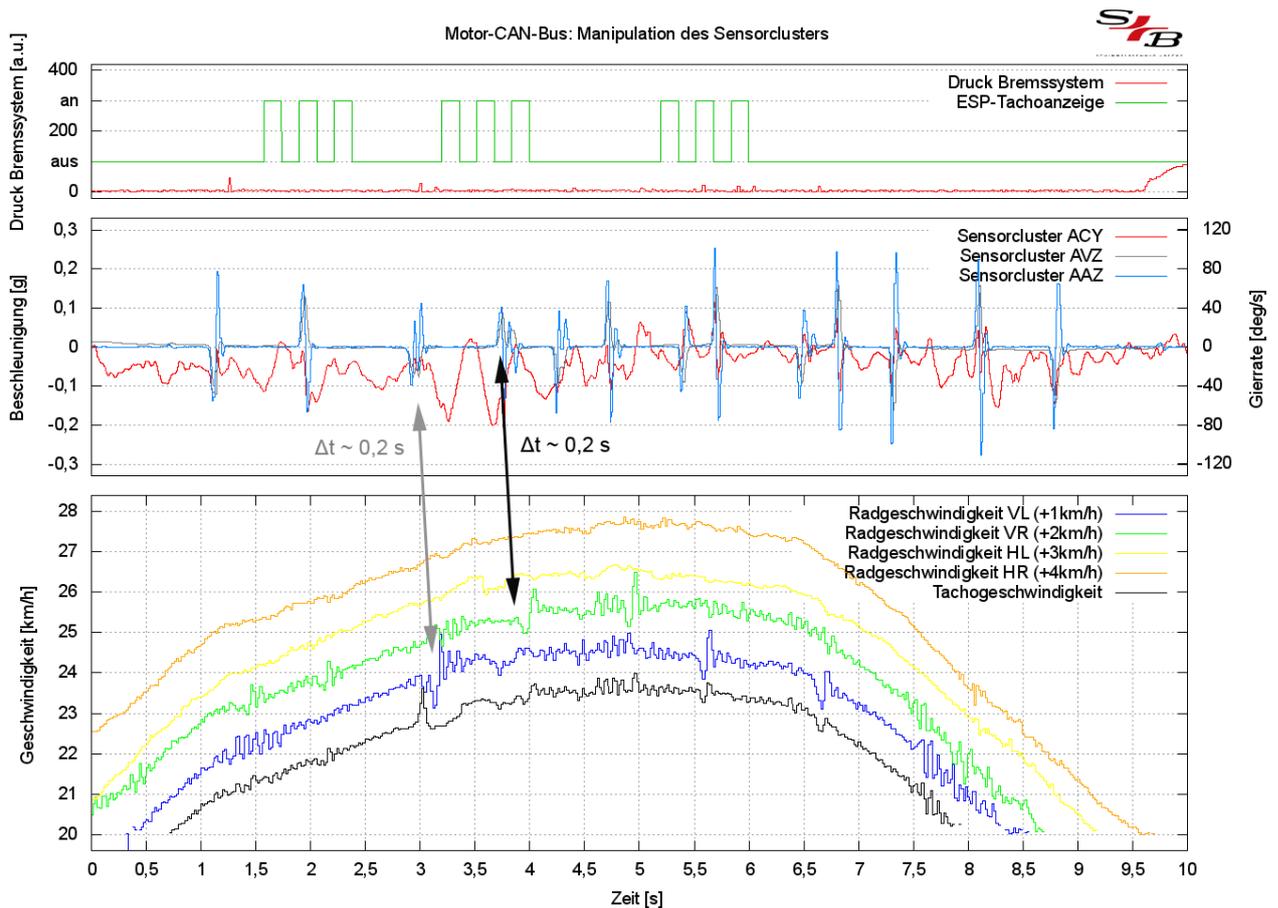


Abb. 10: ESP-Eingriffe bei manuellem Verdrehen des Sensorclusters

Manipulation des Sensorclusters / fehlerhafte Sensordaten

Um zu untersuchen, wie das ESP auf fehlerhafte Sensordaten reagiert, wurde bei Geradeausfahrt der Gyrosensor manuell um die Hochachse verdreht. Die Messdaten dieses Versuchs zeigt **Abb. 10**. Im mittleren Diagramm wurden die Messwerte des Sensorclusters (Gierrate (AVZ→), Gierratenänderung (AAZ→) und Querbearbeitung (ACY→)) aufgetragen. Im unteren Diagramm sind zur besseren Lesbarkeit die Radgeschwindigkeiten jeweils um ein km/h erhöht eingetragen.

Die manuellen Bewegungen des Sensors sind als scharfe Peaks deutlich erkennbar. Wird der Sensor bspw. zum Zeitpunkt $t = 3 \text{ s}$ nach rechts gedreht (negative Werte zu Beginn des Peaks), so wird das vordere linke Rad (VL →) abgebremst, obwohl sich das Fahrzeug immer noch in einer Geradeausfahrt befindet.

Aus der Darstellung lässt sich der zeitliche Abstand des ESP-Eingriffs von der Auslösung bis zur sichtbarer Radabbremmung mit etwa $\sim 0,2 \text{ s}$ bestimmen.

Spurenzeichnung trotz Fahrdynamikregelung

Gerade in Bezug auf die Unfallrekonstruktion ist eine korrekte Interpretation der Spurenlage vor Ort entscheidend. Meist wird davon ausgegangen, dass durch eine Fahrdynamikregelung wie ESP oder ABS keine Spuren auf der Fahrbahn entstehen können.

Im Falle einer Vollbremsung auf geteiltem Untergrund (Asphalt links, Rasen rechts) sind deutliche Bremsspuren auf der rechten Rasenseite ersichtlich (siehe **Abb. 11**).



Abb. 11: ABS-Reifenspuren auf geteiltem Untergrund (links Asphalt/rechts Rasen), Geschwindigkeit beim Versuch: 30 km/h

Auf unebenem Asphalt bzw. teilweise Rollsplitt ist bei einer Vollbremsung auf der linken Fahrzeugseite eine Spurzeichnung trotz ABS-Regelung durch Reifenabrieb aufgetreten (**Abb. 12**). Zur Verdeutlichung wurde in diesem Bereich eine Messlatte danebengelegt. Auf der rechten Fahrzeugseite entsteht eine Bremsspur aufgrund des losen Rollsplitts, welcher bei einer Bremsung zu hellen Schleifspuren auf dem dunklen Asphalt führt.



Abb. 12: ABS-Reifenspuren auf unebener Fahrbahn mit Rollsplitt, Geschwindigkeit beim Versuch: 70 km/h

Auch auf ebener Fahrbahn lässt sich trotz ABS-Regelung eine durchgängige Bremsspur aufgrund von Reifenabrieb erzeugen, wie **Abb. 13** zeigt.

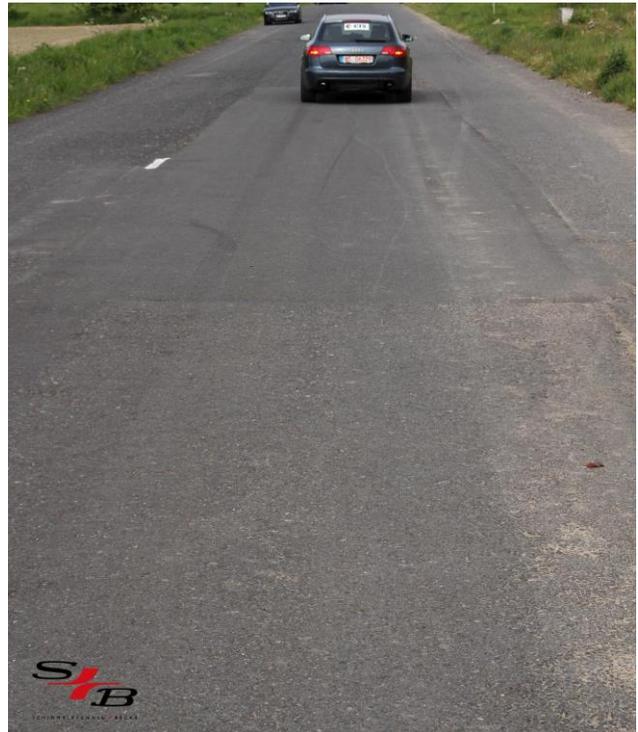


Abb. 13: Durchgängige ABS-Reifenspuren auf ebener Fahrbahn durch Reifenabrieb, Geschwindigkeit beim Versuch: 80 km/h

Bei den Kreisfahrten mit ESP wurden durch den starken Schräglaufwinkel der Räder ebenfalls Reifenspuren erzeugt (**Abb. 14**).



Abb. 14: Reifenspuren bei Kreisfahrten mit ESP, Geschwindigkeit beim Versuch: 30 km/h

Ausblick

Die verwendete Messtechnik wird erprobt, um bei Versuchsreihen moderne Fahrzeuge mit Fahrdynamikregelung in verschiedenen Situationen und auf unterschiedlichen Untergründen zu testen und deren Schleuderbewegung mit Hilfe einer Topkamera aufzuzeichnen.

Ferner wird der Gierratensensor während der Fahrt unabhängig vom Fahrzeug automatisiert bewegt, um die Reaktion der Fahrdynamikregelung auf gültige, aber falsche Messwerte zu analysieren. Auf diese Weise kann untersucht werden, inwiefern das Fahrzeug auf möglicherweise fehlerhafte Sensorsignale reagiert. Aktuelle Fälle deuten darauf hin, dass fehlerhafte und möglicherweise gefährliche Eingriffe durch das ESP möglich sein könnten.

Im Rahmen der Arbeiten zeigt sich bereits jetzt, dass auch bei modernen Fahrzeugen eine Spurzeichnung unter bestimmten Bedingungen zu beobachten ist. Ferner führt die Manipulation an den Sensoren zu Eingriffen der Fahrdynamikregelung, die jedoch speziellen Randbedingungen genügen müssen. Es sind vielfältige Sicherheitsmechanismen erkennbar, die einen ungewollten Eingriff des ESP weitgehend ausschließen sollen.

Durch die geringe Änderung der Raddrehzahlen sind die einzelnen Eingriffe nicht immer eindeutig zu erkennen. Daher wird für die Vorbereitung des Vortrags das ESP-Steuergerät umgebaut, so dass an den 12 vorhandenen Ventilen die einzelnen Ventilstellungen zu jedem Zeitpunkt erfasst werden können. Somit sind die direkten Eingriffe und die Zeitauflösung des Eingriffs des Gerätes an den einzelnen Rädern auswertbar. Da ESP-Eingriffe auch Fahrzeugkollisionen und insbesondere Auslaufbewegungen beeinflussen können, sind diese Daten ggfs. geeignet, zur Verbesserung der entsprechenden Simulationsprogramme beizutragen.

Literatur

1. Holtkötter I.; Kortmann A., Wirksamkeit von Fahrdynamikregelungen wie ESP, VRR 8 (2014), S. 299-303.

Kontakt

Schimmelpfennig und Becke
Dr. rer. nat. Ingo Holtkötter
Münsterstraße 101
48155 Münster, Deutschland
e-mail: holtkoetter@ureko.de
Tel: +49 2506 820-0