

# **Masterlabor Mechatronik I**

**Aufnahme von Reibungskoeffizient-Schlupf-Kurven  
zur Simulation einer ABS-Bremmung**

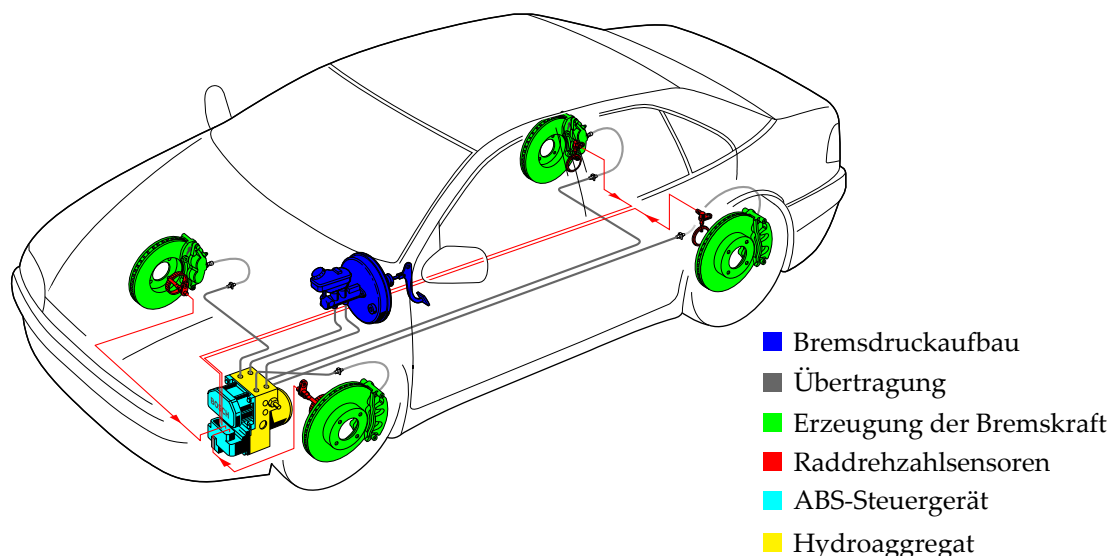


## Einleitung

Das ANTI-BLOCKIER-SYSTEM (ABS) als erstes Fahrerassistenzsystem ist heute ein unverzichtbarer Standard radabgebremster Verkehrsmittel und dient dem Ziel, sowohl die Lenkbarkeit des Fahrzeugs während einer Gefahrenbremsung weitestgehend zu erhalten als auch den Bremsweg durch optimale Ausnutzung der Kontaktkräfte zwischen Reifen und Fahrbahn zu verkürzen. In dieser Dokumentation zum MASTERLABOR MECHATRONIK I wird zunächst ein Überblick über die Funktionsweise des ABS gegeben, um darauf aufbauend einen kurzen Umriss über die Wirkprinzipien der Regelung und die Funktionsweise des MATLAB-SIMULINK-Modells zum ABS-Regelkreis zu vermitteln. Anschließend folgt die Beschreibung des PORTABLE FRICTION TESTER (PFT) zur mobilen Aufnahme von Reibungskoeffizient-Schlupf-Kurven, woraus die Zielsetzung dieses Labors resultiert, eine ABS-Bremsung anhand der ermittelten Reibcharakteristiken mithilfe des ABS-Modells zu simulieren.

## Anti-Blockier-System

Eine Bremsung basiert auf dem Grundprinzip, die kinetische Energie des Fahrzeuges durch Umwandlung in Reibungsenergie abzubauen. **Bild 1** zeigt das konventionelle Bremssystem eines PKW sowie dessen Erweiterung zur Bereitstellung der ABS-Funktionalität. Zunächst werden die Komponenten der konventionellen Betriebsbremsanlage beschrieben. Der Bremsdruckaufbau (dunkelblau) beginnt mit der Bremspedalbetätigung, bei der die Fußkraft an die Kolbenstange des Bremskraftverstärkers weitergegeben wird. Die Übertragung (grau) geschieht über Bremsschläuche und -leitungen, welche die unter Druck stehende Bremsflüssigkeit zu den einzelnen Radbremszylindern trans-



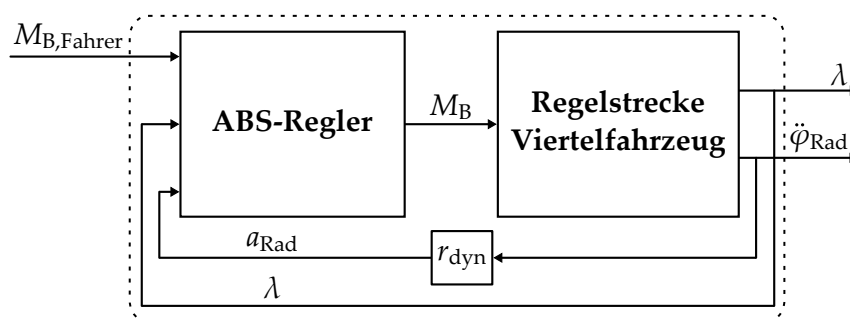
**Bild 1:** Betriebsbremsanlage eines PKW mit ABS-Komponenten, modifiziert nach [3]

portieren. Kernelement zur Erzeugung der Bremskraft (grün) ist der Radbremszylinder, welcher den aus der Verteilung und Übertragung resultierenden Bremsflüssigkeitsdruck in eine Kolbenbewegung transformiert. Aus dieser Kolbenbewegung folgt wiederum eine mechanische Kraft auf das Bremsbelagspaar, aus der sich beim Kontakt mit dem am Rad befindlichen Reibpartner (Trommel oder Scheibe) eine Reibkraft und somit ein Bremsmoment zur Verzögerung der Radumdrehung ergibt.

Das ABS erweitert die konventionelle Bremse um drei Systemkomponenten zur Erhaltung der Lenkbarkeit und Verkürzung des Bremsweges bei einer Vollbremsung. Jedes Rad trägt einen Impulsgeber, welcher der Radgeschwindigkeit folgt und dessen zwei typabhängigen Merkmalsänderungen durch einen an der Radaufhängung befestigten Drehzahlsensor (rot) detektiert werden. Mit der Kenntnis der Anzahl der Merkmalsänderungen pro Umdrehung wird ein Rückschluss auf die richtungsunabhängige Drehzahl und somit die Weitergabe dieser als elektrisches Signal an das ABS-Steuergerät ermöglicht. Das ABS-Steuergerät (hellblau) überwacht zum einen die Verzögerung einzelner Räder, um deren Blockierneigung zu erfassen und berücksichtigt zum anderen den Schlupf, indem es eine Fahrzeugreferenzgeschwindigkeit aus dem selektiven Mittelwert der Radrehzahlen aller Räder bildet und diesen mit der aktuellen Geschwindigkeit einzelner Räder vergleicht. Eine Regelung nach festen mathematischen Algorithmen erzeugt daraus Signale für das Hydroaggregat mit integrierten Magnetventilen (gelb), welches die hydraulische Verbindung zwischen Hauptzylinder und Radzylinder darstellt. Es setzt die Befehle des Steuergerätes um und verändert über die elektromagnetischen Ventile den Bremsdruck an jedem einzelnen Radzylinder.

## ABS-Regelung

Die ABS-Regelung stellt die mathematischen Zusammenhänge zwischen den physikalischen Vorgängen in der Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn sowie der Programmierung des Steuergerätes zur Verfügung, indem sie die sensorseitigen Informationen verarbeitet und daraus aktorseitige Befehle errechnet. Um diese Regelung in den Fokus zu stellen, werden die relevanten Größen zunächst anhand des ABS-Regelkreises in **Bild 2** zugeordnet und erläutert. Grundsätzlich besteht ein geschlossener Regelkreis

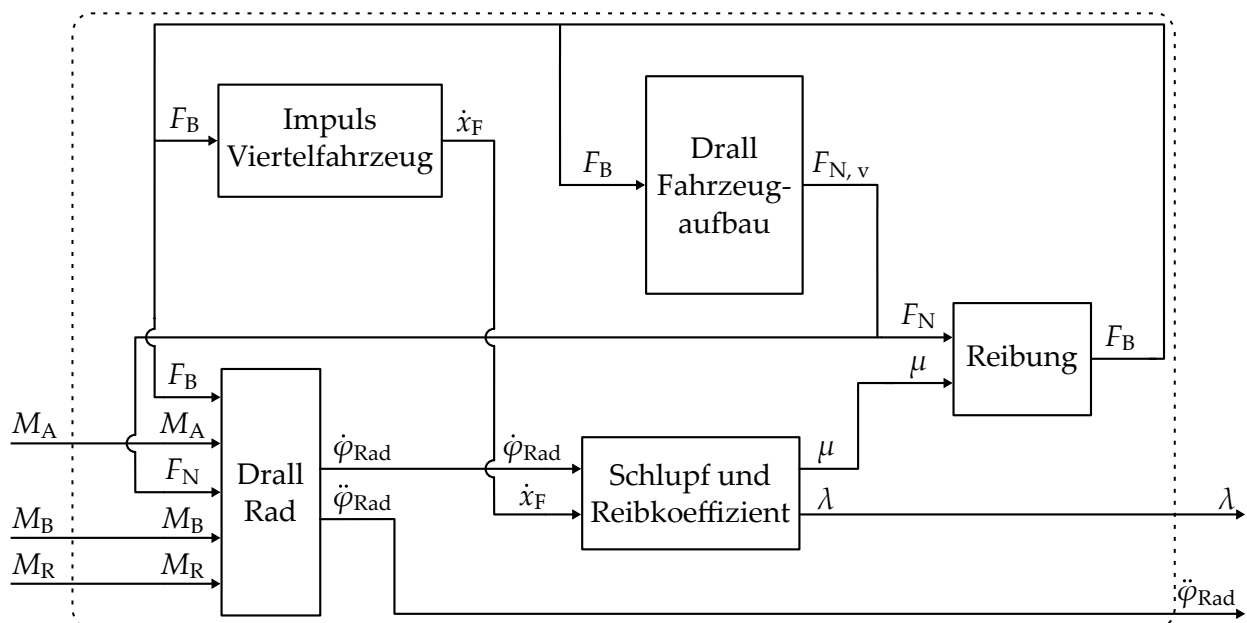


**Bild 2:** ABS-Regelkreis mit Eingangs- und Ausgangsgrößen von Regler und Strecke

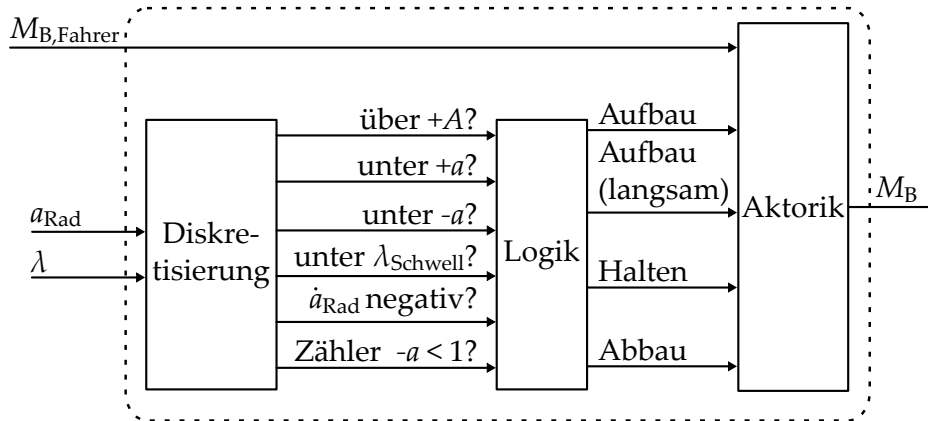
mit Rückkopplung aus den beiden Teilsystemen Regler und Regelstrecke, wobei die Zustandsinformation der Strecke kontinuierlich an den Regler zurückgeführt wird. Dabei bildet die Regelstrecke ein abrollendes Vorderrad im Fahrbahnkontakt sowie das dynamische Verhalten des Fahrzeugaufbaus ab. Ausgänge der Regelstrecke sind die Regelgrößen Radschlupf  $\lambda$  und Radumfangsbeschleunigung  $a_{\text{Rad}}$ . Der Regler entscheidet anhand dieser Größen und dem Fahrerbremsmoment  $M_{\text{B,Fahrer}}$ , ob das eingehende Moment unmodifiziert oder im Druck gesenkt, gehalten oder erhöht als Bremsmoment  $M_{\text{B}}$  an die Strecke weitergegeben wird. Die Relevanz zweier Regelgrößen ergibt sich aus dem unzureichenden situationsbedingten und schnellen Erkennen des Blockierens bei der ausschließlichen Überwachung der einzelnen Größen, detaillierter in [1, 2, 3] beschrieben.

## Modell des ABS-Regelkreises in MATLAB/SIMULINK

Betrachtet man die Regelstrecke, welche zur Abbildung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften eines Viertelfahrzeugs dient, so besteht diese aus den in **Bild 3** visualisierten, nachfolgend beschriebenen Subsystemen. Die Bremskraft  $F_{\text{B}}$  zwischen Rad und Straße wird als COULOMB'sche Reibung aus der Normalkraft  $F_{\text{N}}$  und dem radschlupfabhängigen Reibkoeffizienten  $\mu$  modelliert. Radlastschwankungen aufgrund der Bremskraft werden im Drall des Fahrzeugaufbaus abgebildet und resultieren in Änderungen der Radnormalkraft. Der Drall des Rades nimmt die Information zur Bremskraft im Latsch und zur Normalkraft als Ursache des Rollwiderstandes, sowie die wirkenden Momente aus Antrieb  $M_{\text{A}}$ , Bremsung  $M_{\text{B}}$  und Reibung  $M_{\text{R}}$  auf und liefert Informationen über die Radgeschwindigkeit  $\dot{\varphi}_{\text{Rad}}$  sowie die -beschleunigung  $\ddot{\varphi}_{\text{Rad}}$ . Zur Berechnung des dimensionslosen Schlupfes  $\lambda$ , welcher definiert ist als die auf die Fahrzeuggeschwin-



**Bild 3:** Signalflussplan der Regelstrecke mit deren Subsystemen



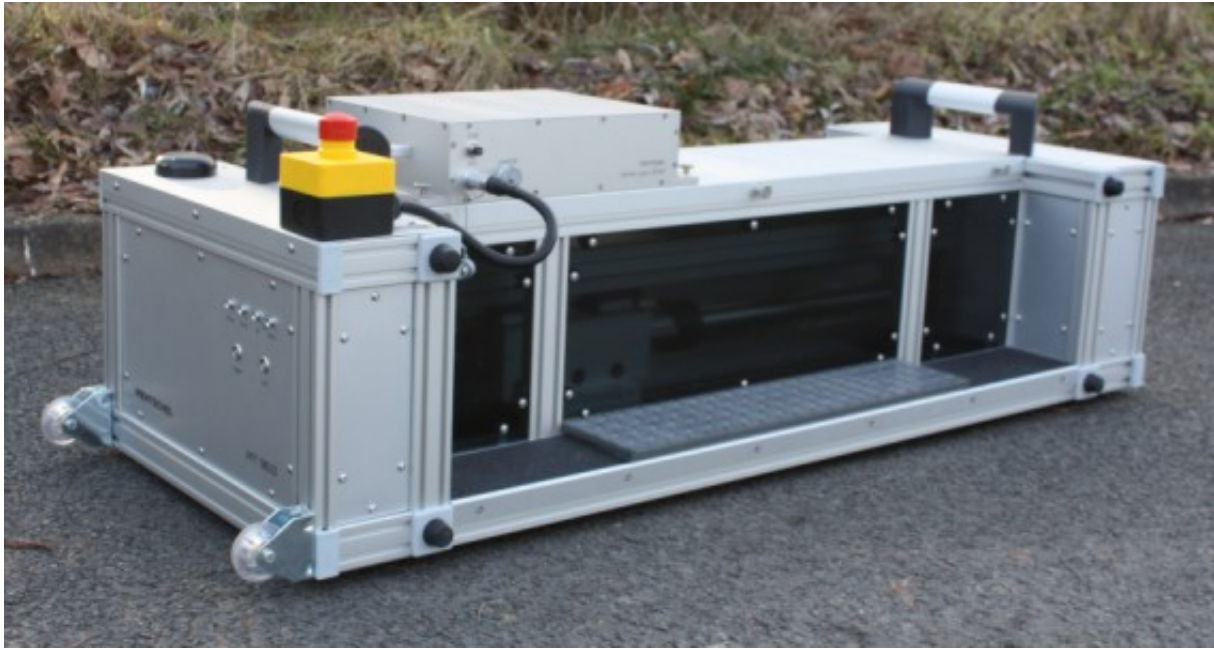
**Bild 4:** Signalflussplan des Reglers mit dessen Subsystemen

digkeit  $\dot{x}_F$  bezogene Differenz zwischen Fahrzeug- und Radgeschwindigkeit, kann die noch fehlende Fahrzeuggeschwindigkeit aus dem Impuls des Viertelfahrzeugs gewonnen werden. Schließlich wird der Reibkoeffizient anhand von tabellierten Messdaten aus dem aktuellen Schlupf ermittelt.

Die Verbindung zum Regler wird über die Regelgrößen Radschlupf und Radumfangsbeschleunigung gebildet, wobei die Radumfangsbeschleunigung nach **Bild 2** aus dem Produkt der Radbeschleunigung und des dynamischen Reifenradius besteht. Das erste Subsystem des Reglers, erkennbar in **Bild 4**, ist die Diskretisierung, in welcher binäre Informationen über die Über- oder Unterschreitung der Beschleunigungsschwellen  $+A$ ,  $+a$ , und  $-a$  sowie der Schlupfschwelle  $\lambda_{\text{Schwell}}$  generiert werden. Zudem wird die Zu- oder Abnahme der Radbeschleunigung detektiert und die Häufigkeit des Übertritts der Beschleunigungsschwelle  $-a$  gezählt. Aus diesen Informationen kann der aktuelle Zustand des gebremsten Rades in der Logik abgeleitet werden. Der Kern der Logik besteht aus einer Lookup-Tabelle, welche alle  $2^6 = 64$  möglichen Zustände beinhaltet und jedem Zustand nach vorheriger Definition eine von vier möglichen Aktionen zur Druckmodifikation zuweist. Die Information zur Art der Druckmodifikation wird an die Aktorik übermittelt, in welcher der Druck und somit auch das dazu proportionale Bremsmoment aufrechterhalten, gesenkt sowie langsam und schnell aufgebaut werden kann. Allerdings ist es nicht möglich, dass der modifizierte Druck den vom Fahrer durch den Tritt auf das Bremspedal vorgegebenen Bremsdruck überschreitet.

## Portable Friction Tester

Basierend auf am IDS vorhandenen Labortestmethoden zur Reibung von Reifenprofilklötzen auf verschiedenen Fahrbahnuntergründen wurde ein mobiler Versuchsstand entwickelt, der Portable Friction Tester (PFT). Der Hauptvorteil dieses Systems ist, dass es in der Regel schwierig ist, jede interessante Straßenoberfläche ins Labor zu bekommen. Entwicklungsvorgabe war, dass das System ohne Spannungsversorgung funktioniert und von zwei Personen positioniert und bedient werden kann. Weiterhin sollte es von den



**Bild 5:** Portable Friction Tester (PFT)

Dimensionen her in den Kofferraum eines mittelgroßen PKWs passen.

Die Messungen zwischen Profilklotzprobe und Fahrbahnoberfläche erfolgen quasistationär: Die Normallast bleibt während einer Messung konstant und die Gleitgeschwindigkeit wird ebenfalls konstant geregelt; Beschleunigungs- und Verzögerungsphase des Lineardirektantriebs werden nicht in die Auswertung der Messung einbezogen. Eine Variation der Geschwindigkeit kann softwareseitig eingestellt werden, auch eine Abfolge von Messungen mit verschiedenen Geschwindigkeiten und Wiederholungsmessungen sind programmierbar. Die Normallast wird passiv über Gewichte aufgebracht, weswegen eine Lastvariation nur hardwareseitig erfolgen kann.

In der Software erfolgt eine automatisierte Ermittlung des Haftreibungswerts, der beim Beschleunigen und Losbrechen der Probe auf der Straßenoberfläche auftritt. Im Bereich konstanter Geschwindigkeit wird über eine zeitliche Mittelung der Gleitreibungswert berechnet, der sich bei dieser Geschwindigkeit einstellt. Um eine  $\mu$ -Schlupf-Kurve der Gummiprobe auf einer bestimmten Fahrbahnoberfläche bestimmen zu können, muss eine Reibkennlinie gemessen werden, die sich aus dem Haftreibungswert und quasistationären Gleitreibungswerten bei verschiedenen Geschwindigkeiten zusammensetzt. Eine Lastvariation ist nicht erforderlich, da bei pneumatischen Luftreifen der Reifenaufstandsdruck in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn immer genau dem Reifenfülldruck entspricht (eine Lastverlagerung führt lediglich zu einer Größenänderung der Kontaktfläche, aber nicht zu einer lokalen Laständerung).

Die verwendeten Gummiprüfproben sind z.B. aus Reifenlaufstreifen oder Prüfenplatten ausgeschnitten und auf das Prüfenhalterblech aufgeklebt. Einige Reifenhersteller benutzen direkt aufvulkanisierte Klotzproben, zum Teil auch mit Profil oder Spikes.

## Literaturverzeichnis

- [1] ISERMANN, R. (Hrsg.): *Fahrdynamik-Regelung - Modellbildung, Fahrerassistenzsystem, Mechatronik*. 1. Auflage. Wiesbaden : Vieweg, 2006, S. 137–168. – ISBN 3–8348–0109–7
- [2] REICHEL, H.-R. : *Elektronische Bremssysteme - Vom ABS zum Brake-by-Wire*. 1. Auflage. Renningen-Malmsheim : expert, 2001. – ISBN 3–8169–2010–1
- [3] REIF, K. : *Bremsen und Bremsregelsysteme*. 1. Auflage. Wiesbaden : Vieweg, Teubner, 2010. – ISBN 3–8348–1311–7