

# Entwicklung einer Antriebsschlupfregelung mittels Motoreingriff an einem ferngesteuerten Allrad-Modellfahrzeug

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Jennewein, Dipl.-Ing. Alexander Russ, B.Sc. Christoph Herrmann

In dem Forschungsprojekt wird die Entwicklung einer Antriebsschlupfregelung mittels Motoreingriff an einem ferngesteuerten Allrad-Modellfahrzeug beschrieben. Zur Realisierung dieses Vorhabens wird mit Raddrehzahlsensoren, einem Arduino-Mikrocontroller und einer inertialen Messeinheit (IMU) kostengünstige Technik verwendet. Zunächst wird das Vorgehen beschrieben, wie das Motorsignal manipuliert werden kann, um die Motoreingriffe zu ermöglichen. Für die Schätzung der Referenzgeschwindigkeit des Fahrzeuges wird ein Algorithmus vorgestellt, welcher die verfügbaren Messdaten kombiniert. Der mit der Referenzgeschwindigkeit geschätzte maximale Reifenschlupf des Fahrzeuges dient als Regelgröße der Traktionskontrolle. Der PID-Regler reduziert bei Überschreiten einer festgelegten Schwelle die vom Fahrer angeforderte Fahrhebelstellung, womit der Antriebsschlupf beim Beschleunigen geregelt werden kann.

## Eingriff in die Motorsteuerung

Damit der Eingriff in die Motorsteuerung ermöglicht werden kann, muss die bisherige Methode abgeändert werden. Das Signal der Fernsteuerung als pulswidenmoduliertes (PWM) Rechtecksignal wurde bisher direkt an die Motorsteuerung weitergegeben, indem die steigenden und fallenden Flanken des Rechtecksignals detektiert werden und dabei der entsprechend vorliegende Status (High/Low) auf den Ausgang übertragen wird. Die Pulswidenmodulation ist ein digitales Verfahren, bei welchem eine Größe (hier: Spannung) bei konstanter Frequenz zwischen zwei Werten wechselt. Durch Variation des Tastgrades, auch Pulsweite genannt, kann somit ein übertragbares digitales Signal moduliert werden, welches durch Demodulation in ein Analogsignal umgewandelt und am Motor umgesetzt werden kann. Der erwähnte Tastgrad beschreibt das Verhältnis zwischen der Impulsdauer  $\tau$  und der Periodendauer  $T$ :

$$\text{Tastgrad} = \frac{\text{Impulsdauer } \tau}{\text{Periodendauer } T}$$

Um das Signal zu manipulieren, muss dieses analysiert werden. Abbildung 1 zeigt das sich ergebende Signal, wenn sich der Fahrhebel in der Neutralstellung befindet (durchgezogene Linie). Die gestrichelte Linie zeigt die Grenze der maximalen Fahrhebelstellung an. Unterhalb der Neutralstellung wird das Signal dazu genutzt, die Bremsenservos anzusteuern, oberhalb dieser Grenze wird die Antriebseinheit angesteuert.

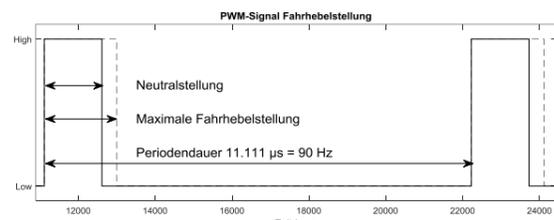


Abbildung 1. Ausschnitt aus pulswidenmoduliertem (PWM) Signal der Fahrhebelstellung mit Periodendauer und Impulsdauer

Über die Funktion `analogWrite(pin, value)` ist der Arduino Due in der Lage, an bestimmten Ausgängen PWM-Signale zu senden. Dabei ergeben sich jedoch die folgenden zwei Probleme: Zum einen bietet der Mikrocontroller keine Funktion an, die Frequenz des Ausganges zu ändern (Standardfrequenz 1000 Hz), zum anderen liegt die Standard-Auflösung für den Befehl bei 8 bit  $\rightarrow 2^8 = 256$ , woraus sich ein möglicher Wertebereich von 0 bis 255 ergibt. Das Problem, welches aus dem limitierten Wertebereich resultiert, ist in Tabelle 1 visualisiert. Durch die Auflösung von 8 bit ergeben sich im nutzbaren Bereich von 13,5 % bis 17 % 10 mögliche Positionen. Es ergeben sich allerdings 1920 (Pulsweite Maximalstellung) – 1505 (Pulsweite Neutralstellung) + 1 = 416 mögliche Werte für die Fahrhebelstellung, die detektiert werden können. Damit zeigt sich, dass die 8 bit-Auflösung für das zu generierende PWM-Signal zu gering ist, da es deutlich weniger anzusteuern Positionen als detektierbare Positionen gibt.

Zur Lösung der genannten Probleme werden die Eigenschaften in der Hardwarekonfiguration des Mikrocontrollers verändert, sodass die entsprechenden Ausgänge ein anderes Verhalten zeigen. Damit kann die Frequenz für PWM-Signale, als auch die Auflösung, auf anforderungsgerechte 16 bit, verändert werden, sodass nun die Möglichkeit besteht, mit dem

`analogWrite`-Befehl die vom Fahrer gewünschte Fahrhebelstellung zu überschreiben und damit in die Motorsteuerung einzugreifen.

Tabelle 1. Auflösung des Signales bei 8 bit und bei 16 bit

	8 bit → 256	16 bit → 65536
Wert bei 13,5 % Tastgrad (Neutralstellung)	34	8847
Wert bei 17 % Tastgrad (Maximalstellung)	43	11141
Anzahl möglicher Positionen	10	2295
Anzahl möglicher Positionen / Pulsweitenbereich (416)	0,02	5,5

## Regelkreis

Die Aufgabe der Traktionskontrolle soll es sein, das vom Fahrer geforderte Antriebsmoment, in Form einer gewählten Fahrhebelstellung  $\theta_{\text{Fahrer}}$ , bei Überschreiten einer festgelegten Schlupfgrenze  $\kappa_{\text{Soll}}$  zu reduzieren (Abbildung 2). Hierzu wird zunächst der Fahrerwunsch an den Motor und damit das Fahrzeug weitergeleitet ( $\theta_{\text{Korrigiert}} = \theta_{\text{Fahrer}}$ ). Das Verhalten des Fahrzeuges auf diese Eingabe kann mittels der vorhandenen Sensorik detektiert werden. Hieraus kann die Fahrzeuggeschwindigkeit  $\hat{v}$  geschätzt sowie die Radumfangsgeschwindigkeit aller vier Räder  $v_{ij}$  berechnet werden. Die relative Abweichung zwischen Radumfangsgeschwindigkeit (rotatorisch) und Fahrzeuggeschwindigkeit (translatorisch), auch Schlupf  $\hat{\kappa}$  genannt, kann aufgrund dieser Informationen geschätzt werden:

$$\hat{\kappa}_{\text{Antrieb},ij} = \frac{v_{ij} - \hat{v}_{\text{Ref}}}{v_{ij}}$$

mit  $i = V$  (vorne),  $H$  (hinten) und  $j = L$  (links),  $R$  (rechts)

Die Differenz aus maximalem Schlupf  $\hat{\kappa}_{\text{max}}$  und einer festgelegten Schlupfgrenze wird als Regelabweichung an den Regler weitergeleitet. Dieser liefert, sofern  $\hat{\kappa}_{\text{max}} > \kappa_{\text{Soll}}$ , einen Korrekturwert  $\theta_{\text{Korrektur}}$ , welcher von  $\theta_{\text{Fahrer}}$  subtrahiert wird und somit ein reduziertes  $\theta_{\text{Korrigiert}}$  ergibt.

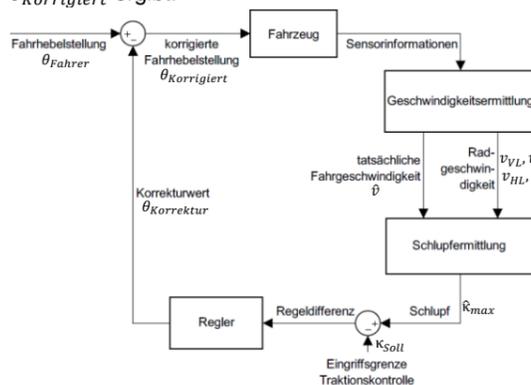


Abbildung 2. Regelkreisentwurf der Traktionskontrolle

## Geschwindigkeitsschätzung

Aufgabe der Geschwindigkeitsermittlung ist es, die Radumfangsgeschwindigkeiten sowie die Referenzgeschwindigkeit des Fahrzeuges zu bestimmen. Die Radumfangsgeschwindigkeit

$$v_{ij} = 2 * \pi * n_{ij} * r_{ij}$$

ergibt sich aus der Raddrehzahl  $n_{ij}$  und dem Reifenradius  $r$ . Dieser wird im Rahmen der Arbeit als statisch betrachtet.

Werden die Radumfangsgeschwindigkeiten in den Fahrzeugschwerpunkt transformiert, kann aus diesen ebenfalls eine Referenzgeschwindigkeit  $\hat{v}^{\text{Rad}}$  bestimmt werden. Dabei kommt ein Algorithmus zum Einsatz, der beim Antreiben die niedrigste Umfangsgeschwindigkeit, und beim Bremsen die höchste Umfangsgeschwindigkeit, als Referenz setzt (High-/Low-Select-Methode). Allerdings liefert die Methode dennoch fehlerhafte Resultate, sobald alle vier Räder Schlupf besitzen (Abbildung 3, oben, rot, ab  $t = 4$  s).

So wie sich eine ausschließliche Nutzung der Raddrehzahlen ausschließt, ist dies bei der Integration der gemessenen Beschleunigung  $\hat{v}^{\text{IMU}}$  allerdings ebenfalls nicht möglich. Systematische Fehler (z.B. Offset), welche teilweise korrigierbar sind, und zufällige Fehler (z.B. Rauschen), nicht korrigierbar, summieren sich über die Zeit auf, sodass die Abweichung zur tatsächlichen Geschwindigkeit immer größer wird (Abbildung 3, oben, blau). Daher ist die Methode nur für

kurze Zeitperioden zulässig, in denen die Abweichung noch in einem akzeptablen Bereich liegt.

Eine Lösung liefert ein kombinierter Ansatz. Auch hier wird die Beschleunigung integriert,  $\hat{v}^{\text{IMU}}$ , allerdings wird als Integrationsstartwert die zuletzt festgelegte Referenzgeschwindigkeit gewählt. Solange nun das relative Verhältnis zwischen  $\hat{v}^{\text{IMU}}$  und  $\hat{v}^{\text{Rad}}$  unterhalb eines Grenzwertes liegt, wird  $\hat{v}^{\text{Rad}}$  als Referenz genutzt. Oberhalb dieser Grenze wird  $\hat{v}^{\text{IMU}}$  genutzt (siehe Abbildung 3, oben, schwarz).

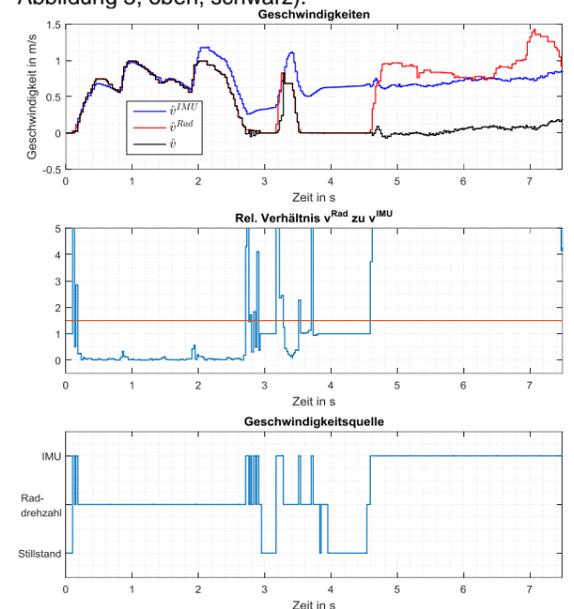


Abbildung 3: Messschrieb einer Testfahrt. Oben: Integrierte Beschleunigung, Geschwindigkeit aus Raddrehzahlsensoren und berechnete Referenzgeschwindigkeit. Mitte: Relatives Verhältnis der Geschwindigkeit aus den Raddrehzahlsensoren und der integrierten Beschleunigung. Unten: Wahl der Geschwindigkeitsquelle

## Regler

Als Regler wird ein PID-Regler gewählt, um eine schnelle Regelung zu erhalten. Bei einer negativen Regeldifferenz wird die Regelgröße konstant minimiert. Wie ein typischer Verlauf der Regelgröße bei dem Vorliegen von Schlupf aussehen kann, ist in Abbildung 4 zu sehen. Beim Beschleunigen tritt zunächst ein sehr großer Radschlupf von nahezu 100 % auf (mittleres Diagramm). Der Regler reagiert auf dieses Ereignis und steigert seine Ausgangsgröße auf ungefähr 70 %. Der Schlupf sinkt in Folge dessen und erreicht einen Wert unterhalb der Eingriffsgrenze. Die Regelgröße wird nun schrittweise reduziert, bis sie den Minimalwert von 0 % erreicht. Währenddessen steigt die Geschwindigkeit kontinuierlich an, ohne dass dabei der Schlupf erneut ansteigt.

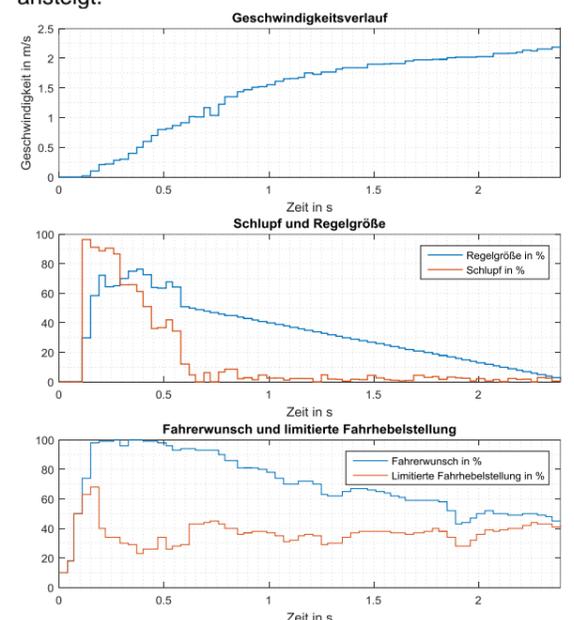


Abbildung 4. Anfahrmanöver mit Schlupf. Oben: Geschwindigkeitsverlauf. Mitte: Regelgröße und Schlupf. Unten: Fahrerwunsch und tatsächliche Fahrhebelstellung

Das untere Diagramm in Abbildung 4 zeigt, dass während des Beschleunigungsvorganges vom Fahrer eine sehr große Fahrhebelstellung übermittelt wurde. Wird diese beim Auftreten des Schlupfes nicht geregelt, kann der Schlupf nicht reduziert werden und das Fahrzeug neigt zu Instabilität.