

AEG



DATENVERARBEITUNG

Analogrechner und Hybride Systeme

Armin Czinczel, Peter Maier

Echtzeitsimulation eines Reglers für blockierungsfreies Bremsen auf dem Hybriden Präzisionsanalogrechner RA 770

Armin Czinczel, Peter Maier *

Echtzeitsimulation eines Reglers für blockierungsfreies
Bremsen auf dem Hybriden Präzisionsanalogrechner RA 770

2.	Funktionsprinzip des Bremsreglers	2
3.	Simulation des Bremsreglers	3
3.1.	Struktur der Simulation	4
3.2.	Leitstelle des Regelkreises	4
3.3.	Simulierte Teil des Regelkreises	6
4.	Ablauf der Echtzeitsimulation	7
	Literatur	10

* Herr Armin Czinczel ist Mitarbeiter der Fa. TELDIX,
Heidelberg

Herr Peter Maier ist Mitarbeiter der Fa.
AEG-TELEFUNKEN, Konstanz

INHALT

	Seite
1. Einleitung	1
2. Funktionsprinzip des Bremsreglers	2
3. Simulation des Bremsreglers	3
3.1. Struktur der Simulation	4
3.2. Echtteile des Regelkreises	4
3.3. Simulierte Teile des Regelkreises	6
4. Ablauf der Echtzeitsimulation	7
Literatur	12

Wird dieses Blockieren nicht verhindert, so treten drei gefährliche Folgen auf:

- Der Bremsweg wird länger.

- Das Fahrzeug läßt sich nicht mehr lenken.

- Das Fahrzeug kann schleudern.

Der Einbau des Elektronischen Bremsreglers bewirkt hier folgende wesentlichen Verbesserungen:

Der Bremsweg wird auf guter trockener Fahrbahn um mindestens 10% auf glatter, nasser Fahrbahn um bis zu 30% kürzer.

Das Fahrzeug ist während des Bremsens voll lenkbar, man kann z.B. einem Hindernis ausweichen.

Das Fahrzeug ist während des Bremsens völlig richtungstabil, es kann nicht schleudern.

Auf dem Gebiet des Automobilbaus sind seit einigen Jahren verstärkte Bemühungen um eine größere Fahrsicherheit zu beobachten. Dies wurde nicht zuletzt durch die ständig steigende Unfallziffer bei zunehmender Verkehrsdichte notwendig.

Bei dem Trend zu immer stärkeren Motoren mit größeren Beschleunigungen und immer höheren Spitzengeschwindigkeiten kommt den Bremsen als den aktiven Sicherheitseinrichtungen eines Kraftfahrzeugs zwangsläufig eine erhöhte Bedeutung zu. Fortschritte in der Verbesserung der Bremswirkung wurden bereits durch Erhöhung der Griffigkeit der Straßenoberflächen sowie durch eine Verbesserung der Reifenprofile und die Einführung der Scheibenbremsen erzielt.

Einen weiteren bedeutenden Beitrag liefert nun der kürzlich der Öffentlichkeit vorgestellte Elektronische Bremsregler, der von der Firma Teldix in Zusammenarbeit mit der Firma Daimler-Benz entwickelt wurde. Er wird unter der Bezeichnung Anti-Bloc-System in Mercedes-Fahrzeuge eingebaut. Dieser Bremsregler vermeidet das Blockieren der Räder bei zu starkem Bremsen.

Wird dieses Blockieren nicht verhindert, so treten drei gefährliche Folgen auf:

Der Bremsweg wird länger.

Das Fahrzeug läßt sich nicht mehr lenken.

Das Fahrzeug kann schleudern.

Der Einbau des Elektronischen Bremsreglers bewirkt hier folgende wesentlichen Verbesserungen:

Der Bremsweg wird auf guter trockener Fahrbahn um mindestens 10%, auf glatter, nasser Fahrbahn um bis zu 50% kürzer.

Das Fahrzeug ist während des Bremsens voll lenkbar; man kann z. B. einem Hindernis ausweichen.

Das Fahrzeug ist während des Bremsens völlig richtungsstabil, es kann nicht schleudern.

Der Bremsregler überwacht mit Hilfe von Sensoren (Meß-
 fühlern) das Drehzahlverhalten jedes einzelnen Rades. Sobald
 die Drehzahl bei zu starkem Bremsen plötzlich schnell abfällt,
 liefern die Sensoren elektrische Signale an die elektronische
 Steuereinheit. Diese enthält einen kleinen Elektronenrechner,
 der die Signale so verarbeitet, daß die Elektromagnet-Ventile
 in der Hydraulikeinheit optimal angesteuert werden. Dadurch
 wird der Bremsdruck für jedes einzelne Rad so bemessen,
 daß das Rad nicht blockiert, sondern ständig die größte physi-
 kalisch mögliche Bremskraft auf die Straße überträgt. Durch
 die genaue Überwachung jedes einzelnen Rades ist der Regler
 in der Lage, blitzschnell auf jede Veränderung der Straßen-
 oberfläche (z. B. bei Glatteis) zu reagieren und die Bremskraft
 optimal anzupassen. Man spricht deshalb von einer adaptiven
 Regelung.



Bild 1: Hybrider Präzisionsanalogrechner ASG 110 mit
 Digitalteil (Werkbild: ASG-TELEFUNKEN)

Bei der langjährigen Entwicklung des elektronischen Bremsreglers [1], [2] leisteten die hybriden Präzisionsanalogrechenanlagen von AEG-TELEFUNKEN [3], [4], [5], (Bild 1 zeigt den Hybriden Präzisionsanalogrechner RA 770) wertvolle Dienste, sowohl bei der Analyse der Zusammenhänge zwischen Bremsystem und Fahrzeugdynamik, als auch bei der anschließenden Synthese und der Optimierung des Antiblockier-Regelkreises [6]. Beim Entwurf und der Berechnung des elektronischen Bremsreglers erwies sich der Weg über die Simulation als notwendig und nützlich. Denn erstens weisen wesentliche Teile der Regelstrecke Nichtlinearitäten auf, die sich einer Linearisierung durch mathematische Näherungsverfahren entziehen (z. B. Berechnung des Bremsschlupfes aus Fahrzeug- und Radgeschwindigkeit). Zweitens kommt hierbei der besondere Vorzug des Analogrechners zum Tragen, daß über einfache Anpaßelemente Echteile des physikalischen Regelkreises mit in die Simulation einbezogen werden können, so daß deren physikalisches Verhalten vollständig und exakt in der Berechnung berücksichtigt ist. Und drittens lassen sich dadurch wesentliche Einschränkungen bezüglich Kosten (kostspielige Konstruktions- und Versuchsarbeiten) und Gefahren (Versuchsfahrten) erreichen.

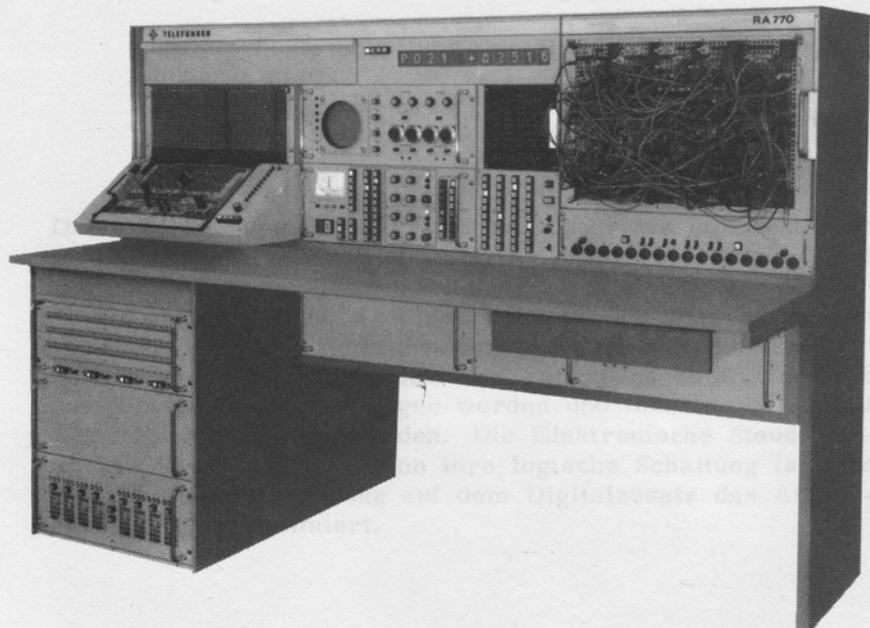


Bild 1: Hybrider Präzisionsanalogrechner RA 770 mit Digitalteil (Werkbild: AEG-TELEFUNKEN)

3.1. Struktur der Simulation

Die hier beschriebene Simulation stellt die letzte Phase der Optimierung des Elektronischen Bremsreglers für Personenkraftwagen dar (Stand vom Sommer 1970). Dabei werden nicht nur möglichst viele Echtteile der Regelstrecke, sondern auch die Echtteile des Elektronischen Bremsreglers zur Simulation herangezogen, deren Entwicklung schon damals abgeschlossen war.

Bild 2 zeigt schematisch das Zusammenwirken des Analogrechners mit den Echtteilen des Regelkreises. Zu den Echtteilen des Regelkreises gehören:

- a) ein komplettes, serienmäßiges 2-Kreis-Bremssystem,
- b) die Hydraulikeinheit des Elektronischen Bremsreglers,
- c) die Elektronische Steuereinheit des Elektronischen Bremsreglers sowie
- d) 4 Druckgeber und die Ladungsverstärker zum Messen der Bremsdrücke in den 4 Radbremszylindern (Anpaßelemente).

Die auf dem Analogrechner simulierten Teile des Regelkreises haben zum Teil analoge und zum Teil digitale Struktur. Zu den auf dem Analogprogrammierfeld (APF) nachgebildeten Teilen gehören:

- a) die Dynamik des Fahrzeugs,
- b) die Dynamik der mechanischen Systeme Bremse-Rad-Fahrbahn für die 4 Räder des Fahrzeugs und
- c) die Dynamik der 4 Sensoren.

Auf dem Digitalteil des Rechners dagegen wird

die logische Schaltung der Elektronischen Steuereinheit programmiert.

3.2. Echtteile des Regelkreises

Die Echtteile des Regelkreises umfassen das komplette, serienmäßige Bremssystem des Mercedes-Fahrzeugs sowie die Elektronische Steuereinheit und die Hydraulikeinheit des Elektronischen Bremsreglers. Das Fahrzeug ist mit dem kompletten Bremsregler, also auch den Sensoren, ausgerüstet. Diese können wegen des Stillstands des Fahrzeugs natürlich nicht zur Simulation herangezogen werden und müssen auf dem Analogrechner simuliert werden. Die Elektronische Steuereinheit ist leicht modifiziert, denn ihre logische Schaltung ist zum Zwecke der Optimierung auf dem Digitalzusatz des Analogrechners programmiert.

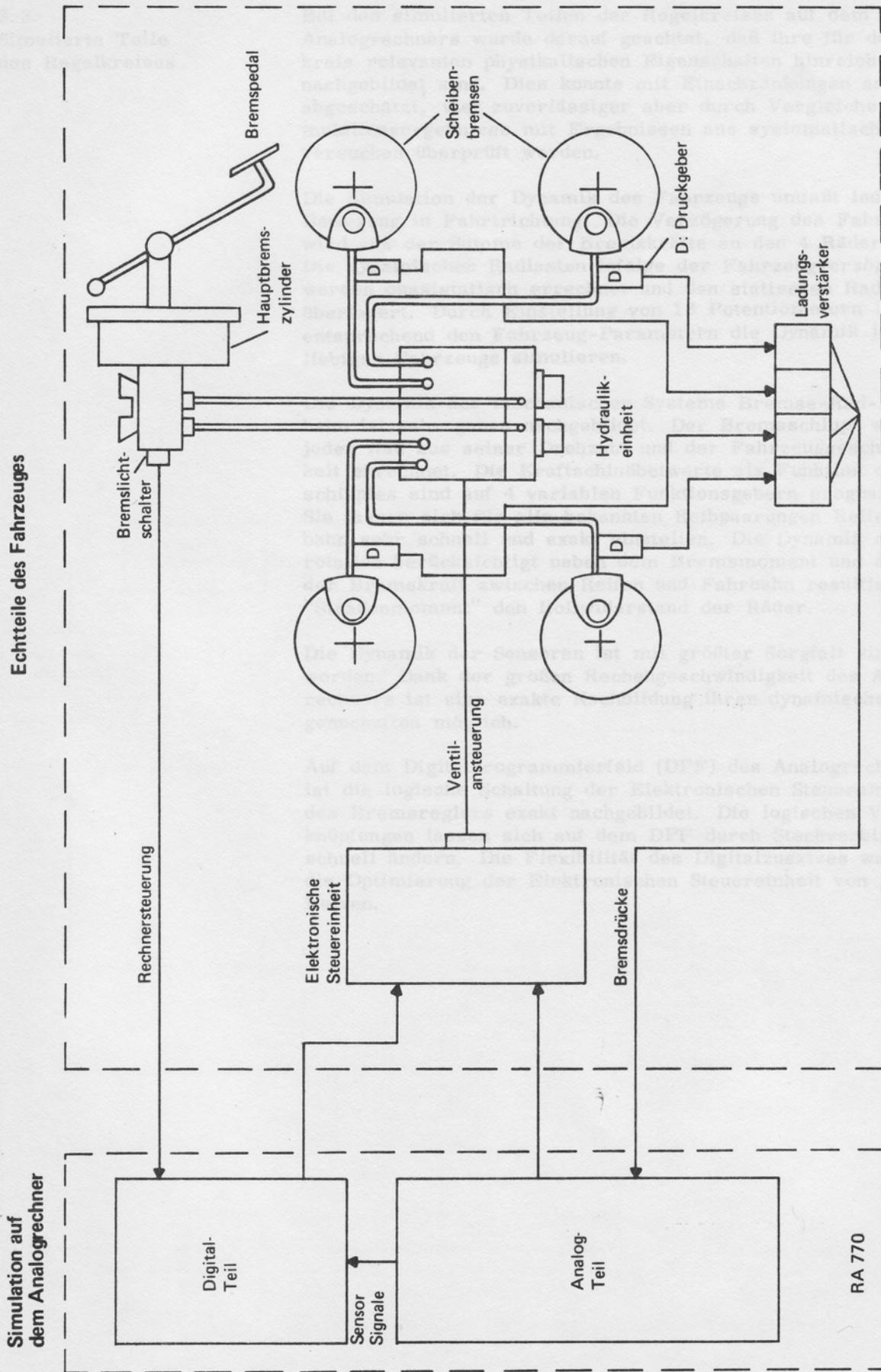


Bild 2: Schematische Darstellung des Antiblockier-Regelkreises aus Echtteilen und auf dem Analogrechner simulierten Teilen

3.3. Simulierte Teile des Regelkreises

Bei den simulierten Teilen des Regelkreises auf dem APF des Analogrechners wurde darauf geachtet, daß ihre für den Regelkreis relevanten physikalischen Eigenschaften hinreichend genau nachgebildet sind. Dies konnte mit Einschränkungen analytisch abgeschätzt, viel zuverlässiger aber durch Vergleiche der Simulationsergebnisse mit Ergebnissen aus systematischen Fahrversuchen überprüft werden.

Die Simulation der Dynamik des Fahrzeugs umfaßt lediglich die Bewegung in Fahrtrichtung. Die Verzögerung des Fahrzeugs wird aus der Summe der Bremskräfte an den 4 Rädern ermittelt. Die dynamischen Radlasten infolge der Fahrzeugverzögerung werden quasistatisch errechnet und den statischen Radlasten überlagert. Durch Einstellung von 18 Potentiometern läßt sich entsprechend den Fahrzeug-Parametern die Dynamik jedes beliebigen Fahrzeugs simulieren.

Die Dynamik der mechanischen Systeme Bremse-Rad-Fahrbahn ist sehr genau nachgebildet. Der Bremschlupf wird für jedes Rad aus seiner Drehzahl und der Fahrzeuggeschwindigkeit errechnet. Die Kraftschlußbeiwerte als Funktion des Bremschlupfes sind auf 4 variablen Funktionsgebern programmiert. Sie lassen sich für alle bekannten Reibpaarungen Reifen-Fahrbahn sehr schnell und exakt einstellen. Die Dynamik der Radrotation berücksichtigt neben dem Bremsmoment und dem aus der Bremskraft zwischen Reifen und Fahrbahn resultierenden "Straßenmoment" den Rollwiderstand der Räder.

Die Dynamik der Sensoren ist mit größter Sorgfalt simuliert worden. Dank der großen Rechengeschwindigkeit des Analogrechners ist eine exakte Nachbildung ihrer dynamischen Eigenschaften möglich.

Auf dem Digitalprogrammierfeld (DPF) des Analogrechners ist die logische Schaltung der Elektronischen Steuereinheit des Bremsreglers exakt nachgebildet. Die logischen Verknüpfungen lassen sich auf dem DPF durch Steckverbindungen schnell ändern. Die Flexibilität des Digitalzusatzes war für die Optimierung der Elektronischen Steuereinheit von großem Nutzen.

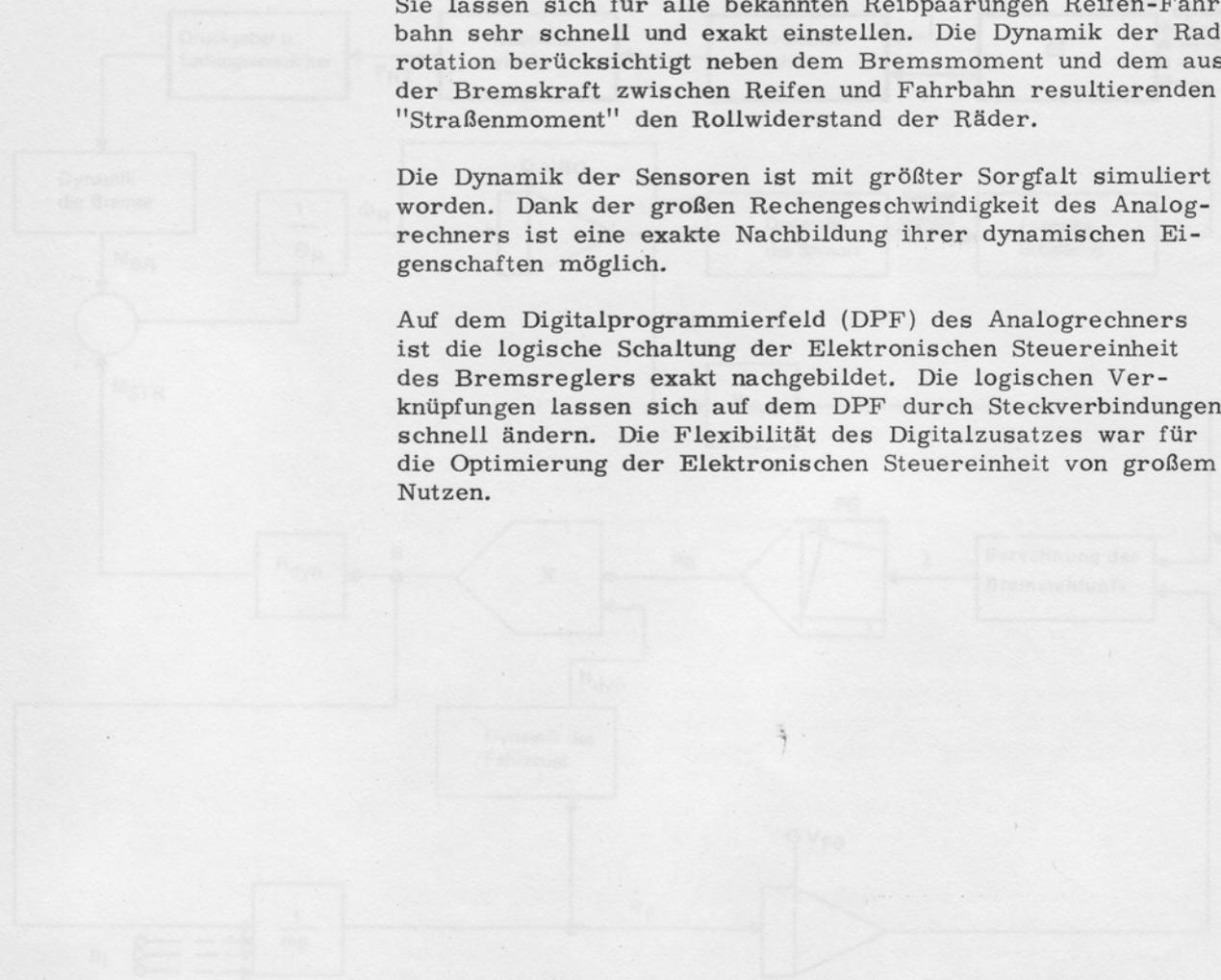


Bild 3: Blockschaltbild des Antiblockier-Regelkreises für ein Rad

Das folgende Blockschaltbild Bild 3 zeigt, aus Gründen der Übersichtlichkeit, die Simulation des Regelkreises für nur ein Rad. Die Kopplung mit den anderen Rädern ist durch gestrichelte Linien angedeutet. Die Echtteile des Regelkreises sind durch stärkere Umrandung hervorgehoben.

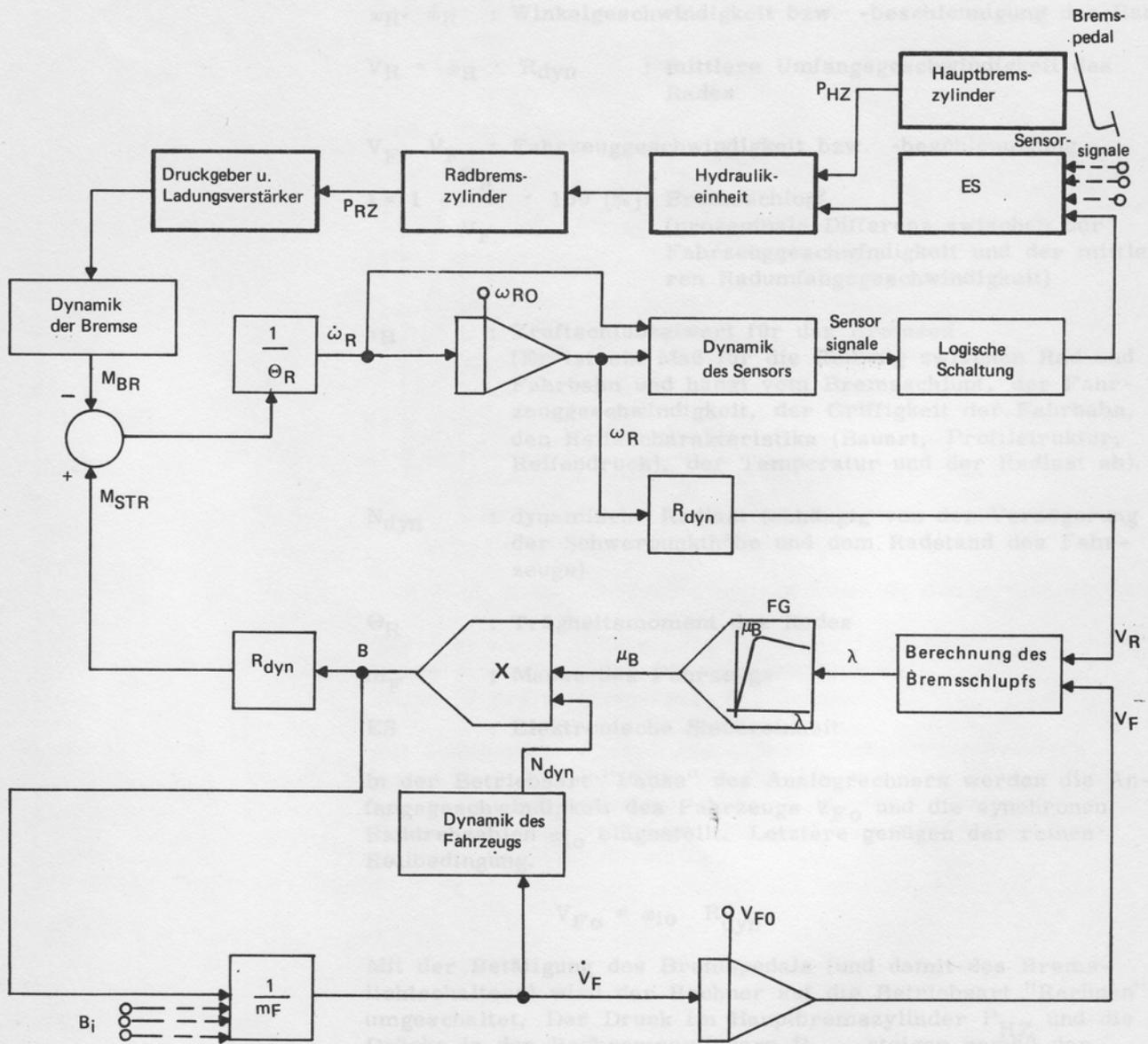


Bild 3: Blockschaltbild des Antiblockier-Regelkreises für ein Rad

Bezeichnungen:

P_{HZ} : Druck im Hauptbremszylinder

P_{RZ} : Druck im Radbremszylinder

M_{BR} : Bremsmoment

$M_{STR} = B \cdot R_{dyn}$: Straßenmoment

R_{dyn} : dynamischer Rollradius des Rades
(mittlerer Radius der Aufstandsfläche des Rades,
abhängig vom Reifenluftdruck, der dynamischen
Radlast und der Raddrehzahl)

$B = \mu_B \cdot N_{dyn}$: Bremskraft

$\omega_R, \dot{\omega}_R$: Winkelgeschwindigkeit bzw. -beschleunigung des Rades

$V_R = \omega_R \cdot R_{dyn}$: mittlere Umfangsgeschwindigkeit des
Rades

V_F, \dot{V}_F : Fahrzeuggeschwindigkeit bzw. -beschleunigung

$\lambda = 1 - \frac{V_R}{V_F} \cdot 100$ [%]: Bremsschlupf
(prozentuale Differenz zwischen der
Fahrzeuggeschwindigkeit und der mittlere-
nen Radumfangsgeschwindigkeit)

μ_B : Kraftschlußbeiwert für das Bremsen
(Er ist ein Maß für die Reibung zwischen Rad und
Fahrbahn und hängt vom Bremsschlupf, der Fahr-
zeuggeschwindigkeit, der Griffigkeit der Fahrbahn,
den Reifencharakteristika (Bauart, Profilstruktur,
Reifendruck), der Temperatur und der Radlast ab).

N_{dyn} : dynamische Radlast (abhängig von der Verzögerung
der Schwerpunkthöhe und dem Radstand des Fahr-
zeugs)

Θ_R : Trägheitsmoment des Rades

m_F : Masse des Fahrzeugs

ES : Elektronische Steuereinheit

In der Betriebsart "Pause" des Analogrechners werden die An-
fangsgeschwindigkeit des Fahrzeugs V_{F0} und die synchronen
Raddrehzahlen ω_{i0} eingestellt. Letztere genügen der reinen
Rollbedingung.

$$V_{F0} = \omega_{i0} R_{dyn}$$

Mit der Betätigung des Bremspedals (und damit des Brems-
lichtschalters) wird der Rechner auf die Betriebsart "Rechnen"
umgeschaltet. Der Druck im Hauptbremszylinder P_{HZ} und die
Drücke in den Radbremszylindern P_{RZi} steigen gemäß der
Betätigungskraft am Bremspedal an. Sie werden gemessen,
verstärkt und dem Rechner zugeführt, der die Bremsmomente
errechnet. Die Räder werden verzögert, ihre Drehzahlen
nehmen ab und ihr Bremsschlupf steigt an. Damit wachsen auch

die Kraftschlußbeiwerte μ_{Bi} zwischen den Rädern und der Fahrbahn und entsprechend den dynamischen Radlasten N_{dyni} steigen die Bremskräfte B_i und die "Straßenmomente" M_{STRi} an. Die Sensoren überwachen laufend das dynamische Verhalten der Räder und liefern elektrische Impulse an die Elektronische Steuereinheit. Werden die Maxima der Kraftschlußbeiwerte μ_{Bimax} (siehe Bild 4) erreicht, so gibt die Elektronische Steuereinheit Steuerbefehle an die Hydraulikeinheit. Die Radbremsdrücke werden in der Folge so moduliert, daß die Räder im Bereich optimalen Kraftschlußbeiwertes laufen, bis das Fahrzeug zum Stillstand kommt.

Die Simulationen werden für das gesamte Spektrum der Kraftschlußbeiwerte zwischen einem typischen Reifen und den unterschiedlichsten Fahrbahnbeschaffenheiten durchgeführt. Das folgende Bild 4 zeigt diese Kraftschlußbeiwerte als Funktion des Bremsschlupfes.

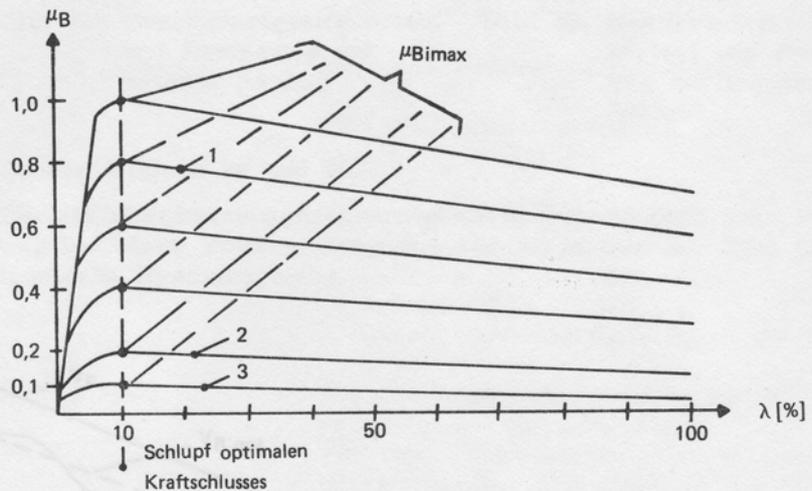


Bild 4: Kraftschlußbeiwerte μ_B als Funktion des Bremsschlupfes

- Kurve 1: Kraftschlußbeiwert für nasse Fahrbahn
- Kurve 2: Kraftschlußbeiwert bei Hartschnee
- Kurve 3: Kraftschlußbeiwert bei Glatteis

Auf Sichtgeräten (Oszillograph) oder Lichtstrahlschreibern lassen sich sämtliche für die Analyse des Regelkreises wesentlichen physikalischen Größen (z. B. die Fahrzeuggeschwindigkeit, die Raddrehzahlen, die Radbremsdrücke, die Signale) graphisch darstellen.

Bild 5: Fahrzeug- und Radgeschwindigkeit als Funktion der Zeit

*) Er läßt sich auch direkt als Zahlenwert auf einem Digitalvoltmeter anzeigen.

So zeigt Bild 5 den qualitativen Verlauf der Fahrzeug- und einer Radgeschwindigkeit bei einer Vollbremsung aus 100 km/h auf einer nassen Fahrbahn (Asphalt) mit geringer Wasserfilmhöhe (Kraftschlußbeiwertkurve 1 in Bild 4). In diesem Bild ist die Radgeschwindigkeit optimalen Kraftschlusses (Bremschlupf $\lambda = 10\%$) eingezeichnet. Die Güte der Bremsregelung läßt sich an Hand der nur geringen Differenz zwischen der Radgeschwindigkeit bei optimalem Kraftschluß ($V_{R\text{opt}}$) und derjenigen Radgeschwindigkeit, die mit dem elektronischen Bremsregler erreicht wird (V_R), messen (siehe Bild 5).

Der sich dabei ergebende Verlauf der Fahrzeuggeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Bremsweg ist in Bild 6a dargestellt.*) Es zeigt, daß an dem Punkt, an dem das Fahrzeug mit Bremsregler bereits zum Stillstand kommt, ein Fahrzeug ohne Regler noch eine Geschwindigkeit von mehr als 60 km/h besitzt. Wie aus Bild 6b zu entnehmen ist, beträgt die Bremswegverkürzung bei trockenem Asphalt immer noch 20%. Ein Aufprall auf ein am Stillstandspunkt des mit Regler ausgerüsteten Fahrzeugs hätte für ein Fahrzeug ohne Regelung sicher schwerwiegende Folgen.

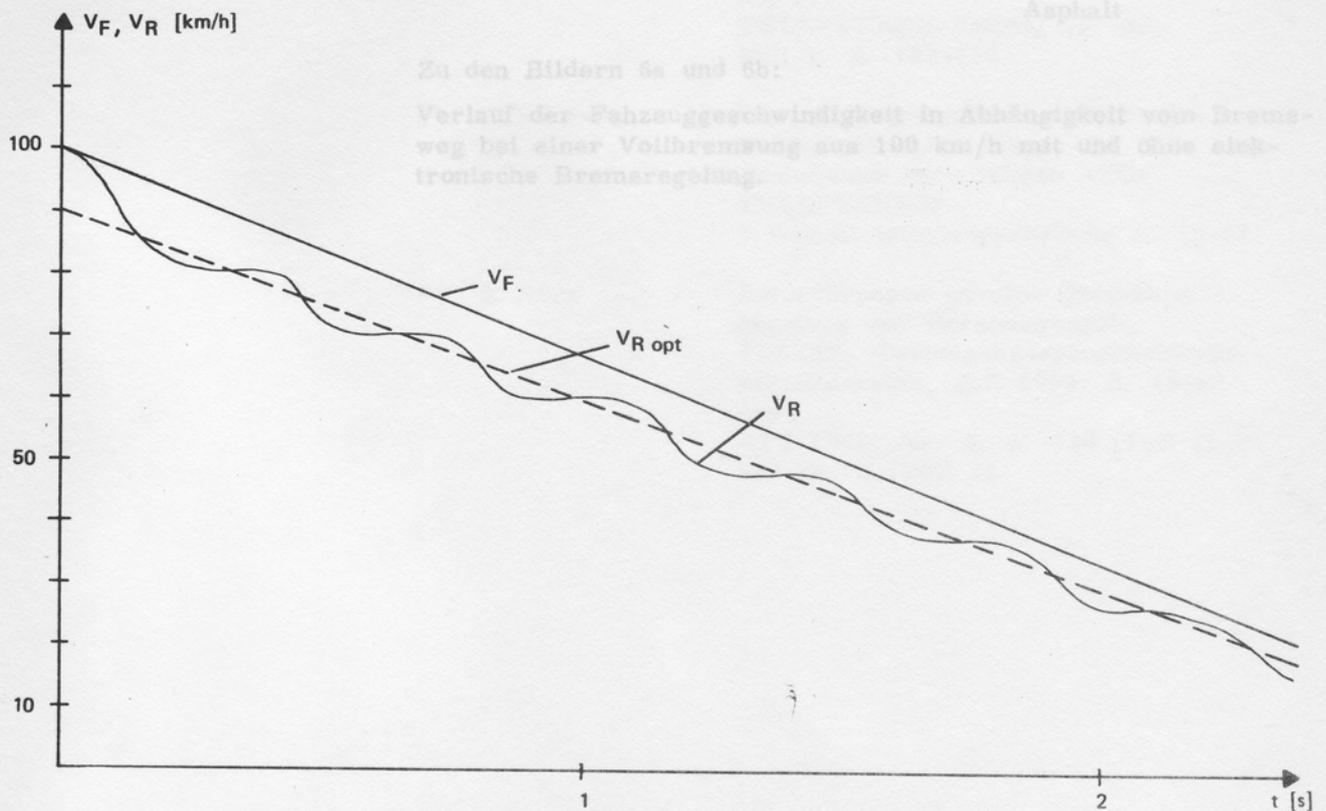


Bild 5: Fahrzeug- und Radgeschwindigkeit als Funktion der Zeit

*) Er läßt sich auch direkt als Zahlenwert auf einem Digitalvoltmeter anzeigen.

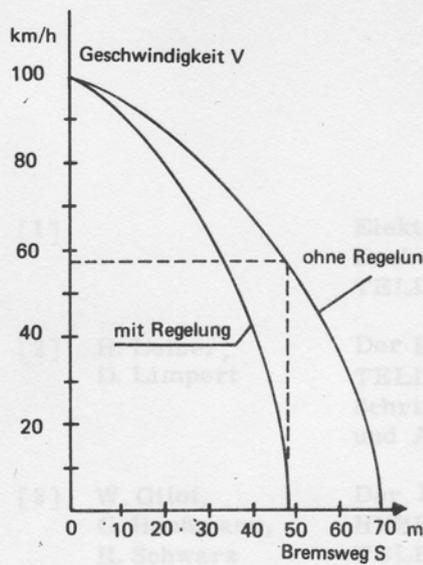


Bild 6a: Geschwindigkeitsverlauf und Bremsweg auf nassem Asphalt

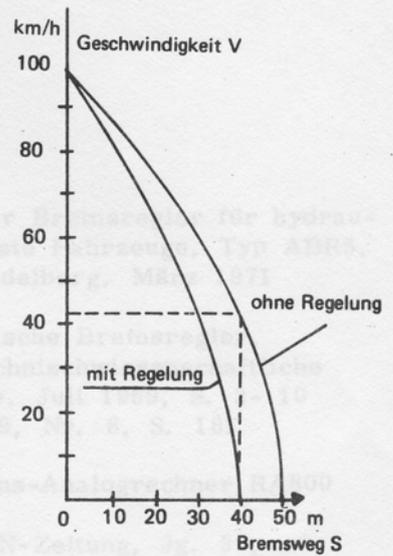


Bild 6b: Geschwindigkeitsverlauf und Bremsweg auf trockenem Asphalt

Zu den Bildern 6a und 6b:

Verlauf der Fahrzeuggeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Bremsweg bei einer Vollbremsung aus 100 km/h mit und ohne elektronische Bremsregelung.

LITERATUR

- [1] Elektronischer Bremsregler für hydraulisch gebremste Fahrzeuge, Typ ABR5, TELDIX, Heidelberg, März 1971
- [2] H. Leiber,
D. Limpert Der Elektronische Bremsregler, TELDIX, Technischwissenschaftliche Schriftenreihe, Juli 1969, S. 2- 10 und ATZ 1969, Nr. 6, S. 181
- [3] W. Giloi,
G. Haußmann,
H. Schwarz Der Präzisions-Analogrechner RA800 HYBRID TELEFUNKEN-Zeitung, Jg. 39, Heft 1, S. 110-111
- [4] R. Schwarz Hybrider Präzisions-Analogrechner RA 770 TELEFUNKEN-Zeitung Jg. 39 Heft 1, S. 128-130
- [5] R. Schwarz Vom Analogrechner zum Hybriden Präzisionsanalogrechner RA 770 Technische Mitteilungen AEG-TELEFUNKEN 2. Beiheft Datenverarbeitung S. 19-23
- [6] E. Hörz Anforderungen an eine Bremskraftregelung von Personenwagen TELDIX, Technischwissenschaftliche Schriftenreihe, Juli 1969, S. 10-20 und ATZ 1969, Nr. 6, S. 189 (Teil 1) und Nr. 7 (Teil 2)