

ÜBERWACHUNG DER RADLASTVERHÄLTNISS E VON

SCHIENENFAHRZEUGEN IM ROLLENDEN BETRIEB

Prof. Dr. H. Kronmüller, Dr. G. Jost

7500 Karlsruhe 1

Institut für Prozeßmeßtechnik und Prozeßleittechnik

Universität Karlsruhe

25.7.1980

1. Aufgabenstellung

Anlaß für den Wunsch, Radlastverhältnisse von Schienenfahrzeugen im rollenden Betrieb zu erfassen, sind Gefährdungen und Unfälle, welche durch eine ungleichmäßige Beladung der Güterwagen verursacht werden. Die Betreiber von Eisenbahnen haben die gleichmäßige, vorschriftsmäßige Beladung kaum im Griff: Die meisten Waggons werden von den Kunden in eigener Verantwortung beladen, die Ladung kann sich während der Fahrt verschieben, eine objektive Kontrolle der richtigen Beladung beim Zusammenstellen der Güterzüge scheitert an dem großen Aufwand.

Die einzelnen Radlasten sind im rollenden Betrieb von dynamischen Kräften überlagert, die durch die Fahrzeugbewegungen hervorgerufen werden. Es leuchtet unmittelbar ein, daß das dynamische Radlastsignal gemittelt über eine hinreichend lange Zeit die statische Radlast gut wiedergibt. Zwei Möglichkeiten bieten sich an:

- 1.) Jeder Waggon ist mit Kraftmeßdosen an jedem Rad ausgerüstet. Die Mittelung kann im Betrieb durchgeführt werden. Der Vorschlag scheitert am Aufwand und der Auswertung.
- 2.) Ein hinreichend langes Stück des Oberbaus wird meßtechnisch so ausgerüstet, daß die Radlasten des darüberrollenden Zuges erfaßt werden können. Unabhängig davon, wie die meßtechnische Aufgabe gelöst wird, ergibt sich aus der Signalanalyse notwendig eine erhebliche Länge der Meß-Strecke und damit ein fast indiskutabler Aufwand.

Ziel der Forschungsarbeiten war deshalb:

Die Realisierung und Erprobung von höherwertigen Schätzalgorithmen, um mit einer möglichst kurzen Meß-Strecke auszukommen.

Dynamische Radlastsignalkomponenten werden zum Teil durch Gleislagefehler im Oberbau verursacht (Bild 1): Längshöhenfehler h_L , Querhöhenfehler h_Q und Richtungsfehler u_r . Weiter wird der Radsatz durch die Konizität der Räder zum *Sinuslauf* angeregt, einer harmonischen Bewegung quer zur Fahrtrichtung. Radsätze mit *Flachstellen*, welche durch blockierendes Bremsen entstehen, tragen ebenfalls zur Dynamik des Radlastsignals bei. Sämtliche Anregungen sind ortsfest, ihr Spektrum im Zeitbereich deshalb abhängig von der Fahrgeschwindigkeit v :

$$u(t) \text{---} \text{---} U\left(\frac{\omega}{v}\right).$$

Die Bewegungen des Wagenkastens (Bild 2) können durch 6 gekoppelte Differential-Gleichungen 2. Ordnung mit konstanten Koeffizienten beschrieben werden. Für einen bestimmten Waggon-Typ ergeben sich rechnerisch Leistungsspektren der Zeit- und Ortsfrequenz nach Bild 3.

Zusammengefaßt: Radlastsignale lassen sich durch lineare Differentialgleichungen 2. Ordnung mit stochastischer Anregung beschreiben. Die Koeffizienten der Differential-Gleichung sind bei den vielen Waggon-Typen verschieden, sie hängen auch von der Beladung ab. Die anregenden Störgrößen sind von der Fahrgeschwindigkeit abhängig.

2. Die Versuchsanlage

Die Radlasten werden zwischen 2 Schwellen durch 2 Querkraft-Meßeinrichtungen mit Dehnmeß-Streifen erfaßt (Bild 4). Die Streifen sind um 45° gegen die Horizontale in der neutralen Faser der Schiene montiert. Nach der Theorie des ebenen Spannungszustandes (Mohr'scher Spannungskreis) [z.B. 1] erfassen dann die DMS die Hauptspannungen, die zur Schubspannung *Querkraft* gehören. Die Summe der beiden Querkraftsignale gibt ein *Meßfenster*: Radlasten zwischen den beiden Meß-Stellen ergeben ein der Last proportionales Ausgangssignal, außerhalb des Fensters ist die Summe der Querkräfte null.

Gemessene Radlastsignale über einem Fenster bei verschiedenen Geschwindigkeiten zeigt Bild 5. Die Signale eines Fensters werden 32mal nach Überschreiten einer Schwelle abgetastet, das Abtastintervall ist abhängig von der Geschwindigkeit gesteuert. Ein Schätzalgorithmus nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt einen Schätzwert für das Plateau. Für das Rad j an der Meß-Stelle i entsteht so das Signal $y_{j,i}$. Bei n Meß-Stellen längs der Strecke steht so eine Stichprobe $y_{j,i}$, $i = 1 \dots n$ zur Bestimmung des stat. Radlastsignals zur Verfügung. Diese Rechenoperationen werden in einem bit-slice-processor AMD 2900 durchgeführt (250 ns Zykluszeit, Codierung binär 12 bit, Mikroprogrammierung).

Die Zuordnung der gemessenen Radlastsignale zu einem Schienenfahrzeug erfolgt mit einem Identifikationsmikrorechner (Intel 8080). Signale von Lichtschranken und Schienenschalter (Bild 6) erfassen die charakteristischen Abmessungen der Fahrzeuge. Im Rechner wird die Zuordnung der Räder zu einem Fahrzeug vorgenommen und der Typ des Fahrzeugs ermittelt.

Die Stichprobe $y_{j,i}$ $j = 1 \dots m$, m Zahl der Räder, $i = 1 \dots n$, n Zahl der Meß-Stellen wird in einem Prozeßrechner verarbeitet. Als Schätzalgorithmus für die statische Radlast wird ein autoregressiver Schätzer [2], [3] verwendet.

Die Signale des Rades j , hier $y_{j,i}$ $i = 1 \dots n$ genannt, werden, wie in Abschnitt 1. ausgeführt, als Signale aus einem linearen, zeitinvarianten System mit stochastischer Erregung erklärt. Sie befolgen demnach auch eine Differenzgleichung der Form:

$$M_j + u_i = \sum_{k=0}^r y_{j,i-k} b_k \quad (1)$$

Dabei ist M_j die statische Radlast, u_i eine mittelwertfreie stochastische Erregung, r die Ordnung des Systems. In den unbekanntem Parametern b_k sind die Konstruktionsdaten der Waggons, die Beladung u.ä. enthalten.

Ist das System eingeschwungen, keine stochastische Erregung vorhanden, d.h. $u_i = 0$, so ist $y_{j,i} = M_j$. Aus (1) erhält man damit die Nebenbedingung $\sum b_k = 1$. Damit läßt sich ein lineares Schätzproblem für $k+1$ unbekannte Parameter formulieren.

Die Aufgabe stellt sich nun mathematisch wie folgt dar:

$$y = X \underline{b} + \underline{e} \quad \text{mit} \quad X = \begin{pmatrix} 1 & y_{j,r+1} - y_{j,r} & y_{j,r+1} - y_{j,r-1} & y_{j,r+1} - y_{j,1} \\ 1 & & & \\ \vdots & & & \\ 1 & y_{j,n} - y_{j,n-1} & \dots & y_{j,n} - y_{j,n-r} \end{pmatrix}$$

$$\underline{b} = \begin{pmatrix} M \\ b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{pmatrix} \quad \underline{y} = \begin{pmatrix} y_{j,r+1} \\ \vdots \\ y_{j,n} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Der Gleichungsfehler \underline{e} enthält die stochastische Erregungen u_i und die Meßfehler der $y_{j,i}$. Die Parameter werden nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate geschätzt, M_j als statische Radlast ausgedrückt. Der Schätzalgorithmus ist nicht erwartungstreu. Geschickte Gruppierung der Stichprobe hilft, die Schiefe herabzusetzen [2].

3. Ergebnisse [4]

Die Versuchsanlage wurde im normalen Fahrbetrieb etwa 1 Jahr lang betrieben. Sie hat sich als sehr betriebssicher und zuverlässig erwiesen. Zur Überprüfung der Genauigkeit wurden mehrfach aus statisch verwogenen Waggonen Testzüge auch in veränderter Waggonfolge zusammengestellt und vielmals die Versuchsanlage mit Geschwindigkeiten zwischen 10 und 100 km/h befahren. Einige wichtige Ergebnisse zeigen die folgenden Bilder.

Bild 7 zeigt ein Histogramm der Fehler in einer Serie der Versuchsfahrten. Die Fahrgeschwindigkeiten waren dabei gleichverteilt im Bereich 10 ... 100 km/h.

Bild 8 zeigt die Standardabweichung und den relativen Fehler der einzelnen Achslasten \hat{A} , der Gesamtlast \hat{G} und bei den Drehgestellwagen die Drehgestelllast \hat{D} . Drehgestellwagen haben den größten relativen Fehler. Eine genauere Untersuchung zeigt, daß in dem Fall Signale mit erheblich anderen Parametern auftreten.

Bild 9 zeigt zum Schluß die Standardabweichung der Radlastverhältnisse bei verschiedenen Geschwindigkeiten bei 2 Achs-Waggonen.

Das Ergebnis ist voll befriedigend. Die Genauigkeit reicht aus, das Radlastverhältnis auf den kritischen Wert zu überprüfen. Als kritischer Wert wird ein Verhältnis von 1:1,2 angesehen.

Die Ergebnisse der Versuchsanlage zeigen, daß im rollenden Betrieb die Radlasten mit einer Standardabweichung unter 2% ermittelt werden können. Dieser Wert ist oft sogar besser als der statisch ermittelte. Wegen der trockenen Reibung in den Blattfedern kann die statische Radlast nur mit einer ziemlichen Toleranz ermittelt werden. Die Fahrversuche ergaben dynamische Störsignale bis zu 60% des statischen Wertes. Durch den Schätzalgorithmus werden diese Störsignale im Verhältnis bis zu 1:30 unterdrückt.

Bild 5. Radlastsignale bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten (im Leistungsdiektoren der Radlastsignale durch eine Zeit- und Ortsfrequenz Flachstelle auf)

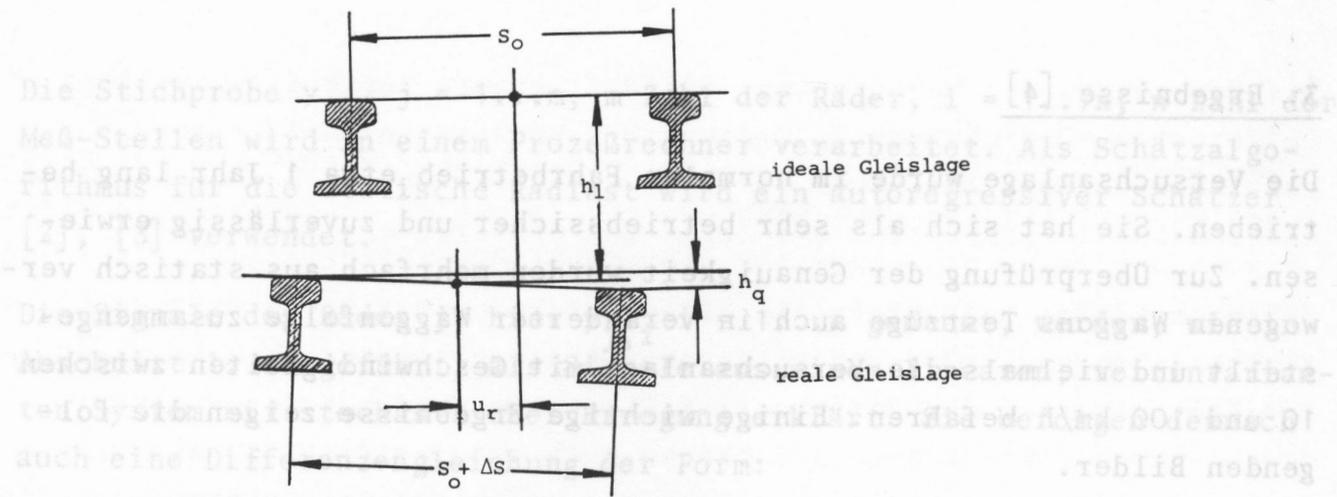


Bild 1. Gleislagefehler im Eisenbahn-Oberbau

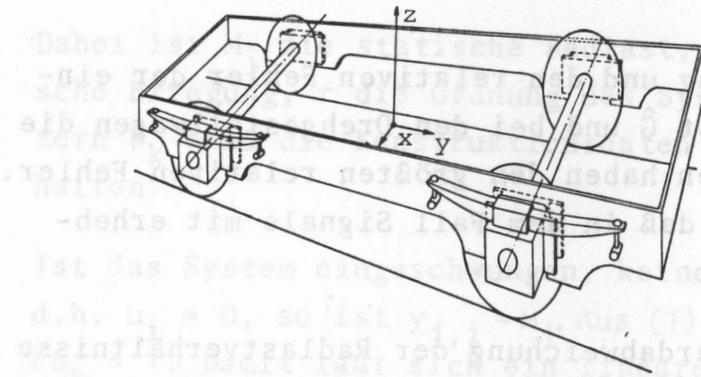


Bild 2. Zweiachsiges Schienenfahrzeug

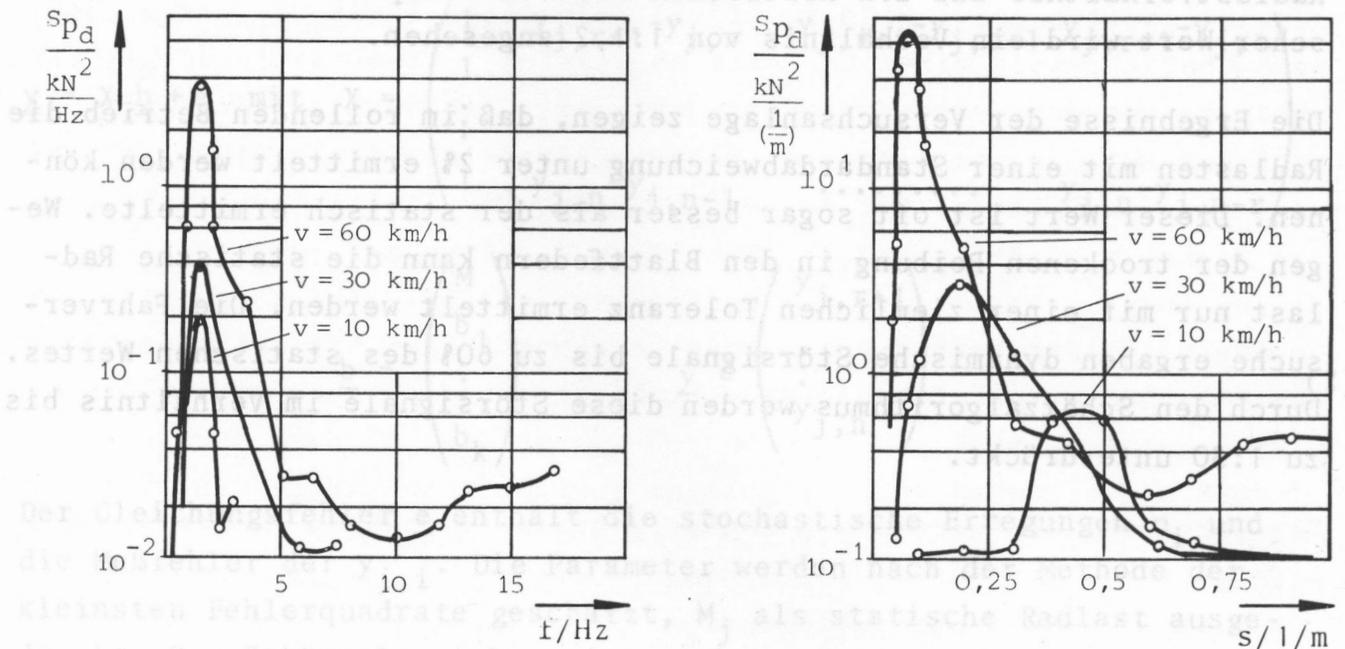


Bild 3. Leistungsdichtespektren der Radlastsignalstörung als Zeit- und Ortsfrequenz

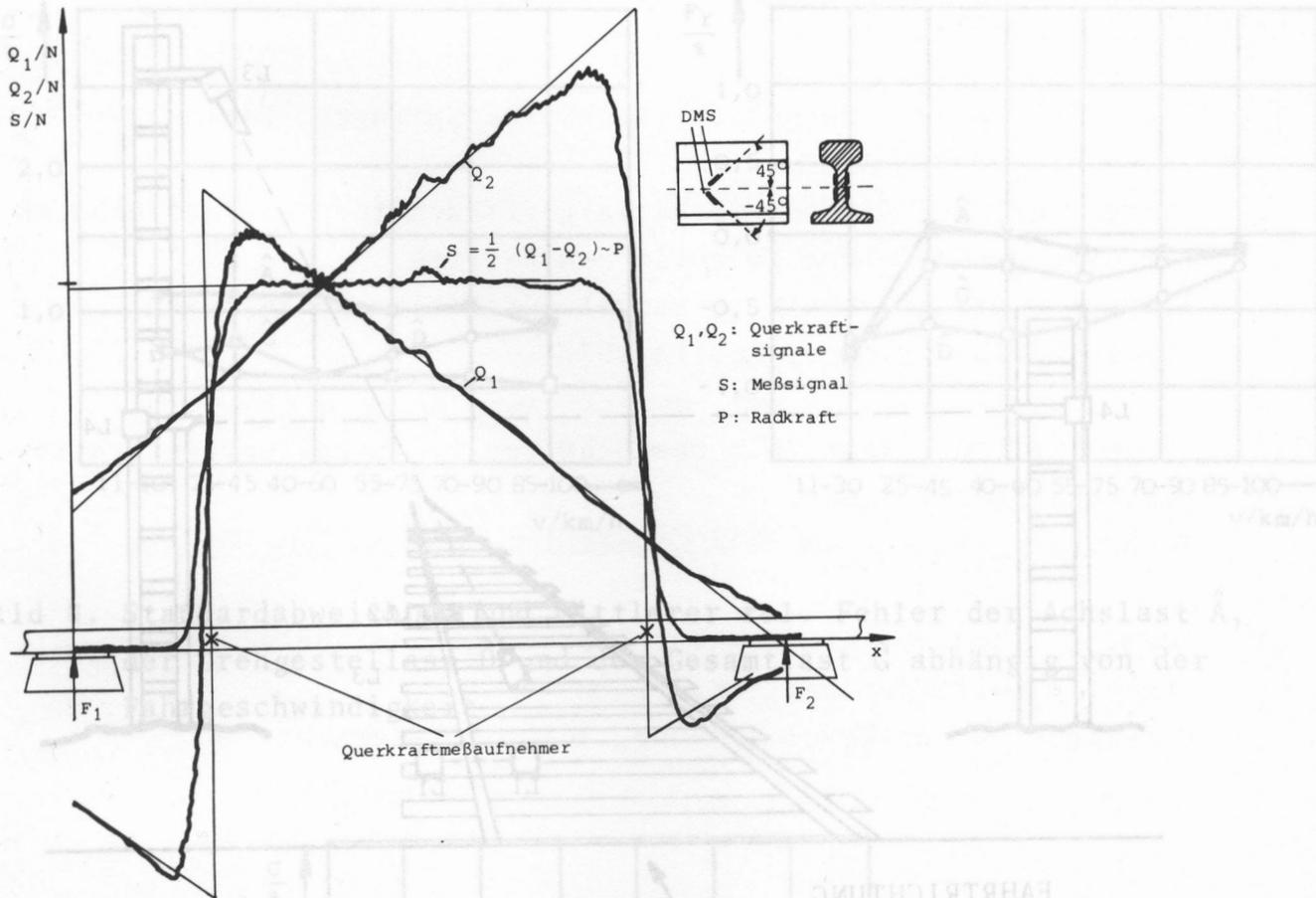


Bild 4. Querkraftmessung und Meßfenster (Radlastsignal S abhängig von der Koordinate x der Radkrafteinleitung)

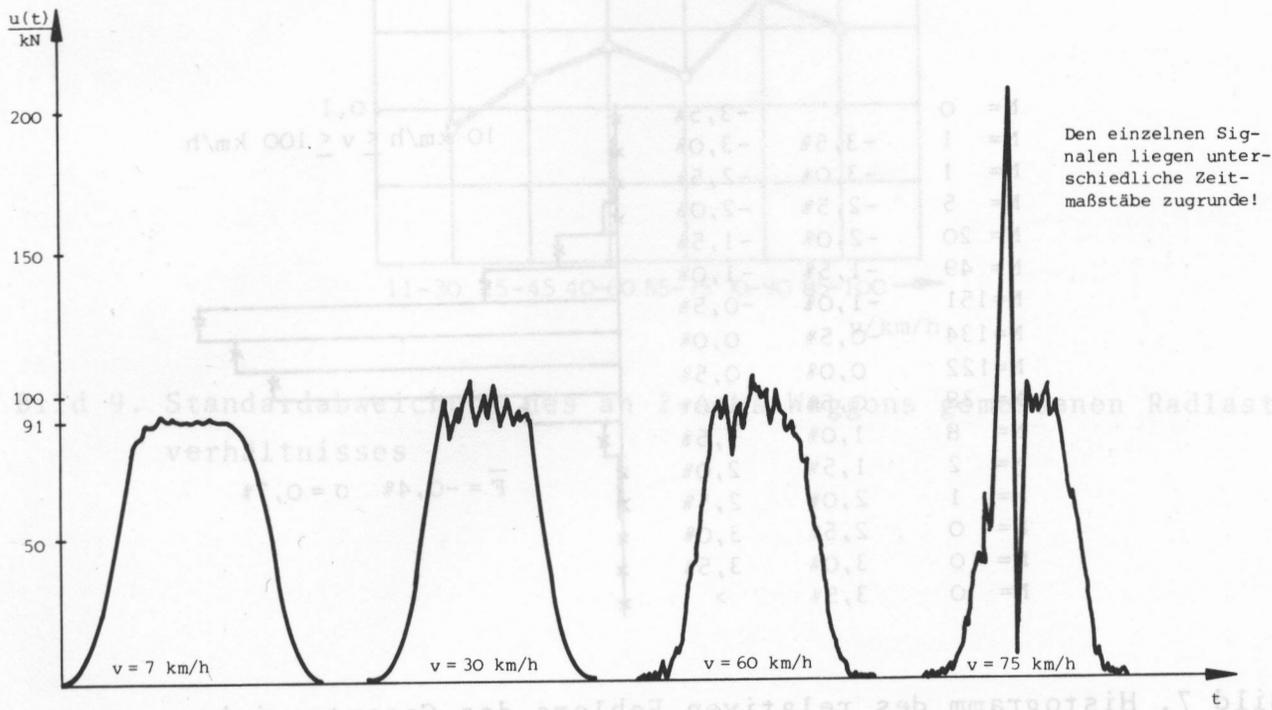


Bild 5. Radlastsignale bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten (im Meßsignal $v = 75 \text{ km/h}$ tritt eine Signalstörung durch eine Flachstelle auf)

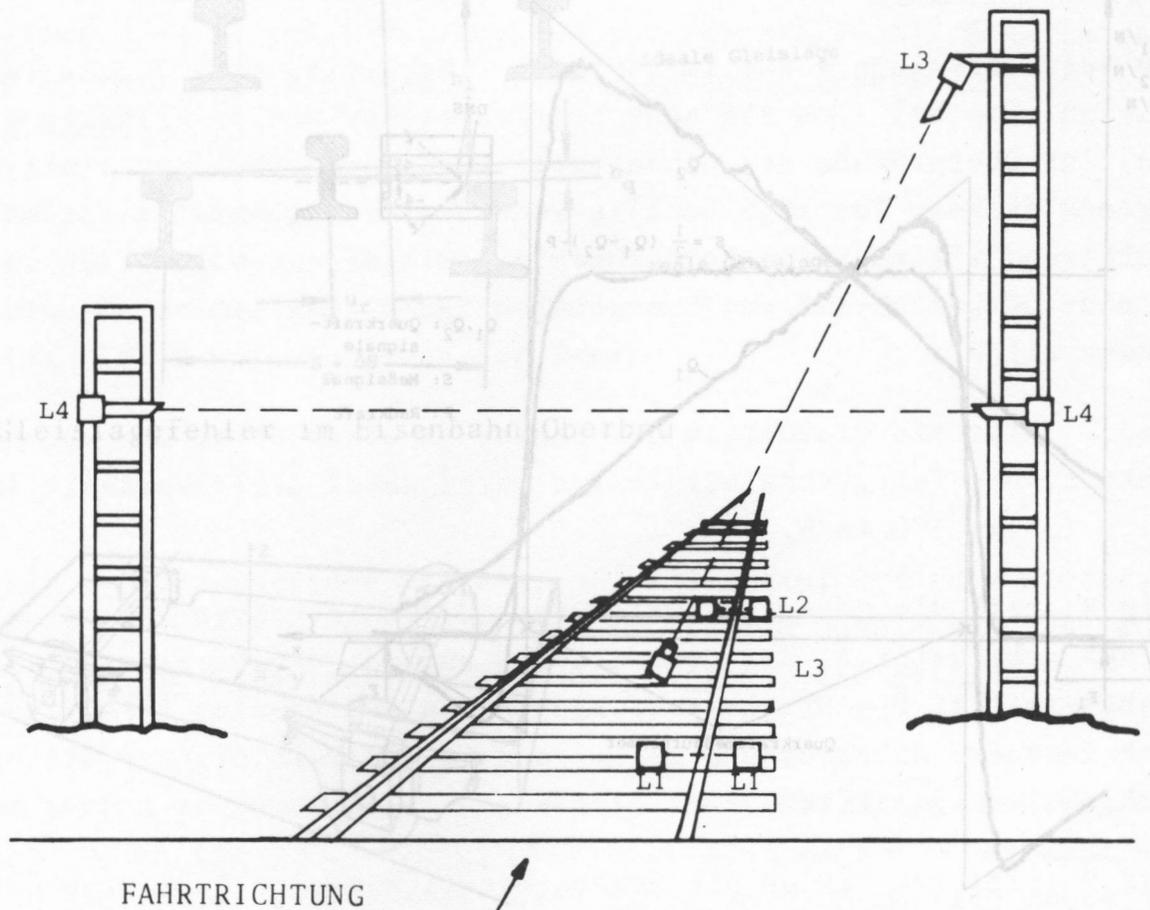


Bild 6. Anordnung der Signalgeber zur Waggonidentifikation

N= 0	<	-3,5%
N= 1	-3,5%	-3,0%
N= 1	-3,0%	-2,5%
N= 5	-2,5%	-2,0%
N= 20	-2,0%	-1,5%
N= 49	-1,5%	-1,0%
N= 151	-1,0%	-0,5%
N= 134	-0,5%	0,0%
N= 122	0,0%	0,5%
N= 38	0,5%	1,0%
N= 8	1,0%	1,5%
N= 2	1,5%	2,0%
N= 1	2,0%	2,5%
N= 0	2,5%	3,0%
N= 0	3,0%	3,5%
N= 0	3,5%	>

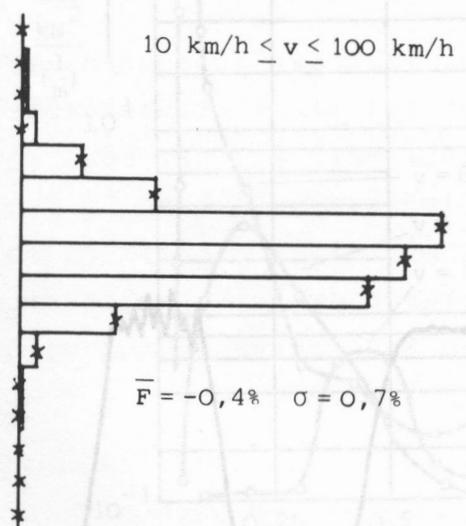


Bild 7. Histogramm des relativen Fehlers des Gesamtgewichtes

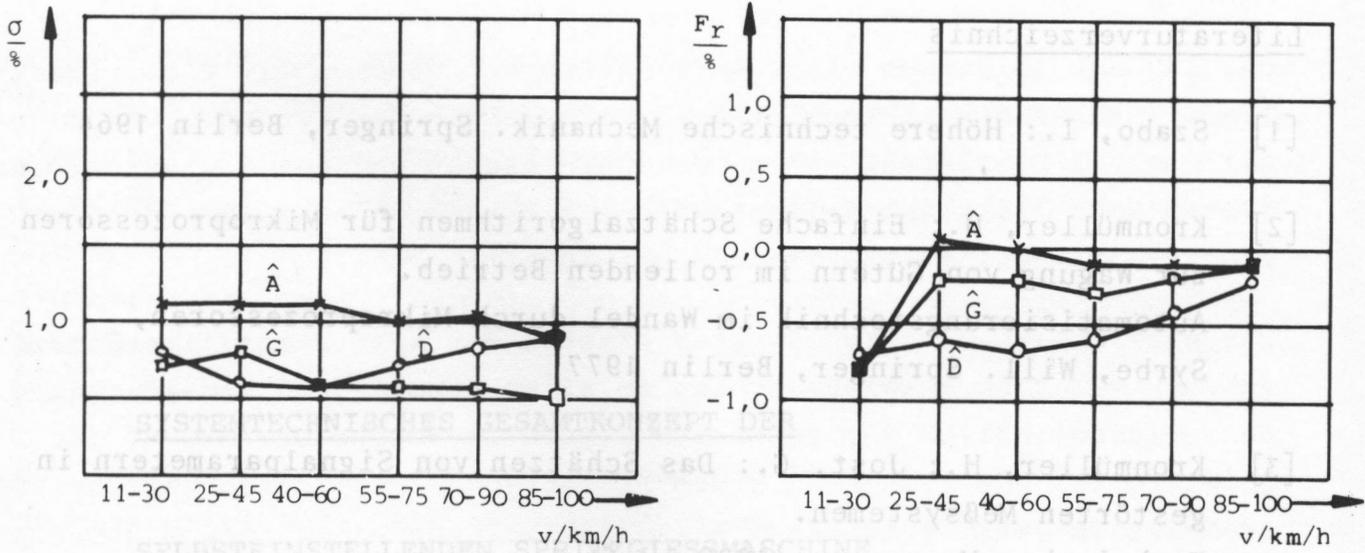


Bild 8. Standardabweichung und mittlerer rel. Fehler der Achslast \hat{A} , der Drehgestelllast \hat{D} und der Gesamtlast \hat{G} abhängig von der Fahrgeschwindigkeit

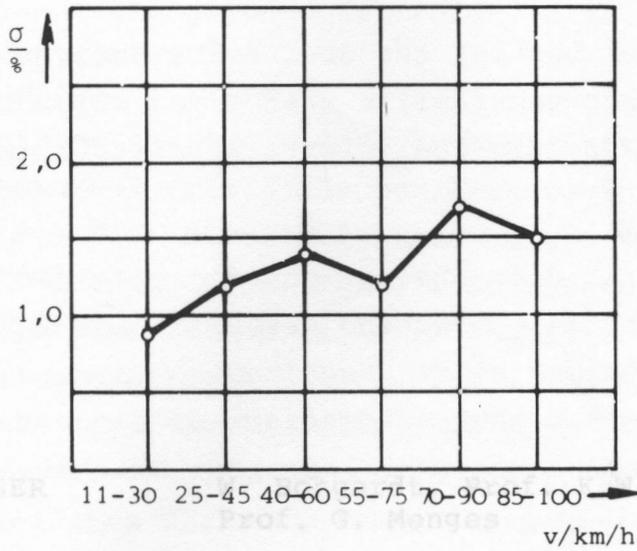


Bild 9. Standardabweichung des an 2-Achs-Waggons gemessenen Radlastverhältnisses

Literaturverzeichnis

- [1] Szabo, I.: Höhere technische Mechanik. Springer, Berlin 1964
- [2] Kronmüller, H.: Einfache Schätzalgorithmen für Mikroprozessoren zur Wägung von Gütern im rollenden Betrieb. Automatisierungstechnik im Wandel durch Mikroprozessoren, Syrbe, Will. Springer, Berlin 1977
- [3] Kronmüller, H.; Jost, G.: Das Schätzen von Signalparametern in gestörten Meßsystemen. Technisches Messen tm, 1980, Heft 1
- [4] Jost, G.: Kontrollstation zur Überwachung der Beladung von Güterzügen im rollenden Betrieb. Gesellschaft für Kernforschung, 1980, PDV-Bericht

Bild 8. Anordnung der Sensoren zur Waggonidentifikation



Bild 9. Standardabweichung des an 2-Achs-Waggon gemessenen Radlastverhältnisses

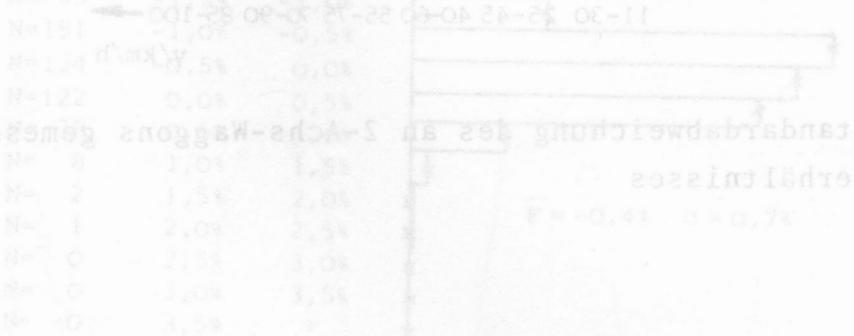


Bild 7. Histogramm des relativen Fehlers des Gesamtgewichtes