

LAUFWERKUNTERSUCHUNG VON DREHGESTELLOKOMOTIVEN IN GLEISBOGEN

Von

G.Y. SOSTARICS

Lehrstuhl für Schienenfahrzeuge, Technische Universität Budapest

(Eingegangen am 20. September 1971)

Vorgelegt von Prof. Dr. K. HORVÁTH

I. Einleitung

Bei Kurvenfahrten treten an dem Laufwerk der Schienenfahrzeuge Kräfte auf. Dies wird zunächst durch Gleiten in den Berührungspunkten von Rad und Schiene, durch die daraus entstehenden Reibungskräfte verursacht. Durch die Richtkräfte wird das Fahrzeug den Reibungskräften gegenüber in die Kurve gedreht.

Für den Konstrukteur ist es wichtig, die Richtkräfte zu kennen, da sich deren Größe auf die Sicherheit gegen Entgleisung des Fahrzeugs und auf den Radreifenverschleiß auswirkt. Die Bestimmung der Richtkräfte ist aus dem Fachschrifttum bekannt, hier soll vor allem auf die Tätigkeit HEUMANN [1, 2] hingewiesen werden. Bei diesen Methoden wird der Vorrang vielmehr den graphischen Verfahren gegeben und sie lassen sich für eine beliebige Laufwerkanordnung anwenden.

Im Laufe der Entwicklung vereinfachten sich die Lokomotivlaufwerke. Die modernen Lokomotiven sind meistens mit Drehgestell ausgeführt, des öfteren mit vier, seltener mit sechs Achsen. Andere Laufwerke mit komplizierterer Achsenanordnung werden heute nur ausnahmsweise vorgesehen. Die auf allgemeinen Laufwerken beruhende graphische Methode hat deshalb auch an Bedeutung verloren, hingegen erhielt die Entwicklung eines Berechnungsverfahrens der zeitgemäßen Laufwerkanordnung Aktualität, die sich für die Programmierung auf die Rechenanlage eignet.

2. Grundsätzliches

Die Reibungskräfte, die an den Radkränzen des eine Kurve befahrenden Schienenfahrzeugs entstehen, haben eine Richtung, als wenn das Fahrzeug um die durch den sog. Reibungsmittelpunkt gehende Vertikalachse verdreht würde. Der Ort des Reibungsmittelpunkts ist von der Lage des Fahrzeugs in der Kurve abhängig. Auf dem Drehgestell halten den Reibungskräften sowie den auf den Drehgestellrahmen wirkenden Horizontalkräften die auf der ersten Achse angreifenden Richtkräfte oder zwei auf der ersten (und in der

Regel auf der letzten) Achse entstehenden Kräfte gemeinsam das Gleichgewicht. Die Richtkräfte werden durch die Auflösung der für das ebene Kräftesystem angeschriebenen Gleichgewichtsgleichungen bestimmt.

3. Gruppierung der Kräfte

In Abb. 1 ist ein dreiachsiges Drehgestell ($i = 3$) mit den darauf wirkenden Horizontalkräften dargestellt. Die Kräfte werden zweckmäßig in drei Gruppen unterteilt. Diese sind:

a) *Die auf den Radkränzen wirkenden Reibungskräfte.* Größe und Lage ihrer Resultierenden hängt vom Achsdruck, von der Reibungszahl, dem Ort des Reibungsmittelpunkts sowie von dem Laufkreisabstand ab. Bei einer sich axial verschiebenden und in geringerem Maße, als es die seitliche Verschiebungsmöglichkeit gestattet, verrückten, sich mit dem Spurkranz auf der Schiene berührenden Achse (im weiteren als »arbeitende Gölsdorfachse« bezeichnet) wird nur die Komponente in der Radebene der Reibungskräfte hierher gezählt. Auf die Gründe soll später eingegangen werden.

b) *Kräfte vom Lokomotivrahmen oder vom anderen Drehgestell.* Hierher werden gerechnet: die auf den *Drehzapfen* wirkende Kraft sowie die über die Kastenaufhängung auf das Drehgestell wirkenden Horizontalkräfte, u. zw. die auf der Gleitstütze wirkende Reibungskraft, die horizontalen Kräfte der Rückfedern oder Pendel sowie bei einer Einrichtung für die Herstellung einer Querkupplung die zwischen den Drehgestellen auftretenden (in Abb. 1 mit R bezeichneten) Kräfte. Die Resultierende dieser Kräfte ist in der Regel von der Federkonstante der eingebauten Federung sowie von den Auslenkungen (dem Auslenkwinkel der beiden Drehgestelle) abhängig.

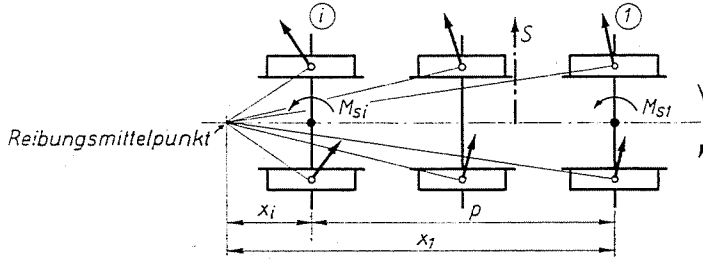
c) *Die auf dem Spurkranz wirkenden Richtkräfte.* In Abhängigkeit von dem Umstand, ob das Drehgestell für Ein- oder für Zweipunktführung ausgelegt ist, entstehen eine oder zwei Richtkräfte. Die auf dem Spurkranz der arbeitenden Gölsdorfachsen entstehenden Kräfte werden nicht hierhergezählt, weil auch bei dem Kräftesystem in Gruppe a) die auf die Radebene senkrechten Komponenten der Reibungskräfte weggelassen wurden. Bei unserer Analyse bleiben also die obengenannten Kräfte des Systems, die sich paarweise Gleichgewicht halten, unberücksichtigt; durch diese Tatsache bleibt die Gültigkeit der Gleichgewichtsgleichungen unbeeinflusst. Das ist zweckmäßig, da damit die Kräftezahl in dieser Gruppe nicht über zwei sein kann; damit wird die Berechnung sehr vereinfacht.

4. Aufschreiben der Gleichgewichtsgleichungen

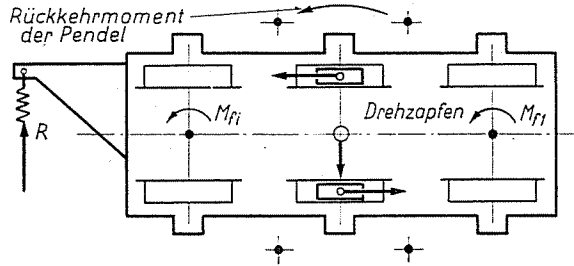
Das einfachste Verfahren zur Bestimmung der Richtkräfte besteht darin, nach der vorstehenden Gruppenbildung die Momente der Kräfte für die Mittelpunkte der vorderen und hinteren führenden Achse anzuschreiben. In Abb. 1

Kräftesystem

a) Reibungskräfte am Radkranz



b) vom Lokomotivrahmen oder von einem anderen Drehgestell angreifende Kräfte



c) am Spurkranz wirkende Richtkräfte

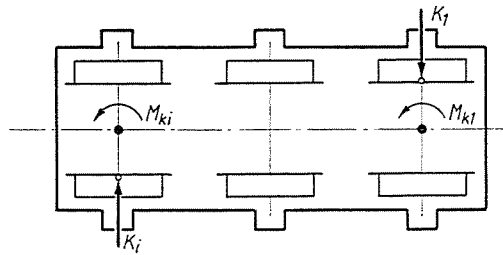


Abb. 1

wurden daher die Momente mit M_{s1} , M_{f1} , M_{k1} bzw. M_{si} , M_{fi} , M_{ki} bezeichnet. Für den Fall des Gleichgewichts lassen sich die Gleichungen aufschreiben:

$$M_{s1} + M_{f1} + M_{k1} = 0 \tag{1}$$

$$M_{si} + M_{fi} + M_{ki} = 0. \tag{2}$$

In Kenntnis von M_{k1} und M_{ki} werden die Richtkräfte sehr einfach, durch Dividieren mit p errechnet.

$$K_1 = \frac{M_{ki}}{p} \tag{3}$$

$$K_i = \frac{M_{k1}}{p}. \quad (4)$$

Rechentechisch ist es zweckmäßig, mit den durch $2\mu Q$ dividierten Werten der Kräfte bzw. Momente zu arbeiten, wo μ die Reibungszahl zwischen Rad und Schiene, Q den Raddruck bedeuten. Diese Werte werden im weiteren mit kleinen Buchstaben (m, k usw.) bezeichnet und *Relativkräfte* bzw. -momente genannt.

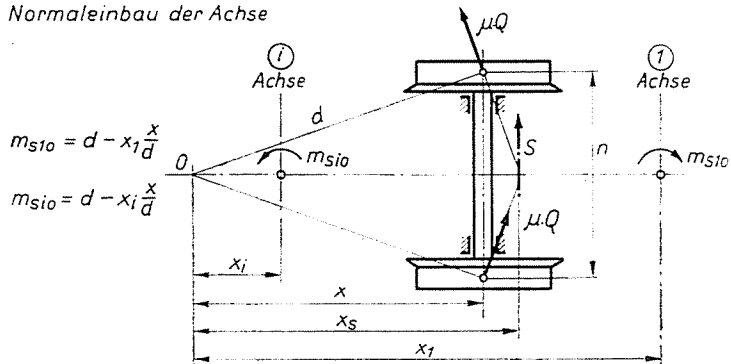
5. Bestimmung der Momente der einzelnen Kräftesysteme

Die Momente der Kräfte nach der vorstehenden Gruppenbildung werden wie folgt bestimmt:

a) *Das Moment der am Radkranz angreifenden Reibungskräfte* wird mit Hilfe der Abb. 2 abgeleitet. Bei einer aus dem Laufwerk herausgehobenen, *normal* eingebauten, also sich in Axialrichtung nicht verschiebenden Achse werden die gesuchten Momente in folgender Weise berechnet:

$$m_{s10} = d - x_1 \frac{x}{d} \quad (5)$$

Normaleinbau der Achse



Arbeitende Gölsdorfachse

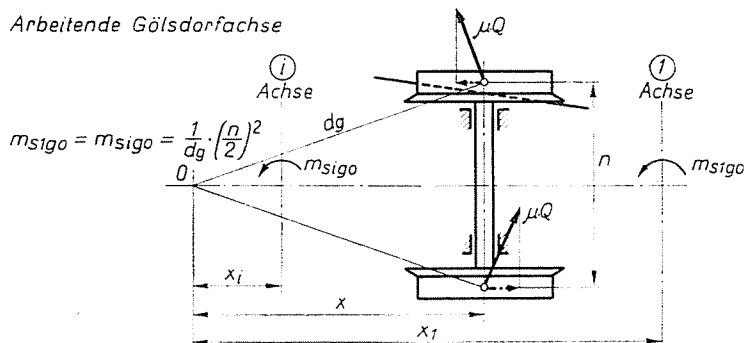


Abb. 2

$$m_{si0} = d - x_i \frac{x}{d}. \tag{6}$$

Dieselben Momente ergeben sich bei einer arbeitenden Gölsdorfachse zu:

$$m_{s1g0} = m_{sig0} = \frac{1}{d_g} \cdot \left(\frac{n}{2}\right)^2. \tag{7}$$

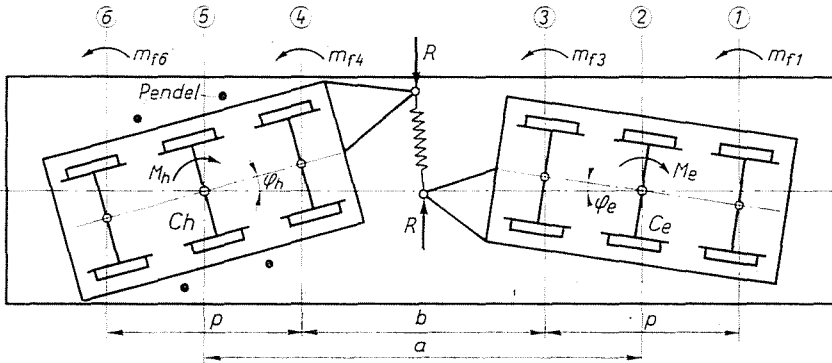


Abb. 3

Bei mehreren Achsen sind diese Momente zu summieren, damit erhält man:

$$m_{s1} = \sum d + \left(\frac{n}{2}\right)^2 \sum \frac{l}{d_g} - x_l \sum \frac{x}{d} \tag{8}$$

$$m_{si} = \sum d + \left(\frac{n}{2}\right)^2 \sum \frac{l}{d_g} - x_i \sum \frac{x}{d}. \tag{9}$$

b) Die Momente der von dem Lokomotivhaupttrahmen oder vom Drehgestell angreifenden Kräfte sind von der konstruktiven Ausgestaltung der kraftübertragenden Bauteile zwischen Lokomotivrahmen und Drehgestell abhängig. Da diese Bauteile sehr verschieden sein können, soll ein Beispiel herausgegriffen werden, um die zur Berechnung benutzten Ausdrücke darzulegen. Als Beispiel wird ein Laufwerk (Abb. 3) mit Drehzapfen und einer ein Rückführdrehmoment ergebenden Kastenaufhängung sowie mit gefederter Querkupplung zwischen den Drehgestellen gewählt:

Für die Vorderachse des vorderen Drehgestells gilt:

$$m_{f1} = \frac{1}{2\mu Q} \left[M_e + \frac{M_e + M_h}{a} \left(p - \frac{a-b}{2} \right) + R \left(p + \frac{b}{2} \right) \right]. \tag{10}$$

Für die Hinterachse des vorderen Drehgestells:

$$m_{f3} = \frac{1}{2\mu Q} \left[M_e + \frac{M_e + M_h}{a} \left(\frac{a-b}{2} \right) + R \frac{b}{2} \right]. \quad (11)$$

Für die Vorderachse des hinteren Drehgestells:

$$m_{f4} = \frac{1}{2\mu Q} \left[M_h + \frac{M_e + M_h}{a} \left(\frac{a-b}{2} \right) + R \frac{b}{2} \right]. \quad (12)$$

Für die Hinterachse des hinteren Drehgestells:

$$m_{f6} = \frac{1}{2\mu Q} \left[M_h + \frac{M_e + M_h}{a} \left(p - \frac{a-b}{2} \right) + R \left(p + \frac{b}{2} \right) \right]. \quad (13)$$

c) *Das Moment der auf den Spurkranz wirkenden Richtkräfte* ist nach den Gl. (1) und (2) gleich der Summe mit entgegengesetztem Vorzeichen der unter a) und b) ausgedrückten Momente, d. h. es ist im wesentlichen nichts anders als das den vorigen Momenten das Gleichgewicht haltende Reaktionsmoment.

6. Einfluß der Kurvenlage des Drehgestells auf die Kräfte

Das Drehgestell kann in der Kurve mit einem Spurspiel »t« verschiedene Stellungen einnehmen. Diese Stellung wird durch den Reibungsmittelpunkt bestimmt, dessen Stelle zweckmäßigerweise mit dem Abstand von der Vorderachse des Drehgestells angegeben wird. In Abhängigkeit von diesem Abstand wird das Moment der Kräftegruppen unter a) und b) ausgedrückt. Zwischen den beiden Kräftegruppen besteht jedoch ein wesentlicher Unterschied; das Moment der *Reibungskräfte* (Kräftegruppe »a«) ist nämlich lediglich von der Lage des Reibungsmittelpunkts des untersuchten Drehgestells abhängig, während das Moment der *auf das Drehgestell wirkenden Kräfte* (Kräftegruppe »b«) in der Regel auch durch die Kurvenlage des anderen Drehgestells, d. h. durch die Stelle des Reibungsmittelpunkts des anderen Drehgestells beeinflußt wird. Letzteres stellt also bei einer gegebenen Lokomotive eine Funktion mit zwei Veränderlichen dar. Für eine Sechssachsenlokomotive werden z. B. die Momente der Kräfte durch die folgenden Funktionen im allgemeinen angegeben (die Indexe bezeichnen die Nummern der Achsen):

$$\left. \begin{aligned} m_{s1} &= \text{Funktion } (x_1), \\ m_{s3} &= \text{Funktion } (x_1), \\ m_{s4} &= \text{Funktion } (x_4), \\ m_{s6} &= \text{Funktion } (x_4) \end{aligned} \right\} \text{ Momente der am Radkranz auftretenden Kräfte}$$

$$\left. \begin{aligned} m_{f1} &= \text{Funktion } (x_1, x_4) \\ m_{f3} &= \text{Funktion } (x_1, x_4) \\ m_{f4} &= \text{Funktion } (x_1, x_4) \\ m_{f6} &= \text{Funktion } (x_1, x_4) \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Momente der auf das Drehgestell wirkenden} \\ \text{Horizontalkräfte} \end{array}$$

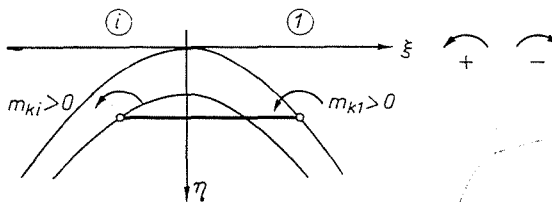
Zwischen der Lage in der Kurve des Drehgestells und der Art der Führung besteht eine Wechselwirkung. Die möglichen Fälle sind in der sog. *Vogelschen* Darstellung in Abb. 4 angegeben.

1. *Zweipunktführung*: die Vorderachse läuft auf dem äußeren, die Hinterachse auf dem inneren Schienenstrang, es entstehen also zwei Richtkräfte. Kenngrößen: $m_{k1} > 0$ und $m_{ki} > 0$.

2. *Einpunktführung*:

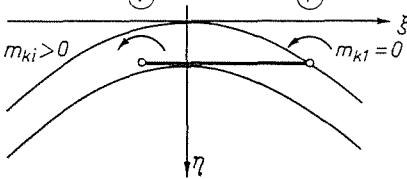
a) Führung an der *Vorderachse*. Dieser Fall kann sowohl bei dem vorderen wie auch bei dem hinteren Drehgestell vorkommen. Kenngrößen: $m_{k1} = 0$ und $m_{ki} > 0$.

1) *Einpunktführung*

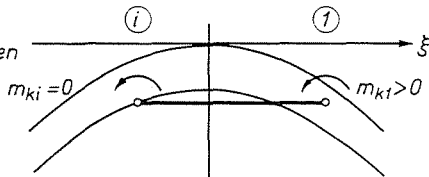


2) *Zweipunktführung*

a) *Führung vorn*



b) *Führung hinten*



3) *Ein Fall der Gegenführung*

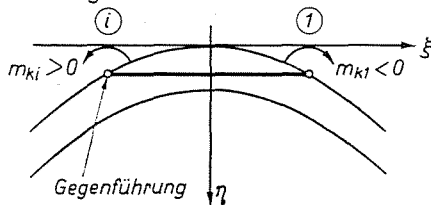


Abb. 4

b) Führung an der *Hinterachse*. Dieser Fall ist nur bei dem hinteren Drehgestell möglich. Kenngrößen: $m_{k1} > 0$ und $m_{ki} = 0$.

3. *Gegenführung*: ist in der Praxis unerwünscht, liegt vor, wenn die vordere Achse an den inneren Schienenstrang oder die hintere Achse an den äußeren Schienenstrang geklemmt wird. Kenngrößen: $m_{k1} < 0$ oder $m_{ki} < 0$.

7. Geometrische Analyse parallel zur statischen Kräfteuntersuchung

Durch die geometrische Analyse erhält man Antwort auf die Frage, ob bei der angesetzten (oder aus der dynamischen Prüfung erhaltenen) Führung bei der Zwischenachse keine Überdeckung von Schiene und Spurkranz entsteht (das bedeutet, daß die angenommene Führung nicht zustande kommen kann) oder — wenn die Zwischenachse eine *Gölsdorfachse* ist — ob diese auch tatsächlich als *Gölsdorfachse* arbeitet oder unter den gegebenen Umständen die Axialverschiebungsmöglichkeit dazu nicht ausreicht.

Die erforderlichen Untersuchungen sind in Tabelle I zusammengefaßt. Wie es die Abbildungen in der Tabelle zeigen, ist bei jeder Achse eine Spurkranzschwächung der Größe »z« oder eine maximale Verschiebung z' in Axialrichtung möglich.

Bei *Zweipunktführung* wird der Ort des Reibungsmittelpunkts aus der Beziehung

$$x_1 = \frac{p}{2} + \frac{Rt'}{p} \quad (14)$$

ermittelt, wo $t' = t + z_1 + z_i$.

Bei *Einpunktführung* erhält man den Ort des Reibungsmittelpunkts aus der dynamischen Analyse. Dabei wird durch die geometrische Analyse geprüft, ob die Ansätze der dynamischen Analyse richtig waren.

Bei einem Radsatz zwischen den führenden Achsen entsteht eine Überdeckung mit der Schiene, wenn folgende Ungleichheiten erfüllt werden:

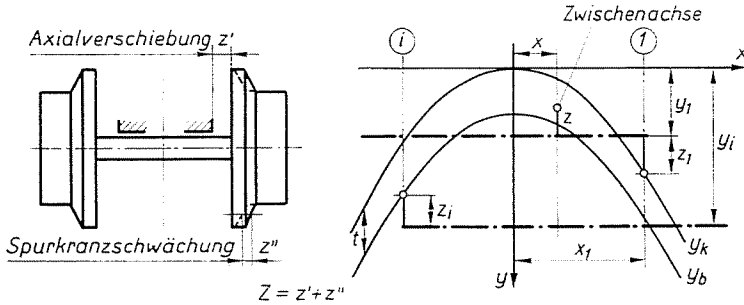
bei der Führung der vorderen Achse:

$$\frac{x^2}{2R} > \frac{x_1^2}{2R} - z_l + z' + z'' \quad \text{und} \quad \frac{x^2}{2R} + t < \frac{x_1^2}{2R} - z_l - z' - z'',$$

bei der Führung der letzten Achse:

$$\frac{x^2}{2R} > \frac{x_l^2}{2R} + t + z_l + z' + z'' \quad \text{und} \quad \frac{x^2}{2R} + t < \frac{x_l^2}{2R} + t + z_l - z' - z''.$$

Tabelle 1



Zwischenachsenprüfungen

Ansatz	Es entsteht Überdeckung (von Schiene und Spurkranz) wenn:	
Die Vorderachse führt	am äußeren Schienenstrang	$x^2/2R > x_1^2/2R - z_1 + z' + z''$
	am inneren Schienenstrang	$x^2/2R + t < x_1^2/2R - z_1 - z' - z''$
Die Hinterachse führt	am äußeren Schienenstrang	$x^2/2R > x_1^2/2R + t + z_1 + z' + z''$
	am inneren Schienenstrang	$x^2/2R + t < x_1^2/2R + t + z_1 - z' - z''$
Ansatz	Arbeitende »G«-Achse, wenn:	
Die Vorderachse führt	$x > 0$	$x^2/2R > x_1^2/2R - z_1 - z'$
	$x < 0$	$x^2/2R + t < x_1^2/2R - z_1 + z'$
Die Hinterachse führt	$x > 0$	$x^2/2R > x_1^2/2R + t + z_1 - z'$
	$x < 0$	$x^2/2R + t < x_1^2/2R + t + z_1 + z'$

Hat die Zwischenachse eine Seitenverschiebung z' , wir die Achse als Gölsdorfachse arbeiten, wenn

a) $x > 0; \frac{x^2}{2R} > \frac{x_1^2}{2R} - z_1 - z'$ und $\frac{x^2}{2R} < \frac{x_1^2}{2R} + t + z_1 - z'$

b) $x < 0; \frac{x^2}{2R} + t < \frac{x_1^2}{2R} - z_1 + z'$ und $\frac{x^2}{2R} + t < \frac{x_1^2}{2R} + t + z_1 + z'$.

8. Programmierung für eine Rechenanlage

Das Blockdiagramm des Rechenprogramms für die Bestimmung der Richtkräfte von Fahrzeugen mit Drehgestell ist in Tabelle 2 angegeben. Die Indexe der Buchstaben beziehen sich auf eine Sechsbachsenlokomotive, die auch Achsen mit axialer Verschiebungsmöglichkeit haben kann.

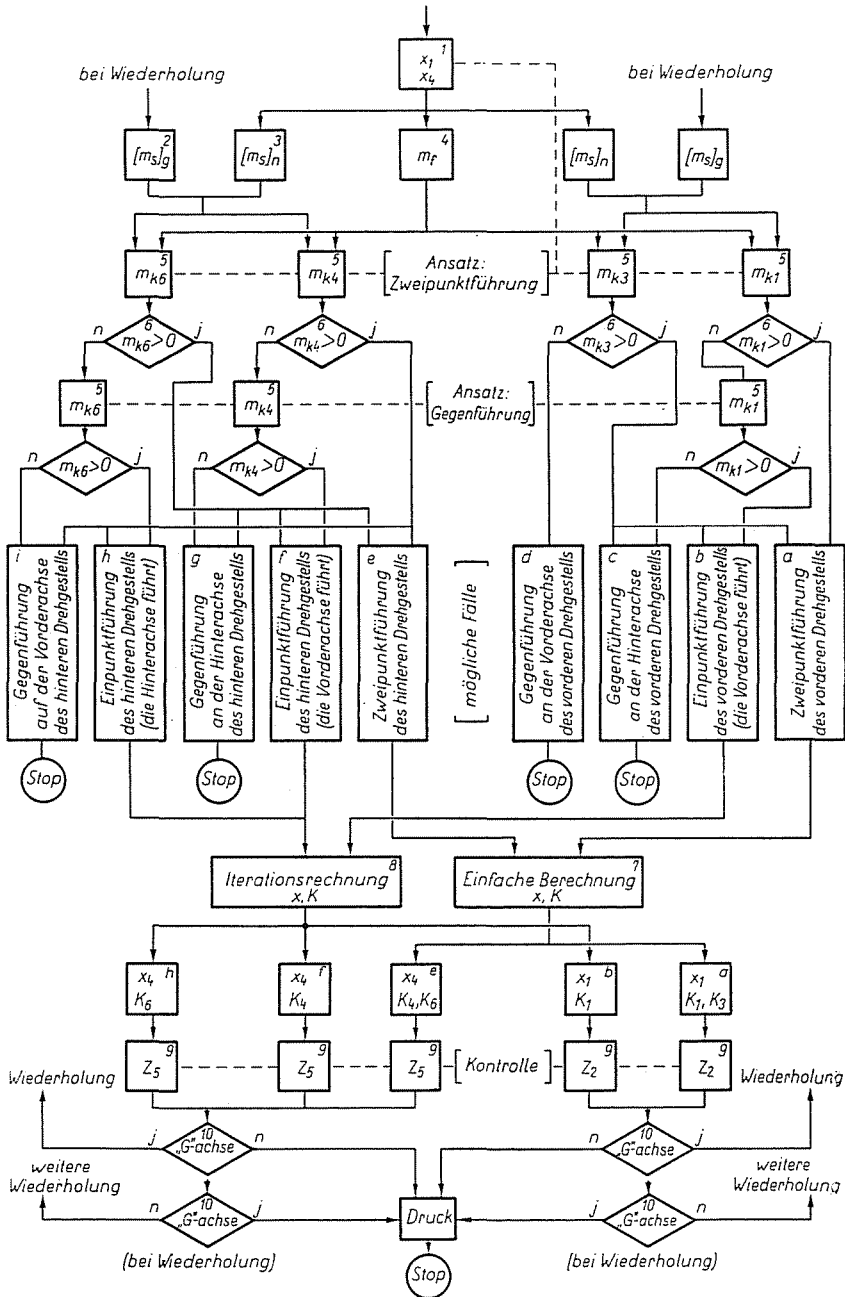
Bei Start des Programms wird vorausgesetzt, daß bei beiden Drehgestellen Zweipunktführung besteht (die erste und die letzte Achse führen), während die Mittelachse eine nicht arbeitende *Gölsdorf*achse ist. In dieser Annahme läßt sich der Ort des Reibungsmittelpunkts sogleich ermitteln und damit erhält man mit den Gleichungen (8) und (9) die Momente der Reibungskräfte (Kräftegruppe »a«) bei den führenden Achsen.

In der Annahme der Zweipunktführung sind die Lage des Drehgestells in der Kurve sowie die Auslenkwinkel der Drehgestelle gegeben, daher lassen sich auch die Momente der vom Lokomotivrahmen bzw. von dem anderen Drehgestell angreifenden Kräfte (Kräftegruppe »b«) ermitteln. Der nächste Schritt ist die Analyse des aus der Summierung der Momente der Kräftegruppen »a« und »b« erhaltenen Moments m_{k1} , die zeigt, wo führende Achsen in den Drehgestellen der Lokomotive liegen werden. Der Gedankengang wird an einem Beispiel dargelegt (Abb. 4). Ist die erste Achse des Drehgestells mit einem Moment mit positivem Vorzeichen ($m_{k1} > 0$) belastet, drückt dieses die hintere Achse an die Schiene an, daher wird die hintere Achse führen. Wirkt an der ersten Achse ein Moment negativen Vorzeichens, so verschiebt sich die hintere Achse des Drehgestells in der Spurrinne — die Führung beim inneren Schienenstrang hört auf — und die Achse gelangt bis zum äußeren Schienenstrang (damit entsteht eine Gegenführung) oder bleibt sie in Zwischenlage. Bei Gegenführung — wenn beide Achsen an den äußeren Schienenstrang ange-drückt sind — liegt der Reibungsmittelpunkt in $p/2$; in Kenntnis dieses Punktes lassen sich wiederum die Momente der Kräftegruppen a) und b) berechnen. Erhält man in diesem Falle noch immer ein resultierendes Moment mit negativem Vorzeichen ($m_{k1} > 0$ ist nicht erfüllt), so kann nur die auf den äußeren Schienenstrang wirkende, nach innen weisende Richtkraft diesem Moment das Gleichgewicht halten, die Gegenführung ist also nachgewiesen. Erhält man jedoch in der Annahme eines Reibungsmittelpunkts $p/2$ ein Moment mit positivem Vorzeichen ($m_{k1} > 0$ ist erfüllt), so gibt es eine Stelle, wo $m_{k1} = 0$. Dies entspricht der Einpunktführung und der dazu gehörende Reibungsmittelpunkt wird mit Iteration bestimmt.

In bezug auf das hintere Drehgestell wird der gleiche Gedankengang verfolgt. Ist auf der Mittelachse auch eine Axialverschiebung möglich, folgt auf die Berechnung eine Kontrolle, wobei nachgewiesen wird, ob die mittlere Achse eine arbeitende *Gölsdorf*achse ist. Bejahendenfalls wird die Berechnung wiederholt und die Momente m_s werden unter Berücksichtigung der *Gölsdorf*achse ermittelt.

Tabelle 2

Blockdiagramm für die rechen-technische Drehgestelluntersuchung einer C_0-C_0 -Lokomotive



Die beschriebene Methode läßt sich derart weiterentwickeln, daß mit ihrer Hilfe auch die dynamische Untersuchung durchgeführt wird. In diesem Falle werden zum Kräftesystem b) auch die bei der Kurvenfahrt entstehenden Massenkräfte hinzugezogen.

Das rechentechnische Verfahren kann auch beim Entwerfen von Lokomotivdrehgestellen sehr vorteilhaft eingesetzt werden; es ermöglicht, in kurzer Zeit über zahllose Varianten eine Übersicht zu gewinnen und die günstige Lösung auszuwählen.

Zusammenfassung

Im Beitrag werden die dynamische Untersuchung der modernen Lokomotivdrehgestelle und die Bestimmung der Kräfte bei Kurvenfahrt behandelt. Die dargelegte Methode baut auf aus dem Fachschrifttum bekannten Grundlagen auf, berücksichtigt jedoch die zweckmäßigen Forderungen der rechentechnischen Programmierung. Mit ihrer Hilfe kann das Kräftespiel einer großen Anzahl von Laufwerkvarianten in Kurven mit verschiedenen Halbmessern bewertet werden.

Literatur

1. SCHWANCK, U.: Professor Heumann und seine Veröffentlichungen, insbesondere zur Spurführung. *Glaser's Annalen* 92 (1968) Nr. 4.
2. HAJNÓCZY, L.: Die Fahrt der Lokomotiven in Gleisbogen (in ungarischer Sprache). Vortragsreihe, gehalten 1951/52 im Ingenieurweiterbildungsinstitut, Nr. 1679 (Manuskript).

Dr. György SOSTARICS, 1502 Budapest, Postfach 91, Ungarn