

Stand- und Entgleisungssicherheit bei Zahnradbahnen

Autor(en): **Borgeaud, G.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **87 (1969)**

Heft 5

PDF erstellt am: **17.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-70589>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Stand- und Entgleisungssicherheit bei Zahnradbahnen

DK 625.33:625.032.84

Von Dr. G. Borgeaud, dipl. Ing., Winterthur

Schluss von Seite 66

5. Die Raddrücke bei der Fahrt in der Kurve

Gegenüber der Fahrt in der Geraden treten zusätzlich die Trägheitskräfte \mathfrak{T} , die Querkomponenten K_q der Kupplungskräfte sowie die Reibungskräfte F zwischen Rad und Schiene und die Querkomponenten Z_q der Reibungskräfte zwischen Zahnstange und Zahnrad auf. Diese Reibungskräfte sind von besonderer Wichtigkeit und sollen daher zuerst näher betrachtet werden.

5.1 Die Reibungskraft $\mu_z Z$ am einzelnen Zahnrad und ihre Quer- und Senkrechtkomponenten

Im Abschnitt 1.5 wurde der durchschnittliche Auftrieb \bar{A} unter der stillschweigend gemachten Voraussetzung bestimmt, dass sich die Reibung μ_z allein in der senkrechten Längsebene auswirkt. Dies ist für die Fahrt in der Geraden auch richtig, weil dort keine Quergleitung an der Zahnstange auftritt. Bei Fahrt in der Kurve trifft dies nicht mehr zu. In jedem Zeitpunkt des Zahneingriffes teilt sich die Reibungskraft $\mu_z Z$ in eine Querkomponente $Z_q = (\mu_z Z)_q$ und in eine in der vertikalen Längsebene liegende Komponente $(\mu_z Z)_v$, die wir kurzerhand als Vertikalkomponente bezeichnen. Diese Komponenten stehen zueinander im gleichen Verhältnis wie die Komponenten w_q und w_v der Gleitgeschwindigkeit w und es gilt daher die Beziehung

$$(63) \quad \frac{(\mu_z Z)_q}{(\mu_z Z)_v} = \frac{w_q}{w_v}$$

Wird mit der Einführung der beiden Reibungskoeffizienten μ_{zv} und μ_{zq} die Zerlegung an μ_z selbst vorgenommen, dann ergeben sich diese Koeffizienten zu

$$\mu_{zv} = \mu_z \frac{w_v}{w} \quad \text{und} \quad \mu_{zq} = \mu_z \frac{w_q}{w}$$

Für die beiden Komponenten Z_v und Z_q der Reibungskraft $\mu_z Z$ gelten dann die Beziehungen

$$(64) \quad Z_v = \mu_{zv} |Z| \quad \text{und} \quad Z_q = \mu_{zq} |Z|$$

Da sich einerseits die Gleitgeschwindigkeit w_v in jedem Augenblick des Zahneingriffes ändert und andererseits w_q für jedes Triebzahnrad eine andere ist, würde es zu erheblichen Komplikationen führen, wollten man die Verhältnisse genau berücksichtigen. Für unsere weiteren Untersuchungen machen wir daher zunächst die Ansätze

$$(65) \quad \mu_{zq} = \mu_z \sin \Phi \quad \text{und} \quad \mu_{zv} = \mu_z \cos \Phi$$

und werden später den Einfluss von Φ auf die Radentlastungen studieren und abklären, wie er mit Rücksicht auf eine nicht allzu komplizierte Berechnung vernünftig berücksichtigt werden kann. Da jetzt nicht mehr μ_z , sondern μ_{zv} den Zahnauftrieb A bedingt, gilt für den durchschnittlichen Auftrieb \bar{A} nicht mehr Gl. (22), sondern die Beziehung

$$(66) \quad \bar{A} = |Z| \left[\operatorname{tg} \beta + \mu_{zv} \left(\frac{\bar{A}_h}{A_h} - \frac{\bar{A}_b}{A_b} \right) \right]$$

Die Querkraft Z_q wirkt nach aussen oder nach innen auf das Zahnrad, je nachdem es nach innen oder nach aussen gleitet. Gemäss Definition ist Z_q somit im ersten Falle positiv und im zweiten Falle negativ. Mit der Beziehung

$$(67) \quad Z_q = \varkappa_z \mu_{zq} |Z|$$

wird ihre Wirkungsrichtung durch den Faktor \varkappa_z festgelegt, auf dessen Wert +1 oder -1 später im Abschnitt 5.3.5 näher eingegangen wird.

5.2 Die Gleitung der Radsätze bei der Fahrt in der Kurve

Aus der Kinematik des Radsatzlaufes ergibt sich, dass jedes Rad des Fahrzeuges um ein Momentanzentrum M auf seiner Schiene gleitet, das sich bei Radreifen mit zylindrischen Laufflächen und gleichem Laufkreisdurchmesser auf dem sogenannten *Hauptradius* (Bild 20) befindet. Dieser ist parallel zur Radachse und wird daher durch das Lot vom Kurvenmittelpunkt auf die Fahrgestell-Längsachse festgelegt. Das Momentanzentrum M , auch *Reibungsmittelpunkt* oder *Gleipol* genannt, liegt auf dem Hauptradius in derjenigen vertikalen Längsebene, die den nur in der Querrichtung gleitenden Kreis des Radlaufzylinders enthält. Dieser besondere Laufkreis soll weiterhin *Rollkreis* genannt werden. Wie später gezeigt wird, ist er entweder kinematisch oder dynamisch festgelegt. Sind beide Räder des Radsatzes drehbar auf der Radsatzachse gelagert, dann erhält jedes ein eigenes Momentanzentrum M_a bzw. M_i mit der Ordinate η_a bzw. η_i gegenüber der betreffenden Lauffläche. Sind sie dagegen fest mit der Radsatzachse verbunden, dann erhalten sie ein gemeinsames Momentanzentrum M mit der Ordinate η gegenüber der Fahrzeuglängsachse.

Die momentane Gleitdrehung des betrachteten Rades um sein Momentanzentrum geschieht mit der Winkelgeschwindigkeit

$$\omega_0 = \frac{V}{R}$$

der Schwenkung der Fahrzeuglängsachse um das Kurvenzentrum. Die Gleitgeschwindigkeit w des Rades in seinem Aufstandspunkt A ergibt sich somit zu

$$w = \omega_0 q = q \frac{V}{R}$$

wobei der Gleitarm q grundsätzlich durch die Beziehung

$$(68) \quad q = \sqrt{(x - a_r)^2 + \bar{\eta}^2}$$

gegeben ist. Diese Gleitgeschwindigkeit zerlegt sich in Längs- und Querrichtung in die Komponenten

$$(69) \quad \begin{aligned} w_x &= -\frac{\bar{\eta}}{q} w = -\bar{\eta} \omega_0 \\ w_q &= -\frac{(x - a_r)}{q} w = -(x - a_r) \omega_0 \end{aligned}$$

Dabei gilt als positive Richtung, wenn w_x nach vorn und w_q nach aussen gerichtet sind.

5.3 Die Reibungskräfte F zwischen Rad und Schiene

Infolge der oben erwähnten Gleitung der Räder entsteht in jedem Aufstandspunkt A eine Reibungskraft

$$(70) \quad F = \mu_s R$$

die in entgegengesetzter Richtung wie die betreffende Gleitgeschwindigkeit w wirkt und sich daher gleich zerlegen lässt. Es gilt somit

$$(71) \quad \begin{aligned} U &= -F \frac{w_x}{w} = F \left(\frac{\bar{\eta}}{q} \right) \\ S &= -F \frac{w_q}{w} = F \frac{(x - a_r)}{q} \end{aligned}$$

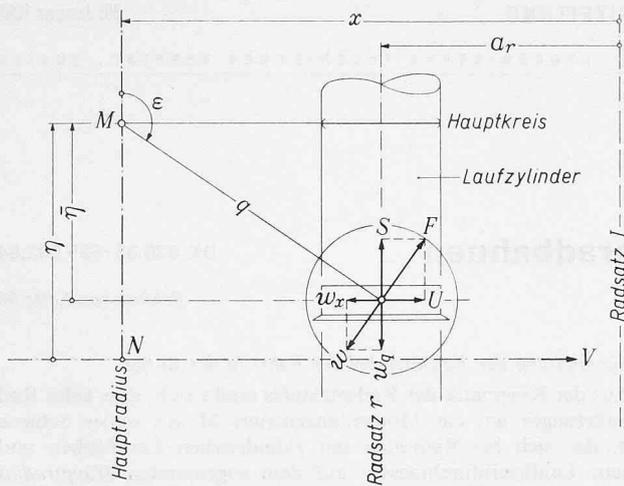


Bild 20. Gleitungs- und Reibungsverhältnisse am einzelnen Rad

Die Längskomponente übernimmt das Vorzeichen von $\bar{\eta}$ und ergibt sich somit als Zugkraft für ($\bar{\eta} > 0$) und als Bremskraft für ($\bar{\eta} < 0$). Desgleichen erhält die Querkomponente S das gleiche Vorzeichen wie ($x - a_r$). Im Falle ($x > a_r$) der vorradialen Radstellung wirkt sie auf das Rad somit nach aussen und im Falle ($x < a_r$) der hinterradialen Stellung nach innen.

Um die Lage des Hauptradius sowie die Richtkräfte P zu bestimmen, wird es später notwendig sein, die Momente $\sum \mathfrak{M}_r$ und $\sum \mathfrak{Z}_r$ zu bestimmen. Dabei sind \mathfrak{M}_r und \mathfrak{Z}_r durch das Moment der beiden Reibungskräfte F_a und F_i gegeben, das sich bei \mathfrak{M}_r in bezug auf den Fusspunkt N des Hauptradius und bei \mathfrak{Z}_r in bezug auf den Zentralpunkt O_I des vorlaufenden Radsatzes I ergibt. Die Anteile des Aussenrades an den Momenten \mathfrak{M}_r und \mathfrak{Z}_r ergeben sich zu

$$(72a) \quad \mathfrak{M}_{ar} = (x - a_r) S_{ar} - e U_{ar}$$

und

$$(73a) \quad \mathfrak{Z}_{ar} = -[a_r S_{ar} + e U_{ar}]$$

und diejenigen des Innenrades zu

$$(72i) \quad \mathfrak{M}_{ir} = (x - a_r) S_{ir} + e U_{ir}$$

$$(73i) \quad \mathfrak{Z}_{ir} = -[a_r S_{ir} - e U_{ir}].$$

Diese Anteile führen zu

$$(74) \quad \mathfrak{M}_r = (x - a_r) (S_a + S_i)_r + e (U_i - U_a)_r$$

$$(75) \quad \mathfrak{Z}_r = -a_r (S_a + S_i)_r + e (U_i - U_a)_r.$$

Der Wert von $\bar{\eta}$ ist kinematisch bedingt, wenn zum Beispiel bei gekoppeltem Zahnrad die Gleitgeschwindigkeit w_x erzwungen wird. Ist dies nicht der Fall, dann ist $\bar{\eta}$ dynamisch dadurch bedingt, dass eine bestimmte Zugkraft oder Bremskraft U entstehen muss. Es sind daher grundsätzlich die in folgenden Abschnitten behandelten Fälle zu unterscheiden.

5.3.1 Die Laufräder sind drehbar auf der Radsatzachse gelagert

Jedes Rad weist in diesem Falle ein eigenes Momentanzentrum M_a bzw. M_i auf, dessen Ordinate $\bar{\eta}_a$ bzw. $\bar{\eta}_i$ durch die auszuübende Längskraft U_a bzw. U_i festgelegt ist. Als solche kann praktisch nur eine Bremskraft auftreten, nämlich wenn die Räder zum Beispiel durch Klötze gebremst werden. Da diese beiden Längskräfte primär festgelegt sind, können die beiden Kräfte S_a und S_i unmittelbar daraus nach den Beziehungen

$$(76) \quad \begin{aligned} S_{ar} &= \sqrt{F_{ar}^2 - U_{ar}^2} \operatorname{sgn}(x - a_r) & \text{und} \\ S_{ir} &= \sqrt{F_{ir}^2 - U_{ir}^2} \operatorname{sgn}(x - a_r) \end{aligned}$$

ermittelt werden, so dass sich die Ermittlung der $\bar{\eta}$ -Werte erübrigt.

Es kann angenommen werden, dass bei dem hier allein in Frage kommenden Bremsvorgang beiden Rädern die gleiche Umfangskraft U aufgezwungen wird. In diesem Falle vereinfachen sich beide Gleichungen (74) und (75) zu

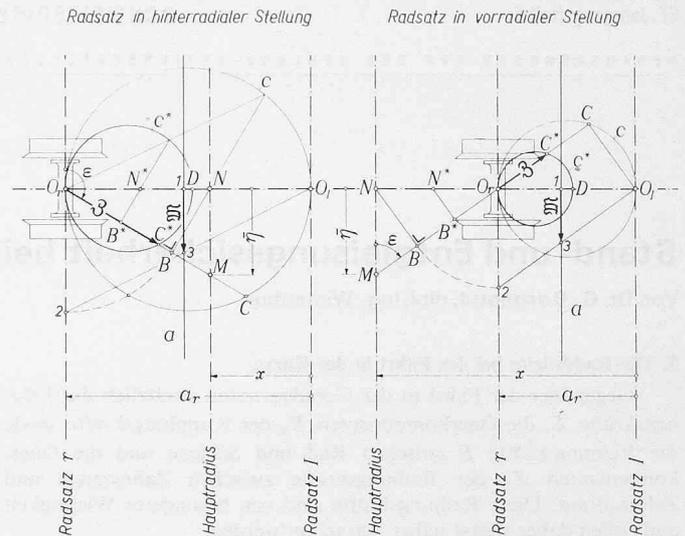


Bild 21. Geometrische Ermittlung der Momente \mathfrak{M}_r , \mathfrak{Z}_r im Falle drehbar auf der Achse gelagerter Räder

$$(77) \quad \mathfrak{M}_r = (x - a_r) (S_a + S_i)_r \quad \text{und} \quad \mathfrak{Z}_r = -a_r (S_a + S_i)_r.$$

Werden ferner zur Vereinfachung der Untersuchung gleiche Rad-drücke angenommen, dann weisen beide Räder die gleiche Kraft S auf, womit sich die Gleichungen (77) auch in der Form

$$(78) \quad \mathfrak{M}_r = (x - a_r) \left(\frac{S_r}{F_r} \right) F_r \quad \text{und} \quad \mathfrak{Z}_r = -a_r \left(\frac{S_r}{F_r} \right) F_r$$

schreiben lassen. Diese beiden Beziehungen führen zu der in Bild 21 angegebenen graphischen Ermittlung von \mathfrak{M}_r und \mathfrak{Z}_r . Es ist auf Grund der Gleichung (71) leicht zu erkennen, dass $a_r S_r/F_r$ durch die Strecke $\overline{O_r C}$ und $(x - a_r) S_r/F_r$ durch die Strecke $\overline{O_r B}$ gegeben ist. Somit wäre \mathfrak{Z}_r unmittelbar durch die von der Gleitarmgeraden bestimmten Sekante $\overline{O_r C}$ des Kreises c und \mathfrak{M}_r durch die Strecke $\overline{O_r B}$ bestimmt, wenn der für die Momente gewählte Massstab derart wäre, dass die Strecke $\overline{O_r O_I}$ unmittelbar dem Moment $F_r \cdot \overline{O_r O_I}$ entspricht. Es ist aber angebracht, einen kleineren und für alle Radsätze gleichen Massstab zu wählen. Der Kreis c muss daher auf den Kreis c^* mit dem Durchmesser

$$\overline{O_r D} \sim \overline{O_r O_I} \cdot F_r$$

reduziert werden. \mathfrak{Z}_r ist in diesem Falle durch die Sekante $\overline{O_r C^*}$ gegeben. Wird im gleichen Verhältnis die Strecke $\overline{O_r N}$ zu $\overline{O_r N^*}$ reduziert und vom Punkt N^* aus die Senkrechte zum Gleitarm gezogen, dann ist \mathfrak{M}_r durch die Strecke $\overline{O_r B^*}$ gegeben. \mathfrak{M}_r kann aber einfacher wie folgt ermittelt werden:

Es wird auf der Achse $O_r O_I$ der Punkt 1 mit dem Abstand

$$1 \overline{O_r} = \overline{D O_I}$$

bestimmt und die senkrechte Hilfsgerade a durch diesen Punkt gezogen. Die Lage dieser Geraden hängt von derjenigen des Momentanzentrums nicht ab. Mit $\overline{O_r B}$ als Radius wird der Kreis um O_r gezeichnet, der die Radsatzachse im Punkt 2 schneidet. Die Gerade $2-3$ schneidet ihrerseits die Hilfsgerade a im Punkt 3. \mathfrak{M} ist dann durch die Strecke $1-3$ gegeben.

Soll die Untersuchung mit Hilfe eines Computers durchgeführt werden, dann sind hierfür grundsätzlich die Gleichungen (76), (74) und (75) massgebend.

5.3.2 Die Laufräder sind fest mit der Achse verbunden, das Zahnrad aber unverkuppelt darauf gelagert

Die Laufräder und ihre Achse setzen sich in diesem Falle zu einem einzigen Körper zusammen; beide Räder weisen ein gemeinsames Momentanzentrum M auf, dessen Ordinate η durch die allfällig auszuübende Zug- oder Bremskraft U_r dadurch festgelegt ist, dass sie der Bedingung

$$(79) \quad U_{ar}(\eta) + U_{ir}(\eta) = U_r$$

zu genügen hat.

Beim Aussenrad ist $\bar{\eta}$ durch $(\eta - e)$ und beim Innenrad durch $(\eta + e)$ gegeben. Damit wird Gl. (68) zu

$$(80) \quad \begin{aligned} q_a &= \sqrt{(x - a_r)^2 + (\eta - e)^2} && \text{bzw.} \\ q_i &= \sqrt{(x - a_r)^2 + (\eta + e)^2} \end{aligned}$$

Das Einsetzen von Gl. (80) in die erste der beiden Gleichungen (71) führt zu den Beziehungen

$$(81) \quad \begin{aligned} U_a &= F_a \frac{(\eta - e)}{\sqrt{(x - a_r)^2 + (\eta - e)^2}} && \text{bzw.} \\ U_i &= F_i \frac{(\eta + e)}{\sqrt{(x - a_r)^2 + (\eta + e)^2}} \end{aligned}$$

die sich nach Einführung der Hilfsgrössen

$$(82) \quad \begin{aligned} \varphi_a &= \frac{(\eta - e)}{\sqrt{(x - a_r)^2 + (\eta - e)^2}} && \text{und} \\ \varphi_i &= \frac{(\eta + e)}{\sqrt{(x - a_r)^2 + (\eta + e)^2}} \end{aligned}$$

zu

$$(83) \quad U_a = \varphi_a F_a \quad \text{und} \quad U_i = \varphi_i F_i$$

vereinfachen. Zur Ermittlung desjenigen η -Wertes, der die Bedingung (79) erfüllt, ist es vorteilhafter, mit den Hilfsgrössen

$$(84) \quad \varphi_m = \frac{\varphi_a + \varphi_i}{2} \quad \text{und} \quad \Delta \varphi = \frac{\varphi_i - \varphi_a}{2}$$

statt unmittelbar mit φ_a und φ_i zu operieren. Die absoluten Werte $|\varphi_m|$ und $|\Delta \varphi|$ dieser Hilfsgrössen sind für die bei Zahnradbahnen in Frage kommenden Bereiche 0 bis 6,8 für $|(x - a_r)/e|$ und 0 bis 22 für η/e in Zahlentafeln 1a bis 1c angegeben. Dabei sind nur diejenigen Werte aufgeführt, die für φ_a bzw. φ_i einen kleineren Wert als 0,95 ergeben. Ferner sind die $(x - a_r)/e$ - und η/e -Schritte genügend klein gewählt, um die Ermittlung von φ_m und $\Delta \varphi$ mit genügender Genauigkeit auf Grund einer linearen Interpolation zu gestatten. Bezüglich des Vorzeichens bleibt $\Delta \varphi$ stets positiv, während φ_m das Vorzeichen von η übernimmt. Es gilt somit

$$(85) \quad \Delta \varphi = + |\Delta \varphi| \quad \text{und} \quad \varphi_m = |\varphi_m| \operatorname{sgn} \eta.$$

Von diesen Werten aus ergeben sich φ_a und φ_i zu

$$(86) \quad \varphi_a = \varphi_m - \Delta \varphi \quad \text{und} \quad \varphi_i = \varphi_m + \Delta \varphi.$$

Diese Werte führen gemäss Gl. (83) zu denjenigen von U_a und U_i , aus welchen sich schliesslich die Querkräfte S_a und S_i entsprechend den Beziehungen (76) ermitteln lassen. Mit den Ansätzen (83) schreibt sich die Bedingung (79) auch

$$(\varphi_a F_a)_r + (\varphi_i F_i)_r = U_r.$$

Nach Division aller Glieder dieser Gleichung mit $F_r = (F_a + F_i)_r$ und nach Einführung von Gl. (84) wird sie zu

$$(87) \quad \varphi_m - \left(\frac{F_a - F_i}{F} \right) \Delta \varphi = \frac{U}{F}.$$

Muss nun für einen gegebenen Wert von $(x - a_r)/e$ die zu U_r führende Ordinate η bestimmt werden, so ist zunächst mittels der Tabelle 2 zu ermitteln, in welchem Bereich η liegen muss. Treten zum Beispiel beim Radsatz die Reibungskräfte $F_a = 3000$ kp, $F_i = 1500$ kp auf und muss eine Bremskraft $U_r = -3000$ kp entwickelt werden, dann führt Gl. (87) zur Bedingung

$$\varphi_m - \frac{1500}{4500} \Delta \varphi = -\frac{3000}{4500} \quad \text{bzw.} \quad \varphi_m - 0,3333 \Delta \varphi = -0,6667$$

die für alle in Frage kommenden x -Werte gültig bleibt.

Für $(x - a_r)/e = 3$ zum Beispiel führt zunächst eine grobe Schätzung zu folgenden Ergebnissen:

$$\begin{aligned} \eta/e &= -1 & -2 & -3 \\ \varphi_m &\cong -0,280 & -0,51 & -0,68 \\ -1/3 \Delta \varphi &= -0,09 & -0,06 & -0,04 \\ \varphi_m - 1/3 \Delta \varphi &= -0,37 & -0,57 & -0,72 \text{ (Sollwert } -0,6667). \end{aligned}$$

Daraus folgt, dass η/e zwischen -2 und -3 approximativ bei

$$\eta/e \cong - \left[2 + (3 - 2) \frac{0,6667 - 0,57}{0,72 - 0,57} \right] = -2,67$$

liegen sollte. Der genauere Schritt der Untersuchung führt zu

$$\begin{aligned} \eta/e &= -2,4 & -2,6 & -2,8 \\ \varphi_m &= -0,5864 & -0,6194 & -0,6496 \\ -1/3 \Delta \varphi &= -0,0545 & -0,0496 & -0,0451 \\ \varphi_m - 1/3 \Delta \varphi &= -0,6409 & -0,6690 & -0,6947. \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich der zwischen $-2,4$ und $-2,6$ liegende genaue Wert von η/e zu

$$\begin{aligned} \eta/e &= - \left[2,4 + 0,2 \frac{0,6667 - 0,6409}{0,6690 - 0,6409} \right] = \\ &= - [2,4 + 0,2 \cdot 0,918] = -2,5836. \end{aligned}$$

Dementsprechend werden φ_m und $\Delta \varphi$ zu

$$\begin{aligned} \varphi_m &= - [0,5864 + (0,6194 - 0,5864) 0,918] = -0,6167 \\ \Delta \varphi &= [0,1635 - (0,1653 - 0,1488) 0,918] = 0,1500. \end{aligned}$$

Daraus folgt

$$\varphi_a = \varphi_m - \Delta \varphi = -0,7667 \quad \text{und} \quad \varphi_i = \varphi_m + \Delta \varphi = -0,4667$$

was schliesslich gemäss Gl. (86) zu

$$\begin{aligned} U_a &= -0,7667 \cdot 3000 = -2300 \text{ kp} \\ U_i &= -0,4667 \cdot 1500 = -700 \text{ kp} \end{aligned}$$

führt.

Müssen die Verhältnisse für einen $(x - a_r)/e$ -Wert untersucht werden, der zwischen zwei Tabellenwerten liegt, dann ist es am einfachsten, die U_a - und U_i -Werte für jeden dieser beiden $(x - a_r)/e$ -Tabellenwerte nach obigen Ausführungen zu bestimmen und daraus die gesuchten U_a - und U_i -Werte durch lineare Interpolation zu ermitteln.

Auf Grund der beiden U_a - und U_i -Werte können dann S_a und S_i nach Gl. (76) und schliesslich \mathfrak{M}_r und \mathfrak{Z}_r nach Gl. (74) und (75) berechnet werden.

Wird im Falle ($U = 0$) die Untersuchung zur Vereinfachung auf Grund gleicher Raddrücke durchgeführt, dann wird durch diese Voraussetzung der Reibungsmittelpunkt auf die Längsachse des Radsatzes verlegt. Er fällt somit mit dem Punkt N zusammen. Dadurch ergibt sich die gleiche Gleitarmlänge für beide Räder, was zu $S_a = S_i$ und $U_a = -U_i$ führt. Beide Räder liefern somit den gleichen Anteil an \mathfrak{M}_r einerseits und an \mathfrak{Z}_r andererseits. Zur graphischen Ermittlung dieser beiden Grössen genügt es daher, die Untersuchung bei einem Rad durchzuführen, wie dies in Bild 22 gezeigt ist. Wie früher ist \mathfrak{Z}_r unmittelbar durch den Hilfskreis c^* gegeben, dessen Durchmesser AD jetzt auf der Geraden AO_I liegt und die Grösse

$$\overline{AD} \sim \overline{AO_I} \cdot F_r$$

aufweist. Das Moment \mathfrak{M}_r ergibt sich hier einfacher mit Hilfe der von der Lage des Momentanzentrums M unabhängigen Geraden g , indem es jeweils durch die Strecke $\overline{M-3}$ gegeben ist, die zwischen M und dem Schnittpunkt 3 der Geraden g mit der durch M gezogenen Senkrechten zum Gleitarm liegt. Die Gerade g selbst ist durch ihre beiden Punkte 1 und 2 festgelegt. Dabei befindet sich der Punkt 1 auf der durch O_I gehenden Senkrechten zur Geraden AO_I und liegt im Abstande

$$\overline{O_I-1} = \overline{AD}$$

vom Punkt O_I . Der Punkt 2 liegt auf der Längsachse im Abstand

$$\overline{O_r - 2} = \overline{O_r A} \frac{\overline{AD}}{\overline{AO_r}}$$

vom Punkt O_r .

Obwohl die Tabellen 2a bis 2c eine wesentliche Hilfe für die Ermittlung von \mathfrak{M}_r und \mathfrak{Z}_r bedeuten, bleibt diese immer noch zeitaufwendend. Viel rascher und einfacher wäre natürlich, sie mittels Computer durchzuführen. In diesem Fall muss zunächst η auf Grund der sich aus Gl. (82) und (83) ergebenden Beziehung

$$(88) \quad F_{ar} \frac{(\eta_r - e)}{\sqrt{(x - a_r)^2 + (\eta_r - e)^2}} + F_{ir} \frac{(\eta_r + e)}{\sqrt{(x - a_r)^2 + (\eta_r + e)^2}} = U_r$$

auf dem Iterationsweg ermittelt werden⁵⁾. Dann erfolgt die Bestimmung von U_a , U_i , S_a , S_i , \mathfrak{M}_r und \mathfrak{Z}_r nach Gleichungen (81), (76) und (77).

Im speziellen Falle ($x = a_r$) wird η aus Gl. (88) ausgeschaltet und kann daher nicht von dieser Gleichung aus ermittelt werden. In diesem Falle ergeben sich die Verhältnisse nach Tabelle 2.

5.3.3 Die Laufräder sind fest mit der Achse verbunden und das Zahnrad mit der Achse verkuppelt

Die Zahnradübersetzungsverhältnisse werden normalerweise derart gewählt, dass die Räder im halbabgenutzten Zustand der Bandagen die gleiche Umfangsgeschwindigkeit wie das Trieb- oder Bremszahnrad aufweisen. Die Räder laufen somit bei neuen Bandagen schneller und bei abgenutzten Bandagen langsamer als das Zahnrad und müssen daher entsprechend in Längsrichtung gleiten. Die Ordinate η des beiden Rädern gemeinsamen Momentanzentrums M ist durch denjenigen Kreis des Laufzylinders gegeben, der die gleiche Umfangsgeschwindigkeit wie das verkuppelte Zahnrad hat (vgl. Bild 23). Sie wird somit durch die Beziehung

$$\frac{n_z D_z}{2R} = \frac{n_r D_r}{2(R + \eta)}$$

festgelegt und ergibt sich daher zu

$$(89) \quad \eta = R \frac{n_r D_r - n_z D_z}{n_z D_z}$$

⁵⁾ Für die Iteration kann der erste Schritt auf Grund des durch die Beziehung

$$\eta \cong e \frac{F(F_a - F_i)}{F^2 - U^2} + \frac{U}{F^2 - U^2} \sqrt{(F_a - F_i)^2 e^2 + (F^2 - U^2)(x - a_r)^2}$$

gegebenen approximativen Wert von η vorgenommen werden.

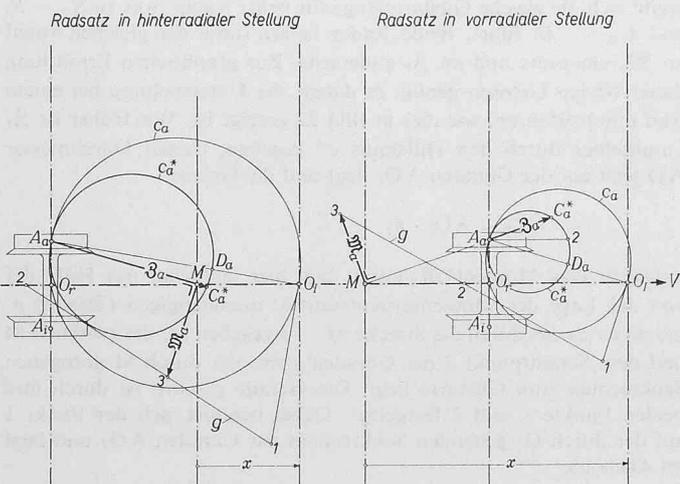


Bild 22. Geometrische Ermittlung der Momente \mathfrak{M}_r und \mathfrak{Z}_r im Falle fest mit der Achse verbundener Räder bei $\eta = 0$

Tabelle 2. Verhältnisse bei $x = a_r$

	$U > (F_i - F_a)$	$U = (F_i - F_a)$	$U < (F_i - F_a)$
η	$+e$	$-e$ bis $+e$	$-e$
U_i	F_i	F_i	$U + F_a$
U_a	$U - F_i$	$-F_a$	$-F_a$
S_i	0	0	$(-1 \text{ bis } +1) \sqrt{F_i^2 - U_i^2}$
S_a	$(-1 \text{ bis } +1) \sqrt{F_a^2 - U_a^2}$	0	0

Ist das Zahnrad fest auf der Radsatzachse befestigt, dann sind n_z und n_r gleich, so dass sich η in diesem Falle einfacher zu

$$(90) \quad \eta = R \frac{D_r - D_z}{D_z}$$

ergibt. Da D_r praktisch zwischen $(D_z n_z / n_r + 12 \text{ mm})$ und $(D_z n_z / n_r - 12 \text{ mm})$ gehalten wird, nimmt η einen Wert ein, der zum Beispiel für $D_z = 600 \text{ mm}$ und $R = 80 \text{ mm}$ zwischen $+1,6$ und $-1,6 \text{ mm}$ betragen kann.

Die Ermittlung von \mathfrak{M}_r , \mathfrak{Z}_r und S_r geschieht in gleicher Weise wie im Abschnitt 5.3.2, jedoch mit dem Unterschied, dass η unmittelbar durch Gl. (89) festgelegt und nicht an Gl. (88) gebunden ist. Mit seinen Laufrädern liefert der Radsatz jedenfalls die dem festgelegten η entsprechende und sich aus den beiden Gleichungen (81) ergebende Längskräfte U .

5.3.4 Bemerkungen

Die später aufgestellte Gleichung (102) zeigt, dass die Richtkraft P_r der vorderen führenden Achse mit dem Moment \mathfrak{M}_r zunimmt. Aus den Bildern 21 und 22 kann andererseits erkannt werden, dass dort \mathfrak{M}_r für ($\eta = 0$) maximal wird. Unter der für diese Bilder geltenden Voraussetzung gleicher Raddrücke führt dieser Wert von η zu $U_r = 0$. Bei gleichen Raddrücken führt somit der Zustand ($U_r = 0$) zur grössten Richtkraft P_r und daher zur grössten Entlastung des betreffenden Rades. Bei ungleichen Raddrücken dürfte dies auch ungefähr der Fall sein, obwohl es nicht ohne weiteres nachgewiesen werden kann. Da der Fall ($U_r = 0$) bei jedem Fahrzeug auftreten kann, ist es angezeigt, ihn bei den weiteren Untersuchungen vorzusetzen, was auch zu einer gewissen Vereinfachung der Berechnung führt. Eine Ausnahme ergibt sich allerdings, wenn beim betrachteten Vorgang die Laufräder einen Anteil an der Zug- oder Bremskraft liefern. In diesem Fall ist es angezeigt, die zugehörige Kraft U_r zu berücksichtigen.

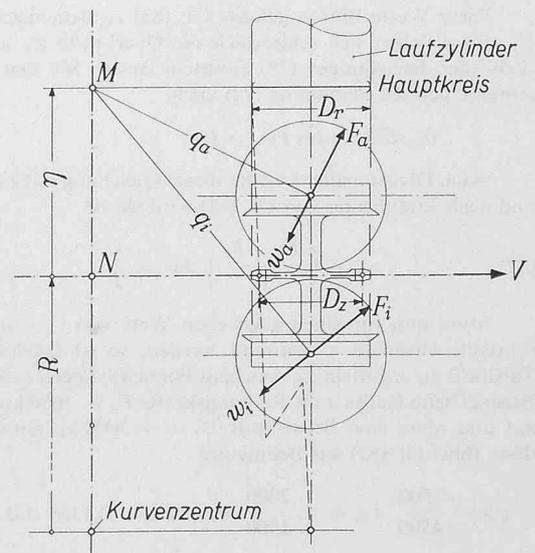


Bild 23. Lage des Momentanzentrums des Radsatzes bei verkuppeltem Zahnrad

Tabelle 3. Ummumerierung der Radsätze und Zahnräder

	Talfahrt ($\psi = -1$)	Bergfahrt ($\psi = +1$)
Numerierung in Bergrichtung	1 → 2	1 → 2
Numerierung in Fahrtrichtung	I → II	II ← I

5.3.5 Die Richtung der Quergleitung der Zahnräder

Das Momentanzentrum des Zahnrades befindet sich stets im Fusspunkt N des Hauptradius auf der Fahrzeughängsachse, weil in der Gleisebene die Gleitung des Zahnrades nur in Querrichtung stattfinden kann. Das Zahnrad gleitet somit bei vorradialer Stellung nach innen und bei hinterradialer Stellung nach aussen. Der im Abschnitt 5.1 eingeführte Faktor \varkappa_z weist somit den Wert +1 im ersten Falle und -1 im zweiten auf.

5.3.6 Ummumerierung der Radsätze und Zahnräder

Wie dies bei den Bezeichnungen dargelegt wurde, ist es notwendig, die vorlaufende Achse als erste zu bezeichnen, wobei, einer klaren Unterscheidung wegen, die Numerierung mit römischen Zahlen I, II usw. festgelegt wurde. Es ist somit eine Ummumerierung nach Tabelle 3 notwendig.

Jede bisher mit den Indizes 1, 2... bezeichnete Grösse muss jetzt entsprechend Tabelle 3 neue Indizes erhalten. In dem hier betrachteten Fall des zweiachsigen Fahrgestelles ergeben sich somit die für die Untersuchung der Fahrt in der Kurve massgebenden Grössen aus den bisherigen nach den Tabellen 4 und 5.

Nach den im Abschnitt «Bezeichnungen» gemachten Voraussetzungen befindet sich das Kurvenzentrum bei Bergwärtsbetrachtung rechts vom Fahrzeug. Die linke Fahrzeugseite befindet sich somit auf der Aussenseite und die rechte auf der Innenseite der Kurve, so dass die Indizierungen a und L bzw. i und R einander entsprechen.

5.4 Ermittlung der Lage des Hauptradius und der einzelnen Richtkräfte

Obwohl die Raddrücke \mathfrak{R}_L und \mathfrak{R}_R infolge des Spurkranzauftriebes V anders als R_L und R_R ausfallen, werden bei den weiteren Untersuchungen letztere zugrunde gelegt. Diese übliche Voraussetzung vermeidet erhebliche Komplikationen, die nicht zu sehr abweichenden Resultaten führen. Zur Bestimmung dieser Raddrücke R muss der Wert von H_r in Gl. (57) eingesetzt werden. Diese Lagerquerkraft setzt sich aus H_{Tr} (Gl. 44) und einem Anteil ΔH zusammen, der durch das Moment $e \sum (U_i - U_a)$ der Längskräfte bedingt ist und sich beim zweiachsigen Fahrgestell zu

$$(91) \quad \left. \begin{aligned} \Delta H_I &= + \\ \Delta H_{II} &= - \end{aligned} \right\} \frac{e}{a} [(U_i - U_a)_I + (U_i - U_a)_{II}]$$

ergibt. Diese Längskräfte U hängen von η und x ab. Der Anteil ΔH kann daher nicht von Anfang an bestimmt werden, so dass es notwendig ist, im Iterationsverfahren vorzugehen. Im ersten Schritt ist H_r in Gl. (57) mit dem Wert von H_{Tr} einzusetzen und im nächsten Schritt mit demjenigen, der sich nach Gl. (104) ergibt.

Die Lage des Hauptradius kann durch seinen Abstand x von der vorlaufenden Achse festgehalten werden. Sie ist dadurch bedingt, dass alle in der Horizontalebene auf das gesamthaft betrachtete Fahrge-

stell wirkenden Kräfte im Gleichgewicht sein müssen. Dabei hängen alle zwischen Rad und Schiene und zwischen Zahnrad und Zahnstange entstehenden Reibungskräfte in ihren Richtungen von x ab. Mit Ausnahme der Richtkräfte P sind alle übrigen Kräfte als gegeben zu betrachten. Alle diese Kräfte sind in Bild 24 zusammengestellt. Dies sind:

- die einzelnen Querkräfte T_g . Zu diesen gehören u. a. die einzelnen Gewichtskomponenten $G \sin \delta$, die Trägheitskräfte \mathfrak{T} , die bei den Zahnrädern z entstehenden Reibungskräfte Z_{qz} und die gegebenenfalls vom Kasten ausgeübte Querkraft C_q .
- die Richtkraft P_{II} der gegebenenfalls innen anlaufenden Achse II. Weil sie nach aussen wirkt, ist sie wie die Kräfte T als positiv zu betrachten.
- das im Falle eines Drehgestellfahrzeuges möglicherweise vom Kasten ausgeübte Moment M' bzw. M''
- die bei den einzelnen Radsätzen r entstehenden Querkräfte S_r und Momente \mathfrak{M}_r .

Die Gleichgewichtsbedingungen (\sum Querkräfte = 0 und \sum Momente um N = 0) schreiben sich

$$(92) \quad \sum S_r + \sum T_g + P_{II} = P_I$$

$$(93) \quad \sum \mathfrak{M}_r + \sum (x - t) T_g + (x - a) P_{II} + M = x P_I$$

Das Einsetzen von Gl. (92) in Gl. (93) führt zu

$$\sum \mathfrak{M}_r + \sum (x - t) T_g + (x - a) P_{II} + M = x [\sum S_r + \sum T_g + P_{II}]$$

woraus sich nach Umgruppierung die Beziehung

$$(94) \quad \sum \mathfrak{M}_r - x \sum S_r = \sum t T_g - M + a P_{II}$$

ergibt, die sich mit den Ansätzen

$$(95) \quad \mathfrak{Z} = \sum \mathfrak{M}_r - x \sum S_r$$

$$(96) \quad M = \sum t T_g - M$$

zu

$$(97) \quad \mathfrak{Z} = M + a P_{II}$$

vereinfacht.

Das Moment \mathfrak{Z} ist allein durch die Reibungskräfte zwischen Rad und Schiene gegeben und hängt daher von x , d. h. von der Lage des Hauptradius ab. Das Glied D des Ausdruckes für M ergibt sich hingegen aus den äusseren Einwirkungen und ist daher von x unabhängig. Im Glied $\sum t T_g$ ist der Anteil $t_z v_z Z_{qz}$ des einzelnen Zahnrades z betragsmässig ebenfalls von x unabhängig, wohl aber in seinem Vorzeichen. Dieses wird durch den Faktor \varkappa festgelegt, der im Abschnitt 5.5 näher betrachtet wird.

Die Richtkraft P_{II} tritt nicht auf, wenn der aus der Beziehung

$$(98) \quad \mathfrak{Z}(x) = M$$

ermittelte Wert von x kleiner als der Wert

$$(99) \quad \bar{x} = \frac{a}{2} + \frac{sR}{a}$$

der Spiessgangstellung ausfällt.

Tabelle 4. Änderung der Indices für die nach Fahrtrichtung bezeichneten Kräfte

	H_I	H_{II}	F_I	F_{II}	U_I	U_{II}	K_{qI}	K_{qII}	Z_{qI}	Z_{qII}
Talfahrt	H_1	H_2	F_1	F_2	U_1	U_2	K_{uq}	K_{oq}	Z_{q1}	Z_{q2}
Bergfahrt	H_2	H_1	F_2	F_1	U_2	U_1	K_{oq}	K_{uq}	Z_{q2}	Z_{q1}

Tabelle 5. Änderung der Indices für die nach Fahrtrichtung bezeichneten Längen und Faktoren

	t_w	t_{KI}	t_{KII}	t'_K	t''_K	t_{zI}	t_{zII}	t_c	t_g	\varkappa_I	\varkappa_{II}
Talfahrt	w_1	- k_u	$(k_o + a)$	- k'	$a + k''$	z_1	z_2	c_1	g_1	\varkappa_1	\varkappa_2
Bergfahrt	w_2	- k_o	$(k_u + a)$	$a + k'$	- k''	$(a - z_2)$	$(a - z_1)$	c_2	g_2	\varkappa_2	\varkappa_1

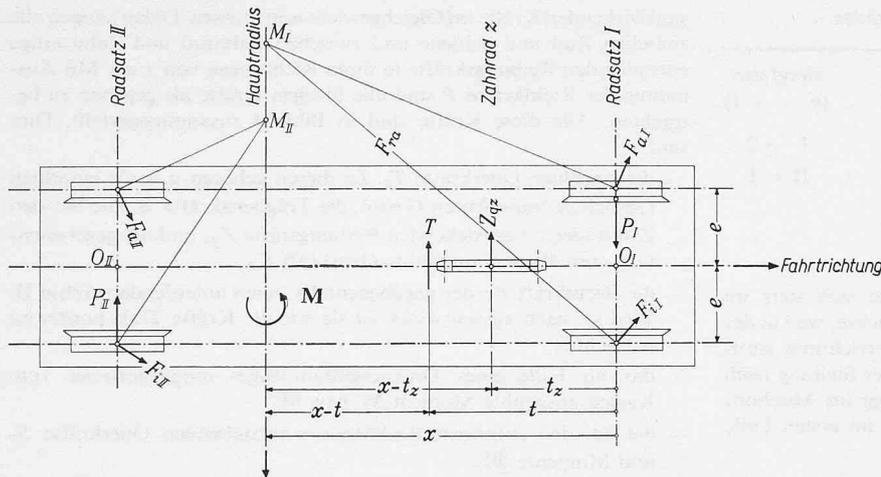


Bild 24. Zusammenstellung der parallel zur Gleisebene auf das Fahrgestell wirkenden Kräfte

Um den Wert von x zu finden, der sich bei freier Einstellung der hinteren Achse entsprechend Gl. (98) ergibt, wird einerseits \mathfrak{B} als Summe der einzelnen gemäss der in den Abschnitten 5.3.1 bis 5.3.5 gefundenen Grössen \mathfrak{B}_r ermittelt und die entsprechende Kurve $\mathfrak{B} = f(x)$ gezogen (Bild 25). Weiter wird das Seilpolygon der äusseren Kräfte T_g konstruiert, dessen letzter Strahl m mit seinem bei $x = 0$ liegenden Punkt A den Wert von M bestimmt. Die Lösung ist dann durch denjenigen Punkt B der \mathfrak{B} -Kurve gegeben, der sich auf gleicher Höhe wie der Punkt A befindet und sich daher als Schnittpunkt der \mathfrak{B} -Kurve mit der Horizontalen durch A ergibt. Der entsprechende x -Wert ist massgebend, wenn er kleiner als \bar{x} ausfällt. Wenn sich nach Gl. (98) x grösser als \bar{x} ergibt, dann bleibt dieser massgebend, da x infolge der Spiessgangstellung nicht grösser sein kann. In diesem Fall ergibt sich P_{II} aus Gl. (97) zu

$$(100) \quad P_{II} = \frac{\mathfrak{B}(\bar{x}) - M}{a}$$

Ist der Wert von x auf diese Weise bestimmt worden, dann lässt sich die entsprechende Einstellung des Fahrgestelles im Gleis ohne weiteres ermitteln, da seine Längsachse bei x tangential zum Gleisbogen liegen muss. Dies ist in Bild 25 oben nach dem Vogelverfahren gezeigt, wobei die Lage der Fahrgestell-Längsachse unmittelbar durch die Gerade EF gegeben ist, die den Punkt F mit dem bei x liegenden Punkt E auf der Ellipse mit der doppelten Ordinate verbindet⁶⁾.

Fasst man $\sum \mathfrak{M}_r$ zu \mathfrak{M} zusammen, dann ergibt sich unmittelbar aus Gl. (95) und (97)

$$(101) \quad \sum S_r = \frac{\mathfrak{M} - (M + a P_{II})}{x}$$

womit Gl. (92) zu

$$(102) \quad P_I = \frac{\mathfrak{M} - (M + a P_{II})}{x} + (\sum T_g + P_{II})$$

wird. Trägt man im Diagramm von Bild 25 ebenfalls die \mathfrak{M} -Kurve auf, dann zeigt Gl. (101), dass im Falle ($x < \bar{x}$) bzw. ($P_{II} = 0$) die Summe $\sum S_r$ durch den Tangentenwinkel zwischen der horizontalen Geraden AB und der Geraden gegeben ist, die den Punkt A mit dem sich bei x ergebenden Punkt C der \mathfrak{M} -Kurve verbindet. Andererseits führt das in Gl. (102) eingeklammerte letzte Glied zum Tangentenwinkel zwischen der Horizontalen AB und dem letzten Strahl m des Seilpolygons der Kräfte T_g . Daraus folgt, dass bei $P_{II} = 0$ die Richtung P_I durch den Tangentenwinkel zwischen beiden Geraden AC und m gegeben ist.

In dem durch $P_{II} \neq 0$ gekennzeichneten Fall ($x = \bar{x}$) ist die Lage des Punktes A durch die Ordinate von $\mathfrak{B}(\bar{x})$ bestimmt. Der Ausdruck $(M + a P_{II})$ muss gemäss Gl. (97) zur gleichen Ordinate führen (siehe

^{c)} Streng genommen gilt dieses Verfahren nur für die quadratische Parabel. Der uns interessierende Teil der Spurellipse deckt sich aber praktisch genügend genau mit einer solchen Parabel.

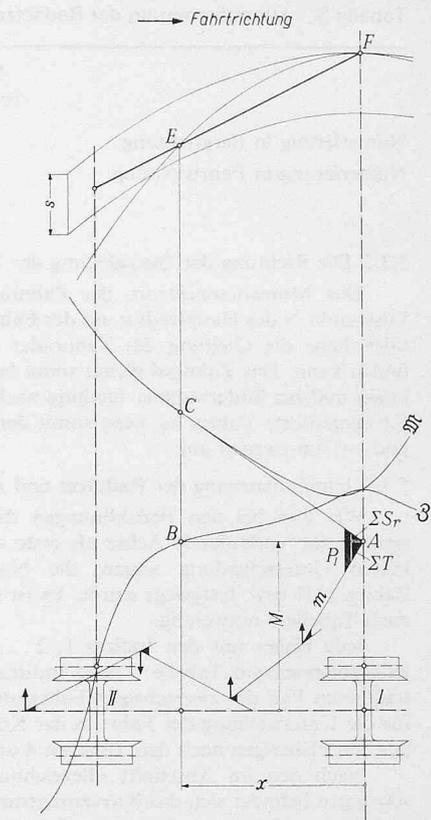


Bild 25. Das \mathfrak{M}_3 -Verfahren zur Ermittlung der Lage des Hauptradius und der Spurranzdrücke, bei freier Einstellung des Fahrgestelles

Bild 26). Somit ist P_{II} durch den Tangentenwinkel in D zwischen dem letzten Strahl m der äusseren Kräfte T_g und der Verbindungsgeraden DA liegt. Aus Gl. (101) folgt, dass $\sum S_r$ wiederum durch den Tangentenwinkel zwischen der Horizontalen und der Geraden AC gegeben ist. Da ferner der Tangentenwinkel zwischen beiden Geraden AB und AD dem eingeklammerten Glied von Gl. (102) entspricht, ergibt sich aus dieser Gleichung, dass P_I in diesem Fall dem Tangentenwinkel zwischen beiden Geraden AC und AD entspricht. Die oben für P_I gemachte Feststellung bleibt somit gültig, wenn als letzter Strahl des Seilpolygons nicht m , sondern die Gerade AD betrachtet wird.

Aus der Gleichgewichtsbedingung ($\sum Y = 0$) am Radsatz ergibt sich die Richtkraft P_r zu

$$(103) \quad P_r = (q_L - q_R) [H_r + G_r \sin \gamma + \mathfrak{T}_r + v_z Z_{qz} + S_r]$$

Daraus folgt für die Lagerquerkraft H_r die Beziehung

$$(104) \quad H_r = (q_L - q_R) P_r - (G_r \sin \gamma + \mathfrak{T}_r + v_z Z_{qz} + S_r)$$

Diese Kraft wird allgemein verschieden sein von der in Gl. (57) zur Bestimmung der Raddrücke R eingesetzten Kraft H_{Tr} . Ist der Unterschied zu gross, dann ist im Iterationsverfahren der durch Gl. (104) gegebene Wert von H_r neu in Gl. (57) einzusetzen und die Durchrechnung bis zu einer befriedigenden Übereinstimmung zu wiederholen.

5.5 Die Richtung der Quergleitung der Zahnräder: Wert von v_z

Die Richtung der durch Gl. (67) gegebenen Querkomponenten Z_{qz} ist durch das Vorzeichen des Faktors v_z festgelegt. Dieser ist positiv bei vorradialer Stellung und negativ bei hinterradialer Stellung des Zahnrades.

Im Abschnitt 5.3.5 wurde festgestellt, dass sich das Momentanzentrum der Zahnräder im Pol N des Fahrgestelles befinden muss. Demnach ist das einzelne Zahnrad

- in vorradialer Stellung bei $x > t_z$, und
- in hinterradialer Stellung bei $x < t_z$.

Sind bei jedem Fahrgestell (Rahmenfahrzeug oder Drehgestell) zwei Zahnräder vorhanden, dann befindet sich das vorlaufende ($z = I$) stets in vorradialer Stellung, gleitet nach innen und weist somit den Faktor $v_z = +1$ auf. Das nachlaufende Zahnrad ($z = II$) kann sich je nach den Verhältnissen vorradial, radial oder hinterradial einstellen. Dabei spielt es unter anderem eine wichtige Rolle, ob \bar{x} kleiner

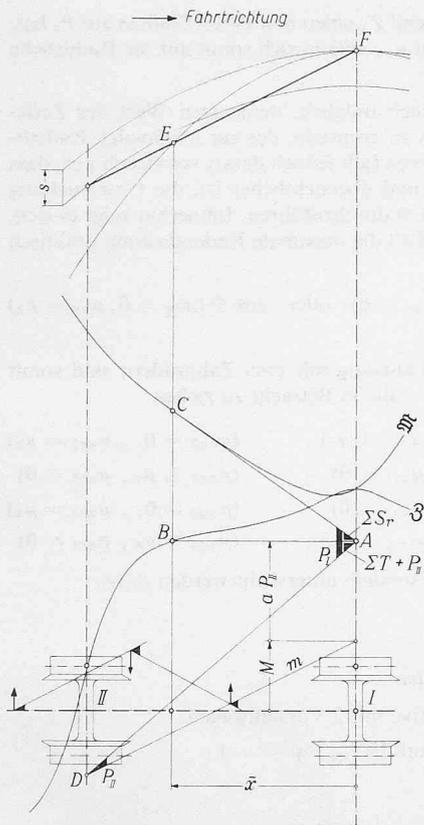


Bild 26. Das M₃-Verfahren bei Spiessgangstellung des Fahrgestelles

oder grösser als t_{II} ist sowie ob $\mathfrak{Z}(\bar{x})$ und $\mathfrak{Z}(t_{II})$ kleiner oder grösser als $M(\kappa_{II} = -1)$, $M(\kappa_{II} = 0)$ und $M(\kappa_{II} = +1)$ sind. Aus diesen verschiedenen Möglichkeiten ergeben sich die im Testdiagramm, Bild 27, festgehaltenen verschiedenen Fälle. Daraus ist unter anderem zu entnehmen, dass sich x in den Fällen c, d, e und i zu t_{II} ergibt und κ_{II} dabei vom Gleichgewichtszustand aus einen Wert aufnehmen muss, der von Null verschieden ist.

Bei $x = t_{II}$ läuft das Zahnrad radial und führt somit grundsätzlich keine Quergleitung aus. Da es aber im Eingriffsvorgang praktisch stets in der vertikalen Ebene gleitet, kann ein von Null verschiedener Wert von κ_{II} nur bei Quergleitung entstehen. Betrachtet man die Verhältnisse bei $x = t \pm \delta x$ näher, so führt die Annahme des μ_{zq} -Verlaufes nach der unstetigen Kurve a von Bild 28 dazu, dass die Querkraft Z_q bei $\delta x = 0$ bzw. bei $x = t$ jeden Wert zwischen ihrem positiven und negativen Maximalwert einnehmen kann. Dies ist jedoch nach obigem nicht möglich. Infolge der Materialelastizität

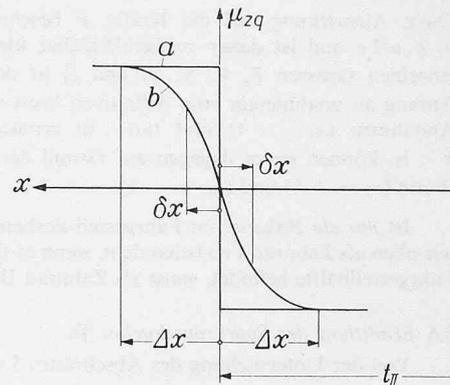


Bild 28. Verlauf des μ_{zq} -Wertes bei $x = t_{II}$

und der vom Eingriff herrührenden vertikalen Gleitung verläuft μ_{zq} in Wirklichkeit nach der Linie b, Bild 27, wobei die Bereichsbreite $2 \Delta x$ nicht näher definierbar ist. Für unsere Betrachtung wird diese Bereichsbreite praktisch auf Null geschrumpft, wobei die Kurve b sehr nahe an die Kurve a zu liegen kommt. Dementsprechend vernachlässigen wir bei $\kappa = 0$ den Wert von δx , der effektiv nicht null sein kann, und setzen voraus, dass Z_{qII} bzw. κ_{II} bei $x = t_{II}$ jeden Wert zwischen $-\mu_{zq} Z_{II}$ und $+\mu_{zq} Z_{II}$ bzw. zwischen -1 und $+1$ einnehmen kann.

In den sich für $x = \bar{x} = t_{II}$ ergebenden Fällen c und d des Testdiagrammes ist das Moment M der äusseren Kräfte, das den Wert von $\mathfrak{Z}(t_{II})$ aufzuweisen hat, gleichzeitig durch P_{II} und Z_{qII} zu verwirklichen. Die Summe ihrer Anteile am Moment M ist dabei allein bestimmt, ihre Anteile selbst aber nicht. Der Faktor κ_{II} kann aus diesem Grunde grundsätzlich jeden Wert zwischen den im Testdiagramm angegebenen Grenzwerten einnehmen, wobei der obere Grenzwert zum maximalen Wert von P_{II} und der untere zum maximalen Wert von P_I führt. Dieser Faktor ist somit je nachdem die Achse II oder die Achse I am meisten durch Entlastung gefährdet ist zu wählen.

Aus dem Testdiagramm, Bild 27, ist ferner zu entnehmen, dass x in den Fällen a, c, d, e, g und i unmittelbar festgelegt ist. In den Fällen b, f, h und j hingegen ist es auf Grund der Gleichung (98) zu ermitteln. Auf dem graphischen Weg lässt sich dies leicht durchführen. Bei der Rechnung mittelst Computer dagegen geht man am einfachsten auf dem Iterationsweg vor, indem man zunächst von $x = \bar{x}$ ausgeht und den Wert von x allmählich verkleinert, bis $\mathfrak{Z}(x)$ den im Testdiagramm angegebenen M -Wert erreicht.

Der Wert von \mathfrak{Z} hängt grundsätzlich von κ_{II} dadurch ab, dass sich Z_{qII} gemäss Gl. (44), (51) und (57) auf die Grösse der einzelnen Raddrucke R und der entsprechenden Reibungskräfte F auswirkt.

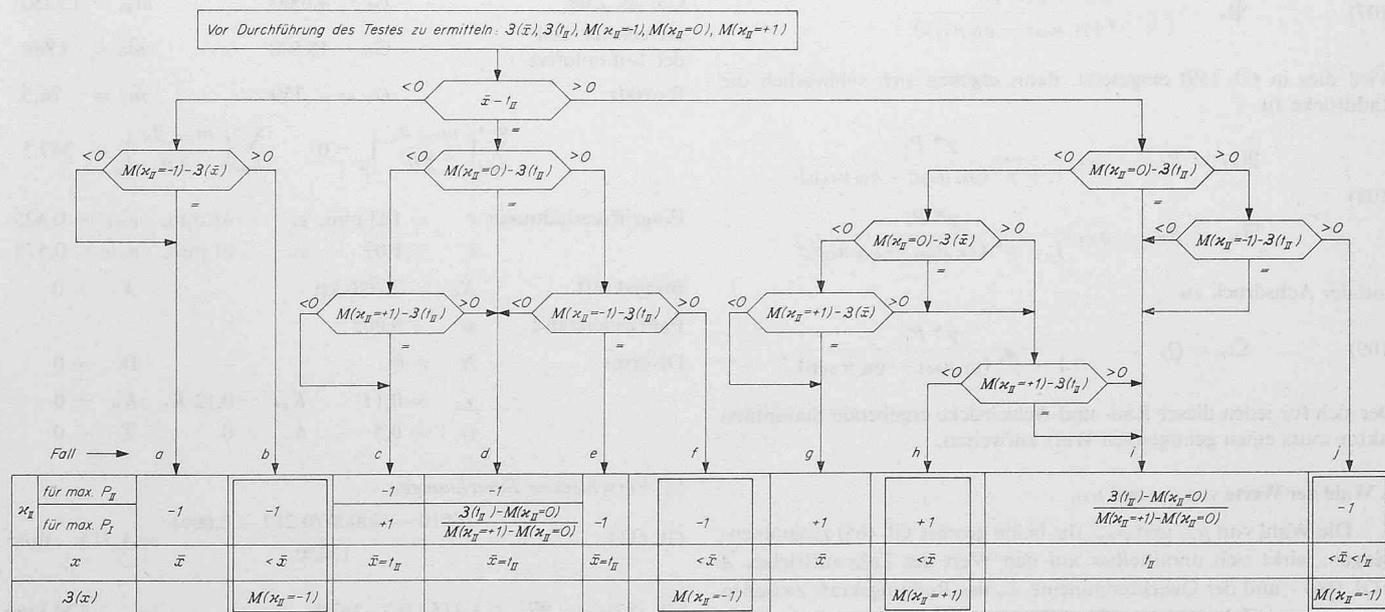


Bild 27. Testdiagramm zur Ermittlung des κ_{z} -Wertes

Diese Auswirkung auf die Kräfte F beschränkt sich jedoch auf $\mu_s Z_q u/2_e$ und ist daher vernachlässigbar klein. Somit können die einzelnen Grössen F , V , S , \mathfrak{M} und \mathfrak{Z} in den Fällen $\bar{x} \geq t_{II}$ von Anfang an unabhängig vom definitiven Wert von z_{II} auf Grund der Annahmen ($z_I = +1$) und ($z_{II} = 0$) ermittelt werden. Im Falle $\bar{x} < t_{II}$ können sie es dagegen auf Grund der wirklich auftretenden Werte ($z_I = +1$) und ($z_{II} = -1$).

Ist nur ein Zahnrad im Fahrgestell vorhanden, dann ist es gleich wie oben als Zahnrad I zu behandeln, wenn es sich in der vorlaufenden Fahrgestellhälfte befindet, sonst als Zahnrad II.

5.6 Ermittlung des Spurkranzdruckes \mathfrak{F}_r

Von der Untersuchung des Abschnittes 5.4 sind bekannt:

- die Lage des Hauptradius: x
- der Wert der Richtkraft: P_r
- die Querkomponenten S_a und S_i der Reibungskräfte F_a und F_i zwischen Rad und Schiene
- die sich für beide Annahmen ($\mu_{zq} = 0$) und ($\mu_{zq} = \mu_z$) ergebenden Werte 0 bzw. $\mu_z Z$ der Querkraft

Für die Querkomponenten S der Reibungskräfte F kann der Ansatz

$$S = \mu_{sq} R$$

gemacht werden, wobei μ_{sq} das Vorzeichen von S zu übernehmen hat und somit positiv oder negativ ausfällt, je nachdem S nach aussen oder nach innen auf das betreffende Rad wirkt. Daraus ergibt sich unmittelbar die Beziehung

$$(105) \quad \mu_{sqL} = \frac{S_L}{R_L} \quad \text{bzw.} \quad \mu_{sqR} = \frac{S_R}{R_R}$$

Die Gleichgewichtsbedingung ($\sum Y = 0$) am Radsatz führt zu

$$(106) \quad \mathfrak{F}_r = H_r + G_r \sin \gamma + \mathfrak{Z}_r + Z_{qr} + \mu_{sqL} \mathfrak{R}_L + \mu_{sqR} \mathfrak{R}_R$$

Da H_{Tr} den grössten Anteil an H_r liefert und sich der übrige Anteil bei der Spurkranzführung nicht viel gegenüber der Rollenführung ändert, kann in die Gleichung (109) der durch Gl. (104) gegebene Wert von H_r eingesetzt werden. Werden ferner die gleichen Koeffizienten μ_{sqL} und μ_{sqR} vorausgesetzt, dann wird Gleichung (109) unter Berücksichtigung von Gl. (59) zu

$$\mathfrak{F}_r = (\varrho_L - \varrho_R)_r P_r - S_r + [\mu_{sqL} (R_L - \varrho_L \gamma^* \mathfrak{F})]_r + [\mu_{sqR} (R_R + \varrho_R \gamma^* \mathfrak{F})]_r$$

Daraus folgt für den Spurkranzdruck die Beziehung

$$(107) \quad \mathfrak{F}_r = \frac{(\varrho_L - \varrho_R)_r P_r}{1 + \gamma^* (\varrho_L \mu_{sqL} - \varrho_R \mu_{sqR})}$$

Wird dies in Gl. (59) eingesetzt, dann ergeben sich schliesslich die Raddrucke zu

$$(108) \quad \mathfrak{R}_{Lr} = R_{Lr} - \varrho_{Lr} \frac{\gamma^* P_r}{1 + \gamma^* (\varrho_L \mu_{sqL} - \varrho_R \mu_{sqR})}$$

$$\mathfrak{R}_{Rr} = R_{Rr} - \varrho_{Rr} \frac{\gamma^* P_r}{1 + \gamma^* (\varrho_L \mu_{sqL} - \varrho_R \mu_{sqR})}$$

und der Achsdruck zu

$$(109) \quad \mathfrak{Q}_r = \mathfrak{Q}_r - \frac{\gamma^* P_r}{1 + \gamma^* (\varrho_L \mu_{sqL} - \varrho_R \mu_{sqR})}$$

Der sich für jeden dieser Rad- und Achsdrücke ergebende Stabilitätsfaktor muss einen genügenden Wert aufweisen.

6. Wahl der Werte von μ_{zv} und μ_{zq}

Die Wahl von μ_{zv} und μ_{zq} , die beide gemäss Gl. (65) zusammenhängen, wirkt sich unmittelbar auf den Wert des Zahnauftriebes \bar{A} - Gl. (66) - und der Querkomponente Z_q der Reibungskraft zwischen Zahnrad und Zahnstange - Gl. (64) - aus. \bar{A} wirkt sich seinerseits unmittelbar auf die Raddrucke R - Gl. (56) - aus und daher indirekt

auf die Richtkraft P_r , während Z_q einen indirekten Einfluss auf P_r hat. Beide Koeffizienten μ_{zv} und μ_{zq} wirken sich somit auf die Raddrucke \mathfrak{R} aus.

Es ist wohl grundsätzlich möglich, denjenigen Wert des Zerlegungswinkels Φ rechnerisch zu ermitteln, der zur maximalen Radentlastung führt. Dieses Verfahren fällt jedoch derart verwickelt aus, dass es praktisch viel einfacher und übersichtlicher ist, die Untersuchung für verschiedene Werte von Φ durchzuführen. Immerhin zeigt es sich, dass je nach vorliegendem Fall die maximale Radentlastung praktisch für

$$\sin \Phi = 1 (\mu_{zq} = \mu_z, \mu_{zv} = 0) \quad \text{oder} \quad \cos \Phi (\mu_{zq} = 0, \mu_{zv} = \mu_z)$$

entsteht.

Für ein zweiachsiges Fahrzeug mit zwei Zahnradern sind somit grundsätzlich folgende vier Fälle in Betracht zu ziehen

$$\text{Fall } \alpha: \quad (\mu_{zq1} = 0, \mu_{zv1} = \mu_z), \quad (\mu_{zq2} = 0, \mu_{zv2} = \mu_z)$$

$$\text{Fall } \beta: \quad (\mu_{zq1} = \mu_z, \mu_{zv1} = 0), \quad (\mu_{zq2} = \mu_z, \mu_{zv2} = 0)$$

$$\text{Fall } \gamma: \quad (\mu_{zq1} = \mu_z, \mu_{zv1} = 0), \quad (\mu_{zq2} = 0, \mu_{zv2} = \mu_z)$$

$$\text{Fall } \delta: \quad (\mu_{zq1} = 0, \mu_{zv1} = \mu_z), \quad (\mu_{zq2} = \mu_z, \mu_{zv2} = 0)$$

von denen jeder für sich besonders untersucht werden muss.

7. Beispiele

Beispiel: 1 Rahmenlokomotive

Zugskomposition Lokomotive mit 2 Vorstellwagen:

Abbremsung bei Talfahrt auf 250/00: $\psi = -1$

a) Daten

Lokomotiv-Hauptabmessungen: (Bild 19)

$a = 3$ m,	$g_1 = g_2 = 1,5$ m,
$h_k = 0,11$ m,	$h_0 = 0,75$ m,
$D_z = 0,7$ m,	$D_r = 0,75$ m,
$t_{zI} = z_1 = 0,75$ m,	$t_{zII} = z_2 = 2,25$ m
$k_0 = 1,255$ m,	$u = 0,033$ m
$2e = 1,07$ m,	$\ddot{u} = 10,5$

	Gewichte in kp	Massen in kg
Lokomotive	$G_{\text{Lok}} = 20000$	$\bar{m}_{\text{Lok}} = 2040$
Rotierende Teile der Lokomotive		$m_{\text{rot Lok}} = 9170$
		$m_{g \text{ Lok}} = 11210$
2 Vorstellwagen	$G_w = 20000$	$\bar{m}_w = 2040$
Ganzer Zug	$G_t = 40000$	$m_{gt} = 13250$
Gefederter Teil der Lokomotive	$G_o = 18500$	$\bar{m}_o = 1886$
Radsatz	$G_r = 750$	$\bar{m}_r = 76,5$

$$\sum \left(\frac{m_{\text{rot}} \vartheta_x}{2 \ddot{u}} \right)_p = 0 \quad \sum \left(\frac{m_{\text{rot}} \vartheta_q}{2 \ddot{u}} \right)_p = 347,5$$

Eingriffsverhältnisse e	$= 103$ mm,	$e_o = 45$ mm,	$e_o/e = 0,425$
ε	$= 1,03$	$e_u = 61$ mm,	$e_u/e = 0,575$
Bremskraft	$X_b = 26910$ kp		$X_A = 0$
Fahrwiderstand	$w = 0,005$		
Diverses	$N = 0$		$W = 0$
	$\chi_o = 0,11$	$K_{ov} = 0,12$	K_o
	$\tau_r = 0,5$	$\delta = 0$	$\mathfrak{Z} = 0$

b) Verschiedene Berechnungen

$$\text{Gl. (11):} \quad b = \frac{26910 - 40000 (0,242 - 0,005)}{13250} = 1,315 \quad \text{m/s}^2$$

$$\text{Gl. (37):} \quad \mathfrak{M}_q = 1,315 \cdot 0,7 \cdot 347,5 = 320 \text{ kpm}$$

$$\mathfrak{M}_x = 0$$

Tabelle 6. Durchführung der weiteren Berechnungen

Gl.		Variante				
		α	β	γ	δ	
	$\mu_{zv1} =$	0,15	0	0	0,15	
	$\mu_{zv2} =$	0,15	0	0,15	0	
	$\mu_{zq1} =$	0	0,15	0,15	0	
	$\mu_{zq2} =$	0	0,15	0	0,15	
66	$\bar{A}_1 = (0,25 + 0,024) 7425$ bzw. $0,25 \cdot 7425$	2034	1856	1856	2034	kp
	$\bar{A}_2 = (0,25 + 0,024) 7425$ bzw. $0,25 \cdot 7425$	2034	1856	2034	1856	kp
48.1	$M_q = 0,75 \cdot 6958 + 0,11 \cdot 7423 + 320 + (0,375 - 0,033) 14850$	11434				kpm
49.1	$\mathcal{L}_1 = \frac{1}{6} 1,5 \cdot 17940 - (2,25 \bar{A}_1 + 0,75 \bar{A}_2) + 11434 - 1,255 \cdot 890$	5188	5276	5254	5209	kp
	$\mathcal{L}_2 = \frac{1}{6} 1,5 \cdot 17940 - (0,75 \bar{A}_1 + 2,25 \bar{A}_2) - 11434 + 4,255 \cdot 890$	2193	2282	2216	2260	kp
56	$R_{IL1} = R_{IR1} = \mathcal{L}_1 + (0,97 \cdot 375)$	5552	5640	5618	5573	kp
	$R_{IL2} = R_{IR2} = \mathcal{L}_2 + (0,97 \cdot 375)$	2557	2646	2580	2624	kp
	$Q_{l1} = R_{IL1} + R_{IR1} = 2 R_{l1}$	11104	11280	11236	11146	kp
	$Q_{l2} = R_{IL2} + R_{IR2} = 2 R_{l2}$	5114	5292	5160	5248	kp
	$Z_{qI} = + \mu_{zq} \cdot 7425$	0	+ 1114	+ 1114	0	kp
	$Z_{qII} = \mu_{zq} \cdot 7425$	0	- 1114	0	- 1114	kp
	$\sum Z_q$	0	0	+ 1114	- 1114	kp
41	$K_{oq} = 0,11 \cdot 7423$	+ 816,5				kp
41	$K_{uq} =$	0				kp
51.1	$M_x = 0,11 \cdot 816,5 - (0,375 - 0,033) \sum Z_q$	+ 90	+ 90	- 291	+ 471	kpm
	$\tau M_x/2 e =$	+ 42	+ 42	- 136	+ 220	kp
44.1	$H_{TI} = \frac{1}{3} \{ -1,255 \cdot 816,5 + 2,25 Z_{qI} + 0,75 Z_{qII} \}$	- 342	+ 215	+ 494	- 620	kp
	$H_{TII} = \frac{1}{3} \{ 4,255 \cdot 816,5 + 0,75 Z_{qI} + 2,25 Z_{qII} \}$	+ 1158	+ 601	+ 1436,5	+ 322,5	kp
	$H_{TI} \frac{D_r}{4 e}$	- 120	+ 75	+ 173	- 217	kp
	$H_{TII} \frac{D_r}{4 e}$	+ 406	+ 210	+ 503	+ 113	kp
	$R_{LI} = R_{RI}$	5552	5640	5618	5573	kp
	$R_{LII} = R_{RII}$	2557	2646	2580	2624	kp
57	R_{LI}	5474	5757	5655	5576	kp
	R_{RI}	5630	5523	5581	5570	kp
	R_{LII}	3005	2898	2947	2957	kp
	R_{RII}	2109	2394	2213	2291	kp
(70)	F_{aI}	1642	1726	1697	1673	kp
	F_{iI}	1690	1638	1675	1665	kp
	F_{aII}	902	870	884	887	kp
	F_{iII}	633	718	664	688	kp

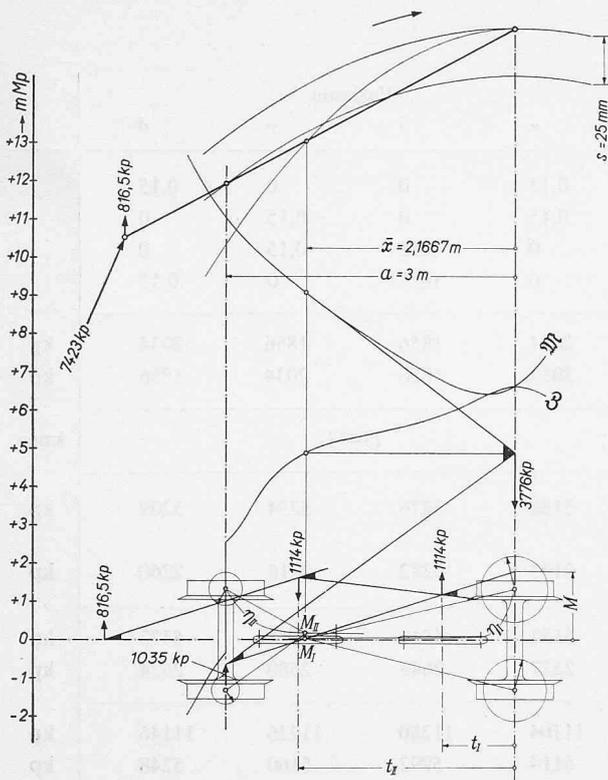


Bild 29. Ermittlung der Richtkräfte P des Rahmenfahrzeuges des Beispiels I (Variante β)

$$\begin{aligned} \bar{b} \bar{m}_0 + G_o \sin \alpha &= 1,315 \cdot 1886 + 18500 \cdot 0,242 = 6958 \text{ kp} \\ G_o \cos \alpha &= 18500 \cdot 0,97 = 17940 \text{ kp} \\ \text{Gl. (16): } K_o &= +0 - 1,315 \cdot 2040 + 20000(0,005 - 0,242) = -7423 \text{ kp} \\ K_{ov} &= 0,12 \cdot 7423 = +890 \text{ kp} \\ \text{Gl. (12): } Z_1 + Z_2 &= 26910 - 1,315 \cdot 9170 = 14850 \text{ kp} \\ Z_1 = Z_2 &= 7425 \text{ kp} \end{aligned}$$

Aus Bild 6:

$$\bar{A}_h/A_h = 0,58, \quad \bar{A}_b/A_b = 0,42, \quad (\bar{A}_h/A_h - \bar{A}_b/A_b) = 0,16$$

Die weiteren Berechnungen werden in Tabelle 6 durchgeführt.

c) Fahrt in der Geraden ohne Querkräfte

Bei der Fahrt in der Geraden ohne Querkräfte ergeben sich die einzelnen Achsdrücke zu Q_i . Die Entlastung der bergseitigen Achse 2 wird bei der Variante α am grössten. Die entsprechenden Stabilitätsfaktoren betragen

$$\sigma_2 = \frac{10000}{10000 - 5114} = 2,046 \text{ und } \sigma_2 = \frac{5114}{10000} = 0,511.$$

d) Fahrt in der Kurve

Bei der Talfahrt wird Achse 1 zur Achse I und Achse 2 zur Achse II. Voraussetzungen:

Die Laufräder sind fest mit der Achse verbunden und entwickeln keine Längskraft U .

$$\text{Kurvenradius } R = 80 \text{ m}, \quad \text{Spurspiel } s = 0,025 \text{ m}, \quad \mu_s = 0,3.$$

$$\text{Gl. (99): } \bar{x} = 1,5 + \frac{0,025 \cdot 80}{3} = 2,1667 \text{ m}, \quad \bar{x} < t_{zII}: \kappa_{II} = -1.$$

Auf Grund dieser Reibungskräfte lässt sich für jede Variante die graphische Untersuchung gemäss Bild 26 durchführen, wie dies in Bild 29 für die Variante β gezeigt ist. Da \bar{x} kleiner als t_{II} ist, gilt für κ_{II} der Wert -1 . Die entsprechend aufgestellte Tabelle 8 zeigt, dass bei allen Varianten M ($\kappa_{II} = -1$) kleiner als $\mathfrak{Z}(\bar{x})$ ausfällt. Im Testdiagramm, Bild 27, tritt somit der Fall a auf, so dass die Lokomotive bei

allen Varianten α bis δ im Spiessgang bzw. mit $x = \bar{x}$ läuft. Damit vereinfacht sich die Ermittlung der Richtkräfte P_I und P_{II} dadurch, dass die Verhältnisse lediglich für

$$x = \bar{x} = 2,1667 \text{ m} \quad \text{bzw. für} \quad x/e = \frac{2,1667}{0,535} = 4,05$$

untersucht zu werden brauchen. Zunächst müssen die zu ($U_r = 0$) führenden Ordinaten η_I und η_{II} der Reibungsmittelpunkte beider Radsätze ermittelt werden. Im folgenden wird für den Radsatz I gezeigt, wie dies auf Grund der Zahlentafel 1 geschehen kann. Da der Wert 4,05 zwischen den beiden Tabellenwerten 4,0 und 4,2 liegt, wird zunächst die Untersuchung für $(x - a_I)/e = x/e = 4,0$ durchgeführt. Da ferner F_{aI} und F_{iI} nur sehr wenig voneinander abweichen, kann man für den gesuchten Wert von η_I ungefähr ($\varphi_m = 0$) setzen, was zu $\eta_I/e = 0$ führt. Die Verhältnisse werden daher für die beiden Werte $\eta/e = 0$ und $\eta/e = -0,1$ in Tabelle 7 untersucht.

Die gleiche Untersuchung für $(x - a_I)/e = x/e = 4,2$ führt zu den praktisch gleichen Werten von η_I , so dass diese auch für $x/e = 4,05$ gültig sind. Wie man aus obigen Ausführungen ersieht, bleibt die Ermittlung von η_I selbst mit Hilfe der Tabellen 2a bis 2c unständlich. Diese Art der Ermittlung kann allenfalls in Kauf genommen werden, wenn sich x zu \bar{x} ergibt und die Kräfteverhältnisse nur für diesen besondern x -Wert untersucht werden müssen. Normalerweise kann aber nicht von Anfang an erkannt werden, ob Spiessgangstellung vorliegt oder nicht. Es ist somit allgemein notwendig, die \mathfrak{M} - und \mathfrak{Z} -Kurven mindestens teilweise aufzuzeichnen, und hierfür die η -Werte für verschiedene x -Werte zu ermitteln. Es ist daher viel einfacher und schneller, die Rechnung mit Hilfe eines Computers durchzuführen, der nebst den η -Werten auch unmittelbar diejenigen von U_r , S_r , \mathfrak{M}_r , und \mathfrak{Z}_r liefern kann. Auf diese Weise wurden die für die verschiedenen Varianten massgebenden \mathfrak{M} - und \mathfrak{Z} -Kurven sowie die sich für $x = \bar{x}$ und für beide Radsätze ergebenden Werte von η_r , U_{ar} , U_{ir} , S_{ar} , S_{ir} , \mathfrak{M}_r und \mathfrak{Z}_r ermittelt. In Tabelle 8 sind die Ergebnisse zusammengestellt.

Die gefundenen H_r -Werte weichen um rd. 290 kp von den eingesetzten H_{Tr} -Werten ab. Die aufgeführte Kontrolle zeigt, dass diese Abweichung dem Anteil ΔH gemäss Gl. (91) entspricht. Sie zieht einen Fehler von rund 100 kp bei den Raddrücken nach sich. Sollen genauere Resultate erzielt werden, wäre es notwendig, die Raddrücke R_L und

⁷⁾ Dies ist darauf zurückzuführen, dass η_r bei ($U_r = 0$) nur sehr wenig von $(x - a_r)$ abhängt, sobald es grösser als e wird.

Tabelle 7. Ermittlung des η -Wertes

		Variante			
		α	β	γ	δ
$(\bar{x} - a_I)/e$		4,00			
$\frac{F_{oI} - F_{iI}}{F_r}$		-0,0144	+0,0261	+0,0065	+0,0024
Tabelle 1 und Gl. 87 $x/e = 4,00$	$\eta_I/e = 0$				
	$\Delta \varphi$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	$\Delta \varphi \left(\frac{F_a - F_i}{F} \right)_I$	0,2425	0,2425	0,2425	0,2425
	$(U/F)_I$	-0,00349	+0,00633	+0,00158	+0,00058
$x/e = -0,1$	$\eta_I/e = -0,1$				
	$\Delta \varphi$	0,00349	-0,00633	-0,00158	-0,00058
	$\Delta \varphi \left(\frac{F_a - F_i}{F} \right)_I$	0,00349	-0,00633	-0,00158	-0,00058
	$(U/F)_I$	-0,00349	+0,00633	+0,00157	+0,00058
$(\eta/e)_I$		-0,0153	+0,0277	+0,0069	+0,0254
η_I		m -0,0082	+0,0148	+0,0037	+0,00136

Tabelle 8

Gl.		Variante					
		α	β	γ	δ		
(88)	η_I	-0,0082	0,0148	0,0037	0,00136	m	
	η_{II}	0,1295	0,0718	0,1058	0,0943	m	
(81)	U_{aI}	- 399	- 403	- 404	- 400	kp	
	U_{iI}	+ 399	+ 403	+ 404	+ 400	kp	
	U_{aII}	- 395	- 423	- 405	- 415	kp	
	U_{iII}	+ 395	+ 423	+ 405	+ 415	kp	
(76)	S_{aI}	1593	1678	1648	1624	kp	
	S_{iI}	1642	1588	1625	1616	kp	
	S_{aII}	- 811	- 760	- 786	- 784	kp	
	S_{iII}	- 495	- 580	- 526	- 549	kp	
(74)	\mathfrak{M}_I	7436	7508	7526	7450	mkp	
	\mathfrak{M}_{II}	1511	1570	1527	1555	mkp	
	\mathfrak{M}	8947	9078	9053	9005	mkp	
(75)	\mathfrak{Z}_I	427	431	432	428	mkp	
	\mathfrak{Z}_{II}	4340	4475	4370	4443	mkp	
	\mathfrak{Z}	4767	4906	4802	4871	mkp	
(96)	M	3473	1802	4308	967	mkp	
	$\mathfrak{Z} - M$	1294	3104	494	3904	mkp	
(100)	P_{II}	431	1035	165	1301	kp	
(102)	P_I	3178	3776	4058	2910	kp	
(24)	$\gamma^* = \frac{0,57735 + 0,3}{1 - 0,3 \cdot 0,57735}$	($\gamma = 60^\circ$)					
		1,061					
(105)	μ_{sqLI}	0,291	0,2915	0,2915	0,2912	kp	
	$1 + \mu_{sqLI} \cdot \gamma^*$	1,309	1,309	1,309	1,309		
(107)	\mathfrak{P}_{LI}	2427	2883	3100	2223	kp	
	R_{LI}	5475	5757	5665	5576	kp	
	$\gamma^* \mathfrak{P}_{LI}$	2575	3057	3288	2358	kp	
(108)	\mathfrak{R}_{LI}	2899	2700	2377	3218	kp	
(6)	\mathfrak{S}_{LI}	2,38	2,173	1,906	2,657		
(105)	μ_{sqRII}	- 0,2345	- 0,2422	- 0,2375	- 0,2395		
	$1 - \mu_{sqRII} \cdot \gamma^*$	1,2488	1,257	1,252	1,254		
(107)	\mathfrak{P}_{RII}	345	823	132	1038	kp	
	R_{RII}	2109	2394	2213	2291	kp	
	$\gamma^* \mathfrak{P}_{RII}$	366	873	140	1102	kp	
(108)	\mathfrak{R}_{RII}	1743	1521	2073	1189	kp	
(6)	\mathfrak{S}_{RII}	1,535	1,437	1,708	1,312		
(104)	H_I	- 57	+ 510	+ 786	- 330	kp	
	H_{II}	+ 875	+ 305	+ 1147	+ 32	kp	
(91)	ΔH_I	+ 283	+ 295	+ 289	+ 291	kp	
	ΔH_{II}	- 283	- 295	- 289	- 291	kp	
Kontrolle	H_{TI}	- 342	+ 215	+ 494	- 620	kp	
	H_{TII}	+ 1158	+ 601	+ 1436,5	+ 322,5	kp	
	$H_r = H_{Tr} + \Delta H_r \begin{cases} H_I \\ H_{II} \end{cases}$	H_I	- 57	+ 510	+ 783	- 329	kp
		H_{II}	+ 875	+ 306	+ 1147,5	+ 31,5	kp

Tabelle 9

Gl.	$i =$	1	2	3	4	5	6	Total	
	G_i	54 000	12 000	13 000	54 000	18 000	19 000	170 000	kp
	\bar{m}_i	5 505	1 224	1 326	5 505	1 836	1 936	17 334	kp
	$m_{rot i}$	1 500	0	0	1 500	0	0	3 000	kp
	m_{gi}	7 005	1 224	1 326	7 005	1 836	1 936	20 334	kp
	X_{mi}	24 400	0	0	0	0	0	24 400	kp
	$G_i (\sin \alpha + w)$	6 172	1 372	1 486	6 172	2 057	2 172	19 431	kp
(9)	X_i	18 228	-1 372	-1 486	-6 172	-2 057	-2 172	4 969	kp
(10)	X_t	24 400 - 170 000 · 0,1143 = 24 400 - 19 431 =						4 969	kp
(11)	b	4969/20 334 =						0,2444	m/s ²
	$b \bar{m}_i$	1 345	299	324	1 345	449	473	4 235	kp
	$b m_{rot i}$	367	0	0	367	0	0	734	kp
	$b m_{gi}$	1 712	299	324	1 712	449	473	4 969	kp
(12)	Z_i	24 033	0	0	-367	0	0		kp
(13)	K_{ui}	0	16 516	14 865	13 035	5 151	2 645		kp
(14)	K_{oi}	-16 516	-14 865	-13 055	-5 151	-2 645	0		kp

R_R auf Grund der gefundenen H_I und H_{II} neu zu ermitteln und die Berechnung in einem zweiten Iterationsschritt zu wiederholen. Da es hier vor allem darum geht, die Berechnungsmethode zu zeigen, wird auf eine solche Wiederholung verzichtet, die aber mit Hilfe eines Computers leicht durchzuführen ist.

Die gefundenen Sicherheitswerte \mathfrak{S} zeigen, dass das innere Rad der bergseitigen, nachlaufenden Achse II am meisten gefährdet ist. Dies ist ganz besonders bei den Varianten β und δ der Fall, was auf die Querreibung des nachlaufenden Zahnrades zurückzuführen ist.

Beispiel II

Bei Bergfahrt auf 110⁰/₀₀ setzt der mittlere Triebwagen 4 der in Tabelle 9 angegebenen Zugkomposition aus, so dass allein der talseitige Triebwagen 1 eine Zugkraft liefert, die in diesem Falle ihren maximalen Wert erreicht. Die Gewichte der einzelnen Fahrzeuge sind in Tabelle 11 angegeben. Weiter gelten folgende Werte für die Bergfahrt:

$$\psi = +1, \quad \text{tg } \alpha = 0,11, \quad \sin \alpha = 0,1093, \\ \cos \alpha = 0,994, \quad w = 0,005, \quad \sin \alpha + w = 0,11430.$$

Untersuchung am unteren Triebfahrzeug 1

Voraussetzungen: $\xi_d = 1, \quad \xi_c = 0, \quad \tau_r = 0,5, \quad \mathfrak{Z} = 0, \quad \delta = 0$
 Hauptdaten (vergleiche Bild 17)

$d = 11,46 \text{ m},$	$d' = d'' = 5,73 \text{ m},$
$a' = a'' = a = 2,79 \text{ m},$	$h_q = 0,12 \text{ m},$
$h_c = 0,825 \text{ m},$	$h_l = 0,24 \text{ m},$
$h_x = 0,085 \text{ m},$	$h_k = 0,225 \text{ m},$
$h_c - h_x = 0,74 \text{ m},$	$h_k - h_x = 0,14 \text{ m},$
$z_1 = 0,$	$z_2 = 2,79 \text{ m},$
$t_{zII} = 0,$	$t_{zI} = 2,79 \text{ m},$
$b = 0,855 \text{ m},$	$f = 0,968 \text{ m},$
$g' = g'' = 5,73 \text{ m},$	$k_o = k_u = 0,6 \text{ m},$
$g_1 = g_2 = 1,395 \text{ m},$	$c_1 = c_2 = 1,395 \text{ m},$
$D_r = 0,78 \text{ m},$	$D_z = 0,688 \text{ m},$
$u = 0,046 \text{ m},$	
$2e = 1,07 \text{ m},$	$2l = 1,475 \text{ m},$
$Q_o = 13500 \text{ kp},$	$R_o = 6750 \text{ kp},$
$G_c = 32700 \text{ kp},$	$G_d = 10650 \text{ kp},$
$\bar{m}_c = 3334 \text{ kg},$	$\bar{m}_d = 1086 \text{ kg},$
$m_{rot c} = 0,$	$m_{rot d} = 750 \text{ kg},$
	$m_{gd} = 1836 \text{ kg},$

$$G_r = 6300 \text{ kp}, \quad G_r = 2175 \text{ kp} \\ \bar{m}_r = 642 \text{ kg}, \quad \bar{m}_r = 222 \text{ kg}$$

$$\sum \left(\frac{m_{rot} \vartheta_x}{\ddot{u}} \right)_p = 0, \quad \sum \left(\frac{m_{rot} \vartheta_q}{\ddot{u}} \right)_p = -110 \text{ kg}$$

Eingriffsverhältnisse (doppelte Abtsche Zahnstange 120 mm Teilung)

$$e = 115 \text{ mm} \quad e_o = 47 \text{ mm} \quad e_u = 68 \text{ mm} \\ \varepsilon = 0,96 \quad e_o/e = 0,41 \quad e_u/e = 0,59$$

Aus Bild (9) ergibt sich bei Wirkung Z in Bewegungsrichtung $\bar{A}_h/A_h = 0,39 \quad \bar{A}_b/A_b = 0,61 \quad (\bar{A}_h/A_h - \bar{A}_b/A_b) = -0,21$

$$\bar{x} = \frac{2,79}{2} + \frac{0,025 \cdot 80}{2,79} = 2,112 \text{ m} < t_{II}$$

$$Z_r = \frac{1}{4} Z_1 = \frac{24033}{4} = 6008 \text{ kp}.$$

Auf Grund dieser Daten können die einzelnen, für die weitere Untersuchung massgebenden Grössen in der folgenden Reihenfolge ermittelt werden:

$G_c \cos \alpha = 0,994 \cdot 32700$	$= 32504 \text{ kp}$
$G_c \sin \alpha = 0,1093 \cdot 32700$	$= 3575 \text{ kp}$
$b \bar{m}_c = 0,2444 \cdot 3334$	$= 814 \text{ kp}$
$G_c \sin \alpha + b \bar{m}_c$	$= 4389 \text{ kp}$
Gl. (53') $C'_v = \frac{5,73 \cdot 32504 + 0,74 \cdot 4389}{11,46}$	$= 16535 \text{ kp}$
Gl. (53'') $C''_v = \frac{5,73 \cdot 32504 - 0,74 \cdot 4389}{11,46}$	$= 15969 \text{ kp}$
$G_d \sin \alpha = 0,1093 \cdot 10650$	$= 1164 \text{ kp}$
$b \bar{m}_d = 0,2444 \cdot 1085$	$= 265 \text{ kp}$
$G_d \sin \alpha + b \bar{m}_d = 1164 + 265$	$= 1429 \text{ kp}$
$(G_d + G_c g''/d) w = 27000 \cdot 0,005$	$= 135 \text{ kp}$
Gl. (54') $C'_x = 12016 - 1429 - 135$	$= 10452 \text{ kp}$
Gl. (54'') $C''_x = 12016 - 1429 - 135 - 16516$	$= -6064 \text{ kp}$
Gl. (55) $G_c \sin \alpha + b \bar{m}_c = 4389 \text{ kp}$	$C'_x + C''_x = 4388 \text{ kp}$

Tabelle 10. Untersuchung am bergseitigen Triebgestell

Gl.		Variante				
		α	β	γ	δ	
	$\mu_{zv1} =$ $\mu_{zv2} =$	0,15 0,15	0 0	0 0,15	0,15 0	
	$\mu_{zq1} =$ $\mu_{zq2} =$	0 0	0,15 0,15	0,15 0	0 0,15	
(66)	$\bar{A}_1 = (0,25 - 0,15 \cdot 0,21) 6008$ bzw. $0,25 \cdot 6008$ $\bar{A}_2 = (0,25 - 0,15 \cdot 0,21) 6008$ bzw. $0,25 \cdot 6008$	1313 1313	1502 1502	1502 1313	1313 1502	kp kp
(29)	$B_1 = B_2 = B = \frac{6008 \cdot 0,688}{2 \cdot 0,855} (v_1 = v_2 = 1)$		2416			kp
(37)	$\mathfrak{M}_x =$ $\mathfrak{M}_q = - \frac{0,2444 \cdot 0,688}{2} \cdot 110$		0 - 9,25			mkp
	$G_f'' \sin \alpha + b \bar{m}_f'' = 0,1093 \cdot 6300 + 0,2444 \cdot 642$		845			kp
(48.2)	$M_q'' = - 0,085 \cdot 6064 - 9,25 + 0,24 \cdot 845 + 0,225 \cdot 16516$		3395			mkp
(49.2)	$\mathcal{L}_1'' = \frac{(15969 + 0,994 \cdot 6300) 1,395 + 3395}{2 \cdot 2,79}$ $\mathcal{L}_2'' = \frac{(15969 + 0,994 \cdot 6300) 1,395 - 3395}{2 \cdot 2,79}$		6166 4949			kp kp
(34)	$\Delta_z R_1 = + \frac{2416 \cdot 0,855}{2,79}$ $\Delta_z R_2 =$		+ 740 - 740			kp kp
(56)	$R_{iL1}'' = 6166 + \frac{0,994 \cdot 2175 \cdot 0,425}{1,07} + 740 - 0,5 \bar{A}_1$ $R_{iR1}'' = 6166 + \frac{0,994 \cdot 2175 \cdot 0,645}{1,07} + 740 - 0,5 \bar{A}_1$ $R_{iL2}'' = 4949 + \frac{0,994 \cdot 2175 \cdot 0,645}{1,07} - 740 - 0,5 \bar{A}_2$ $R_{iR2}'' = 4949 + \frac{0,994 \cdot 2175 \cdot 0,425}{1,07} - 740 - 0,5 \bar{A}_2$	7109 7553 4852 4412	7014 7458 4761 4317	7014 7458 4852 4412	7109 7553 4761 4317	kp kp kp kp
(58)	$Q_{l1}'' =$ $Q_{l2}'' =$	14662 9264	14472 9078	14472 9264	14662 9078	kp kp
	$Q_{o1}'' = Q_{o2}'' =$		13500			kp
(6)	$\mathfrak{E}_2'' =$	3,19	3,05	3,19	3,05	kp
	Voraussetzung $\varkappa_2 = + 1, \varkappa_1 = - 1$ ($\varkappa_{II} = - 1$ weil $t_{zII} = a$)					
(45'')	$C'_q = C''_q$		0			
(46)	$M_e =$		0			
(41)	$K_{oq} = 16516 \cdot 0,030 =$		495			kp
(47)	$K''_{dq} =$		495			kp
(67)	$Z''_{q1} = 6008 \cdot \mu_{zq1} \cdot \varkappa_1$ $Z''_{q2} = 6008 \cdot \mu_{zq2} \cdot \varkappa_2$	0 0	- 901 + 901	- 901 0	0 + 901	kp kp
	$Z''_{qI} =$ $Z''_{qII} =$	0 0	+ 901 - 901	0 - 901	+ 901 0	kp kp
(44.2)	$H''_{T1} = - \frac{495 \cdot 0,6}{2,79}$ $H''_{T2} = + \frac{495 \cdot 3,39}{2,79}$		- 106 + 601			kp kp

Tabelle 10 (Fortsetzung)

Gl.		Variante				
		α	β	γ	δ	
(51.1)	$M_x'' = + 0,225 \cdot 495$	+ 111				mkp
	$v_r u Z_{q1}'' = 0,046 \cdot Z_{q1}''$	0	- 41	- 41	0	mkp
	$v_r u Z_{q2}'' = 0,046 \cdot Z_{q2}''$	0	+ 41	0	+ 41	kp
	$\tau_r M_x'' = 0,5 M_x''$	+ 56				kp
(57)	$R_{L1}'' = R_{LL1}'' + \frac{56 - 106 \cdot 0,39 + v_1 u Z_{q1}''}{1,07}$	7122	6989	6989	7122	kp
	$R_{R1}'' = R_{RR1}'' - \frac{56 - 106 \cdot 0,39 + v_1 u Z_{q1}''}{1,07}$	7540	7483	7483	7540	kp
	$R_{L2}'' = R_{LL2}'' + \frac{56 + 601 \cdot 0,39 + v_2 u Z_{q2}''}{1,07}$	5123	5070	5123	5070	kp
	$R_{R2}'' = R_{RR2}'' - \frac{56 + 601 \cdot 0,39 + v_2 u Z_{q2}''}{1,07}$	4140	4007	4140	4007	kp
(70)	$F_{L1}'' =$	2137	2097	2097	2137	kp
	$F_{R1}'' =$	2262	2245	2245	2262	kp
	$F_{L2}'' =$	1537	1521	1537	1521	kp
	$F_{R2}'' =$	1242	1202	1242	1202	kp
Tabelle 4	$F_{aI}'' = F_{L2}'' =$	1537	1521	1537	1521	kp
	$F_{iI}'' = F_{R2}'' =$	1242	1202	1242	1202	kp
	$F_{aII}'' = F_{L1}'' =$	2137	2097	2097	2137	kp
	$F_{iII}'' = F_{R1}'' =$	2262	2245	2245	2262	kp

Die den am Schluss der Tabelle 10 gefundenen Reibungskräften für ($U_r = 0$) entsprechenden \mathfrak{M}_r - und \mathfrak{Z}_r -Werte wurden mit Hilfe eines Computers für verschiedene Werte von x berechnet und die zugehörigen \mathfrak{M} - und \mathfrak{Z} -Kurven für jede Variante gezeichnet, wie

dies in Bild 30 für die Variante β gezeigt ist. Die darauf aufgebaute graphische Untersuchung zeigt, dass das untersuchte bergseitige Triebgestell in allen vier Varianten im Spiessgang läuft. Damit ist x wiederum durch \bar{x} gegeben. Die entsprechenden, für die weitere Untersuchung massgebenden Grössen sind in Tabelle 11 zusammengestellt.

Wie im Beispiel der Lokomotive weichen die nach Gl. (104) gefundenen H_r -Werte um ΔH von den eingesetzten H_{Tr} -Werten ab. Um genauere Ergebnisse zu erhalten, ist es somit notwendig, mindestens einen zweiten Iterationsschritt vorzunehmen, auf den hier verzichtet wird, da er in Bezug auf die Berechnungsmethode nichts Neues bringt.

Die kleinsten Sicherheitswerte \ominus ergeben sich bei den Varianten β und δ für das vorlaufende linke Rad und bei den Varianten β und γ für das hintere rechte Rad. Sie ergeben sich somit als solche bei den Varianten, wo sich μ_z am betreffenden Zahnrad voll in Querrichtung auswirkt. Aus der in Tabelle 11 angegebenen Rechnung geht hervor, dass der Spurkranzauftrieb wesentlich zur Radentlastung beiträgt. Bei der Variante β z. B. beträgt er 3875 kp beim linken Rad I. Die entsprechende totale Entlastung beträgt $6750 - 1195 = 5555$ kp. Der Spurkranzauftrieb macht hier somit rund 70% der totalen Entlastung aus.

8. Einfluss des Schienenformzustandes

Aus den angeführten Beispielen ist zu erkennen, wie wichtig die Verhältnisse am Spurkranzdruckpunkt sind. Bei der zugehörigen Berechnung wurde für den Spurkranzwinkel γ der übliche Wert von 60° und für den Reibungskoeffizienten μ_b der Wert 0,3 vorausgesetzt. Der Wert $\gamma = 60^\circ$ kann als gültig betrachtet werden, solange einerseits die seitlich führende Schienenkopfabrundung nicht zu einer um weniger als 60° geneigten Fläche abgenützt und andererseits der Spurkranz nicht durch Abnützung scharf geworden ist. Der Wert $\mu_b = 0,3$ entspricht etwa dem nicht geschmierten Zustand der Führungskante der Schiene bzw. des Spurkranzes. Eine gute Schmierung verbessert selbstverständlich die Verhältnisse.

Die für die Variante β des Beispiels II aufgestellten Kurven von Bild 31 geben einen Überblick über den Einfluss von δ und μ_b . Daraus

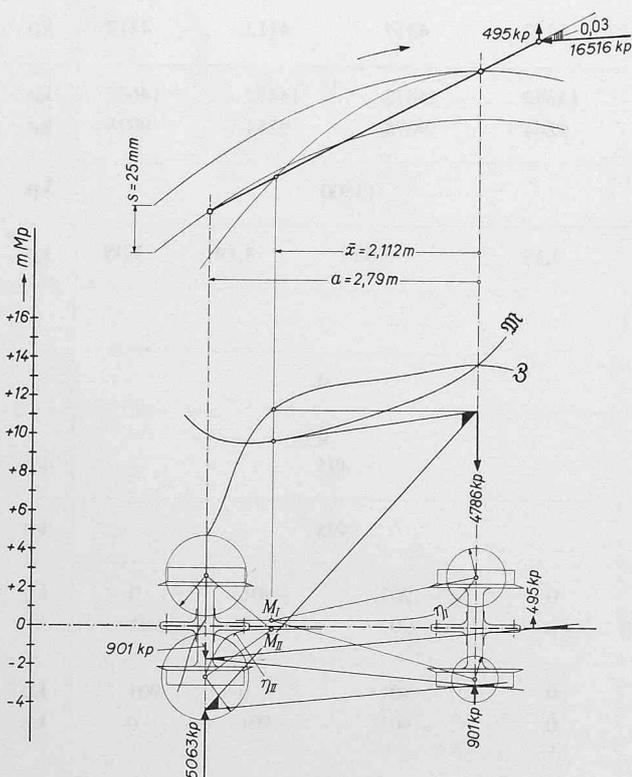


Bild 30. Ermittlung der Richtkräfte P des bergseitigen Triebgestelles des Beispiels II (Variante α)

Tabelle 11

Gl.		Variante				
		α	β	γ	δ	
(88)	η_I	0,0604	0,0666	0,0604	0,0666	m
	η_{II}	— 0,0246	— 0,0299	— 0,0299	— 0,0246	m
(81)	U_{aI}	— 337	— 329	— 337	— 329	kp
	U_{iI}	337	329	337	329	kp
	U_{aII}	— 1360	— 1342	— 1342	— 1360	kp
	U_{iII}	1360	1342	1342	1360	kp
(76)	S_{aI}	1500	1485	1500	1485	kp
	S_{iI}	1195	1156	1195	1156	kp
	S_{aII}	— 1648	— 1611	— 1611	— 1648	kp
	S_{iII}	— 1807	— 1802	— 1802	— 1807	kp
(74)	\mathfrak{M}_I	6052	5930	6052	5930	mkp
	\mathfrak{M}_{II}	3798	3750	3750	3798	mkp
	\mathfrak{M}	9850	9680	9802	9728	mkp
(75)	\mathfrak{Z}_I	361	352	361	352	mkp
	\mathfrak{Z}_{II}	11096	10959	10959	11096	mkp
	\mathfrak{Z}	11457	11311	11320	11448	mkp
(96)	M	— 297	— 2810	— 2810	— 297	mkp
	$\mathfrak{Z} - M$	11754	14121	14130	11745	mkp
(100)	P_{II}	4212	5063	5065	4210	kp
(102)	P_I	3947	4786	3941	4792	kp
(24)	$\gamma^* = \frac{0,57735 + 0,3}{1 - 0,3 \cdot 0,57735}$	1,061				
(105)	μ_{sqLI}	0,2928	0,2929	0,2928	0,2929	
	$1 + \mu_{sqLI} \cdot \gamma^*$	1,3107	1,3108	1,3107	1,3108	
(107)	\mathfrak{F}_{LI}	3010	3652	3007	3657	kp
	R_{LI}	5123	5070	5123	5070	kp
	$\gamma^* \mathfrak{F}_{LI}$	3192	3875	3190	3880	kp
(108)	\mathfrak{R}_{LI}	1931	1195	1933	1190	kp
(6)	\mathfrak{E}_{LI}	1,401	1,215	1,401	1,214	
(105)	μ_{sqRII}	— 0,2396	— 0,2408	— 0,2408	— 0,2396	
	$1 - \mu_{sqRII} \cdot \gamma^*$	1,2543	1,2555	1,2555	1,2543	
(107)	\mathfrak{F}_{RII}	3357	4032	4033	3355	kp
	R_{RII}	7540	7483	7483	7540	kp
	$\gamma^* \mathfrak{F}_{RII}$	3562	4278	4279	3560	kp
(108)	\mathfrak{R}_{RII}	3978	3205	3204	3980	kp
(6)	\mathfrak{E}_{RII}	2,434	1,904	1,903	2,436	

Tabelle 11 (Fortsetzung)

Gl.		Variante				
		α	β	γ	δ	
(104)	H_I	1252	1244	1246	1250	kp
	H_{II}	- 757	- 749	- 751	- 755	kp
(91)	ΔH_I	650	641	644	647	kp
	ΔH_{II}	- 650	- 641	- 644	- 647	kp
Kontrolle	H_{TI}	601	601	601	601	kp
	H_{TII}	- 106	- 106	- 106	- 106	kp
	$H_r = H_{Tr} + \Delta H_r \begin{cases} H_I \\ H_{II} \end{cases}$	1251	1242	1245	1248	kp
		- 756	- 747	- 750	- 752	kp

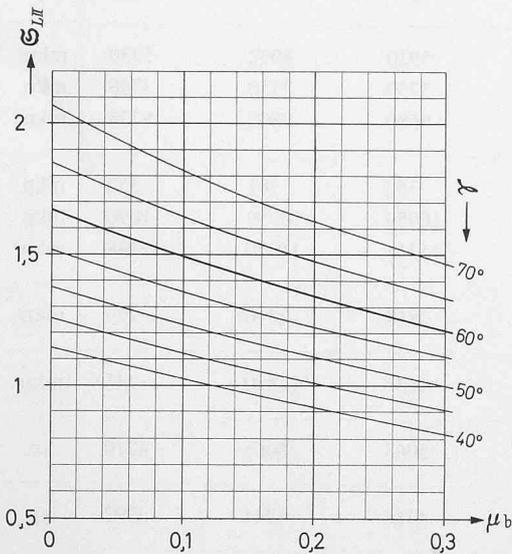


Bild 31. Einfluss von δ und μ_b auf \mathcal{S}_{LII} im Falle der Variante des Beispiels II (Voraussetzung $\mu_s = 0,3$)

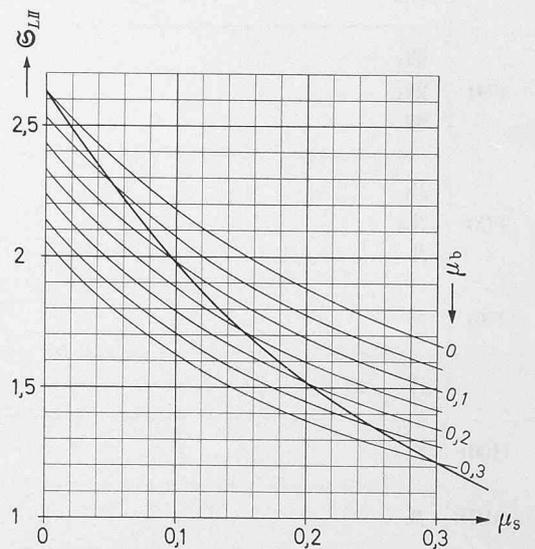


Bild 32. Einfluss von μ_b und μ_s auf \mathcal{S}_{LII} im Falle der Variante des Beispiels II (Voraussetzung $\gamma = 60^\circ$)

erkennt man u. a., dass sich der Sicherheitsfaktor \mathcal{S}_{LII} bei $\gamma = 60^\circ$ von 1,215 auf 1,415 erhöht, wenn durch Schmierung μ_b von 0,3 auf 0,15 verringert wird.

9. Einfluss des Schienenoberflächenzustandes

Bei der Berechnung wurde der Reibungskoeffizient μ_s im Aufstandspunkt ebenfalls zu 0,3 angenommen. Bei Adhäsionsbahnen wird ein sauberer, trockener Zustand des Schienenkopfes angestrebt. Bei reinen Zahnradbahnen hingegen ist man nicht an diese Bedingung gebunden, da ja Zug- und Bremskräfte meistens allein durch die Zahnstange übertragen werden. Dieser Reibungskoeffizient hat einen direkten Einfluss auf die Richtkräfte P und daher auf die Spurkranzdrücke und die Radentlastungen. Der Stabilität wegen ist es somit vorteilhaft, die Schienenlauffläche ebenfalls zu schmieren. Die für die Variante β des Beispiels II unter der Voraussetzung $\gamma = 60^\circ$ und mit μ_b als Parameter aufgestellten Kurven von Bild 32 zeigen, wie der Sicherheitsfaktor \mathcal{S} von μ_s abhängt. Bei Schmierung der Schiene kann angenommen werden, dass μ_b den gleichen Wert wie μ_s aufweist. In diesem Falle ergibt sich die dick ausgezogene Kurve. Daraus ersieht man, wie wichtig der Einfluss dieser μ -Werte ist. Beträgt z. B. bei $\mu_b = \mu_s = 0,3$ der Sicherheitsfaktor \mathcal{S} nur 1,215, so erhöht er sich auf 1,72, wenn dank Schmierung dieser Reibungswert auf 0,15 verringert wird. Da es aber fraglich ist, ob der entsprechende Schienenzustand wirklich stets vorliegt, ist es vorsichtiger, die Stabilität auf Grund der schlechteren Verhältnisse nachzuprüfen.

10. Einfluss des Zahnstangenzustandes

Bei den bisherigen Ausführungen wurde ein einwandfreier Zustand der Zahnstange und der Zahnräder vorausgesetzt. Hiezu ge-

hört u. a., dass die zum Eingriff kommende Zahnflanke der Zahnstange gerade verläuft und um den Eingriffswinkel β gegenüber der Vertikalen geneigt ist. In Wirklichkeit tritt stets eine Abnutzung am oberen Teil der Zahnflanke auf, die zu einer gewissen Abrundung der Zahnkante führt und die bei zu lange im Betrieb gebliebenen Zahnstangen sogar eine Neigungsschwächung der Zahnflanke bewirken kann. Verläuft diese Neigungsschwächung über einen grösseren Teil der Zahnflanke, dann erfährt der Zahnauftrieb eine nicht unbedeutende Erhöhung, die eine entsprechende Verschlechterung der Stabilitätsverhältnisse zur Folge hat. Es ist daher wichtig, dass nur solche Zahnstangen im Betrieb gelassen werden, deren Kopfkantenabnutzung nicht zu tief gelangt.

Korrektur: In den Gleichungen (59), (61) und (62), Heft 4, S. 66, ist an Stelle von δ^* zu setzen γ^* .

Schlussbemerkungen

Die angeführten Beispiele zeigen, dass jede konkrete Untersuchung einen ziemlich grossen Umfang annimmt. Dies ist besonders für die Triebfahrzeuge der Fall. Für die Wagen vereinfacht sich die Untersuchung dadurch, dass die durch Zugkraft oder Bremskraft gegebenen Entlastungen $\Delta_z L$ und $\Delta_z R$ wegfallen, wenn die Wagen selbst nicht an der Bremsung teilnehmen.

Bei Handrechnung braucht ein gut eingeführter Rechner etwa 15 bis 30 Stunden, um einen bestimmten Fall zu untersuchen. Dies kann im einzelnen Fall in Kauf genommen werden, jedoch nicht mehr, wenn für ein bestimmtes Fahrzeug alle möglichen Betriebsfälle nachgeprüft werden müssen, denn es kann 10 bis 15 solcher Fälle geben. Die Ableitungen wurden daher so aufgebaut, dass alle notwendigen Berechnungen mittels Computer durchgeführt werden können. Ein entsprechendes Berechnungsprogramm wird zur Zeit aufgestellt.

η/e (Absoluter Wert)

$(x - \alpha_r) / e$ (Absoluter Wert)

	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	
0	0,0000 1,0000	0 + 1 1,0000	1,0000 0,0000	1,0000 0,0000	1,0000 0,0000	1,0000 0,0000	1,0000 0,0000	1,0000 0,0000													
0,1	0,0000 0,9950	0,0010 0,9949	0,0021 0,9944	0,0036 0,9935	0,0055 0,9919	0,0086 0,9892	0,0140 0,9841	0,0248 0,9735	0,0520 0,9464	0,1458 0,8529	0,4994 0,4994	0,8530 0,1459	0,9467 0,0523	0,9739 0,0252	0,9846 0,0145	0,9899 0,0093	0,9928 0,0064	0,9946 0,0047	0,9958 0,0035	0,9966 0,0028	0,9966 0,0028
0,2	0,0000 0,9806	0,0038 0,9800	0,0081 0,9783	0,0134 0,9749	0,0206 0,9693	0,0314 0,9599	0,0489 0,9434	0,0805 0,9126	0,1434 0,8505	0,2736 0,7209	0,4975 0,4975	0,8515 0,2741	0,9411 0,1444	0,9741 0,0821	0,9855 0,0511	0,9826 0,0342	0,9729 0,0242	0,9794 0,0179	0,9838 0,0137	0,9869 0,0107	0,9869 0,0107
0,3	0,0000 0,9578	0,0080 0,9567	0,0169 0,9532	0,0276 0,9468	0,0417 0,9361	0,0615 0,9190	0,0914 0,8914	0,1388 0,8459	0,2158 0,7705	0,3358 0,6520	0,4945 0,4945	0,6531 0,3369	0,7728 0,2181	0,8494 0,1422	0,8961 0,0961	0,9252 0,0677	0,9439 0,0495	0,9565 0,0374	0,9653 0,0290	0,9717 0,0230	0,9717 0,0230
0,4	0,0000 0,9285	0,0130 0,9268	0,0271 0,9216	0,0438 0,9120	0,0647 0,8968	0,0927 0,8736	0,1315 0,8386	0,1867 0,7867	0,2645 0,7117	0,3680 0,6105	0,4903 0,4903	0,6124 0,3699	0,7155 0,2683	0,7926 0,1926	0,8467 0,1396	0,8842 0,1033	0,9102 0,0782	0,9287 0,0605	0,9422 0,0478	0,9522 0,0384	0,9522 0,0384
0,5	0,0000 0,8944	0,0181 0,8923	0,0375 0,8855	0,0598 0,8735	0,0868 0,8550	0,1208 0,8279	0,1649 0,7896	0,2224 0,7369	0,2961 0,6675	0,3855 0,5816	0,4851 0,4851	0,5845 0,3883	0,6733 0,3019	0,7458 0,2313	0,8018 0,1771	0,8438 0,1367	0,8751 0,1069	0,8985 0,0848	0,9162 0,0682	0,9298 0,0557	0,9298 0,0557
0,6	0,0000 0,8575	0,0229 0,8550	0,0472 0,8472	0,0735 0,8336	0,1060 0,8131	0,1441 0,7843	0,1908 0,7555	0,2479 0,6951	0,3162 0,6325	0,3946 0,5590	0,4789 0,4789	0,5630 0,3986	0,6405 0,3243	0,7074 0,2602	0,7624 0,2077	0,8063 0,1661	0,8407 0,1336	0,8677 0,1085	0,8889 0,0889	0,9057 0,0736	0,9057 0,0736
0,7	0,0000 0,8192	0,0272 0,8165	0,0556 0,8082	0,0867 0,7938	0,1218 0,7726	0,1625 0,7437	0,2100 0,7061	0,2654 0,6593	0,3286 0,6034	0,3985 0,5399	0,4719 0,4719	0,5451 0,4036	0,6138 0,3391	0,6753 0,2814	0,7281 0,2319	0,7721 0,1909	0,8082 0,1574	0,8376 0,1304	0,8614 0,1088	0,8807 0,0914	0,8807 0,0914
0,8	0,0000 0,7809	0,0307 0,7781	0,0625 0,7696	0,0966 0,7551	0,1341 0,7341	0,1762 0,7062	0,2236 0,6708	0,2768 0,6280	0,3356 0,5782	0,3988 0,5228	0,4642 0,4642	0,5293 0,4052	0,5912 0,3486	0,6478 0,2967	0,6979 0,2507	0,7412 0,2112	0,7779 0,1779	0,8087 0,1501	0,8343 0,1272	0,8557 0,1083	0,8557 0,1083
0,9	0,0000 0,7433	0,0334 0,7405	0,0678 0,7322	0,1041 0,7181	0,1432 0,6979	0,1859 0,6716	0,2327 0,6389	0,2838 0,6000	0,3387 0,5557	0,3967 0,5071	0,4560 0,4560	0,5148 0,4044	0,5712 0,3543	0,6237 0,3075	0,6712 0,2651	0,7133 0,2276	0,7498 0,1951	0,7813 0,1674	0,8082 0,1438	0,8283 0,1240	0,8283 0,1240
1,0	0,0000 0,7071	0,0355 0,7045	0,0718 0,6965	0,1096 0,6830	0,1496 0,6641	0,1924 0,6396	0,2383 0,6097	0,2873 0,5746	0,3390 0,5351	0,3927 0,4922	0,4472 0,4472	0,5012 0,4017	0,5532 0,3571	0,6022 0,3149	0,6472 0,2758	0,6878 0,2406	0,7239 0,2094	0,7556 0,1821	0,7832 0,1585	0,8072 0,1382	0,8072 0,1382
1,1	0,0000 0,6727	0,0369 0,6702	0,0745 0,6627	0,1133 0,6501	0,1537 0,6326	0,1963 0,6101	0,2411 0,5829	0,2882 0,5513	0,3372 0,5161	0,3874 0,4780	0,4381 0,4381	0,4882 0,3976	0,5367 0,3578	0,5826 0,3195	0,6254 0,2837	0,6646 0,2508	0,6999 0,2211	0,7315 0,1946	0,7595 0,1713	0,7841 0,1509	0,7841 0,1509
1,2	0,0000 0,6402	0,0379 0,6379	0,0762 0,6309	0,1155 0,6193	0,1560 0,6032	0,1981 0,5827	0,2419 0,5581	0,2872 0,5298	0,3338 0,4982	0,3812 0,4643	0,4287 0,4287	0,4756 0,3926	0,5211 0,3567	0,5646 0,3220	0,6053 0,2891	0,6431 0,2585	0,6776 0,2304	0,7088 0,2050	0,7369 0,1822	0,7620 0,1620	0,7620 0,1620
1,3	0,0000 0,6097	0,0384 0,6076	0,0771 0,6012	0,1165 0,5906	0,1569 0,5759	0,1984 0,5573	0,2410 0,5351	0,2847 0,5086	0,3293 0,4814	0,3743 0,4510	0,4192 0,4192	0,4635 0,3868	0,5065 0,3544	0,5477 0,3229	0,5867 0,2926	0,6231 0,2641	0,6567 0,2377	0,6875 0,2135	0,7156 0,1915	0,7409 0,1716	0,7409 0,1716
1,4	0,0000 0,5812	0,0385 0,5793	0,0773 0,5735	0,1166 0,5638	0,1566 0,5505	0,1974 0,5337	0,2389 0,5136	0,2812 0,4907	0,3240 0,4654	0,3669 0,4382	0,4096 0,4096	0,4516 0,3804	0,4925 0,3511	0,5319 0,3223	0,5692 0,2945	0,6044 0,2681	0,6372 0,2433	0,6675 0,2203	0,6953 0,1991	0,7207 0,1799	0,7207 0,1799
1,5	0,0000 0,5547	0,0384 0,5529	0,0771 0,5476	0,1160 0,5389	0,1555 0,5269	0,1954 0,5117	0,2359 0,4936	0,2769 0,4730	0,3180 0,4502	0,3592 0,4257	0,4000 0,4000	0,4401 0,3736	0,4792 0,3470	0,5169 0,3207	0,5528 0,2952	0,5869 0,2706	0,6188 0,2474	0,6485 0,2256	0,6760 0,2054	0,7014 0,1869	0,7014 0,1869
1,6	0,0000 0,5300	0,0381 0,5284	0,0764 0,5236	0,1149 0,5157	0,1537 0,5048	0,1928 0,4911	0,2323 0,4748	0,2720 0,4562	0,3117 0,4357	0,3513 0,4136	0,3904 0,3904	0,4289 0,3665	0,4664 0,3424	0,5026 0,3183	0,5373 0,2948	0,5703 0,2720	0,6014 0,2503	0,6306 0,2297	0,6577 0,2105	0,6829 0,1927	0,6829 0,1927
1,7	0,0000 0,5070	0,0377 0,5056	0,0754 0,5012	0,1133 0,4941	0,1514 0,4843	0,1897 0,4719	0,2282 0,4572	0,2667 0,4404	0,3051 0,4219	0,3433 0,4020	0,3810 0,3810	0,4180 0,3593	0,4541 0,3372	0,4890 0,3152	0,5225 0,2935	0,5545 0,2724	0,5849 0,2521	0,6135 0,2327	0,6403 0,2145	0,6653 0,1974	0,6653 0,1974
1,8	0,0000 0,4856	0,0371 0,4843	0,0743 0,4804	0,1115 0,4740	0,1489 0,4651	0,1863 0,4539	0,2237 0,4406	0,2611 0,4255	0,2983 0,4088	0,3352 0,3907	0,3716 0,3716	0,4074 0,3519	0,4422 0,3318	0,4760 0,3116	0,5085 0,2915	0,5396 0,2719	0,5692 0,2530	0,5972 0,2348	0,6237 0,2175	0,6484 0,2012	0,6484 0,2012
1,9	0,0000 0,4657	0,0365 0,4646	0,0730 0,4610	0,1095 0,4552	0,1460 0,4472	0,1826 0,4371	0,2191 0,4251	0,2554 0,4114	0,2915 0,3962	0,3273 0,3798	0,3625 0,3625	0,3970 0,3445	0,4308 0,3261	0,4635 0,3075	0,4950 0,2890	0,5253 0,2708	0,5543 0,2531	0,5818 0,2360	0,6078 0,2197	0,6323 0,2042	0,6323 0,2042
2,0	0,0000 0,4472	0,0358 0,4461	0,0716 0,4429	0,1073 0,4377	0,1431 0,4304	0,1787 0,4213	0,2143 0,4104	0,2497 0,3980	0,2847 0,3842	0,3194 0,3693	0,3536 0,3536	0,3870 0,3371	0,4197 0,3202	0,4515 0,3031	0,4822 0,2861	0,5117 0,2692	0,5400 0,2526	0,5670 0,2366	0,5926 0,2212	0,6168 0,2064	0,6168 0,2064
2,2	0,0000 0,4138	0,0343 0,4129	0,0686 0,4103	0,1028 0,4060	0,1369 0,4000	0,1709 0,3925	0,2046 0,3835	0,2382 0,3733	0,2714 0,3619	0,3041 0,3495	0,3363 0,3363	0,3679 0,3225	0,3988 0,3083	0,4289 0,2938	0,4580 0,2791	0,4862 0,2645	0,5133 0,2501	0,5392 0,2360	0,5640 0,2223	0,5877 0,2090	0,5877 0,2090
2,4	0,0000 0,3846	0,0328 0,3839	0,0655 0,3817	0,0981 0,3781	0,1307 0,3732	0,1630 0,3670	0,1952 0,3595	0,2270 0,3510	0,2585 0,3415	0,2895 0,3312	0,3201 0,3201	0,3501 0,3084	0,3794 0,2963	0,4080 0,2839	0,4358 0,2714	0,4627 0,2587	0,4887 0,2461	0,5137 0,2337	0,5377 0,2215	0,5608 0,2096	0,5608 0,2096
2,6	0,0000 0,3590	0,0313 0,3584	0,0625 0,3566	0,0936 0,3536	0,1246 0,3495	0,1554 0,3443	0,1860 0,3381	0,2163 0,3309	0,2463 0,3230	0,2758 0,3142	0,3049 0,3049	0,3334 0,2950	0,3613 0,2846	0,3886 0,2740	0,4152 0,2631	0,4410 0,2521	0,4660 0,2411	0,4901 0,2302	0,5134 0,2194	0,5358 0,2087	0,5358 0,2087
2,8	0,0000 0,3363	0,0298 0,3358	0,0596 0,3343	0,0893 0,3318	0,1188 0,3284	0,1482 0,3240	0,1774 0,3188	0,2062 0,3128	0,2348 0,3060	0,2629 0,2986	0,2906 0,2906	0,3178 0,2822	0,3445 0,2733	0,3706 0,2641	0,3961 0,2547	0,4209 0,2451	0,4450 0,2355	0,4682 0,2258	0,4909 0,2162	0,5127 0,2067	0,5127 0,2067
3,0	0,0000 0,3162	0,0285 0,3158	0,0569 0,3145	0,0852 0,3124	0,1134 0,3095	0,1414 0,3058	0,1692 0,3014	0,1968 0,2963	0,2240 0,2905	0,2509 0,2842	0,2773 0,2773	0,3034 0,2701	0,3289 0,2624	0,3540 0,2545	0,3784 0,2463	0,4023 0,2379	0,4255 0,2294	0,4481 0,2209	0,4700 0,2123	0,4912 0,2038	0,4912 0,2038
3,2	0,0000 0,2983	0,0272 0,2979	0,0543 0,2968	0,0813 0,2950	0,1083 0,2926	0,1350 0,2894	0,1616 0,2856	0,1879 0,2812	0,2139 0,2763	0,2397 0,2709	0,2650 0,2650	0,2899 0,2589	0,3145 0,2521	0,3385 0,2451	0,3620 0,2380	0,3850 0,2306	0,4074 0,2232	0,4293 0,2156	0,4505 0,2080	0,4711 0,2004	0,4711 0,2004
3,4	0,0000 0,2822	0,0260 0,2819	0,0519 0,2809	0,0777 0,2794	0,1035 0,2773	0,1291 0,2746	0,1545 0,2713	0,1797 0,2676	0,2046 0,2633	0,2292 0,2586	0,2535 0,2535	0,2774 0,2480	0,3010 0,2423	0,3241 							

η/e (Absoluter Wert)

$(x - \alpha_T) / e$ (Absoluter Wert)

	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,3	3,6	3,9	4,2	4,5	4,8	5,1	5,4	5,7	6,0	6,4	6,8	7,2	7,6	
0,3	0,9764 0,0186	0,9829 0,0127																			
0,4	0,9599 0,0314	0,9705 0,0218	0,9773 0,0158																		
0,5	0,9404 0,0460	0,9555 0,0325	0,9655 0,0238	0,9725 0,0180	0,9775 0,0140																
0,6	0,9190 0,0615	0,9386 0,0442	0,9520 0,0328	0,9614 0,0250	0,9682 0,0195	0,9734 0,0156															
0,7	0,8965 0,0773	0,9203 0,0566	0,9369 0,0425	0,9489 0,0327	0,9577 0,0257	0,9644 0,0206	0,9718 0,0152														
0,8	0,8736 0,0927	0,9011 0,0690	0,9208 0,0526	0,9353 0,0409	0,9462 0,0324	0,9545 0,0261	0,9638 0,0193	0,9705 0,0147													
0,9	0,8506 0,1073	0,8813 0,0813	0,9039 0,0628	0,9209 0,0493	0,9338 0,0393	0,9438 0,0318	0,9550 0,0238	0,9632 0,0182	0,9693 0,0142												
1,0	0,8279 0,1208	0,8613 0,0931	0,8865 0,0728	0,9058 0,0578	0,9206 0,0465	0,9323 0,0379	0,9455 0,0285	0,9553 0,0219	0,9626 0,0172	0,9682 0,0138											
1,1	0,8058 0,1331	0,8414 0,1043	0,8689 0,0826	0,8902 0,0662	0,9069 0,0536	0,9202 0,0440	0,9355 0,0333	0,9468 0,0258	0,9554 0,0204	0,9620 0,0163	0,9673 0,0133										
1,2	0,7843 0,1441	0,8217 0,1146	0,8511 0,0919	0,8743 0,0743	0,8928 0,0608	0,9077 0,0502	0,9249 0,0383	0,9378 0,0298	0,9477 0,0236	0,9554 0,0190	0,9615 0,0155	0,9664 0,0128									
1,3	0,7636 0,1539	0,8024 0,1241	0,8334 0,1006	0,8583 0,0822	0,8784 0,0677	0,8947 0,0563	0,9139 0,0433	0,9284 0,0339	0,9395 0,0270	0,9483 0,0218	0,9553 0,0179	0,9610 0,0148	0,9656 0,0124								
1,4	0,7437 0,1625	0,7835 0,1327	0,8159 0,1088	0,8423 0,0897	0,8638 0,0745	0,8815 0,0623	0,9025 0,0483	0,9186 0,0381	0,9310 0,0305	0,9409 0,0247	0,9488 0,0203	0,9552 0,0169	0,9605 0,0142	0,9649 0,0120							
1,5	0,7246 0,1699	0,7651 0,1404	0,7986 0,1163	0,8263 0,0968	0,8492 0,0810	0,8682 0,0682	0,8909 0,0533	0,9085 0,0423	0,9222 0,0340	0,9331 0,0277	0,9420 0,0228	0,9492 0,0190	0,9551 0,0160	0,9601 0,0136	0,9643 0,0116						
1,6	0,7062 0,1762	0,7472 0,1472	0,7817 0,1232	0,8105 0,1034	0,8345 0,0871	0,8547 0,0738	0,8791 0,0582	0,8981 0,0464	0,9131 0,0375	0,9251 0,0307	0,9348 0,0254	0,9428 0,0212	0,9494 0,0179	0,9550 0,0152	0,9597 0,0130	0,9636 0,0112					
1,7	0,6885 0,1815	0,7299 0,1532	0,7651 0,1294	0,7948 0,1094	0,8199 0,0929	0,8411 0,0792	0,8671 0,0629	0,8875 0,0505	0,9037 0,0410	0,9168 0,0337	0,9275 0,0279	0,9362 0,0234	0,9435 0,0198	0,9496 0,0168	0,9548 0,0145	0,9593 0,0125	0,9642 0,0104				
1,8	0,6716 0,1859	0,7131 0,1584	0,7489 0,1349	0,7794 0,1150	0,8054 0,0983	0,8276 0,0843	0,8500 0,0675	0,8767 0,0545	0,8942 0,0445	0,9083 0,0367	0,9198 0,0306	0,9294 0,0257	0,9374 0,0217	0,9441 0,0186	0,9498 0,0159	0,9547 0,0138	0,9602 0,0115				
1,9	0,6553 0,1895	0,6969 0,1629	0,7331 0,1399	0,7643 0,1201	0,7911 0,1033	0,8141 0,0891	0,8428 0,0719	0,8658 0,0584	0,8844 0,0479	0,8996 0,0397	0,9120 0,0332	0,9224 0,0279	0,9310 0,0237	0,9384 0,0203	0,9446 0,0175	0,9499 0,0151	0,9559 0,0126	0,9609 0,0106			
2,0	0,6396 0,1924	0,6812 0,1668	0,7177 0,1442	0,7494 0,1247	0,7769 0,1080	0,8008 0,0937	0,8307 0,0761	0,8548 0,0622	0,8745 0,0513	0,8907 0,0427	0,9040 0,0358	0,9151 0,0302	0,9245 0,0257	0,9324 0,0221	0,9392 0,0190	0,9450 0,0165	0,9516 0,0138	0,9570 0,0116	0,9616 0,0099	0,9655 0,0085	
2,2	0,6101 0,1963	0,6514 0,1726	0,6882 0,1513	0,7207 0,1326	0,7493 0,1161	0,7744 0,1018	0,8064 0,0838	0,8328 0,0694	0,8545 0,0578	0,8725 0,0485	0,8876 0,0409	0,9002 0,0348	0,9109 0,0298	0,9201 0,0256	0,9279 0,0222	0,9347 0,0193	0,9423 0,0162	0,9487 0,0137	0,9541 0,0117	0,9587 0,0101	
2,4	0,5827 0,1981	0,6236 0,1764	0,6604 0,1565	0,6934 0,1387	0,7227 0,1227	0,7488 0,1087	0,7826 0,0906	0,8107 0,0759	0,8342 0,0638	0,8540 0,0540	0,8706 0,0459	0,8848 0,0393	0,8968 0,0338	0,9071 0,0292	0,9160 0,0254	0,9237 0,0222	0,9325 0,0187	0,9399 0,0159	0,9462 0,0136	0,9515 0,0117	
2,6	0,5573 0,1984	0,5976 0,1785	0,6342 0,1601	0,6674 0,1433	0,6973 0,1280	0,7241 0,1144	0,7592 0,0966	0,7888 0,0817	0,8140 0,0694	0,8353 0,0592	0,8534 0,0507	0,8689 0,0436	0,8822 0,0377	0,8937 0,0328	0,9036 0,0286	0,9123 0,0251	0,9222 0,0212	0,9306 0,0181	0,9377 0,0155	0,9438 0,0134	
2,8	0,5337 0,1974	0,5732 0,1793	0,6096 0,1624	0,6427 0,1467	0,6729 0,1321	0,7002 0,1190	0,7364 0,1016	0,7673 0,0869	0,7938 0,0744	0,8165 0,0639	0,8360 0,0551	0,8528 0,0477	0,8673 0,0415	0,8799 0,0362	0,8909 0,0318	0,9005 0,0280	0,9115 0,0238	0,9209 0,0203	0,9289 0,0175	0,9357 0,0151	
3,0	0,5117 0,1954	0,5505 0,1791	0,5864 0,1635	0,6194 0,1488	0,6497 0,1352	0,6773 0,1226	0,7143 0,1058	0,7463 0,0913	0,7739 0,0789	0,7979 0,0683	0,8186 0,0593	0,8365 0,0517	0,8522 0,0452	0,8658 0,0396	0,8778 0,0349	0,8883 0,0308	0,9004 0,0263	0,9108 0,0226	0,9196 0,0195	0,9273 0,0169	
3,2	0,4911 0,1928	0,5291 0,1780	0,5645 0,1637	0,5973 0,1501	0,6276 0,1373	0,6554 0,1254	0,6929 0,1093	0,7257 0,0952	0,7544 0,0829	0,7794 0,0723	0,8012 0,0632	0,8202 0,0553	0,8369 0,0486	0,8516 0,0428	0,8645 0,0379	0,8759 0,0336	0,8891 0,0288	0,9004 0,0248	0,9101 0,0215	0,9185 0,0187	
3,4	0,4719 0,1897	0,5091 0,1763	0,5439 0,1632	0,5764 0,1506	0,6066 0,1387	0,6345 0,1275	0,6724 0,1121	0,7058 0,0984	0,7353 0,0863	0,7612 0,0758	0,7839 0,0667	0,8040 0,0587	0,8216 0,0519	0,8372 0,0459	0,8510 0,0408	0,8632 0,0363	0,8775 0,0312	0,8897 0,0270	0,9003 0,0235	0,9095 0,0205	
3,6	0,4539 0,1863	0,4903 0,1741	0,5245 0,1621	0,5566 0,1505	0,5866 0,1394	0,6145 0,1288	0,6526 0,1142	0,6865 0,1010	0,7166 0,0893	0,7433 0,0789	0,7669 0,0698	0,7878 0,0618	0,8063 0,0549	0,8228 0,0488	0,8374 0,0435	0,8504 0,0389	0,8656 0,0336	0,8788 0,0292	0,8902 0,0254	0,9002 0,0223	
3,8	0,4371 0,1826	0,4726 0,1715	0,5062 0,1605	0,5379 0,1498	0,5676 0,1395	0,5954 0,1296	0,6336 0,1158	0,6678 0,1031	0,6984 0,0918	0,7258 0,0816	0,7501 0,0726	0,7718 0,0647	0,7911 0,0577	0,8083 0,0515	0,8237 0,0461	0,8375 0,0413	0,8537 0,0359	0,8677 0,0313	0,8800 0,0274	0,8907 0,0240	
4,0	0,4213 0,1787	0,4560 0,1687	0,4890 0,1586	0,5202 0,1488	0,5496 0,1392	0,5772 0,1299	0,6153 0,1169	0,6498 0,1048	0,6808 0,0938	0,7087 0,0840	0,7336 0,0751	0,7560 0,0672	0,7760 0,0602	0,7940 0,0540	0,8101 0,0485	0,8246 0,0437	0,8416 0,0381	0,8565 0,0333	0,8695 0,0292	0,8810 0,0258	
4,2	0,4064 0,1748	0,4404 0,1657	0,4727 0,1565	0,5034 0,1474	0,5324 0,1385	0,5598 0,1299	0,5978 0,1175	0,6324 0,1061	0,6637 0,0955	0,6920 0,0859	0,7175 0,0773	0,7404 0,0695	0,7611 0,0626	0,7797 0,0563	0,7965 0,0508	0,8116 0,0459	0,8295 0,0402	0,8452 0,0353	0,8590 0,0311	0,8711 0,0275	
4,4	0,3925 0,1709	0,4256 0,1625	0,4573 0,1541	0,4875 0,1457	0,5161 0,1375	0,5432 0,1294	0,5811 0,1178	0,6157 0,1070	0,6472 0,0969	0,6758 0,0876	0,7017 0,0792	0,7252 0,0715	0,7464 0,0647	0,7656 0,0585	0,7829 0,0529	0,7987 0,0480	0,8174 0,0422	0,8338 0,0371	0,8483 0,0328	0,8611 0,0291	
4,6	0,3793 0,1669	0,4117 0,1593	0,4428 0,1516	0,4724 0,1439	0,5006 0,1362	0,5275 0,1287	0,5650 0,1178	0,5996 0,1075	0,6312 0,0979	0,6600 0,0890	0,6863 0,0808	0,7102 0,0733	0,7319 0,0665	0,7516 0,0604	0,7695 0,0549	0,7858 0,0499	0,8053 0,0440	0,8224 0,0389	0,8376 0,0345	0,8511 0,0307	
4,8	0,3670 0,1630	0,3986 0,1561	0,4290 0,1490	0,4581 0,1419	0,4859 0,1348	0,5124 0,1278	0,5497 0,1176	0,5841 0,1078	0,6157 0,0986	0,6448 0,0901	0,6713 0,0821	0,6955 0,0748	0,7177 0,0682	0,7379 0,0621	0,7563 0,0566	0,7731 0,0517	0,7932 0,0458	0,8110 0,0406	0,8269 0,0361	0,8410 0,0322	
5,0	0,3553 0,1592	0,3862 0,1528	0,4160 0,1463	0,4445 0,1398	0,4719 0,1332	0,4980 0,1267	0,5350 0,1171	0,5692 0,1079	0,6008 0,0991	0,6299 0,0909	0,6567 0,0832	0,6812 0,0762	0,7037 0,0697	0,7243 0,0637	0,7432 0,0583	0,7604 0,0533	0,7812 0,0474	0,7996 0,0422	0,8161 0,0377	0,8308 0,0337	
5,2	0,3443 0,1554	0,3745 0,1496	0,4036 0,1436	0,4316 0,1376	0,4586 0,1315	0,4843 0,1254	0,5209 0,1164	0,5549 0,1077	0,5864 0,0994	0,6156 0,0915	0,6425 0,0841	0,6673 0,0773	0,6901 0,0709	0,7110 0,0651	0,7303 0,0597	0,7479 0,0548	0,7693 0,0489	0,7883 0,0437	0,8053 0,0392	0,8206 0,0351	
5,4	0,3339 0,1518	0,3634 0,1464	0,3919 0,1409	0,4194 0,																	

η/e (Absoluter Wert)

↓ (Absoluter Wert)

	8,0	8,4	8,8	9,2	9,6	10,0	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	15	16	17	18	20	22
2	0,9689 0,0073	0,9717 0,0064	0,9742 0,0056	0,9764 0,0049																
2,2	0,9627 0,0087	0,9661 0,0076	0,9691 0,0066	0,9717 0,0058																
2,4	0,9561 0,0101	0,9601 0,0088	0,9635 0,0078	0,9666 0,0068																
2,6	0,9491 0,0116	0,9536 0,0102	0,9576 0,0089	0,9611 0,0079																
2,8	0,9417 0,0132	0,9468 0,0115	0,9514 0,0102	0,9553 0,0090	0,9589 0,0080	0,9620 0,0071														
3,0	0,9339 0,0148	0,9397 0,0130	0,9448 0,0114	0,9492 0,0101	0,9532 0,0090	0,9567 0,0080	0,9606 0,0070													
3,2	0,9258 0,0164	0,9323 0,0144	0,9379 0,0127	0,9429 0,0113	0,9473 0,0101	0,9512 0,0090	0,9555 0,0079	0,9593 0,0069	0,9627 0,0061											
3,4	0,9175 0,0180	0,9245 0,0159	0,9307 0,0140	0,9362 0,0125	0,9411 0,0111	0,9454 0,0100	0,9502 0,0087	0,9544 0,0077	0,9582 0,0068											
3,6	0,9089 0,0196	0,9165 0,0173	0,9233 0,0154	0,9293 0,0137	0,9347 0,0122	0,9394 0,0110	0,9447 0,0096	0,9494 0,0085	0,9534 0,0075	0,9571 0,0067	0,9603 0,0060									
3,8	0,9001 0,0212	0,9083 0,0188	0,9157 0,0167	0,9222 0,0149	0,9280 0,0133	0,9332 0,0120	0,9390 0,0105	0,9441 0,0093	0,9485 0,0082	0,9525 0,0073	0,9560 0,0065	0,9592 0,0059								
4,0	0,8910 0,0228	0,8999 0,0202	0,9078 0,0180	0,9149 0,0161	0,9212 0,0144	0,9268 0,0130	0,9331 0,0114	0,9386 0,0090	0,9435 0,0080	0,9478 0,0070	0,9516 0,0064	0,9551 0,0058	0,9582							
4,2	0,8818 0,0243	0,8913 0,0217	0,8998 0,0193	0,9074 0,0173	0,9141 0,0156	0,9202 0,0140	0,9270 0,0124	0,9329 0,0109	0,9382 0,0097	0,9429 0,0087	0,9471 0,0078	0,9508 0,0070	0,9542 0,0063	0,9573 0,0057						
4,4	0,8725 0,0259	0,8826 0,0231	0,8916 0,0206	0,8997 0,0185	0,9069 0,0167	0,9134 0,0150	0,9207 0,0133	0,9271 0,0118	0,9328 0,0105	0,9378 0,0094	0,9424 0,0084	0,9464 0,0076	0,9501 0,0068	0,9534 0,0062						
4,6	0,8631 0,0274	0,8738 0,0245	0,8833 0,0219	0,8919 0,0197	0,8996 0,0178	0,9065 0,0161	0,9143 0,0142	0,9211 0,0126	0,9272 0,0113	0,9327 0,0101	0,9375 0,0090	0,9419 0,0081	0,9458 0,0074	0,9494 0,0067	0,9526 0,0055					
4,8	0,8535 0,0288	0,8648 0,0258	0,8749 0,0232	0,8839 0,0209	0,8921 0,0189	0,8994 0,0171	0,9077 0,0151	0,9150 0,0135	0,9215 0,0120	0,9273 0,0108	0,9325 0,0097	0,9372 0,0087	0,9414 0,0079	0,9453 0,0072	0,9491 0,0059	0,9524 0,0050				
5,0	0,8439 0,0302	0,8557 0,0271	0,8663 0,0244	0,8759 0,0221	0,8845 0,0200	0,8923 0,0181	0,9010 0,0161	0,9088 0,0143	0,9157 0,0128	0,9219 0,0115	0,9274 0,0103	0,9324 0,0093	0,9369 0,0084	0,9410 0,0077	0,9441 0,0064	0,9470 0,0053				
5,2	0,8343 0,0316	0,8466 0,0284	0,8577 0,0256	0,8677 0,0232	0,8768 0,0210	0,8850 0,0191	0,8942 0,0170	0,9024 0,0152	0,9097 0,0136	0,9163 0,0122	0,9222 0,0110	0,9275 0,0099	0,9323 0,0090	0,9367 0,0082	0,9412 0,0068	0,9451 0,0057	0,9494 0,0048			
5,4	0,8246 0,0329	0,8374 0,0297	0,8490 0,0268	0,8595 0,0243	0,8690 0,0221	0,8776 0,0201	0,8873 0,0179	0,8959 0,0160	0,9036 0,0144	0,9106 0,0129	0,9168 0,0117	0,9225 0,0105	0,9276 0,0096	0,9322 0,0087	0,9362 0,0072	0,9402 0,0061	0,9451 0,0052	0,9494 0,0044		
5,6	0,8150 0,0341	0,8283 0,0308	0,8403 0,0280	0,8512 0,0254	0,8611 0,0231	0,8701 0,0211	0,8803 0,0188	0,8893 0,0168	0,8975 0,0151	0,9048 0,0136	0,9114 0,0123	0,9173 0,0111	0,9227 0,0101	0,9276 0,0092	0,9326 0,0077	0,9373 0,0065	0,9419 0,0055	0,9464 0,0047		
5,8	0,8053 0,0353	0,8190 0,0320	0,8315 0,0291	0,8429 0,0264	0,8532 0,0241	0,8626 0,0220	0,8732 0,0197	0,8827 0,0177	0,8912 0,0159	0,8989 0,0143	0,9058 0,0130	0,9121 0,0118	0,9178 0,0107	0,9230 0,0097	0,9280 0,0081	0,9326 0,0069	0,9369 0,0058	0,9414 0,0050		
6,0	0,7957 0,0364	0,8098 0,0331	0,8227 0,0301	0,8345 0,0275	0,8452 0,0251	0,8550 0,0229	0,8660 0,0205	0,8760 0,0185	0,8849 0,0166	0,8929 0,0150	0,9002 0,0136	0,9068 0,0124	0,9128 0,0112	0,9182 0,0103	0,9234 0,0086	0,9287 0,0073	0,9342 0,0062	0,9394 0,0053		
6,2	0,7860 0,0375	0,8006 0,0341	0,8140 0,0311	0,8261 0,0284	0,8372 0,0260	0,8473 0,0238	0,8588 0,0214	0,8692 0,0193	0,8785 0,0174	0,8869 0,0157	0,8945 0,0143	0,9014 0,0130	0,9077 0,0118	0,9134 0,0108	0,9184 0,0090	0,9234 0,0077	0,9290 0,0065	0,9341 0,0056	0,9394 0,0042	
6,4	0,7765 0,0385	0,7915 0,0351	0,8052 0,0321	0,8177 0,0294	0,8291 0,0269	0,8397 0,0247	0,8516 0,0222	0,8623 0,0200	0,8720 0,0181	0,8808 0,0164	0,8887 0,0149	0,8959 0,0136	0,9025 0,0124	0,9085 0,0113	0,9140 0,0095	0,9190 0,0080	0,9241 0,0069	0,9291 0,0059	0,9341 0,0044	
6,6	0,7670 0,0394	0,7824 0,0361	0,7964 0,0330	0,8093 0,0303	0,8211 0,0278	0,8319 0,0255	0,8443 0,0230	0,8554 0,0208	0,8655 0,0188	0,8746 0,0171	0,8828 0,0155	0,8904 0,0142	0,8972 0,0129	0,9035 0,0118	0,9100 0,0100	0,9154 0,0084	0,9211 0,0072	0,9268 0,0062	0,9324 0,0047	
6,8	0,7576 0,0403	0,7733 0,0369	0,7877 0,0339	0,8009 0,0311	0,8131 0,0286	0,8242 0,0264	0,8370 0,0238	0,8485 0,0215	0,8589 0,0195	0,8683 0,0178	0,8769 0,0162	0,8848 0,0147	0,8919 0,0135	0,8984 0,0123	0,9099 0,0104	0,9196 0,0088	0,9279 0,0076	0,9350 0,0065	0,9464 0,0049	0,9552 0,0038

Zahlentafel 1c zum Abschnitt 5.3.2: Werte vom $\left\{ \begin{array}{l} \varphi_m \text{ (obere Zahl)} \\ \Delta\varphi \text{ (untere Zahl)} \end{array} \right.$

Der Flughafen Zürich in Stichworten

DK 656.71

Im Laufe des soeben begonnenen Jahres wird dem Zürcher Volk die Verantwortung zufließen, über die Durchführung des als dritte Bauetappe bekannten, weiteren Ausbaus der Flughafenanlagen in Kloten entscheiden zu müssen. Damit wird dem Stimmbürger praktisch das Schicksal des Flughafens anvertraut, denn wenn dieser seine internationale bzw. interkontinentale Bedeutung beibehalten und somit der Schweiz den direkten Zugang zu allen Teilen der Welt ermöglichen soll, ist eine Erweiterung unumgänglich.

Nach der starken Verzögerung in der Durchführung der zweiten Bauetappe infolge Ablehnung der Vorlage im Jahre 1957¹⁾ und auf Grund der damals gemachten, umfangreichen Abstriche an den geplanten Anlagen ist es unvermeidbar, dass der zur Zeit in Ausführung befindliche Bauabschnitt kurz nach seiner Vollendung bereits die ersten Engpässe aufweisen wird.

Die Tragweite dieser Entscheidung ist wesentlich grösser als es bei einer oberflächlichen Betrachtung scheinen mag, denn ein internationaler Flughafen kann so wenig wie ein Überseehafen oder ein Hauptbahnhof als isoliertes Gebilde angesehen, sondern muss als volkswirtschaftlich entscheidender Faktor im Leben einer Region, ja eines ganzen Landes beurteilt werden.

Leider gibt es kaum ein Unterfangen, das so heftige und leidenschaftliche Diskussionen ausgelöst hat, und denen in so krasserm Masse einseitige und teils falsche Informationen zugrunde liegen, wie die Erweiterung des Zürcher Flughafens. Zudem können die an-

scheinende Passivität und das Stillschweigen der am Bestehen dieses Flughafens interessierten Kreise als Zeichen dafür gewertet werden, dass die von den unermüdlich tätigen Gegnern gebrauchten Argumente sich nicht stichhaltig erwidern lassen. Tagungen, offene Briefe, Leitartikel, Kampfparolen usw., die oft den Komplex nur einseitig beleuchten können oder wollen, bleiben allzu häufig unbeantwortet, ausser in einem verschwindend kleinen Kreis von der unsachlichen Parteilichkeit und des Eigennutzes verdächtigten Fachzeitschriften.

Es stimmt, dass die gewerbliche Luftfahrt (auch die Militärfliegerei, obwohl man gegen diese selten eine Kritik hört) mit Lärm behaftet ist; mit aller Wahrscheinlichkeit stimmt es auch, dass starker Lärm Gesundheitsschäden verursacht. Man ist aber zum Beispiel der menschlichen Tuberkulose auch nicht durch Töten der davon befallenen Patienten Meister und Herr geworden, sondern durch sinnvolles und zielbewusstes Einsetzen menschlicher Kraft und Intelligenz. Zusammenarbeit mit gemeinsamem Ziel und konstruktiver Einsatz der im Menschen harrenden Kräfte werden viel eher zu einem der Allgemeinheit dienenden Ergebnis führen als blinde, unüberlegte, ja fanatische Parteilichkeit, gleichgültig in welcher Richtung.

Es ist ferner auch wahr, dass der Ausbau der Flughafenanlagen in Kloten viel Geld kosten wird; die dazu nötigen Summen sind aber sehr klein im Vergleich mit den Milliarden, die zum Beispiel im Strassenbau investiert werden. Dazu kommt aber noch eine Tatsache, die meistens verschwiegen wird, nämlich dass, im Gegensatz zum Strassenbau, die Investitionen im Flughafen nicht nur indirekt, sondern auch *direkt gewinnbringend* sind. Diese Gewinne fließen aber

¹⁾ Siehe hierüber: Der Ausbau des Flughafens Zürich, SBZ 75 (1957), H. 23, S. 345-357 und SBZ 76 (1958), H. 7, S. 96-98.