

Gleislagerstabilität bei Meterspurbahnen

Autor(en): **Rangosch, Severin**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **114 (1996)**

Heft 45

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79074>

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.

Severin Rangosch, Zürich

Gleislagestabilität bei Meterspurbahnen

Aufgrund der international relativ geringen Verbreitung von Meterspurbahnen waren bislang Untersuchungen zur Lagestabilität durchgehend verschweisster Gleise weitgehend auf den Normalspurbereich beschränkt. Die Übertragung der Ergebnisse von Normalspur auf Meterspur ist wegen zahlreicher Meterspureigenheiten nicht durch Analogieschlüsse möglich; dies zeigte die hier vorgestellte Untersuchung vor allem im Bereich der Lagestabilität von Kurven, deren Radien erheblich unter den Minimalradien der Normalspur liegen.

Angesichts des rund 1400 km langen Meterspurnetzes in der Schweiz [1] erscheint es angebracht, für dieses vollwertige Bahnsystem eine Berechnungsmethode der Lagestabilität zu entwickeln, die dem jeweiligen Betreiber eine Grundlage liefert, den Komponenteneinsatz bezüglich des Oberbaus optimaler, rationeller und wissenschaftlich abgesichert in verschiedenen Kombinationen vorzunehmen. Dieser Problematik hat sich der Verfasser am Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau (IVT) der ETH Zürich angenommen [2].

Begriffsdefinition

Die vorliegende Arbeit widmet sich der sogenannten Gleislagestabilität. Die klassische Definition dieses Eisenbahnbegriffes umfasst den Widerstand des Gleises gegen eine Veränderung des geometrischen Gleiszustands. Er wird im Zusammenwirken mit dem materialbedingten Gleiszustand von der Lageänderung der Oberbauteile und in Abhängigkeit vom Untergrund durch Beanspruchungszustände beeinflusst.

Bei den Beanspruchungszuständen handelt es sich einerseits um Fahrzeuglasten inklusive dynamischer Komponenten, deren Auswirkungen durch den Bogenradius, die Gleiskonstruktion und den Untergrundzustand beeinflusst werden, und andererseits um Beanspruchungen aus Schienentemperaturdifferenzen. Kritische Belastungszustände ergeben sich bei gleichzeitigem Auftreten dieser beiden Be-

anspruchungskomponenten, welche als Konsequenz seitliche Gleisverdrückungen oder -verwerfungen und in der Folge sogar Zugentgleisungen nach sich ziehen können. Der die Gleislagestabilität beschreibende Widerstand gegen eine solche seitliche Gleisrostverschiebung wird durch den Gleisverschiebewiderstand in Querrichtung und durch die horizontale Rahmensteifigkeit des Gleisrostes, die durch dessen Ersatzträgheitsmoment bestimmt ist, aufgebaut.

Für eine genauere Untersuchung der Gleislagestabilität reicht diese vereinfachte Definition natürlich nicht aus; vielmehr muss der Detaillierungsgrad der diesen Begriff bestimmenden Parameter erheblich grösser sein, um die hier auftretenden

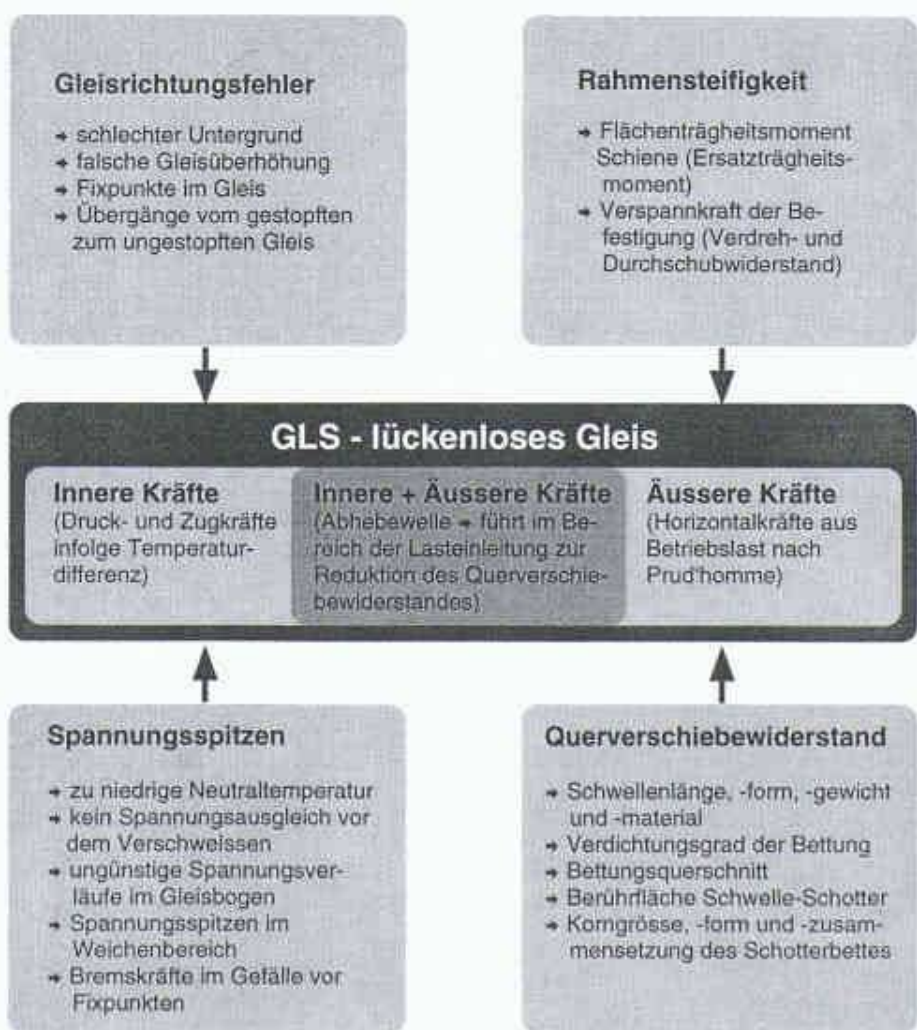
Effekte besser lokalisieren zu können. Deshalb werden zu Beginn dieser Untersuchung das Parametergeflecht der Gleislagestabilität (Bild 1) präzise analysiert und deren Wechselwirkungen beschrieben.

Daraus erkennt man das Zusammenspiel der einzelnen Oberbauparameter und wie wichtig die Fokussierung des Untersuchungsinteresses auf die für die Gleislagestabilität massgebenden Grössen ist.

Randbedingungen

Zur Wahrung einer ausreichenden Untersuchungstiefe ist in diesem weiten Forschungsfeld eine Festlegung der Randbedingungen unumgänglich. Aufgrund der im Meterspurbereich weit verbreiteten Schotterbettung erfolgt als erste Abgrenzungsstufe die Beschränkung auf den klassischen Schotteroberbau. Aus gleichem Grunde wird das Querschwellengleis untersucht; abweichende Schwellenformen, wie z.B. Y-Stahlschwellen, werden lediglich vergleichend herangezogen, jedoch

1
Einflussgrössen auf die Gleislagestabilität (= GLS) [3]



aufgrund geringer Verbreitung und mangelnder Langzeiterfahrung nicht explizit untersucht. Bei der untersuchten Schiene handelt es sich um die lückenlos verschweisste Vignolschiene verschleissfester Güte oder besser ($\sigma_f \geq 900 \text{ N/mm}^2$). Als Standard für die Schienenbefestigung wird die Skf-Verlegeart (W-Befestigung) bestimmt. Hinsichtlich Gleisgeometrie erfolgt themabedingt die Beschränkung auf den Gleisbogen, der bei Meterspur für Radien kleiner 350 m definiert wird [4].

Die Randbedingung Untergrundbeschaffenheit ist hier derart eingeschränkt, dass von einer normalen Tragfähigkeit ausgegangen wird (Bettungsmodul $C = 0,15 \text{ N/mm}^3$). Diese Einschränkung wird vorgenommen, weil zum einen der Einfluss des Untergrundes stark die Oberbauqualität beeinflussen kann und zum anderen bisher eine exakte messtechnische Erfassung des Bettungsmoduls entlang einer längeren Gleisstrecke noch nicht erfolgt ist.

Als äussere Lasten werden die maximalen dynamischen Radlasten im Gleisbogen berücksichtigt, die durch die Lokomotiven am vorderen ersten Radsatz in die Aussenschiene eingeleitet werden. Für die Temperaturbeanspruchung wird eine Neutralisationstemperatur von $T_n = 25^\circ\text{C}$ und eine maximale Jahrestemperaturschwankung von $\Delta T_{\text{max, Jahr}} = 90 \text{ K}$ angenommen. Alle weiteren Parameter werden, je nach Bedeutung für diese Untersuchung, vollumfänglich berücksichtigt sowie in unterschiedlichen Dimensionen und Konstruktionen - besonders zu Vergleichszwecken - variiert.

Vorgehensweise

Es werden einige bestimmte Oberbaukonstruktionen untersucht und verglichen. Die Auswahl dieser Konstruktionsarten erfolgt unter dem Gesichtspunkt der vergleichenden Untersuchung, d. h. es soll aus den Berechnungen ersichtlich werden, auf welche Weise sich ein leichter von einem schweren Oberbau hinsichtlich Lagestabilität in engen Bogenradien unterscheidet. Als leichte Oberbaukonstruktion (= Typ A) für die Meterspur fungiert die Kombination aus Holzschwelle und VST 36-Schiene, die schwere Konstruktion (= Typ B) besteht aus Monoblock-Spannbetonschwellen und SBB 1-Schiene (= S 49-Profil).

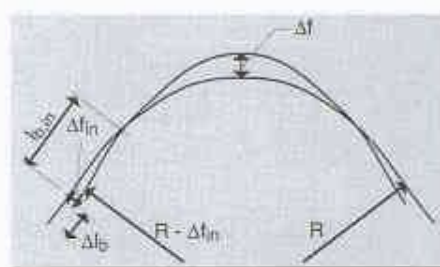
Um eine Unterscheidung bezüglich verschiedener Radlasten vornehmen und Aussagen hinsichtlich der Konsequenzen eventueller Achslasterhöhungen machen zu können, werden jeweils eine leichtere und eine schwerere Lokomotive der

schweizerischen Meterspurbahnen auf den beiden Oberbautypen untersucht. Stellvertretend für das leichte Fahrzeug ist die Ge4/4^m-Meterspurlokomotive mit einer statischen Radlast von 62,5 kN (bisheriger Standard) und für das schwere Fahrzeug die HGe4/4^m-Meterspurlokomotive mit einer statischen Radlast von 80 kN (angestrebter Standard) ausgesucht worden. Da sich diese beiden Fahrzeuge auch hinsichtlich der Radstände und -abmessungen unterscheiden, können daraus resultierenden Einflüsse zusätzlich erfasst werden.

Die Untersuchung der Gleislagestabilität (= GLS) erfolgt zunächst mit den gebräuchlichen Berechnungsmethoden der Normalspur. Hier werden das klassische GLS-Berechnungsverfahren nach Meier [5] sowie dessen Erweiterungen durch Chatkeo [6] und Eisenmann [7] aufgezeigt und die daraus resultierenden Erkenntnisse und offenen Fragen als weitere Untersuchungsgrundlage verwendet. Die daraus abgeleiteten Modifikationserfordernisse an die Meterspurverhältnisse werden zusammengestellt und im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Grundlage für die Entwicklung eines neuen meterspurspezifischen Verfahrens verwendet, welches als LS^M-Methode (= Lagestabilität Meterspur-Methode) bezeichnet wird. Hierbei werden die abgeleiteten Besonderheiten des Meterspursystems in die modifizierte Normalspurmethode implementiert und um die weiteren Effekte, die sich aus den extrem kleinen Bogenradien ergeben, erweitert.

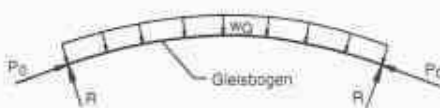
Dieses Modell wird an den beiden hier untersuchten Oberbautypen A und B unter unveränderten Randbedingungen angewandt und die damit gewonnenen Resultate mit denen des klassischen [5] und des erweiterten [6] Normalspurverfahrens verglichen und kommentiert.

Um eine praxisbezogene Verifikation zu ermöglichen, werden die mit der LS^M-Methode ermittelten Ergebnisse mit den Erfahrungswerten der Meterspurbetreiber verglichen. Weiterhin werden zur Überprüfung der Resultate vorhandene Messungen und bahinterne Untersuchungen herangezogen. Damit soll eine erste Verifikationsstufe erreicht werden, welche die tendenzielle Praxisstauglichkeit des LS^M-Verfahrens belegen soll. Für eine vorbehaltlose Praxisempfehlung der LS^M-Methode bedarf es allerdings einer - über diese Untersuchung hinausgehenden - speziellen Messung unter Berücksichtigung aller in dieser Arbeit vorgegebenen Randbedingungen, die - aufgrund des dafür erforderlichen grossen finanziellen, personellen und technischen Aufwandes - als gesonderte Arbeit durchgeführt werden muss.



2
Horizontale Gleisverschiebung (Radialatmung, stark überzeichnet) [2]

3
Durch Δf aktivierter Querverschiebewiderstand w_Q im Bogen [6]

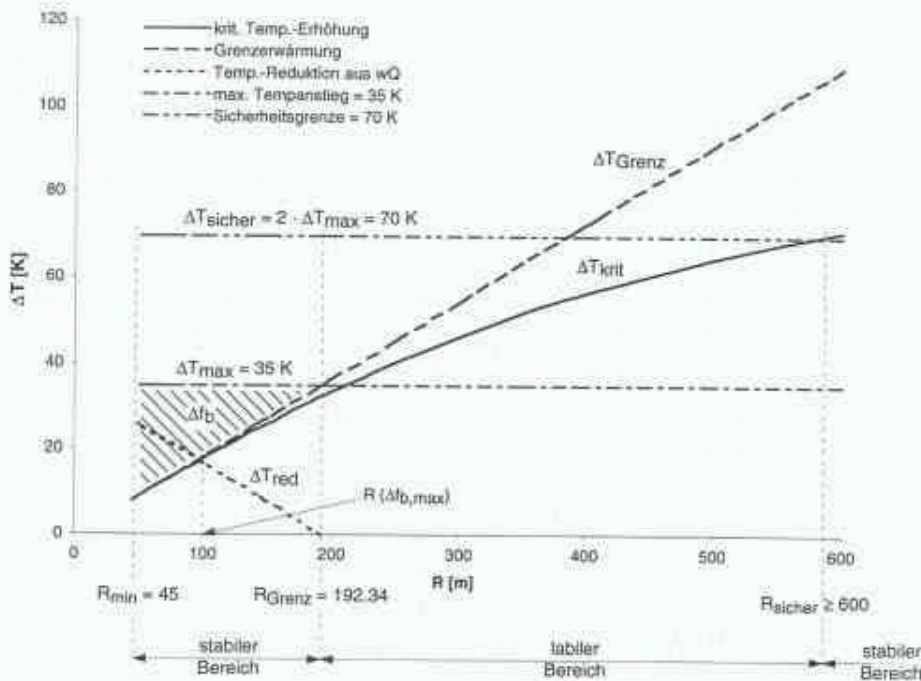


Radialatmung

Die direkte Anwendung der modifizierten Normalspurmethode auf die Meterspur hat gezeigt, dass nicht alle Erkenntnisse von Chatkeo in diese Modifikation einfließen. Das Hauptinteresse konzentrierte sich nämlich auf die Radienbereiche der Normalspur ($R > 300 \text{ m}$), so dass Effekte, die bei sehr kleinen (Meterspur-) Radien vorkommen, für dieses vereinfachte Verfahren nicht oder nur am Rande berücksichtigt wurden. Ein weiterer, im Normalspurbereich nur am Rande bedeutsamer Effekt, ist die sog. Radialatmung des Gleisbogens (Bild 2).

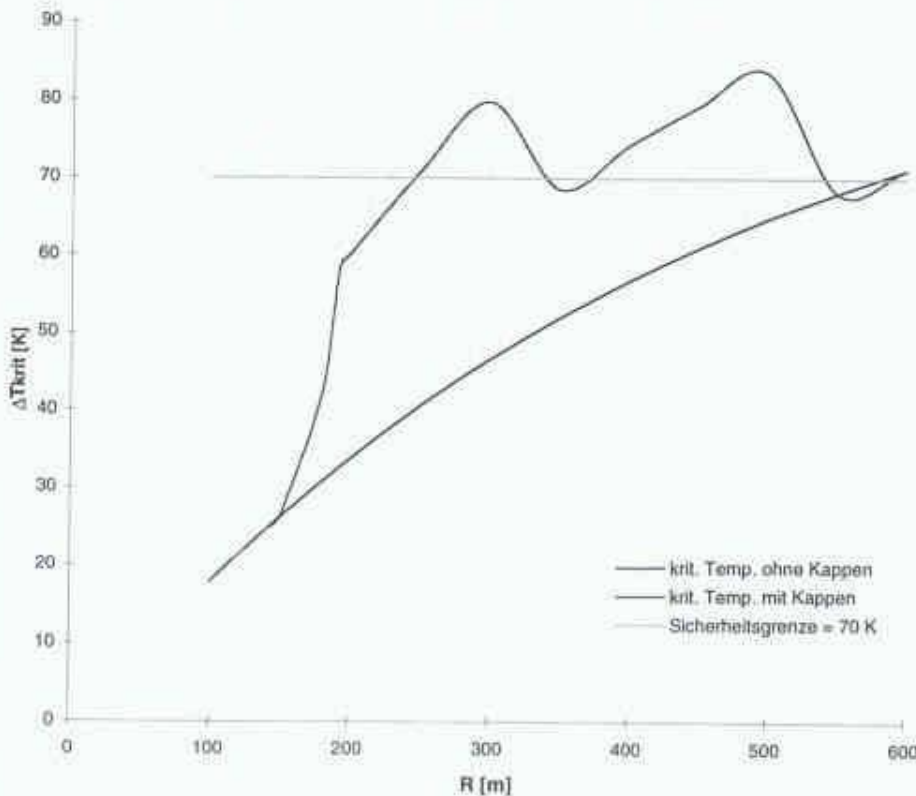
Diese ist bei der Normalspur nur deshalb von untergeordneter Bedeutung, weil sie erst bei Radien unterhalb von 500 m unter anderem axialkraftmindernd zu wirken beginnt [7]; zunächst in geringem Masse und stärker erst bei Radien unterhalb von $R \leq 300 \text{ m}$, welche aber bei der Normalspur in schnell befahrenen Hauptgleisen nicht vorkommen. Bei Meterspur hingegen kommt der Radiusbereich unterhalb von 300 m sehr häufig vor, und daher ist der Einfluss der Radialatmung nicht vernachlässigbar, so dass - neben anderen Anpassungen - auch noch die Reduktion der temperaturbedingten Axialkraft P_0 durch die Radialatmung Δf des Gleisrostes im Schotterbett berücksichtigt werden muss.

Zum besseren Verständnis sei hier vermerkt, dass der Gleisbogen unter einer Axiallast P_0 durch den von der Radialatmung Δf abhängigen Querverschiebewiderstand w_Q im Gleichgewicht gehalten wird. Dieses Gleichgewicht wird durch die



4
Verläufe der Temperaturanstiege bei engen Meterspurradien für Oberbautyp A [2]

5
Auswirkung des Einbaus von Sicherungskappen im labilen Radiusbereich auf den Verlauf von ΔT_{krit} über R bei Oberbautyp A [2]



Gleichung (2) beschrieben (Bild 3), die sich aus der klassischen Meier-Formel [5] in Gleichung (1) für die Ermittlung des kritischen Gleislagefehlers f' ab dem der Gleisrost auszuknicken beginnt, ergibt, wenn der Bogenradius so klein ist, dass sich R an R_{Grenz} annähert und f' zu Null wird. Der Grenzzadius R_{Grenz} markiert den Übergang zur reinen Radialatmung ohne weiteren Axialkraftanstieg [6].

$$f' = (w_Q - P_0/R) \frac{16E I_E}{P_0^2} \quad \text{[mm]} \quad \text{Gl. (1)}$$

Mit:

E = Elastizitätsmodul des Schienenstahls
 $= 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$

I_E = Ersatzträgheitsmoment des Gleisrostes [mm⁴]

Für $f' = 0$ gilt:

$$w_Q = P_0/R \quad \text{[N/mm]} \quad \text{Gl. (2)}$$

Neben dem bereits erwähnten Parameter R_{Grenz} kann der Beginn des vollständigen Abbaus des Axialkraftzuwachses ΔP_0 infolge reiner Radialatmung auch mit der Grenzerwärmung ΔT_{Grenz} [K] gemäss Gleichung (3) markiert werden. Diese Grenzerwärmung (bei der $f' = 0$ wird) oberhalb der Neutralisationstemperatur T_n (= Schienentemperatur beim Verschweissen), kann näherungsweise wie folgt ermittelt werden [2; 6]:

$$\Delta T_{Grenz} = w_Q R / \alpha E F_{(2)} \quad \text{[K]} \quad \text{Gl. (3)}$$

Vergleicht man ΔT_{Grenz} in Gleichung (3) mit der kritischen Temperaturerhöhung des Gleises ΔT_{krit} nach Gleichung (4) aus dem klassischen Normalspurverfahren nach Meier [5], bei der das Ausknicken des Gleisrostes beginnt,

$$\Delta T_{krit} = \sqrt{\left(\frac{8I_E}{\alpha F_{(2)} R f}\right)^2 + \frac{16I_E w_Q}{\alpha^2 F_{(2)}^2 E f}} - \frac{8I_E}{\alpha F_{(2)} R f} \quad \text{[K]} \quad \text{Gl. (4)}$$

f = angenommener Gleisfehler;
 i. d. R. = 15 - 25 mm

ΔT = Temperaturerhöhung des Gleises [K] über der Neutraltemperatur

$F_{(2)}$ = Fläche der beiden Schienen [mm²]

α = Temperaturkoeffizient von Stahl
 $= 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

so lassen sich die nachfolgenden zentralen, jedoch versuchsstechnisch noch zu verifizierenden Erkenntnisse zur Gleislagestabilität bei lückenlosen engen Meterspurbögen ableiten.

Ergebnisse

Die im folgenden Diagramm (Bild 4) gezeigte Aufteilung der Radien von 45 m bis 600 m und darüber in stabile und labile Bereiche ergibt sich aus den Verläufen der kritischen Temperaturerhöhung ΔT_{krit} und der Grenzerwärmung ΔT_{Grenz} , die auch zur Überwindung des Querverschiebewiderstands w_Q nötig ist.

Ist die maximal vorhandene Schienentemperatur ΔT_{max} grösser als ΔT_{krit} - also oberhalb der ΔT_{krit} -Kurve -, so beginnt das Gleis sich seitlich zu verformen. Oberhalb von ΔT_{Grenz} setzt sich die Radialatmung gegen w_Q durch und kompensiert weitere Temperaturanstiege komplett, so dass P_0 nicht mehr weiter anwächst und auch kein f' existiert, da sich keine Verwerfung mehr einstellt. Um diesen Effekt zu erreichen, muss ΔT den «Graben» zwischen ΔT_{krit} und ΔT_{Grenz} überspringen, der - wie aus (Bild 4) ersichtlich - mit zunehmendem Bogenradius ebenfalls grösser wird. Erst unterhalb vom Grenzradius R_{Grenz} , bei dem der kritische Gleislagefehler $f' = 0$ wird, nähern sich die Kurven von ΔT_{krit} und ΔT_{Grenz} soweit an, dass der vorhin erwähnte «Sprung» möglich ist; d. h. mit Überschreiten der Verwerfungsgrenze (ΔT_{krit}) wird gleichzeitig die Radialatmungsgrenze (ΔT_{Grenz}) überschritten, so dass im Bereich unterhalb von R_{Grenz} sich die bei grösseren Radien normalerweise einstellende Gleisverwerfung in eine ungefährlichere Radialatmung Δf_r transformiert, welche sich im Millimeterbereich bewegt. Das Gleis bleibt dann auch bei weiter ansteigender Temperatur stabil.

Dieser hier nachgewiesene Effekt wurde in der Normalspurforschung bislang nur vermutet, wie z. B. in der Arbeit von Chatkeo [6], doch wegen der fehlenden sehr engen Bogenradien nicht weiter verfolgt. Um eine problemlose gleichmässige Radialatmung Δf_r zu erhalten, ist jedoch ein weitgehend homogener Querverschiebewiderstand und eine über die Bogenlänge gleiche Temperaturerhöhung ΔT nötig.

Ein inhomogener bzw. infolge Radialatmung Δf_r sich ändernder Querverschiebewiderstand w_Q bewirkt folgendes: Bei einer Erhöhung von w_Q verschiebt sich der ΔT_{Grenz} - und ΔT_{krit} -Verlauf nach oben, wobei ΔT_{Grenz} schneller ansteigt; dafür nimmt R_{Grenz} ab. Als Ergebnis hat man einen schmaleren labilen Bereich, der bei einem kleineren R_{Grenz} beginnt und deshalb den praktisch nutzbaren stabilen Bereich unterhalb von R_{Grenz} verkleinert. Eine kompromisslose Erhöhung von w_Q bringt hier demzufolge Nachteile, da die reine Radialatmung unterhalb von R_{Grenz} unnötig behindert wird.

Betrachtet man Radien oberhalb von R_{Grenz} , die aber definitionsgemäss noch zu den Bögen zählen, so kann dort genau genommen keine Radialatmung auftreten, da ΔT_{Grenz} (theoretisch) erst nach der «Verwerfungstemperatur» ΔT_{krit} erreicht wird. In der Realität ist aber kaum ein Schottergleisrost seitlich absolut fest, so dass gemäss [7] Radialatmungen von 10 bis 20 mm auftreten können, ohne zuerst den vollständigen Querverschiebewiderstand überwinden zu müssen. Damit sich aber infolge dieser Radialatmung keine Verwerfung einstellt, muss sie kleiner als der kritische Gleislagefehler f' sein. Dass es aber trotz Radialatmung nicht zu einer Gleisstabilisierung wie bei Radien kleiner R_{Grenz} kommt, liegt am mit dem Radius steigenden «Atmungsbedarf» [4] des Gleises zur Reduktion eines gleich grossen Axialkraftteils. Dies bedeutet, dass mit grösser werdendem Radius mit immer mehr Radialatmung immer weniger Axialkraft abgebaut wird.

Um den von P_0 unabhängigen kritischen Temperaturanstieg ΔT_{krit} , ab dem eine horizontale Gleisbewegung einsetzt, im labilen Radienbereich (Bild 4) über die nach wie vor gültige Sicherheitsgrenze nach Meier [5] von $2 \cdot \Delta T_{max}$ (hier = 70 K) anzuheben, sind Sicherungskappen gegen Horizontalverschiebung an den Schwellen unterhalb der Bogeninnenschiene (damit der grössere Teil des Schotterkörpers als Abstützung nach der Bogenaussenseite dient) einzubauen. Bild 5 zeigt in dem gewellten Verlauf, wie ΔT_{krit} im labilen Bereich mittels Sicherungskappen über die Temperatursicherheitsgrenze von 70 K ansteigt.

Für die stabilen Bereiche ober- und unterhalb des labilen Radienbereiches in Bild 4 sind gemäss dem theoretischen und versuchstechnisch noch zu verifizierenden LS^M -Modell keine Sicherungskappen erforderlich.

Diese Aussage trifft aber nur dann zu, wenn der Querverschiebewiderstand im Gleisbogen - wie bereits erwähnt - eine möglichst grosse Homogenität aufweist, d. h. über die gesamte Bogenlänge und die angrenzenden Bereiche möglichst gleich bleibt. Weiterhin dürfen keine Störstellen wie Weichen, Brücken, Bahnübergänge, Tunnelportale, Stopfbereiche o.ä. im Gleisbogen oder angrenzend vorhanden sein, da diese zusätzlich zu einem variierenden Querverschiebewiderstand noch eine empfindliche Behinderung der Längsverschiebung Δf_l des Gleises bedeuten, die an die Radialatmung nach Bild 2 gekoppelt ist. Vor solchen Störstellen können Zonen mit Axialkraftstau entstehen, die in Bereichen, welche an den Gleisbogen angrenzen, zu Verwerfungen führen können.

Diese Zonen sollten weiterhin mit Schwellenkappen gesichert werden.

Der Einfluss von Fahrzeuglasten auf die Radialatmung wurde hier über eine 30%ige Reduktion von w_Q berücksichtigt [6]. Wie sich aber das Prud'homme-Kriterium [8] (es beschreibt die maximal zulässige seitliche Gleisverschiebungskraft durch das Fahrzeug) beim durch die Radialatmung Δf_r aufgelockerten Schotter verhält, ist - nach heutigem Kenntnisstand - lediglich durch die Grösse des Beiwertes k_p (der wegen Δf_r bei Meterspur eher kleiner wird) beschreibbar, zumal die Definition der Prud'homme-Grenze ursprünglich für Radien mit $R > 500$ m festgelegt wurde. Die Anwendung dieser Grenze bei den viel kleineren Meterspurradien ist deshalb bei der weiteren Meterspurforschung noch näher zu überprüfen.

Weiterhin können Fehler beim Neutralisieren oder Schattenwurf zu einem über den Gesamtbogen ungleichmässigen ΔT -Verlauf führen, was die obere Grenze des labilen Bereichs verschiebt und so Verdrückungen ermöglicht. Grundsätzlich kann aber gesagt werden, dass das Vorhandensein einer gleichmässigen Radialatmung ein gutes Zeugnis für den Schotter- und Schienenzustand des betreffenden Gleisbogens darstellt.

Praxisnutzen

Der Hauptnutzen, der aus dieser Arbeit der Praxis erwächst und wirtschaftliche Relevanz besitzt, ist die potentielle Einsparung von Schwellenkappen bei den Radien ausserhalb des labilen Bereiches (Bild 4) - vorbehaltlich einer versuchstechnischen Verifikation -, wenn keine der bereits erwähnten schotter- oder schienenseitigen Inhomogenitäten vorliegen. Als Sekundärnutzen sind daraus die Kosteneinsparungen aus dem dadurch vereinfachten Schotterunterhalt (Nachverdichtung) zu nennen.

Weiterhin wird den Meterspurbahnbetreibern mit der LS^M -Methode ein relativ einfach handhab- und nachvollziehbares Verfahren zur Berechnung der Gleislagestabilität im meterspurigen Bogengleis gegeben, inklusive der für die Meterspur ermittelten Eingangswerte für den Querverschiebewiderstand, der Rahmensteifigkeit und des vorhandenen Gleislagefehlers. Somit ist die Ermittlung der Gleislagestabilität auch für beliebige andere Schienen-Schwellen-Kombinationen möglich, einschliesslich der Bestimmung ihrer labilen bzw. stabilen Radienbereiche.

Ebenso können aufgrund der weiträumigen Thematikengrenzung auch andere Oberbauprobleme der Meterspur mit den

Literatur

[1]
Wichser J., Rangosch S.: Umsteigefreie Bahnverbindungen zwischen Normal- und Schmalspur; Schweizer Ingenieur und Architekt - SIA, Nr. 13, Zürich, März 1993.

[2]
Rangosch S.: Lagestabilität lückenloser Meterspurgleise in kleinen Bogenradien; Diss. ETH Zürich, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau (IVT), ETH Zürich, Nr. 108, 1995.

[3]
Kopp E.: Eisenbahnbau und Transportwesen I + II; Skript des Instituts für Eisenbahnbau der Universität Innsbruck, 1991.

[4]
Brändli H., Wichser J., Rangosch S., Kohler M.: Optimierung des Oberbaues bei Meterspurbahnen; Band 1-3; Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau (IVT), ETH Zürich, Nr. 100/1-3, 1993.

[5]
Meier H.: Ein vereinfachtes Verfahren zur theoretischen Untersuchung der Gleisverwerfung; Organ für Fortschritte im Eisenbahnbau 92, Heft 20, 1937, S. 369-381.

[6]
Chatkeo Y.: Die Stabilität des Eisenbahngleises im Bogen mit engen Halbmessern bei hohen Axialdruckkräften; Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der TU München, Heft 46, 1985.

[7]
Eisenmann J.: Vorlesung Eisenbahnbau-Kapitel E II; Skript des Lehrstuhls für Bau von Landverkehrswegen der TU München, 1986.

[8]
Prud'homme A.: Der Widerstand des Gleises gegen die von den Fahrzeugen ausgehende seitliche Beanspruchung; Monatsschrift der internationalen Eisenbahn-Kongress-Vereinigung, August-September 1967.

in dieser Arbeit erwähnten Formeln und Verfahren angegangen werden. Und nicht zuletzt wird eine einheitliche Terminologie für die Oberbauberechnung eingeführt, welche mit früheren Arbeiten zur Meterspur [4] übereinstimmt.

Forschungsbedarf

Der aus der vorliegenden Arbeit sich ergebende weitere Forschungsbedarf ist - wie bereits mehrmals erwähnt - in erster Linie versuchstechnischer Art. Das bedeutet, dass zur Verifikation der hier gewonnenen theoretischen Resultate Versuche unter praxisnahen Verhältnissen durchgeführt werden müssen. Dabei sind schotter- und schienenseitig homogene Gleisbögen mit $R < R_{\text{Gleit}}$ ohne Schwellenkappen einer maximalen Temperatur ΔT_{max} auszusetzen und die Radialatmung zu messen.

Weitere Stossrichtungen sind der Einfluss eines atmenden Gleisbogens auf anschliessende Bereiche und umgekehrt der Einfluss von Fixpunkten auf die Radialatmung. Ebenso von Interesse ist der Einfluss der Schienenbiegung und der Neutralisationstemperatur auf die Gleislagestabilität sowie die Langzeitbeobachtung eines atmenden Gleisrostes bei variierendem Querverschiebewiderstand und hinsichtlich Abnutzung des Schottermaterials, die Konsequenzen aus wiederholter Radialbewegung des Gleisrostes.

Ferner sind bezüglich einer verfeinerten Bestimmung des dynamischen Lastinflusses auf den Querverschiebewider-

stand und hinsichtlich einer weitergehenden Abklärung der bisher angenommenen Spurweitenunabhängigkeit des Ersatzträgheitsmomentes Untersuchungen wünschenswert. In diesem Zusammenhang ist auch die aus der Normalspurforschung stammende Prud'homme-Grenze für die sehr kleinen Meterspurradien ($R < 500$ m) näher zu überprüfen.

Nicht zuletzt ist die Aufbereitung der Erkenntnisse aus der meterspurigen LS^M -Methode zu einer Ergänzung bestehender Richtlinien nicht nur bei Meterspur-, sondern auch bei Normalspurbahnen anzustreben. Mit der vorliegenden Arbeit wurde dafür ein Grundstein gelegt.

Adresse des Verfassers:

Severin Rangosch, Dr. sc. techn., ETH, dipl. Bauing. TU/SIA, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau (IVT), ETH Hönggerberg-HIL, 8095 Zürich.