



In der Spurführungs-Mechanik des Vorbilds gilt – wie die Bilder der Siegsdorfer Eisenbahn-Katastrophe anno 1928 drastisch belegen mögen – die Sicherheit gegen Entgleisen als oberstes Gebot. Welche Regeln dabei für die Physiker des Großbetriebs gelten – und welchen Nutzen Modellbahner davon haben – verrät

Dipl.-Ing. WERNER GUDERLEI

SPURFÜHRUNG von Schienenfahrzeugen



Vergleichsweise glimpflich ging für die 18 201 dieser Ausflug ihrer Vorlaufachse ins Schotterbett des Bw Lutherstadt-Wittenberg aus, den Dirk Endisch am 31. August des Jahres 2003 dokumentiert hat (linke Seite oben).

Stumme Zeugen einer Eisenbahn-Katastrophe: Mögen auch die ersten Entgleisungs-Spuren am Oberbau noch eher harmlos erscheinen (linke Seite unten) ...

D er sichere Lauf von

Schienenfahrzeugen war seit den Anfängen der Eisenbahn ein intensiv untersuchtes Thema. Die Sicherheit gegen Entgleisung galt – und gilt – dabei als oberstes Gebot. Zudem sollen die Schie-

physikalischen Zusammenhänge gelten für Loks wie auch Wagen, gleichermaßen für Regel- wie auch für die Schmalspur.

Auch unsere Modellbahn wollen wir entgleisungsfrei bei möglichst vorbildnahen Radgeometrien betreiben. Freilich stellt sich nun die spannende Frage, wie weit wir die Erkenntnisse des großen Vorbilds auf die Modellwelt übertragen – und somit Schlüsse für einen betriebssicheren Lauf ziehen können.

Dieser Beitrag zeigt einige grundsätzliche kinematische Zusammenhänge auf und will auf diese Weise eine kleine Einführung in das Gebiet der Spurführungs-Mechanik geben. Zum allgemein besseren Verständnis wird dabei weitgehend auf mathematische Formeln verzichtet;



... so spricht das Bild der einsamen, reichlich ramponierte Achse (oben) eines S 3/6-Tenders umso deutlicher für die gewaltigen Kräfte, die am 10. Juni 1928 bei der Entgleisung des D 47 bei Siegelsdorf gewirkt haben müssen. Fotos (soweit nicht anders angegeben): DB-Archiv Nürnberg

nenfahrzeuge mit möglichst komfortablem Lauf, verschleißarm – und damit kostengünstig – über die Gleise rollen.

Bereits 1887 hatte der Geheime Baurat Christoph Boedecker wesentliche physikalische Zusammenhänge zwischen Rad und Schiene untersucht und die entsprechenden Erkenntnisse beschrieben: Eisenbahn-Räder haben starre Achsen; die

zudem sind die Probleme in vielen Fällen vereinfacht dargestellt.

Die Funktionsflächen von Rad und Spurkranz

Die Räder von Schienenfahrzeugen weisen kein einheitliches Profil auf. Eine Vielzahl unterschiedlicher Varianten hat sich im Laufe der Zeit im Eisenbahnwesen

DIE WICHTIGSTEN BEGRIFFE

Anlaufwinkel α

Im Bogen stehen Rad und Schiene nicht mehr parallel zueinander, sondern bilden einen Winkel. Je enger der Bogen und je größer der feste Achsstand des Fahrzeugs ist, desto größer ist der Anlaufwinkel. Anzustreben sind kleine Anlaufwinkel; so haben beispielsweise Straßenbahn-Fahrzeuge kurze Achsstände, um betriebs-sicher durch die verhältnismäßig engen Radien zu fahren.

Flankenwinkel des Spurkranzes β

Der Spurkranz-Flankenwinkel beeinflusst die Entgleisungs-Sicherheit ganz maßgeblich. Grundsätzlich gilt, dass die Tendenz zur Entgleisung mit kleiner werdendem Spurkranz-Flankenwinkel ansteigt. Für den Flankenwinkel werden häufig 70 Grad angewendet; für entgleisungskritische Fahrzeuge kann der Wert vergrößert, für entgleisungs-unkritische Fahrzeuge etwas verkleinert werden.

Hohlkehle

Verschiedentlich auch Spurkranz-Ausrundung genannt, ist der Übergang von der Lauffläche zum Spurkranz. Der Radius der Hohlkehle ist so gewählt, dass er geringfügig größer dimensioniert ist als der Radius des Schienenkopfes.

Lauffläche

Die Lauffläche stellt keine zylindrische Walze dar, sondern ist in einem flachen Winkel geneigt. Die Neigung des Winkels wird unterschiedlich ausgeführt und hängt von der Art des jeweiligen Fahrzeugs ab.

Spurspiel

Der Radsatz weist im Gleis ein Spiel in axialer Richtung auf; dies ist erforderlich, um ein Zwängen des Radsatzes im Gleis zu verhindern. Drei- und mehrachsige Fahrzeuge mit starrer Lagerung im Rahmen erfordern zusätzliche Maßnahmen gegen das Zwängen – wie beispielsweise eine seitliche Verschiebbarkeit der Achsen im Rahmen oder auch eine Schwächung des Spurkranzes.

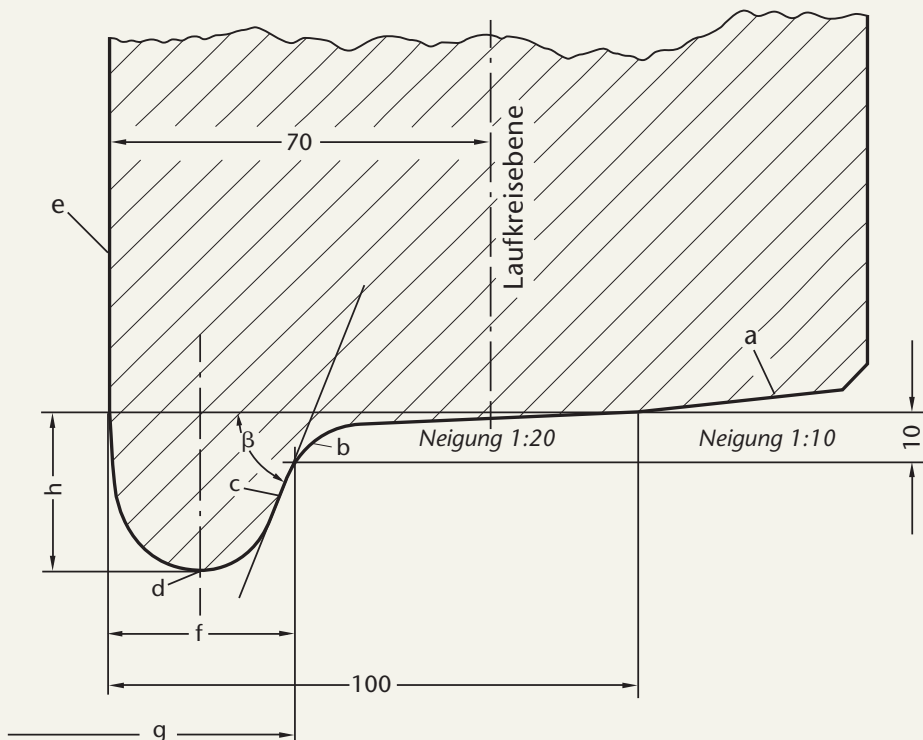
herausgebildet; Profile wurden immer wieder geändert und sowohl den gestiegenen Anforderungen des Betriebs als auch den unterschiedlichen Fahrzeugtypen angepasst: So weist ein modernes Triebfahrzeug ein anderes Profil auf als eine Dampflok aus den Zwanzigerjahren des vergangenen Jahrhunderts.

Allen Profilen gemeinsam aber ist ihre prinzipielle Funktionsweise. Die Form und Geometrie des Spurkranzes spielt eine entscheidende Rolle für die Betriebssicherheit des Fahrzeugs. Zwei Funktionsflächen des Rades sind maßgeblich an der Spurführung beteiligt:

- ▶ Die Lauffläche: diese ist kegelförmig und hat die Aufgabe, den Radsatz im Gleis zu zentrieren.
- ▶ Der Spurkranz: Die Hohlkehle übernimmt gemeinsam mit der Spurkranz-flanke die Führung des Radsatzes im Bogen. Der Winkel an der Spurkranz-Flanke ist dabei entscheidend für das Führungsvermögen – und damit für die Entgleisungs-Sicherheit.

Der Geradeauslauf

Auf einer geraden Strecke scheint ein Eisenbahnfahrzeug exakt geradeaus zu laufen. Betrachtet man es genauer, wird man feststellen, dass dies nicht so ist: Das Rad läuft auf gerader Schiene in einer sinusförmigen Wellenbewegung. Der Grund dafür ist die kegelförmige Lauf-



GRAFIK 1

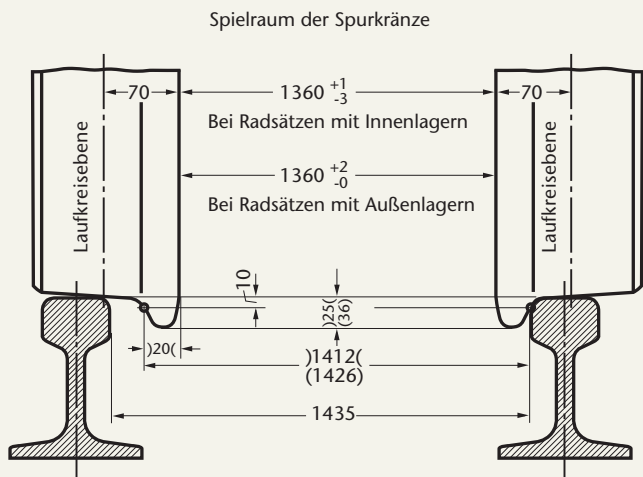
DIE BEZEICHNUNGEN AM SPURKRANZ

- a = Lauffläche
- b = Hohlkehle
- c = Spurkranz-Flanke
- d = Spurkranz-Kuppe
- e = Spurkranz-Rücken
- f = Spurkranz-Dicke =)20(
- g = Spurmaß =)1412(, (1426)
- h = Spurkranz-Höhe
- β = Flankenwinkel

(...) = Höchstmaß nach EBO
)...(= Mindestmaß nach EBO

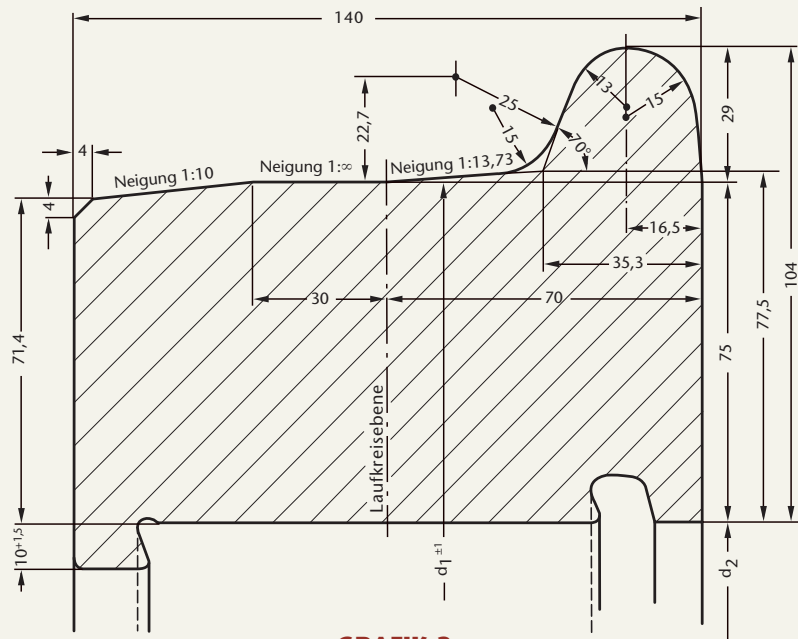
Alle Grafiken:
Dipl.-Ing. Werner Guderlei

Spurführung von Schienenfahrzeugen



GRAFIK 2

Hat den Sinuslauf eines Radsatzes in der Geraden zur Folge: das kegelförmige Radprofil der Lauffläche.



GRAFIK 3

Radprofil mit walzenförmigem Zwischenbereich der Lauffläche nach Heumann-Lotter.

fläche, denn die Eisenbahn-Räder sind keine zylindrischen Walzen, sondern haben eine leicht geneigte Lauffläche. Das Rad läuft somit auf einem Kegel auf der Schiene, die beiden Räder bilden also einen Doppelkegel (Grafik 2).

Beim Vorbild gibt es für die Radprofile eine Reihe unterschiedlicher Varianten, abhängig davon, ob es sich um ein Triebfahrzeug, einen schnell laufenden Reisezug-Wagen oder beispielsweise um einen zweiachsigen Güterwagen handelt.

Seit unseren Kindertagen wissen wir, dass ein Kegel, der auf dem Fußboden gerollt wird, stets eine Kurve beschreibt. Nichts anderes geschieht auch bei den Rädern der Eisenbahn: Der Geradeauslauf stellt in Wirklichkeit eine sinusförmige Wellenlinie dar – er wird deshalb auch «Sinuslauf» genannt. Die Länge einer Welle ist dabei abhängig von der Neigung der Lauffläche: Je steiler der Winkel dieser Neigung ausfällt, desto kürzer zeigt sich die entsprechende Wellenlänge.

Schnell laufende Reisezug-Wagen weisen einen flacheren Winkel der Lauffläche auf; teilweise verfügen sie sogar über einen kleinen walzenförmigen Bereich, wie das Beispiel des Radprofils nach Heumann-Lotter zeigt (Grafik 3).

Durch den Sinuslauf wird in der Geraden – wie in Bogen mit großen Radien – eine Selbstzentrierung des Radsatzes auf dem Fahrweg erzeugt, ohne dass es zum Anlaufen des Spurkränzes an der Schiene kommen muss. Dadurch wird einerseits

ENTGLEISUNGS-URSACHE: EIN LAGEFEHLER VOR DER WEICHE 25

Die Aufnahme von der geräumten Unfallstelle zeigt die zerstörte Weiche 25 mit Blick in Richtung auf den Bahnhof Siegelisdorf. Kurz vor dieser Stelle war in der Nacht des 10. Juni 1928 um 2 Uhr 21 zunächst das Vorlauf-Drehgestell der Würzburger 18 502 – der Zuglok des D 47 (München-Dortmund) auf dem Streckenabschnitt zwischen Nürnberg und Würzburg – entgleist. Auf Höhe des neben dem Gleis stehenden Eisenbahners nahm dann das Unheil seinen Lauf.

Foto: DB-Archiv Nürnberg



Spurführung von Schienenfahrzeugen

besseres Laufverhalten, andererseits auch geringerer Verschleiß erreicht als bei Radsätzen mit zylindrischem Radprofil, die keinen Sinuslauf aufweisen.

Bei der Modellbahn wird vielfach ein Winkel von drei Grad angewendet. Eine Neigung der Laufflächen sehen auch die einschlägigen Normen in diesem Umfeld wie NMRA, NEM oder H0pur® vor.

Der Komfort der Fahrgäste spielt naturgemäß auf der Modellbahn keine Rolle. Auch eine Optimierung des Verschleißes von Rad und Schiene auf gerader Strecke und in Kurven ist dabei unerheblich.

Die Stellungen des Radsatzes bei Bogenfahrt

Bei der Fahrt durch einen Bogen müssen Hohlkehle und Spurkranz den Radsatz führen. Dazu sind erhebliche Widerstände zu überwinden, da der Spurkranz an der Schiene und die Lauffläche des Rades auf der Schienen-Oberfläche gleitet. Dies ist eine wesentliche Ursache für den Verschleiß an Lauffläche und Spurkranz.

Beim Lauf im Bogen können die Räder des Fahrzeugs unterschiedliche Stellungen annehmen, abhängig von der Fahrzeugkonstruktion, dem Bogenradius und weiteren Parametern.

Die Achsen des Fahrzeugs können dabei vier Stellungen einnehmen:

- ◆ den Freilauf
- ◆ den Spießgang
- ◆ die Außensehnen-Stellung
- ◆ die Innensehnen-Stellung.

Beim **Freilauf** ist nur ein Rad an der Bogenführung beteiligt, genauer das vordere, bogenäußere Rad. Diese Art der Bogenführung ist beim Vorbild angestrebt, da sie geringeren Verschleiß an Radsatz und Schiene hinterlässt als der Spießgang. Allerdings können sich diese Verhältnisse nur bei großen Radien und Fahrzeugen mit kleinen Achsständen – wie beispielsweise Wagen mit Drehgestellen – einstellen.

In Gleisbögen mit einem Halbmesser von weniger als 400 Metern – und bei Achsständen von mehr als zwei Metern – stellt sich beim Vorbild in der Regel der **Spießgang** ein.

Die beiden **Sehnenstellungen** bilden beim Vorbild eine Ausnahme und werden deshalb hier nicht weiter betrachtet.

Der Spießgang

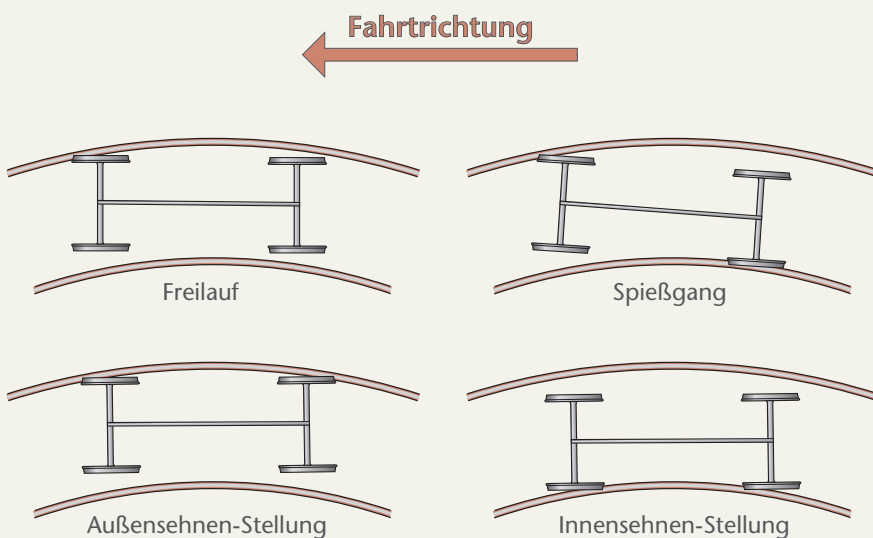
Der Spießgang spielt in der Fahrndynamik, vor allem bei relativ engen Bogenradien, eine große Rolle. Bei der Modellbahn fahren wir – im Vergleich zum Vorbild – auf engen Radien. Auch wenn es keine mir bekannte wissenschaftliche

Untersuchung bei den Modellbahnen gibt, können wir davon ausgehen, dass unsere Modellbahn-Fahrzeuge in der Regel im Spießgang durch die Bogen fahren. Das heißt: In einem Linksbogen bei einem zweiachsigen Fahrzeug gleitet das vordere rechte – bogenäußere – Rad und das hintere linke – also bogeninnere – Rad am Spurkranz. Das erklärt auch das Phänomen, dass in einem Bogen durchaus ein Rad zur Bogenmitte hin entgleisen kann. Drehgestell-Fahrzeuge verhalten sich in diesem Zusammenhang kinematisch wie zwei zweiachsige Fahrzeuge und sind dank ihres kurzen Achsstandes eher zum Freilauf zu bewegen.

Der Anlaufwinkel α

Das Rad kann sich bei festen – das heißt nicht schwenkbaren – Achsen nicht radial zur Schiene einstellen, sondern nimmt einen Winkel zur Schiene ein. Die Schrägstellung des Rades zur Schiene ist der sogenannte Anlaufwinkel « α ». Je enger der Bogen – und je größer der Achsstand des Fahrzeugs – desto größer fällt der Anlaufwinkel aus.

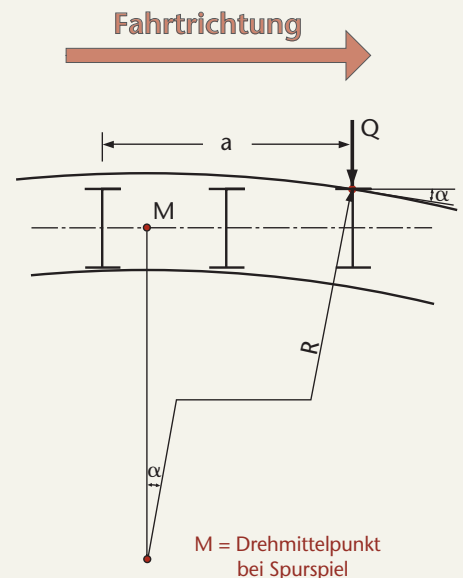
Die Größe des Anlaufwinkels hat maßgebenden Einfluss auf die Sicherheit. Der Anlaufwinkel sollte möglichst klein sein und misst bei Vollbahnen typischerweise bis zwei Grad. Fahrzeuge, die sehr enge



GRAFIK 4: Die Stellungen des Laufwerks bei Bogenfahrt.

GRAFIK 5:

Fahrzeug im Gleisbogen mit Anlaufwinkel α .



M = Drehmittelpunkt bei Spurspiel

Bogen durchfahren sollen – wie zum Beispiel Straßenbahnen – verfügen daher über enge Achsstände.

Der Anlaufwinkel berechnet sich mit der Formel (vereinfacht, ohne Berücksichtigung des Spurspiels):

$$\alpha = \arcsin [(a/2)/R] \times 180/\pi$$

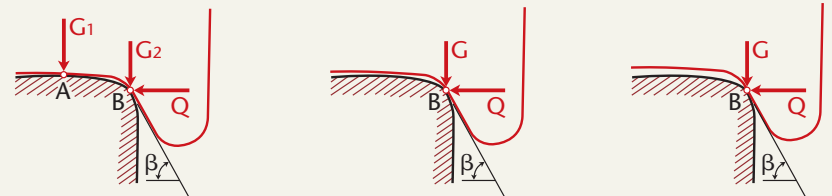
arcsin = Arcussinus; a = Achsstand des Fahrzeugs; R = Radius des Bogens;

So weist zum Beispiel eine Dampflok der Baureihe 94.5 (preußische T 16.1) mit ihrem Achsstand von 5800 mm in einem Bogen mit 190 Metern Halbmesser einen Anlaufwinkel von 0,9 Grad auf. Dagegen hat eine Harzquerbahn-Lok der Baureihe 99.22 bei einem festen Achsstand der Treibräder von 4800 mm in einem Bogen mit 50 Metern Halbmesser einen Anlaufwinkel von 3 Grad.

Ein- und Zweipunkt-Berührung

Im Bogen gibt es zwei Möglichkeiten der Berührung von Rad und Schiene. Bei Zweipunkt-Berührung verteilt sich die Radlast auf die Kraftkomponenten G1 und G2, da das Rad sowohl auf der Lauffläche als auch mit der Hohlkehle auf der Schiene steht (siehe a). Dies wird beim Vorbild nicht angestrebt, da die Radlast G1 an der Lauffläche ein Quergleiten mit entsprechendem Verschleiß verursacht.

GRAFIK 6: Berührungspunkte zwischen Rad und Schiene im Querschnitt



a) Zweipunkt-Berührung

b) Einpunkt-Berührung

c) Entgleisungs-Grenze



Bei Einpunkt-Berührung ist das Rad schon etwas angehoben und es berührt ausschließlich die Hohlkehle der Schiene (siehe b). Der Verschleiß ist bei dieser Variante geringer.

Da der Widerstand der Fahrzeuge im Bogen im Wesentlichen vom Quergleiten des Rades auf der Schienen-Oberfläche herrührt, ist der Bogen-Widerstand bei Einpunkt-Berührung geringer. Übrigens: Dieser Effekt lässt sich auch bei der Modellbahn beobachten.

Werden die Seitenkräfte größer, klettert das Rad immer weiter an der Hohlkehle hinauf, bis der Berührungspunkt zwischen Rad und Schiene an der geraden Spurkranz-Flanke angelangt ist (siehe c). Damit steht das Rad an der Entgleisungsgrenze: Höhere Seitenkräfte kann das Rad nicht mehr

DER AUSLÖSER: ENTGLEISTER RADSATZ RAMMT DIE FLÜGELSCHIENE

Folgeschwerer Verlust: Im Schotter neben der Weiche 25 (rechts) endete jäh der Weg des bereits zuvor zur Bogenmitte hin entgleisten Vorlauf-Drehgestell der 18 502, als dessen linkes Rad auch noch gegen die Flügelschiene (Bild oben) der Weiche krachte. Der Aufprall erfolgte dann mit solcher Wucht, dass der Drehzapfen des Vorlaufgestells unter der Lok glatt abgeschert wurde – und löste damit die bis dahin größte Eisenbahn-Katastrophe in Deutschland aus.



Spurführung von Schienenfahrzeugen

aufnehmen; es wird entgleisen, falls die Seitenkraft Q nicht sinkt.

Der Flankenwinkel des Spurkranzes

Der Flankenwinkel des Spurkranzes beeinflusst in hohem Maße die Betriebssicherheit eines Radsatzes: Je kleiner der Flankenwinkel ausfällt, desto höher ist die Entgleisungsgefahr. Viele Spurkranz-Geometrien verfügen über einen Flankenwinkel von 70 Grad; bei entgleisungskritischen Fahrzeugen ist es sinnvoll, diesen Wert auf 75 Grad zu erhöhen.

Bei entgleisungsunkritischen Fahrzeugen kann dagegen ein etwas flacherer Spurkranz-Flankenwinkel von 60 Grad verwendet werden. Spurkranz-Schmierung kann beim Vorbild die Entgleisungs-Sicherheit zusätzlich erhöhen.

Der Profilverschleiß

Unter anderem führen hohe Zugkräfte, Bogenfahrten und Klotzbremsen zum Verschleiß des Radprofils. Je nach Materialabtragung kommt es zum Verschleiß der Lauffläche sowie des Spurkranzes.

Der Verschleiß der Laufflächen lässt die Spurkranzhöhe anwachsen; gleichzeitig wird der Raddurchmesser kleiner. Durch Verschleiß wird aber auch der Spurkranz dünner, der Flankenwinkel steiler.



Eine kreisrunde Öffnung mittig im Zylinderstück der umgestürzten S 3/6 markiert jene Stelle, an der die Tragplatte für den Bolzen des Vorlauf-Drehgestells durch die Gewalt des Aufpralls an der Flügelschiene der Weiche abgeschert worden ist.

Sind die Verschleißgrenzen erreicht, muss der Spurkranz auf der Radsatz-Drehmaschine neu profiliert werden. Dies ist in der Regel zweimal möglich, bis die Mindeststärke des Radreifens erreicht ist; dann muss das Rad neu bereift werden.

Das Spurspiel

Die Radsätze dürfen im Gleis nicht zwängen. Dies wird dadurch sicherge-

stellt, dass die Spurweite etwas größer ausfällt als die Weite der beiden Spurkranz-Flanken des Radsatzes. Der Radsatz hat somit ein gewisses Spiel im Gleis. Das Spurspiel beim Vorbild beträgt typischerweise 11 mm. Drei- und mehrachsige Fahrzeuge, deren Achsen starr im Rahmen gelagert sind, benötigen unabhängig davon noch weitere Maßnahmen, um ein Zwängen im Bogen zu vermeiden – wie beispielsweise seitliche Verschiebbarkeit der Achsen im Rahmen.

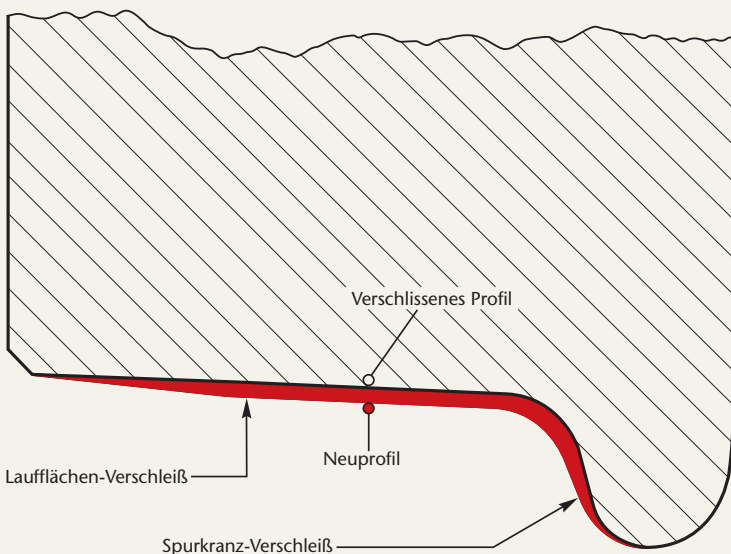
Die Spurweite

Vom Nennmaß der Spurweite von 1435 mm kann innerhalb bestimmter Grenzen abgewichen werden. Die Toleranz für die Spurweite beträgt -5 mm bis +35 mm. Das Mindestmaß für die Spurweite liegt somit also bei 1430 mm, das Höchstmaß – in engen Gleisbögen auf Nebenbahnen – beträgt 1470 mm.

Bei Bogen unter 200 Metern schreibt die Eisenbahn-Betriebsordnung vor, dass die Spurweite vergrößert werden muss.

Auszug aus der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 8. Mai 1967:

Bogenradius (m)	Spurerweiterung (mm)
unter 200 bis 172	mindestens 5
unter 172 bis 150	mindestens 10
unter 150 bis 134	mindestens 15
unter 134 bis 100	mindestens 20

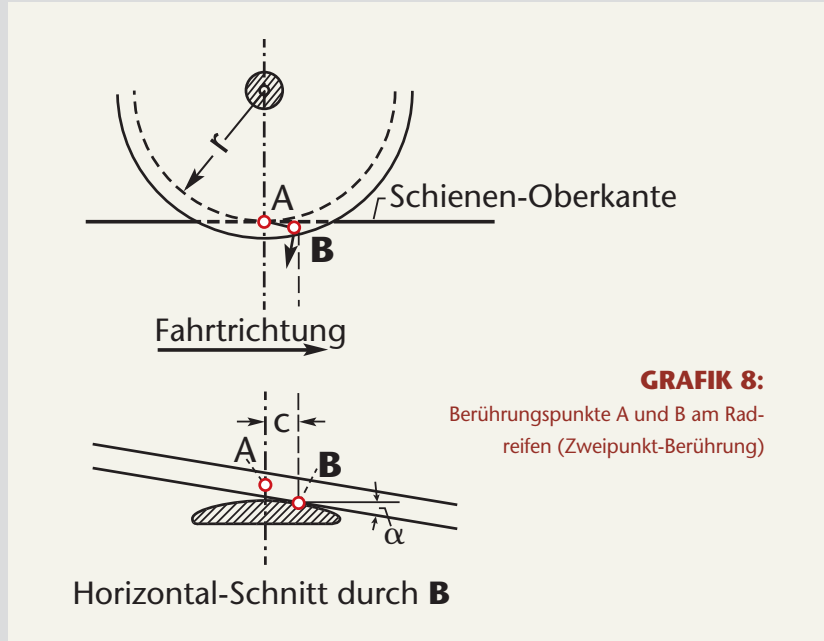


GRAFIK 7: Verschleiß am Radprofil

Die Entgleisung

In einem Bogen steht das führende Rad schräg zum Gleis. Der Spurkranz muss also zwangsläufig die Schiene berühren, um den Radsatz durch den Bogen zu zwingen. Der Berührungspunkt zwischen Schiene und Rad wandert zunächst an der Hohlkehle entlang, bis er im Extremfall bei der Spurkranz-Flanke angelangt. Damit hat das Rad dann bereits seine Entgleisungsgrenze erreicht.

Jedes Rad neigt im Bogen zum Aufklettern, je stärker die Seitenkraft und je geringer die Achslast ist. Enge Bogenradien und große Achsstände begünstigen das Aufklettern des Rades, während sich zum Beispiel Wagen mit Drehgestellen auf Grund ihrer recht kurzen Achsstände als robuster gegen Entgleisung erweisen. Auch sind leere Wagen stärker gefährdet



AM MORGEN DANACH: DAS GESAMTE AUSMASS DER KATASTROPHE

Ohne ihr führendes Drehgestell geriet nun auch die Lok aus der Spur; dabei drehte sie sich gegen die ursprüngliche Fahrtrichtung, löste sich vom Zug, kippte um, und kam schließlich – inmitten dreier quergestellter Überreste ineinander verkeilter Waggons – mit den Rädern nach oben am Fuß des Bahndamms zu liegen.



Spurführung von Schienenfahrzeugen

als beladene Waggon beziehungsweise Lokomotiven dank ihrer verhältnismäßig hohen Achslasten.

Das beste Führungsvermögen eines Radsatzes ergibt sich theoretisch bei einem Flankenwinkel β von 90 Grad. Der Anlaufwinkel α verhindert es jedoch, einen Flankenwinkel des Spurkranzes von 90 Grad zu realisieren.

Die Kräfte am Radsatz an der Entgleisungsgrenze

Das Verhalten des Radsatzes wird von den wirkenden Kräften verursacht. Wenn das Rad am Spurkranz bis zum Ende der

Spurkranz-Flanke aufklettert, steht das Rad unmittelbar vor der Entgleisung. Insgesamt wirken an der Entgleisungsgrenze auf das Rad vier unterschiedliche Kräfte:

- ◆ die Normalkraft G (das Gewicht)
- ◆ die Führungskraft Q (Seitenkraft, verursacht durch Bogenfahrt)
- ◆ der Normaldruck N von der Schiene
- ◆ die Reibungskraft R

Die vertikal wirkende Gewichtskraft G versucht, den Radsatz nach unten zu drücken und damit im Gleis zu halten. Die Seitenkraft Q dagegen ist bestrebt, ihn aus dem Gleis zu schieben.

Auch die Schiene hat kräftemäßig Einfluss auf den Spurkranz. Die Reaktionskraft N wirkt genau senkrecht zur Spurkranz-Flanke am Berührungspunkt von Spurkranz und Schiene. Die Reibungskraft R wirkt in Richtung der Spurkranzflanke.

Für das Aufklettern ist ursächlich die Querkraft Q verantwortlich. Wächst die Querkraft Q an der Entgleisungsgrenze auch nur geringfügig, wird sie den Radsatz zum Entgleisen bringen.

Die Reaktionskraft N – sowie die Reibungskraft R – haben eine nach oben gerichtete Kraftkomponente. Nur diese beiden sind in der Lage, den Radsatz zum Entgleisen zu bringen. Das heißt: Ausschließlich die vertikalen Reaktions-Kraftkomponenten der Schiene bringen das Rad aus der Spur.

In diesem Zusammenhang sind zwei Phänomene wichtig: Die Reibungskraft R ist zirka um Faktor 4 bis 5 geringer als die Normalkraft N , bei einem angenommenen Reibungsbeiwert von 0,2 bis 0,25.

Die nach oben gerichtete vertikale Komponente der Normalkraft N ist stark abhängig vom Spurkranz-Flankenwinkel: Je größer dieser Winkel gewählt wird, desto kleiner zeigt sich die nach oben gerichtete – also entgleisungsfördernde – Kraftkomponente von N .

Bei gegebener Radlast und Querkraft ist für die Entgleisungs-Sicherheit des Radprofils also zusammenfassend festzustellen:

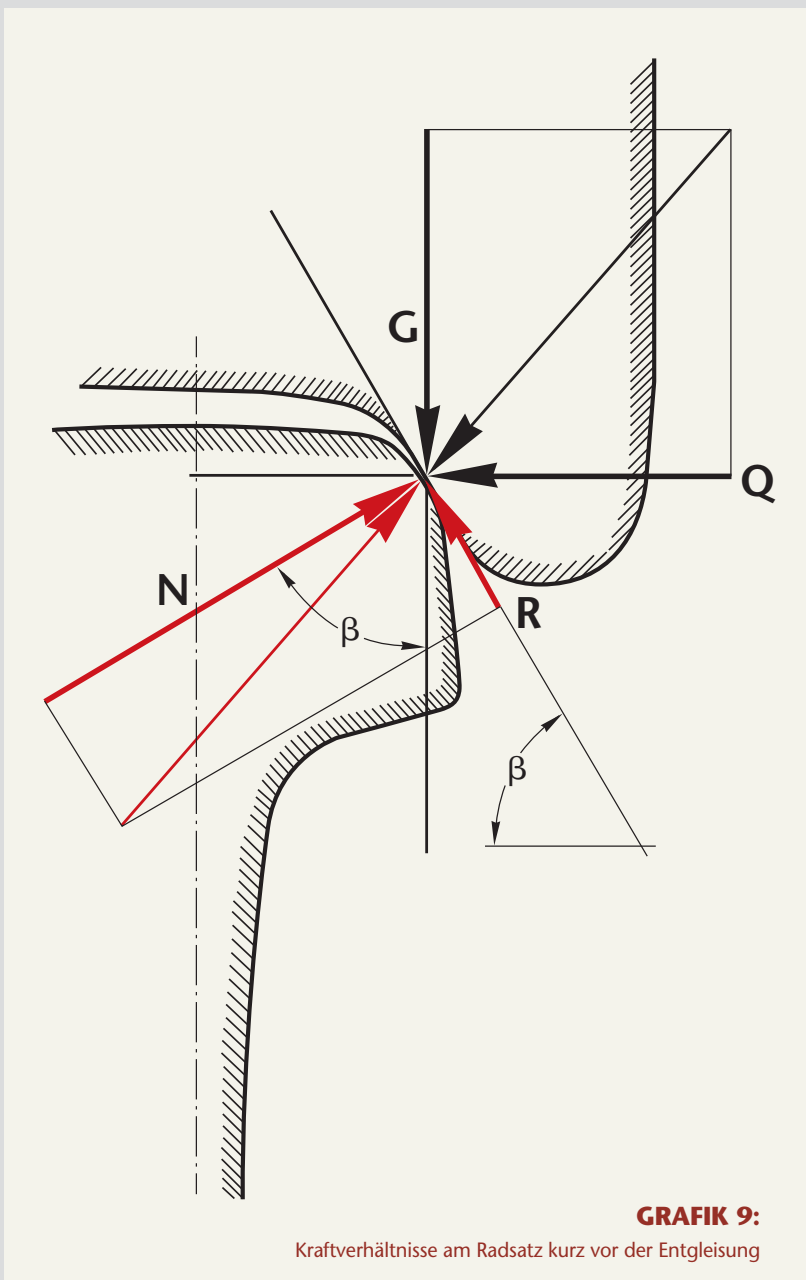
1. Der Flankenwinkel β des Spurkranzes sollte möglichst groß sein.
2. Die Reibung am Spurkranz sollte möglichst gering sein.
3. Die Höhe des Spurkranzes stellt eine Sicherheitsreserve dar, die nicht reduziert werden darf.

Der Entgleisungs-Vorgang

Eine Entgleisung entwickelt sich nicht schlagartig: Vielmehr dreht sich das Rad über eine gewisse Wegstrecke aus dem Gleis. Den Entgleisungsvorgang kann man in drei Phasen einteilen:

1. sicherer Lauf
2. kritischer Zwischenbereich
3. vollendete Entgleisung

Auf einer geraden Strecke ist die entgleisungsfördernde Querkraft Null – also keine Gefahr, und die Radsätze rollen



GRAFIK 9:
Kraftverhältnisse am Radsatz kurz vor der Entgleisung



- ◆ steiler Flankenwinkel am Spurkranz
- ◆ Spurkranz-Form
- ◆ Spurkranz-Höhe
- ◆ gleichmäßige Radlasten
- ◆ geringe Reibung am Spurkranz
- ◆ möglichst geringe Querkraft
- ◆ kleine Anlaufwinkel.

Beim Vorbild scheint die Tatsache interessant, dass neu bereifte Fahrzeuge eher zum Entgleisen neigen als Fahrzeuge mit eingefahrenen Radreifen. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass der Spurkranz bei eingefahrenen Radreifen eine glattere Oberfläche aufweist – also weniger Reibung verursacht. Zudem wird die Spurkranz-Flanke durch den Verschleiß steiler und damit entgleisungssicherer. Hinzu kommt noch, dass der Spurkranz insgesamt – durch den Verschleiß der Lauffläche – höher wird.

Fazit: Enge Bogen – und daraus resultierend große Anlaufwinkel – kleine Rad-durchmesser und große Spurkranzreibung ergeben ein geringes Führungsvermögen; die Entgleisungsgrenze sinkt. Vergrößerung des Flankenwinkels erhöht hingegen die Sicherheit. Auch eine Schmierung der Spurkranz-Flanke erhöht die Sicherheit gegen Entgleisen.

(wird fortgesetzt)

sicher auf den Laufflächen. Fährt das Fahrzeug in einen Bogen ein, wandert der Berührungspunkt sofort von der Lauffläche die Hohlkehle hoch, bis der Flankenwinkel groß genug ist, um die Seitenkräfte zu kompensieren. Im äußersten Fall wandert der Berührungspunkt bis zur Spurkranz-Flanke. Jetzt befindet sich der Radsatz in der kritischen Phase 2: das Führungsvermögen des Radsatzes ist erschöpft, das Rad steht kurz vor der Entgleisung. Größere Seitenkräfte kann der Spurkranz jetzt nicht mehr aufnehmen.

Der Radsatz entgleist aber noch nicht sofort, sondern beginnt, sich am Berührungspunkt hochzudrehen; er arbeitet sich also an der Spurkranz-Flanke hoch. Beim Vorbild kann das noch einige wenige Raddrehungen dauern. Untersuchun-

gen von DB-Experten haben 1/2 bis 3/4 Radumdrehungen ergeben, also 0,5 bis 4 Meter (*Quelle: Bögle*). Damit ist der Spurkranz auch in der Lage, Kraftspitzen durch kurze Stöße – zum Beispiel bei der Fahrt über eine Weiche – abzufangen. Durch die gerade Flanke am Spurkranz gibt es noch eine letzte Chance, dass sich der Spurkranz wieder fangen kann.

Bei der Modellbahn ist es physikalisch nicht anders: Es spielen sich exakt dieselben kinematischen Vorgänge ab.

Die Entgleisungssicherheit

Kräfte, die im Bogen auf das Fahrzeug wirken, führen dann zu einer Entgleisung, wenn das Führungsvermögen des Rades erschöpft ist. Eine Reihe von Einflussfaktoren minimieren das Risiko der Entgleisung:

ABTRANSPORT VOM UNFALLORT: REIF FÜR DEN SCHROTT?

Auch wenn die S 3/6 bei ihrem Sturz vom Bahndamm erhebliche äußerliche Blessuren davongetragen hatte (oben): Ihre Substanz war dabei weitgehend unversehrt geblieben. Am 26. Juni 1928 schließlich wurde der inzwischen wieder aufgerichtete Torso der 18 502 über ein provisorisch verlegtes Gleis zurück auf den Bahndamm gezogen und in die Nürnberger Zentralwerkstätte geschleppt. Nach einer L4-Hauptuntersuchung stand die Lok vier Monate später beim Bw Nürnberg wieder in Diensten ...

