

Technische Universität Dresden Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List" Prof. f. Gestaltung v. Bahnanlagen	Spurführung	Prof. Fengler G 02 Version 01-24
---	--------------------	---

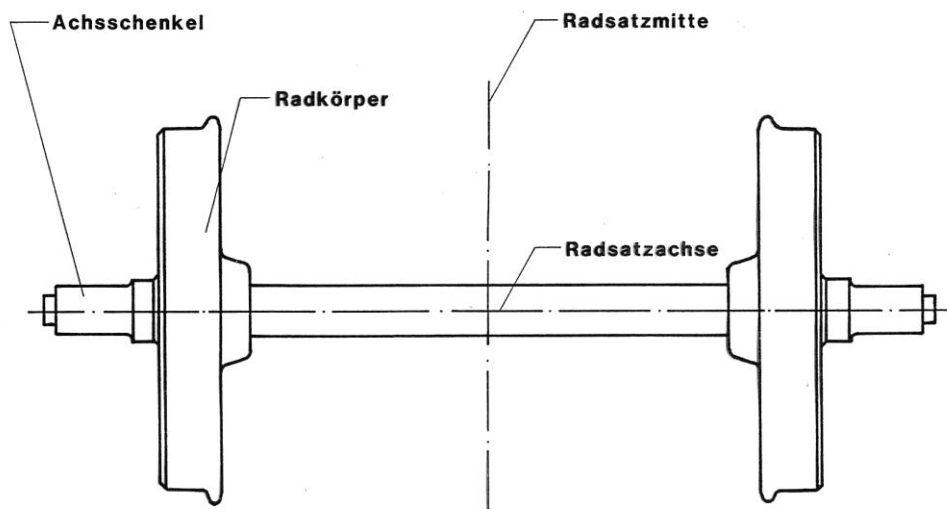
1 Spurführung

„Spurführung“ bedeutet, dass die seitliche Führung des Fahrzeugs durch die Spurführungselemente des Fahrzeugs und des Fahrwegs übernommen wird, d.h. das Fahrzeug nicht aktiv gelenkt wird. Deshalb sind nicht nur Eisenbahnen spurgeführte Systeme, sondern z.B. auch die Magnetschwebbahn Transrapid oder die gummi-bereifte Métro in Paris.

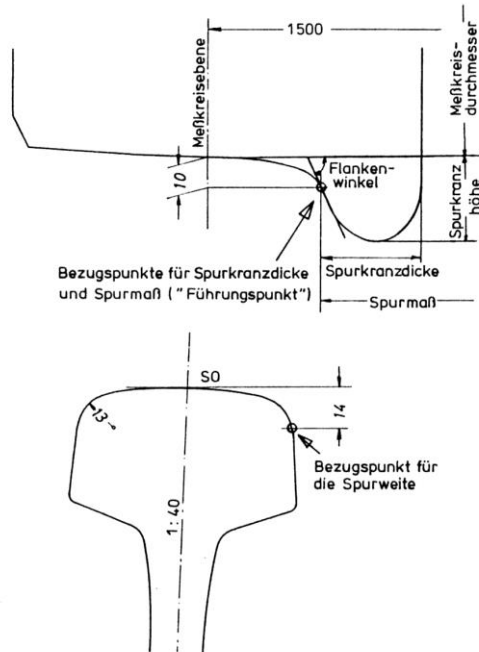
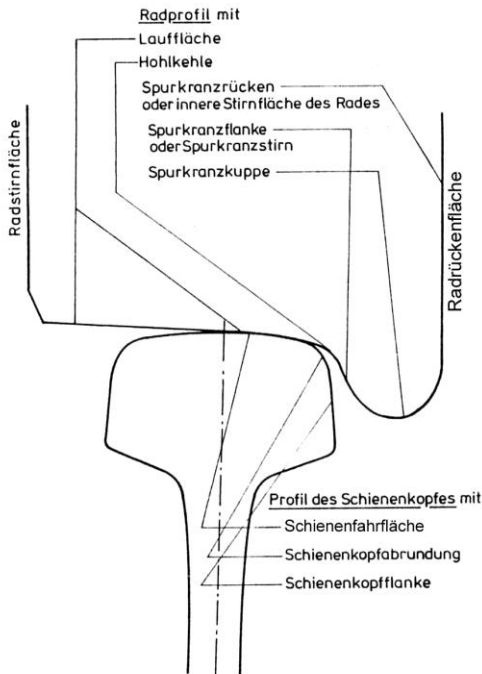
1.1 Prinzip und Elemente der Spurführung des Rad / Schiene – Systems

Die Spurführung des Rad / Schiene – Systems beruht auf der konstruktiven Ausbildung und den Materialeigenschaften von Rad und Schiene. Grundidee dabei ist, mit einem schmalen Stahlrad auf einer schmalen Stahl-Lauffläche zu fahren, weil dadurch ein kleiner Rollwiderstand bei geringen Materialkosten erreicht wird. Da die Schienenfahrläche sehr schmal ist, müssen Spurkränze dafür sorgen, dass die Räder nicht von der Schiene abkommen. Die Spurkränze sind auf der Innenseite der Räder angebracht, weil dadurch im Gleisbogen die Zentrifugalkraft den an der bogenäußeren Schiene laufenden führenden Spurkranz zusätzlich belastet, was der Sicherheit bei Bogenfahrt zu Gute kommt. Die Anbringung auf der Radinnenseite verhindert ein Abgleiten des Rades von der Schiene nach außen. Ein Abgleiten nach innen verhindert der Spurkranz des gegenüber liegenden Rades, welches über die Radsatzachse („Achswelle“) starr verbunden ist. Die auf die Achswelle fest aufgeschraubten Räder bilden zusammen mit der Achswelle den Radsatz; sie können sich nicht gegeneinander verdrehen. Die Achsschenkel laufen in den Radsatzlagern und übertragen die Horizontal- und Vertikalkräfte zwischen Radsatz und Wagenkasten; sie sind Teil der Achswelle.

Somit ist der komplette Eisenbahn-radsatz eine „ungefederte Masse“ von ca. 1 – 1,5 t, die entsprechend große dynamische Kräfte auf das Gleis ausübt.

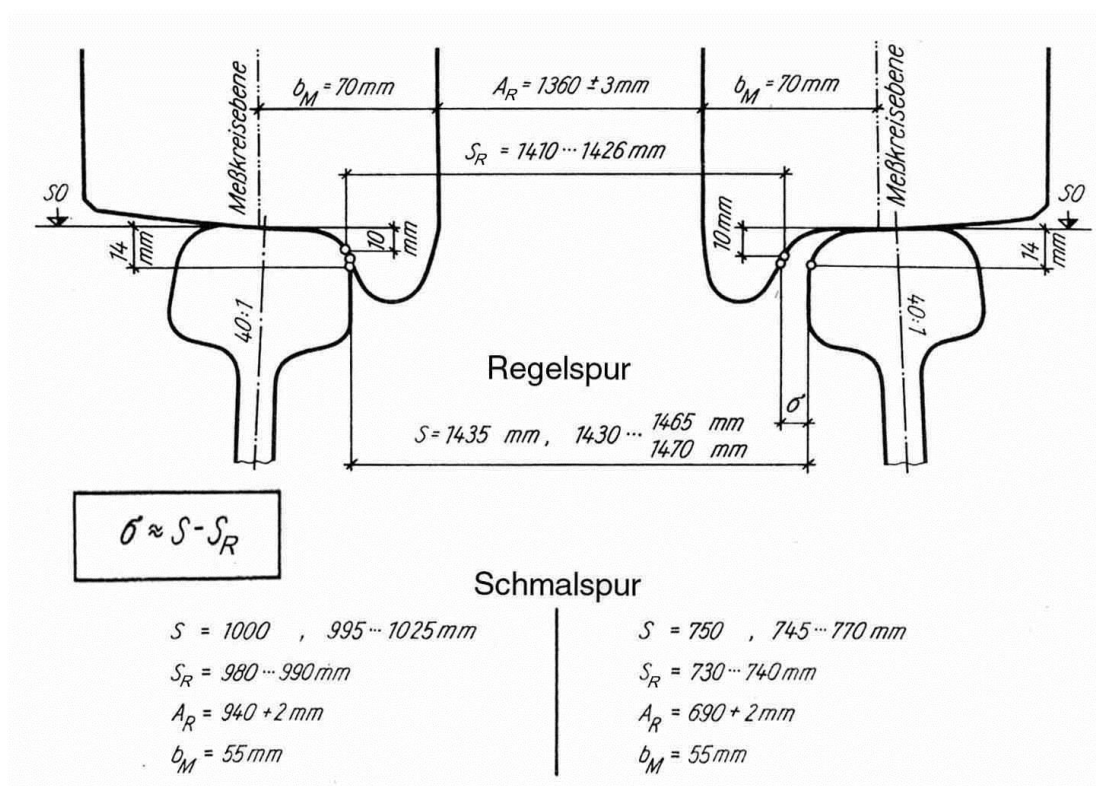


Eisenbahn-radsatz



Berührungselemente von Rad und Schiene

Bezugspunkte an Rad und Schiene



Radsatz im Gleis

Begriffe (Maße jeweils bezogen auf EBO-Bahnen¹):

Bedeutung:)Kleinstmaß((Größtmaß) Regelmaß

Radsatz:

Konstruktive Einheit aus Achswelle und damit fest verbundenen Eisenbahnradern

¹ regelspurige öffentliche Bahnen in Deutschland

Messkreis:

Radumfang in 750 mm Abstand zur Symmetrieachse des Radsatzes

Spurmaß S_R :

Abstand der Messpunkte 10 mm außerhalb des Messkreises am Übergang von der Hohlkehle zum Spurkranz

)1410 mm(- (1426 mm)

Schienenoberkante (SO):

Höchster Punkt der Schienenfahrfläche

Spurweite S:

Kleinster Abstand der Schienenköpfe im Bereich 0 bis 14 mm unter SO

)1430 mm(- 1435 mm – (1465 mm / 1470 mm)

Spurspiel σ :

Differenz zwischen Spurweite und Spurmaß

)4 mm(- (60 mm)

Stützweite bzw. Schienenkopfmittenabstand s:

Abstand der Schienenkopfmitten in SO

ca. 1500 mm (abhängig von Schienenform)

Schienenneigung:

Neigung der Schienenachse in Richtung Gleismitte (Regelwert 1:40, in und zwischen Weichen 1:40 oder 1:∞)

alle Maße [mm]	Messkreisdurchmesser der Räder	Radsatz	
		Mindestmaß	Höchstmaß
Spurmaß S_R	> 840 ^{*)}	1410	1426
Abstand der Spurkranzrücken A_R	> 840 ^{*)}	1357	1363
Radbreite B_R		130	150
Spurkranzdicke S_d	> 840 ^{*)}	20	33
Spurkranzhöhe S_h	> 760 ^{*)}	26	36

^{*)} bei kleineren Messkreisdurchmessern (minimal 330 mm) andere Werte!

Grenzmaße von regelspurigen Rädern und Radsätzen nach EBO

1.2 Spurweiten

Die Spurweite von Schienenbahnen wird unterschieden nach

⇒ Regelspur (1435 mm)

⇒ Breitspur (> 1435 mm)

⇒ Schmalspur (< 1435 mm)

Etwa 2/3 des Schienennetzes der Erde hat Regelspur („Vollspur“, „Normalspur“).

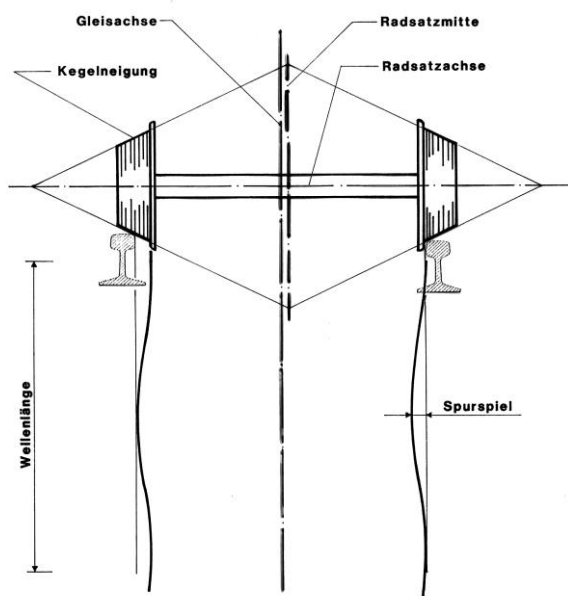
Breitspurnetze haben die Staaten der ehemaligen UdSSR (1524 mm), Irland und Australien (jeweils 1600 mm), Spanien, Portugal sowie Indien und Südamerika (jeweils 1676 mm). Breitspurbahnen lassen auf Grund der größeren Stützweite prinzipiell breitere und höhere Fahrzeuge zu, erfordern aber einen etwas größeren Mindestbogenradius.

Schmalspurbahnen findet man vielerorts als Nebenbahnen und in schwierigem Gelände. Gängige Spurweiten sind 1067 mm (sog. „Kapspur“ in Südafrika und Japan), 1000 mm (Schweiz, deutsche Schmalspurbahnen außer Sachsen), 900 mm (vereinzelt), 750 mm (sächsische Schmalspurbahnen) und 600 mm (Feldbahnen). Straßenbahnen haben häufig 1000 mm Spurweite. Vorteil der Schmalspurbahnen ist ihre wesentlich bessere Bogengängigkeit, nachteilig sind die geringere Fahrzeugbreite, die schlechtere Eignung für hohe Geschwindigkeiten und die größere Gefahr des Aufkletterns in den engen Gleisbögen.

Der Übergang zwischen verschiedenen Spurweiten erfolgt durch Umsteigen oder Umladen, durch Huckepack-Verkehre („Rollbock“) oder durch Radsatz- oder Drehgestellwechsel. Weiterhin gibt es patentierte Achs-Radkonstruktionen, bei denen die Spurweite schnell und automatisch während des Durchfahrens einer speziellen Umpureinrichtung gewechselt werden kann.

1.3 Fahrt in der Geraden

Heute wird die Rad-Schiene-Paarung fast überall nicht zylindrisch, sondern kegelig so ausgebildet, dass die Fahrflächen der Schienen leicht (1:40) zur Gleismitte geneigt sind und auch die Radlaufflächen dementsprechend konisch ausgebildet sind. Wird der Radsatz in den Grenzen des Spurspiels aus der Schienenmitte ausgelenkt, läuft das konische Rad auf der ausgelenkten Seite auf einem größeren und das Rad auf der gegenüber liegenden Seite auf einem kleineren Durchmesser. Das ausgelenkte Rad legt folglich einen größeren Weg zurück, während das andere Rad zurück bleibt. Daraus entsteht eine Wendebewegung um die Hochachse des Radsatzes und eine dementsprechende Winkeldrehung, die der ursprünglichen Auslenkung entgegen wirkt. Es entsteht der sog., sich in gewissen Grenzen selbst stabilisierende „Wellenlauf“, der ein wichtiger Faktor für einen ruhigen Fahrzeuglauf ist.



Wellenlauf

Bei exakt kegelförmiger Schienenfahrfläche und einer ebensolchen Radlauffläche würde sich ein sog. „Sinuslauf“ einstellen, dessen Wellenlänge nach der „Klingel-Formel“ berechnet werden kann:

$$\lambda = 2 \pi^* \sqrt{\frac{r^* s}{2^* \tan \gamma}}$$

r = Radhalbmesser ($\approx 0,5$ m)
 tan γ = Konizität (1:40)

s = Stützweite bzw. Schienenkopfmittenabstand (1,5 m)
 λ = Wellenlänge = 24,3 [m]

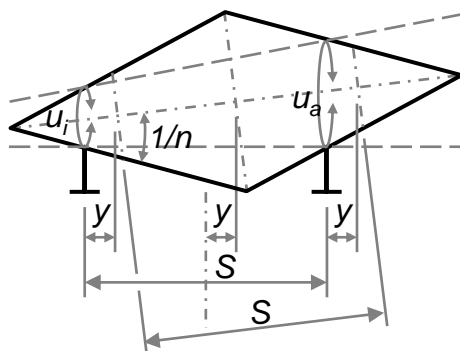
Der Wellenlauf hat je nach Fahrgeschwindigkeit eine Frequenz ca. 1-2 Hz und regelt sich in der Geraden bis zu einer Geschwindigkeit von ca. 160 km/h selbst: Das bedeutet, dass der Spurkranz hier hauptsächlich zur „Spursicherung“ gegenüber unzulässigen Querauslenkungen dient, z.B. aufgrund einer stark fehlerhaften Gleislage, für die eigentliche „Spurhaltung“ jedoch normalerweise nicht benötigt wird. Bei höheren Geschwindigkeiten wachsen die Massenkräfte und damit die seitlichen Anregungen aber so stark an, dass die Spurkränze auch im geraden Gleis am Schienenkopf anlaufen, so dass der sog. „Zickzack-Lauf“ mit großen Kraftspitzen entsteht. Als Gegenmaßnahme werden die Drehgestelle schnell fahrender Fahrzeuge mit einer Drehhemmung („Schlingerdämpfern“) ausgerüstet.

Spurführung in der Geraden	
Spurhaltung	Spursicherung
Elemente der Spurführung	
geneigte Schienenfahrfläche konische Radlaufläche	Spurkranz
Spurführungsmaße	

Die mindestens erforderliche Radbreite wird durch das maximale Spurspiel, den zulässigen seitlichen Schienenverschleiß und durch die erforderliche Überdeckung in Weichen und Kreuzungen mit starrem Herzstück beim Überlauf des Rades von der Flügelschiene auf die Herzstückspitze bestimmt (s. Abschnitt „Konstruktion der Weichen“).

1.4 Fahrt im Bogen

Bei der Fahrt im Bogen treibt die Fliehkraft das Fahrzeug und den Radsatz nach bogenaußen, so dass der äußere Spurkranz ohne Spurspiel an der Schiene und das bogenäußere Rad auf einem größeren Radumfang läuft. Der Grenzradius, bei dem der Radsatz gerade noch zwängungsfrei ohne Gleiterscheinungen (s.u.) durch den Bogen läuft, kann nach folgender Formel berechnet werden:



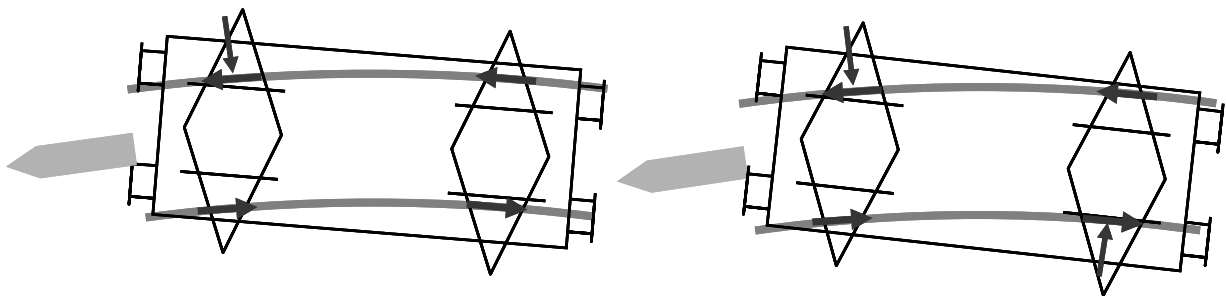
- r_{Gleis} : zwängungsfreier Grenzradius
- r_{Rad} : Radhalbmesser ($\approx 0,5$ m)
- s: Stützweite des Gleises (Regelspur 1,5 m)
- n: Kehrwert der Rad-Konizität
- y: seitliche Radauslenkung
- σ : Spurspiel, $\sigma = 2y$

$$r_{Gleis} = \frac{s^* r_{Rad}^* n}{2y} = \frac{s^* r_{Rad}^* n}{\sigma}$$

Bei einem Spurspiel von 1 cm^1 ergibt sich z.B. nach obiger Formel ein Grenzradius für zwängungsfreien Lauf von $r=3000 \text{ m}$. Die Fliehkraft drückt dabei den Spurkranz tangential an den Schienenkopf, die entgegengesetzt wirkende Reaktionskraft auf Reibung zwischen Radlauf- und Schienenfahrfläche und Spurkranzanlauf hält den Radsatz im Gleis. In Gleisbögen unterhalb des Grenzradius wirken zusätzlich folgende Effekte:

- ⇒ Wegen der erzwungenen Drehzahlgleichheit des bogeninneren und des bogenäußeren Rades gleiten die bogenäußeren Räder nach vorn, die bogeninneren Räder nach hinten (Längsgleiten).
- ⇒ Die Radsätze sind i.d.R. relativ starr im Wagenkasten bzw. Drehgestell angeordnet, so dass sich eine Winkelfehlstellung zwischen der tangentialen Richtung des Gleises und der Rollrichtung des Radsatzes ergibt. Das bogenäußere vordere Rad läuft meist mit einem Differenzwinkel („Anlaufwinkel“ α) an der Schiene an und wird durch die *Richtkraft* in die tangentialen Richtung zurück gedrückt (Quergleiten); je nach Fahrzeugstellung im Gleis kann es auch beim hinteren Radsatz zum Quergleiten kommen. Die Summe aus Fliehkraft und Richtkraft wird als Führungskraft bezeichnet.

Bei den sog. „verschleißangepassten“ Radprofilen (z.B. DB II) liegen die Verhältnisse günstiger; sie können Gleisbogen bis hinunter zu ca. 300 m Radius ohne Längsgleiten durchfahren.



gezwängter Bogenlauf bei starr angelenkten Radsätzen
(links „vorderer Anlauf“, rechts „Spießgang“)

Resultat der Gleitvorgänge im Bogen sind der sog. „Bogenwiderstand“ und häufig auch lästiges Quietschen.

Spurführung im Bogen	
Spurhaltung	Spursicherung
Elemente der Spurführung	
geneigte Schienenfahrfläche konische Radlauffläche Spurkranz	Spurkranz
Spurführungsmaße	

1.5 Sicherheit gegen Entgleisen

Unter einer Entgleisung versteht man das Versagen der Spurführung. Beim Rad / Schiene – System gibt es bei intaktem Gleis zwei mögliche Entgleisungsursachen:

¹ entspricht einem sehr guten Instandhaltungszustand von Gleis und Radsatz

⇒ Kippen

⇒ Aufklettern

Darüber hinaus sind Entgleisungen möglich bei Versagen des Fahrzeugs (z.B. Radbruch), des Oberbaus oder des Bahnkörpers bzw. seiner Elemente (z.B. Schienenbruch, Gleisverwerfung, Verschüttung, Unterspülung) sowie bei unzeitiger Weichenbedienung.

1.5.1 Kippen

Ein Eisenbahnfahrzeug kippt um, wenn das wirkende Kippmoment größer als das Standmoment ist. Im nicht überhöhten Gleisbogen gilt:

$$\frac{m * v^2}{r} * h_s = m * g * \frac{s}{2}$$
$$\frac{v^2}{r} = a_{r,kippp} = \frac{g}{h_s} * \frac{s}{2}$$

m = Masse

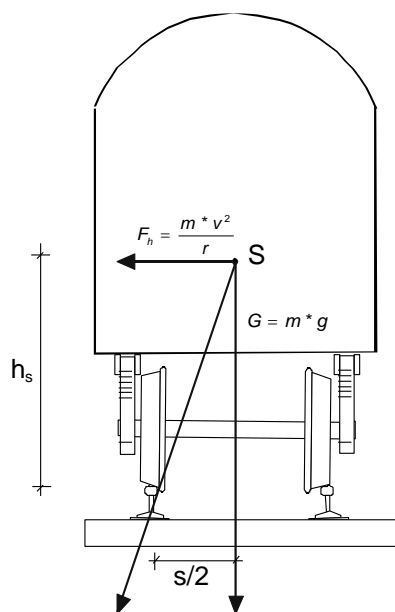
s = Stützweite (1,5 m)

v = Geschwindigkeit

g = Erdbeschleunigung

r = Gleisbogenradius

h_s = Schwerpunkthöhe (ca. ≤ 2 m)

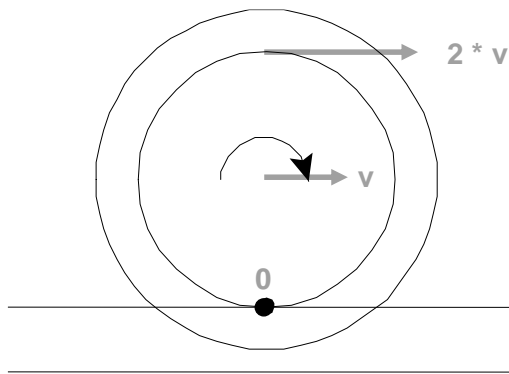


Stand- und Kippmoment

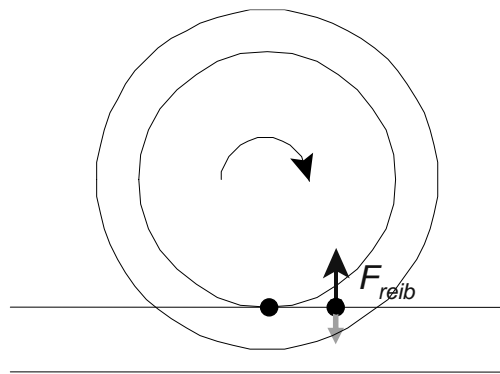
Daraus folgt, dass ein regelspuriges Eisenbahnfahrzeug bei einer Seitenbeschleunigung oberhalb von ca. 3,7 m/s² umkippt, wenn diese lang genug wirksam ist.

1.5.2 Aufklettern

Ein Eisenbahnfahrzeug klettert auf, wenn im Gleisbogen die am Kontaktpunkt zwischen Spurkranz bzw. Hohlkehle und Schienenkopfflanke wirkende – durch Reibung aktivierte - abhebende Kraft größer ist als die vertikal nach unten wirkende Kraftkomponente. Einflussfaktoren sind neben der Horizontal- und Vertikalkraft der Winkel der Kontaktfläche Rad / Schiene und der Reibfaktor. Ursache des Aufkletterns sind zu große Horizontalquerkräfte, z.B. bei zu hoher Geschwindigkeit, in engen Bögen oder in unzulässigen Spurverengungen.



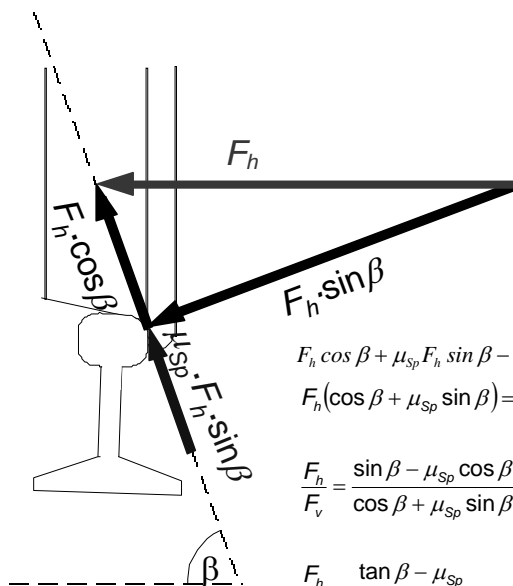
Berührungspunkt in der Geraden



2. Berührungspunkt im Bogen ¹⁾

¹⁾ bei senkrechtem Spurkranz

Berührung von Rad und Schiene in der Geraden und im Bogen



$$F_h \cos \beta + \mu_{sp} F_h \sin \beta - F_v \sin \beta + \mu_{sp} F_v \cos \beta = 0$$

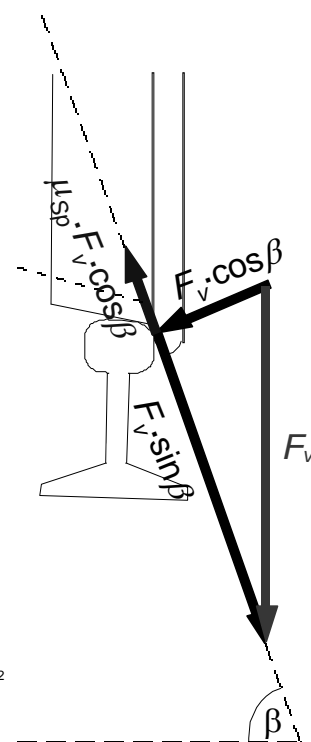
$$F_h (\cos \beta + \mu_{sp} \sin \beta) = F_v (\sin \beta - \mu_{sp} \cos \beta)$$

$$\frac{F_h}{F_v} = \frac{\sin \beta - \mu_{sp} \cos \beta}{\cos \beta + \mu_{sp} \sin \beta} = \frac{\frac{\sin \beta}{\cos \beta} - \mu_{sp}}{\frac{\cos \beta}{\cos \beta} + \mu_{sp} \frac{\sin \beta}{\cos \beta}}$$

$$\frac{F_h}{F_v} = \frac{\tan \beta - \mu_{sp}}{1 + \mu_{sp} \tan \beta}$$

$$\frac{F_h}{F_v} = \frac{\tan 70^\circ - 0,36}{1 + 0,36 \tan 70^\circ} = 1,2 \Rightarrow a_{Nadal} = 1,2g = 11,7 \text{ m/s}^2$$

aus Horizontalkraft-Anteil



aus Vertikalkraft-Anteil

Aufkletterkriterium von Nadal

Bei einem Spurkranzflankenwinkel von 70° und einem Spurkranzreibfaktor $\mu_{sp} = 0,36$ ergibt sich ein Gleichgewicht der abhebenden und der niederhaltenden Kraftkomponenten beim Verhältnis $F_H / F_V = 1,2$. Dieses Kräfteverhältnis darf im Betrieb auch unter Berücksichtigung dynamischer Kraftanteile nicht überschritten werden (Aufkletterkriterium von Nadal). Der Sicherheit gegen Aufklettern kommt zugute, dass die Vertikalkraft F_V im Bogen als Reaktion auf die Fliehkraft und die federungsbedingte Schwerpunktverlagerung nach bogenaußen anwächst. Bei der Fahrzeugzulassung wird die Sicherheit gegen Aufklettern mit Messfahrten überprüft.

Der Spurkranzflankenwinkel im Bereich von 70° ist ein Kompromiss zur Begrenzung der abhebenden Kräfte einerseits (je flacher desto größer) und der Begrenzung der Wirkung dynamischer Kraftspitzen andererseits (je steiler desto größer).

1.6 Spurerweiterung

Da Eisenbahnratsätze sich – bedingt durch die Fahrzeugkonstruktion – normalerweise nicht radial zum Bogenmittelpunkt einstellen, ist es notwendig, die Spurweite in engen Gleisbögen zu vergrößern. Dadurch können Zwängungen vermieden und die Gefahr des Aufkletterns verringert werden. Planmäßige Spurerweiterungen bis auf maximal 1445 mm werden bei Radien unter 175 m in Schritten von 5 mm durch Abrücken der bogeninneren Schiene über 5 Schwellen so hergestellt, dass sie am Bogenanfang durchgeführt sind (siehe Diagramm).

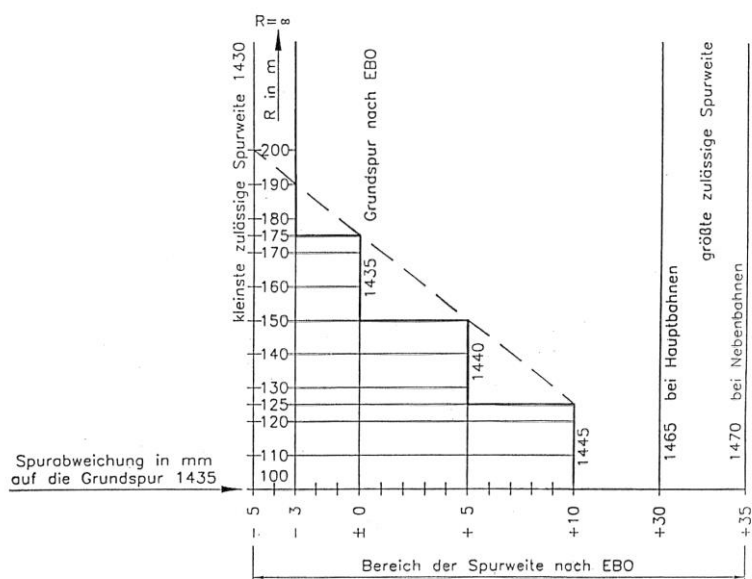


Diagramm zur Spurerweiterung