

DIN EN 15302

ICS 17.040.20; 45.060.01

Ersatz für
DIN EN 15302:2011-01**Bahnanwendungen –
Parameter der Rad-Schiene-Kontaktgeometrie –
Definitionen und Berechnungsmethoden;
Deutsche Fassung EN 15302:2021**

Railway applications –
Wheel-rail contact geometry parameters –
Definitions and methods for evaluation;
German version EN 15302:2021

Applications ferroviaires –
Paramètres géométriques du contact roue-rail –
Définitions et méthodes de détermination;
Version allemande EN 15302:2021

Gesamtumfang 128 Seiten

DIN-Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 15302:2021) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Unterausschuss NA 087-00-02-02 UA „Fahrtechnik“ im DIN-Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF).

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 15302:2011-01 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Erweiterung des Anwendungsbereichs;
- b) Einführung neuer Parameter der Rad-Schiene-Kontaktgeometrie (Rollradienkoeffizient, Nicht-linearitätsparameter);
- c) zusätzliche Methoden zur Bewertung der äquivalenten Konizität;
- d) Verbesserung der Beschreibung von Referenzprofilen;
- e) zusätzliches Referenzradprofil C;
- f) Referenzergebnisse basierend auf analytischen Lösungen;
- g) Hinweise zur Plausibilitätsprüfung der gemessenen Profile;
- h) überarbeitete Bewertung des Glättungsprozesses;
- i) Neubewertung des Gesamtprozesses.

Frühere Ausgaben

DIN EN 15302: 2009-07, 2011-01

Deutsche Fassung

**Bahnanwendungen —
Parameter der Rad-Schiene-Kontaktgeometrie —
Definitionen und Berechnungsmethoden**

Railway applications —
Wheel-rail contact geometry parameters —
Definitions and methods for evaluation

Applications ferroviaires —
Paramètres géométriques du contact roue-rail —
Définitions et méthodes de détermination

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 2. August 2021 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim CEN-CENELEC-Management-Zentrum oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, der Republik Nordmazedonien, Rumänien, Schweden, der Schweiz, Serbien, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

CEN-CENELEC Management-Zentrum: Rue de la Science 23, B-1040 Brüssel

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	6
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe	9
4 Symbole und Abkürzungen	10
5 Überblick über den Prozess zur Bestimmung der Berührgeometrieparameter	11
6 Beschreibung der Rad- bzw. Schienenprofile	11
6.1 Allgemeines	11
6.2 Unsicherheit des Messsystems	13
7 Plausibilitätsprüfung und Verarbeitung von gemessenen Rad- und Schienenprofilen	14
8 Ermittlung der Rad-Schiene-Berührungspunkte und Berührgeometriefunktionen	15
8.1 Allgemeines	15
8.2 Bestimmung der Rollradiendifferenzfunktion	15
8.3 Andere Rad-Schiene-Berührgeometriefunktionen	15
9 Bestimmung der äquivalenten Konizität und des zugehörigen Nichtlinearitätsparameters	16
9.1 Hintergrund zur äquivalenten Konizität	16
9.1.1 Mathematische Beschreibung der kinematischen Querbewegung des Radsatzes	16
9.1.2 Bestimmung der Wellenlänge eines Kegelradsatzes	17
9.2 Bestimmung der äquivalenten Konizität	17
9.3 Bestimmen des Nichtlinearitätsparameters	18
10 Bestimmung des Rollradienkoeffizienten	19
10.1 Hintergrund und Definition	19
10.2 Bestimmung des Punktes E für die Berechnung des Rollradienkoeffizienten	21
11 Andere Rad-Schiene-Berührgeometrieparameter	22
12 Überprüfung der Berechnungssoftware für Berührgeometrieparameter	22
12.1 Übersicht	22
12.2 Validierung der Berechnungsalgorithmen	22
12.3 Beurteilung des Glättungsverfahrens	23
13 Beurteilung des gesamten Prozesses zur Bestimmung der Rad-Schiene-Berührgeometrieparameter	25
13.1 Allgemeines	25
13.2 Reproduzierbarkeit der Berührgeometrieparameterbestimmung basierend auf Schienenprofilmessungen	25
13.2.1 Manuelle Schienenprofilmessgeräte	25
13.2.2 Fahrzeuggebundene Schienenprofil-Messsysteme	26
13.3 Reproduzierbarkeit der Berührgeometrieparameterbestimmung basierend auf Radprofilmessungen	27
13.3.1 Manuelle Radprofilmessgeräte	27
13.3.2 Gleisgebundene Radprofil-Messsysteme	27

Anhang A (informativ) Beispiel für die Darstellung von Berührgeometriefunktionen	29
Anhang B (informativ) Ableitung der kinematischen Gleichung der Radsatzbewegung	30
Anhang C (informativ) Bestimmung der maximalen Querverschiebungen	33
Anhang D (informativ) Verfahren zur Bestimmung der Wellenlänge der Radsatzbewegung durch zweistufige Integration der nichtlinearen Differentialgleichung.....	35
D.1 Allgemeines	35
D.2 Stufe 1	35
D.3 Stufe 2	35
Anhang E (informativ) Verfahren zur Bestimmung der Wellenlänge der Radsatzbewegung durch direkte Integration der nichtlinearen Differentialgleichung.....	37
Anhang F (informativ) Verfahren zur Bestimmung der äquivalenten Konizität durch lineare Regression der Δr -Funktion	38
F.1 Allgemeines	38
F.2 Bedenken bezüglich des Verfahrens	39
Anhang G (informativ) Verfahren zur Bestimmung von Linearisierungsparametern durch harmonische Linearisierung.....	40
G.1 Allgemeines	40
G.2 Bedenken bezüglich des Verfahrens	41
Anhang H (informativ) Umgang mit Sonderfällen der Δr -Funktion	42
Anhang I (normativ) Referenzprofile für Überprüfungen	45
I.1 Allgemeines	45
I.2 Rad A	46
I.2.1 Zeichnung.....	46
I.2.2 Analytische Definition	46
I.2.3 Kartesische Koordinaten.....	47
I.3 Rad B	49
I.3.1 Zeichnung.....	49
I.3.2 Analytische Definition	49
I.3.3 Kartesische Koordinaten.....	50
I.4 Rad C.....	52
I.4.1 Zeichnung.....	52
I.4.2 Analytische Definition	52
I.4.3 Kartesische Koordinaten.....	53
I.5 Rad H.....	55
I.5.1 Zeichnung.....	55
I.5.2 Analytische Definition	55
I.5.3 Kartesische Koordinaten.....	56
I.6 Rad I.....	58
I.6.1 Zeichnung.....	58
I.6.2 Analytische Definition	58
I.6.3 Kartesische Koordinaten.....	59
I.7 Schiene A.....	61
I.7.1 Zeichnung.....	61
I.7.2 Analytische Definition	61
I.7.3 Kartesische Koordinaten.....	62
Anhang J (normativ) Ergebnisse der Berechnungen mit Referenzprofilen.....	64
J.1 Allgemeines	64
J.2 Rad A/Schiene A.....	65
J.2.1 Darstellung der Berührungspunkte, Diagramme der Funktionen Δr , $\Delta \tan \gamma$, $\tan \gamma_e$ und Darstellung der kinematischen Rollbewegung des Radsatzes im Gleis.....	65
J.2.2 Numerische Werte für Δr -Funktion.....	66

J.2.3	Numerische Werte für die Funktion $\tan\gamma_e$	67
J.3	Rad B/Schiene A.....	69
J.3.1	Darstellung der Berührungspunkte, Diagramme der Funktionen Δr , $\Delta \tan\gamma$, $\tan\gamma_e$ und Darstellung der kinematischen Rollbewegung des Radsatzes im Gleis	69
J.3.2	Numerische Werte für Δr -Funktion.....	70
J.3.3	Numerische Werte für die Funktion $\tan\gamma_e$	71
J.4	Rad C/Schiene A	73
J.4.1	Darstellung der Berührungspunkte, Diagramme der Funktionen Δr , $\Delta \tan\gamma$, $\tan\gamma_e$ und Darstellung der kinematischen Rollbewegung des Radsatzes im Gleis	73
J.4.2	Numerische Werte für Δr -Funktion.....	74
J.4.3	Numerische Werte für die Funktion $\tan\gamma_e$	76
J.5	Rad H/Schiene A.....	77
J.5.1	Darstellung der Berührungspunkte, Diagramme der Funktionen Δr , $\Delta \tan\gamma$, $\tan\gamma_e$ und Darstellung der kinematischen Rollbewegung des Radsatzes im Gleis	77
J.5.2	Numerische Werte für Δr -Funktion.....	78
J.5.3	Numerische Werte für die Funktion $\tan\gamma_e$	79
J.6	Rad I/Schiene A	81
J.6.1	Darstellung der Berührungspunkte, Diagramme der Funktionen Δr , $\Delta \tan\gamma$, $\tan\gamma_e$ und Darstellung der kinematischen Rollbewegung des Radsatzes im Gleis	81
J.6.2	Numerische Werte für Δr -Funktion.....	82
J.6.3	Numerische Werte für die Funktion $\tan\gamma_e$	83
J.7	Geändertes Rad A (–2 mm beim Durchmesser des linken Rades)/Schiene A.....	85
J.7.1	Darstellung der Berührungspunkte, Diagramme der Funktionen Δr , $\Delta \tan\gamma$, $\tan\gamma_e$ und Darstellung der kinematischen Rollbewegung des Radsatzes im Gleis	85
J.7.2	Numerische Werte für Δr -Funktion.....	86
J.7.3	Numerische Werte für die Funktion $\tan\gamma_e$	87
J.8	Geändertes Rad B (–2 mm beim Durchmesser des linken Rades)/Schiene A.....	89
J.8.1	Darstellung der Berührungspunkte, Diagramme der Funktionen Δr , $\Delta \tan\gamma$, $\tan\gamma_e$ und Darstellung der kinematischen Rollbewegung des Radsatzes im Gleis	89
J.8.2	Numerische Werte für Δr -Funktion.....	90
J.8.3	Numerische Werte für die Funktion $\tan\gamma_e$	91
J.9	Geändertes Rad H (–2 mm beim Durchmesser des linken Rades)/Schiene A.....	93
J.9.1	Darstellung der Berührungspunkte, Diagramme der Funktionen Δr , $\Delta \tan\gamma$, $\tan\gamma_e$ und Darstellung der kinematischen Rollbewegung des Radsatzes im Gleis	93
J.9.2	Numerische Werte für Δr -Funktion.....	94
J.9.3	Numerische Werte für die Funktion $\tan\gamma_e$	95
J.10	Geändertes Rad I (–2 mm beim Durchmesser des linken Rades)/Schiene A	97
J.10.1	Darstellung der Berührungspunkte, Diagramme der Funktionen Δr , $\Delta \tan\gamma$, $\tan\gamma_e$ und Darstellung der kinematischen Rollbewegung des Radsatzes im Gleis	97
J.10.2	Numerische Werte für Δr -Funktion.....	98
J.10.3	Numerische Werte für die Funktion $\tan\gamma_e$	99
J.11	(Rechtes Rad A – linkes Rad B)/Schiene A	101
J.11.1	Darstellung der Berührungspunkte, Diagramme der Funktionen Δr , $\Delta \tan\gamma$, $\tan\gamma_e$ und Darstellung der kinematischen Rollbewegung des Radsatzes im Gleis	101
J.11.2	Numerische Werte für Δr -Funktion.....	102
J.11.3	Numerische Werte für die Funktion $\tan\gamma_e$	103
Anhang K (normativ)	Toleranzen der äquivalenten Konizität für Prüfrechnungen	105
K.1	Allgemeines	105
K.2	Rad A/Schiene A.....	106
K.2.1	Diagramm.....	106

K.2.2	Numerische Werte	107
K.3	Rad B/Schiene A.....	108
K.3.1	Diagramm.....	108
K.3.2	Numerische Werte	109
K.4	Rad C/Schiene A	110
K.4.1	Diagramm.....	110
K.4.2	Numerische Werte	111
K.5	Rad H/Schiene A	112
K.5.1	Diagramm.....	112
K.5.2	Numerische Werte	113
K.6	Rad I/Schiene A	114
K.6.1	Diagramm.....	114
K.6.2	Numerische Werte	115
K.7	Geändertes Rad A (–2 mm beim Durchmesser des linken Rades)/Schiene A.....	116
K.7.1	Diagramm.....	116
K.7.2	Numerische Werte	117
K.8	Geändertes Rad B (–2 mm beim Durchmesser des linken Rades)/Schiene A.....	118
K.8.1	Diagramm.....	118
K.8.2	Numerische Werte	119
K.9	Geändertes Rad H (–2 mm beim Durchmesser des linken Rades)/Schiene A	120
K.9.1	Diagramm.....	120
K.9.2	Numerische Werte	121
K.10	Geändertes Rad I (–2 mm beim Durchmesser des linken Rades)/Schiene A.....	122
K.10.1	Diagramm.....	122
K.10.2	Numerische Werte	123
K.11	(Rechtes Rad A – linkes Rad B)/Schiene A	124
K.11.1	Diagramm.....	124
K.11.2	Numerische Werte	125
	Literaturhinweise.....	126

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (EN 15302:2021) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis April 2022, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis April 2022 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Dieses Dokument ersetzt EN 15302:2008+A1:2010.

Die wichtigsten Änderungen im Vergleich zur vorherigen Ausgabe sind nachstehend aufgeführt:

- Erweiterung des Anwendungsbereichs;
- Einführung neuer Parameter der Rad-Schiene-Kontaktgeometrie (Rollradienkoeffizient, Nicht-linearitätsparameter);
- zusätzliche Methoden zur Bewertung der äquivalenten Konizität;
- Verbesserung der Beschreibung von Referenzprofilen;
- zusätzliches Referenzradprofil C;
- Referenzergebnisse basierend auf analytischen Lösungen;
- Hinweise zur Plausibilitätsprüfung der gemessenen Profile;
- überarbeitete Bewertung des Glättungsprozesses;
- Neubewertung des Gesamtprozesses.

Dieses Dokument wurde im Rahmen eines Mandats erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelsassoziation CEN erteilt haben, und unterstützt grundlegende Anforderungen der EU-Richtlinien.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Liste dieser Institute ist auf den Internetseiten von CEN abrufbar.

Entsprechend der CEN-CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, die Republik Nordmazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Serbien, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Türkei, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Einleitung

Diese Norm beruht auf dem UIC-Merkblatt 519 OR, das CEN vom Internationalen Eisenbahnverband (UIC) übermittelt und von CEN/TC 256/WG 10 „Zusammenwirken Fahrzeug/Fahrweg“ überarbeitet wurde.

Die Rad-Schiene-Berührgeometrie ist von grundlegender Bedeutung für die Erklärung des dynamischen Laufverhaltens eines Schienenfahrzeugs sowie des quasistatischen Verhaltens in Gleisbögen. Unter den Parametern, die das dynamische Verhalten eines Schienenfahrzeugs charakterisieren, spielt die äquivalente Konizität eine wesentliche Rolle, da sie eine zufriedenstellende Beurteilung der Rad-Schiene-Berührgeometrie auf gerader Strecke und in Gleisbögen mit großem Halbmesser ermöglicht. Ein Radsatz beschreibt beim Fahren im Gleis eine Wellenform. Die Klingel'sche Theorie, die für masselose Radsätze mit konischen Profilen gilt, besagt, dass die Wellenform sinusförmig ist und ihre Wellenlänge vom Kegelwinkel des Radprofils abhängt.

Reale Radprofile sind keine reinen Kegel, sondern haben sich über die Lauffläche ändernde Kegelwinkel, was zu einer nichtlinearen Abhängigkeit der Rollradiendifferenz von der Querbewegung des Radsatzes im Gleis führt. Die Wellenlänge der Radsatzbewegung, die der nichtlinearen kinematischen Bewegungsgleichung entspricht, kann durch numerisches Lösen dieser Formel oder durch spezielle Verfahren zur Linearisierung der Rollradiendifferenzfunktion berechnet werden. Die äquivalente Konizität wird durch den Vergleich dieser Wellenlänge mit der äquivalenten Wellenlänge eines konischen Radsatzes nach der Klingel'schen Formel oder durch Berechnung der Konizität aus der linearisierten Rollradiendifferenzfunktion bewertet.

Es ist wichtig, eine klare Spezifikation für die Bewertung von Rad-Schiene-Berührgeometrieparametern zu haben, welche sowohl in Europäischen und nationalen Normen als auch anderen Dokumenten (rechtlicher und technischer Natur) verwendet werden.

Ziel ist es, sicherzustellen, dass die Ergebnisse für die ermittelten Parameter konsistent sind. Es ist jedoch möglich andere Auswerteverfahren als die in diesem Dokument beschriebenen zu verwenden, vorausgesetzt, dass das verwendete Verfahren zu Werten von Rad-Schiene-Berührgeometrieparametern führt, die mit den Berechnungsergebnissen, die unter Verwendung der in Anhang I angegebenen Referenzprofile erhalten wurden, übereinstimmen. Dieses Dokument gibt ein Validierungsverfahren an, mit dem bestimmt werden kann, ob ein Auswerteverfahren die angegebenen Referenzergebnisse reproduzieren kann.

Der technische Hintergrund wird nach der Veröffentlichung dieses Dokuments in einem Technischen Bericht erläutert.

1 Anwendungsbereich

In diesem Dokument werden Definitionen und Auswertemethoden für die Rad-Schiene-Berührgeometrieparameter angegeben, die das dynamische Fahrverhalten der Fahrzeuge beeinflussen:

- die Rollradiendifferenz der beiden Räder eines Radsatzes (Δr -Funktion), die als Basis für alle weiteren Berechnungen dient;
- die Funktion der äquivalenten Konizität, aus der ermittelt werden:
 - ein einzelner Konizitätswert für eine konkrete Amplitude, die für die Beurteilung der Fahrstabilität eines Fahrzeuges nach EN 14363 im geraden Gleis und in Gleisbögen mit sehr großen Gleisbogenhalbmessern relevant ist;
 - der Nichtlinearitätsparameter, der die Form der Funktion charakterisiert und mit dem Fahrzeugverhalten insbesondere im Geschwindigkeitsbereich um die Stabilitätsgrenze herum in Beziehung steht;
- der Rollradienkoeffizient, der benutzt wird, um das theoretische Radialstellungsvermögen eines Radsatzes im Gleisbogen zu beschreiben.

Außerdem werden Informationen über die Beziehung zwischen den Berührwinkeln der beiden Räder eines Radsatzes ($\Delta \tan \gamma$ -Funktion) und über den Wankwinkelparameter gegeben.

ANMERKUNG Von den genannten Parametern sind für Radpaare mit unabhängig voneinander rotierenden Rädern nur diejenigen relevant, die mit dem Berührwinkel in Beziehung stehen.

Dieses Dokument enthält Beschreibungen möglicher Berechnungsmethoden. Es werden Testrechenfälle bereitgestellt, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen und die korrekte Implementierung der beschriebenen Algorithmen zu überprüfen.

Zur Validierung alternativer Methoden, die nicht in diesem Dokument beschrieben werden, werden Akzeptanzkriterien für die Funktion der äquivalenten Konizität angegeben. Dazu gehören Referenzprofile, Profilkombinationen, Toleranzen und Referenzergebnisse mit Toleranzgrenzen.

Dieses Dokument enthält auch Mindestanforderungen an die Messung von Rad- und Schienenprofilen sowie an die Parameter, die für die Transformation in ein gemeinsames Koordinatensystem der rechten und linken Profile benötigt werden.

In diesem Dokument werden keine Grenzwerte für die Rad-Schiene-Berührgeometrieparameter und keine Toleranzen für Schienen- und Radprofile zur Gewährleistung akzeptabler Ergebnisse angegeben.

Bezüglich der Anwendung dieses Dokuments werden einige allgemeine Empfehlungen gegeben.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 13231-2:2020, *Bahnanwendungen — Oberbau — Abnahme von Arbeiten — Teil 2: Abnahme von reprofilierten Schienen im Gleis, Weichen, Kreuzungen und Schienenauszügen*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- IEC Electropedia: verfügbar unter <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>

ANMERKUNG Dieses Dokument verwendet die europäische Standardnotation für numerische Werte mit „Komma“ (,) als Dezimalpunkt und „Leerzeichen“ () als Tausendertrennzeichen. So sind beispielsweise 2,5 als zweieinhalb und 1 500 als eintausendfünfhundert zu verstehen.

3.1

äquivalente Konizität

Tangens des Kegelwinkels eines Radsatzes mit Kegelrädern, dessen kinematische Bewegung für eine bestimmte Amplitude der Radsatzquerbewegung die gleiche Wellenlänge wie der gegebene Radsatz hat

3.2

Nichtlinearitätsparameter

lokale Steigung der Funktion der äquivalenten Konizität zwischen zwei angegebenen Radsatzverschiebungsamplituden

3.3

Radialstellungsindex

Verhältnis zwischen dem ohne Längsschlupf befahrbaren Bogenradius und dem tatsächlichen Bogenradius des Gleisabschnitts zur Beschreibung der Radialstellungsfähigkeit eines Radsatzes in einem Gleisabschnitt

3.4

Rollradienkoeffizient

Beziehung, die die Fähigkeit einer Rad-Schiene-Berührgeometrie beschreibt, die Rollradiendifferenz bereitzustellen, die für einen Radsatz erforderlich ist, um einen tatsächlichen Gleisbogen ohne Längsschlupf und Spurkranzanlauf zu befahren

Anmerkung 1 zum Begriff: Dieser Parameter steht mit dem Radialstellungsindex in Beziehung.

3.5

Unsicherheit

bezieht sich auf die Definition der erweiterten Unsicherheit mit einem Erweiterungsfaktor von 2, wie in ISO/IEC Guide 98-3:2008-09 (JCGM/WG1/100) definiert

Anmerkung 1 zum Begriff: Die oben definierte Unsicherheit entspricht einem Konfidenzniveau von ungefähr 95 % einer Normalverteilung.

3.6

Reproduzierbarkeit

Grad der Übereinstimmung zwischen den Werten aufeinanderfolgender Messungen desselben Parameters unter verschiedenen Bedingungen unter Verwendung der gleichen Mess- und Auswertemethoden

4 Symbole und Abkürzungen

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Symbole.

$2b_A$	nominaler Berührungspunktabstand (definiert als 1 500 mm für Normalspurweite)
D_0	Laufflächenbezugspunkt; Position auf der Lauffläche des Rades, für Normalspurweite 70 mm von der Innenseite des Rades
x	Längsverschiebung des Radsatzes im Gleis
y	Querverschiebung des Radsatzes im Gleis (auf Höhe der Schienenoberkanten)
ψ	Winkel der Radsatzbewegung in der x - y -Ebene
ds	Bogenlänge der Radbewegung entsprechend dem Winkel $d\psi$
V	Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs
R_{WS}	Momentanradius des Radsatzlaufes
r	mittlerer Rollradius beider Räder
r_0	Radradius bei Radsatzmittelstellung
r_1	Rollradius des rechten Rades
r_2	Rollradius des linken Rades
Δr	Rollradiendifferenz zwischen rechtem und linkem Rad
y_{em}	Querverschiebung bei $\Delta r = 0$
y_{emin}	Mindestwert der Querverschiebungen
y_{emax}	Höchstwert der Querverschiebungen
$\hat{y}$	Amplitude der Radsatzwellenbewegung
λ	Wellenlänge der Radsatzbewegung
γ	Berührungswinkel; Winkel zwischen der Tangente am Rad-Schiene-Berührungspunkt und der Gleisebene
$\Delta \tan \gamma$	Differenz der Tangenten der Berührungswinkel zwischen rechtem und linkem Rad
$\tan \gamma_e$	äquivalente Konizität
N_p	Nichtlinearitätsparameter
Δr_E	Rollradiendifferenz für kinematisches Rollen (Rollen ohne Schlupf)
R_E	minimaler Bogenradius für kinematisches Rollen
q_E	Radialstellungsindex
ρ_E	Rollradienkoeffizient
ε_e	Berührungswinkelparameter
φ	Wankwinkel des Radsatzes um die Längsachse
σ_e	Wankwinkelparameter
σ_{err}	Standardabweichung der zufälligen Profilfehler

ANMERKUNG Einige zusätzliche Symbole, die nicht in der obigen Liste enthalten sind, werden in dem Abschnitt erläutert, in dem sie verwendet werden.

5 Überblick über den Prozess zur Bestimmung der Berührgeometrieparameter

Bild 1 gibt einen Überblick über das Verfahren zur Bestimmung der in diesem Dokument beschriebenen Berührgeometrieparameter. Im Bild sind auch die Abschnitte dieser Norm aufgeführt, in denen mehr Informationen zu bestimmten Prozessschritten gegeben werden, einschließlich möglicher Optionen.

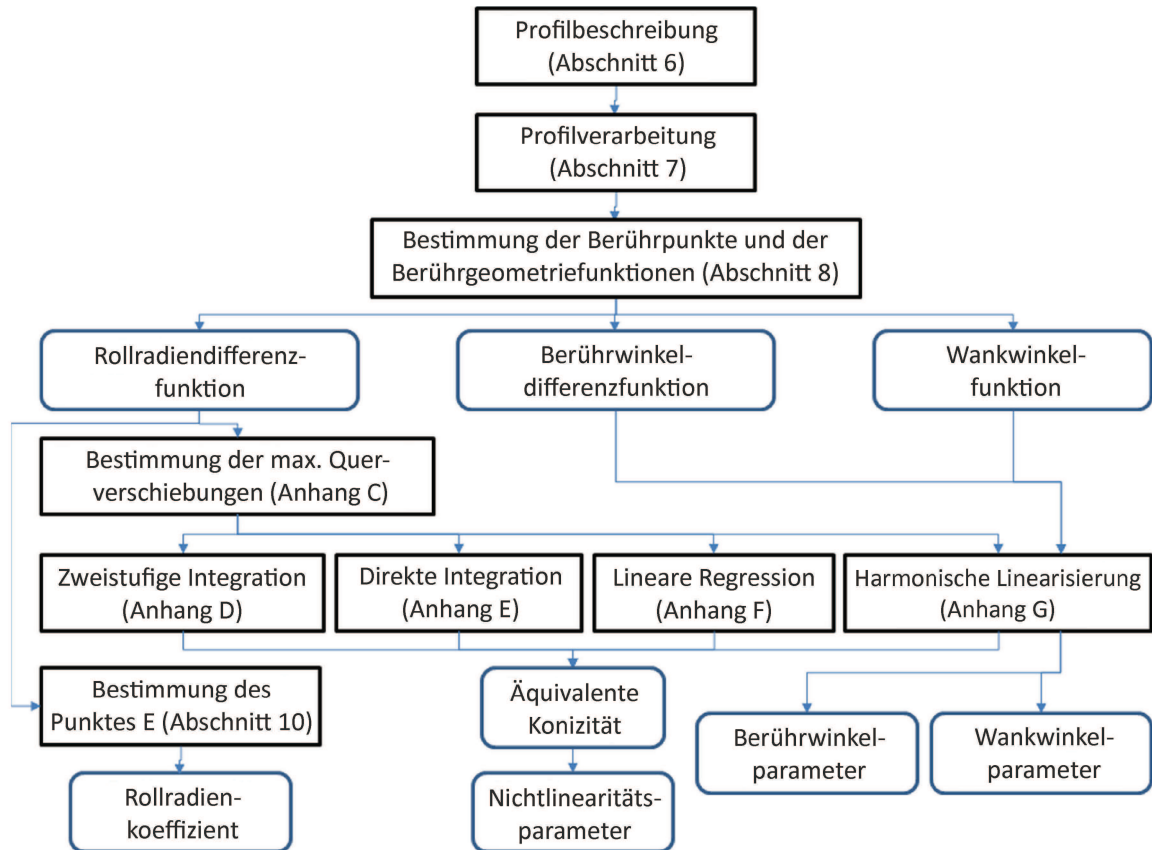


Bild 1 — Prozess der Bestimmung der Berührgeometrieparameter

6 Beschreibung der Rad- bzw. Schienenprofile

6.1 Allgemeines

Die Bestimmung von Parametern der Rad-Schiene-Berührgeometrie erfordert Kenntnisse über die zu bewertenden Formen der Rad- und Schienenprofile sowie deren relative Position:

- Radreifenrückenabstand;
- Raddurchmesser, falls relevant;
- Spurweite;
- Profilorientierung in Relation zur Gleisebene (Schienenneigung, Radneigung durch Achsverbiegung).

ANMERKUNG 1 Bei signifikanten Unterschieden im Raddurchmesser (mehr als 2 mm) muss der resultierende Rolleffekt berücksichtigt werden, wenn er nicht vom Messsystem erfasst wird.

ANMERKUNG 2 Die Biegung der Radsatzwelle unter Last ist allgemein von Bedeutung. Daher werden die Messungen normalerweise für repräsentative Belastungsbedingungen in der Nähe des Berührungspunkts durchgeführt.

Bei Messsystemen, bei denen die Radneigung aufgrund der Radsatzwellendurchbiegung nicht berücksichtigt werden kann, darf die Orientierung durch andere Methoden wie statische Berechnungen bestimmt werden. In einigen Fällen kann es möglich sein, bereits bekannte Biegewinkel zu verwenden, die für das betrachtete Fahrzeug repräsentativ sind.

Wenn die Profile durch Messungen ermittelt werden, können spezielle Geräte verwendet werden, wie z. B. Rad/Schiene-Messvorrichtungen bzw. automatische Messsysteme auf speziellen Schienenfahrzeugen für Schienenprofile oder ortsfeste Systeme für Radprofile.

Die Messgeräte müssen in der Lage sein, die Profilkordinaten mit einem Abstand von maximal 0,5 mm entlang des Profilbogens anzugeben.

ANMERKUNG 3 In Bereichen mit hoher Profilkrümmung ist eventuell ein geringerer Abstand erforderlich, um eine genaue Profilform zu erhalten.

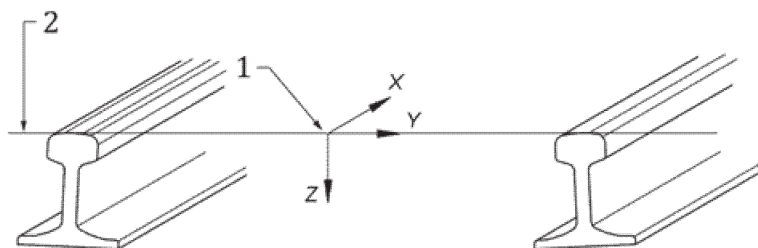
Es muss angegeben werden, ob die Profile im belasteten oder unbelasteten Zustand gemessen wurden.

ANMERKUNG 4 Bei Güterwagen kann die Last potenziell einen entscheidenden Einfluss auf die Berührgeometrie haben. Deshalb wird, wenn die äquivalente Konizität verwendet werden soll, um das Fahrzeugverhalten zu untersuchen, die Berührgeometrie manchmal im leeren und beladenen Zustand in Betracht gezogen.

Bei der Verwendung von theoretischen Profilen muss die Neigung berücksichtigt werden.

Unabhängig von der Quelle der Profile (theoretisch oder gemessen) müssen die beiden Schienen der Gleisanlage in ein bahnbezogenes Koordinatensystem eingetragen werden, das so ausgerichtet ist, dass die x-Achse in Längsrichtung zur Schiene, die y-Achse in tangentialer Richtung zur Oberseite der Schienenköpfe und die z-Achse senkrecht zu beiden Achsen verläuft, siehe Bild 2. Beide Räder des Radsatzes müssen in ein einziges Koordinatensystem mit in analogen Richtungen ausgerichteten Achsen eingetragen werden.

ANMERKUNG 5 Die relative Position und Orientierung der beiden Profile ist relevant. Daher kann die Verwendung eines Messsystems mit einem einzigen Profilmesskopf ohne Bezug zwischen den beiden Seiten zu großen Unsicherheiten der berechneten Berührgeometrieparameter führen.



Legende

- 1 Gleiskoordinatensystem
- 2 Schienenoberkante

Bild 2 — Gleiskoordinatensystem (übereinstimmend mit EN 13848-1)

Es wird empfohlen, die folgenden Eingabedaten (theoretisch oder gemessen) für die Koordinatensysteme anzugeben.

Für die Schienen ist der Ursprung des Koordinatensystems so definiert, dass $y = 0$ in der Mitte der gemessenen Spurweite und $z = 0$ auf Höhe der Schienenoberkanten liegen.

Für die Räder ist der Ursprung des Koordinatensystems so definiert, dass $y = 0$ in der Mitte des Radrückenabstands und $z = 0$ bei D_0 für beide Räder liegen. Jede signifikante Raddurchmesserdivergenz muss als Versatz in der Rollradiendifferenzfunktion enthalten sein, siehe 8.2.

Die Rad- und Schienenprofile müssen so gekennzeichnet sein, dass:

- für die Schiene das Profil nicht nur auf der Oberseite, sondern auch auf der Innenseite (Fläche der Spurweite) mindestens bis 14 mm unterhalb der Schienenoberkante definiert ist;
- bezüglich des Radprofils nicht nur die Lauffläche, sondern auch der äußere Teil und der Übergang zum Spurkranz bis mindestens 10 mm unterhalb von D_0 erfasst wird;
- jeder signifikante Radiusunterschied zwischen den zwei Rädern eines Radsatzes (gemessen an den Laufflächenbezugspunkten der Profile) berücksichtigt wird.

Die numerische Auflösung der Profildaten muss mit dem Bewertungsprozess (Glättung und Berechnung) konsistent sein. Werden Profildaten mit einer niedrigen numerischen Auflösung ausgegeben, kann eine stufenförmige Form mit wiederholten Punkten identischer Amplitude sowie Sprüngen, die viel größer als in der Realität sind, entstehen. Dies führt zu unrealistischen Ergebnissen für die Berührgeometrieparameter. Es wird daher empfohlen, die Profildaten mit einer hohen numerischen Auflösung auszugeben (Anzahl der Ziffern), z. B. mit $1 \cdot 10^{-3}$ mm. Diese liegt zwar jenseits der Messsystemgenauigkeit, verhindert aber Probleme bei der Berechnung von Berührgeometrieparametern.

Für die folgenden Schritte des Verfahrens müssen die Profilkordinaten entlang des Kurvenverlaufs sortiert vorliegen, um ein kontinuierliches Profil zu erhalten.

6.2 Unsicherheit des Messsystems

Die Unsicherheit des Messsystems muss als Kombination der Unsicherheiten der folgenden Parameter quantifiziert werden:

- a) Koordinaten eines einzelnen Profils;
- b) relative Position des linken und rechten Profils (vertikaler und lateraler Abstand, Rotation um die Längsachse).

Diese Unsicherheiten müssen in Labortests ermittelt und vom Hersteller des Messsystems zur Verfügung gestellt werden. Eine mögliche Prüfung für Schienenprofilmessungen ist in EN 13231-2:2020, Anhang C, beschrieben. Wenn es nicht sinnvoll ist, das Messsystem im Labor zu überprüfen, ist eine Überprüfung vor Ort mit einem Referenzmessgerät erforderlich.

Wenn die Profile und die relativen Positionsparameter nicht mit demselben System gemessen werden, muss die Schnittstelle zwischen den Systemen in die Unsicherheitsanalyse einbezogen werden (z. B. der Einfluss unterschiedlicher Abstände von Datenpunkten, Anpassung der verschiedenen Messsysteme, etc.).

Um die Unsicherheit der berechneten Berührgeometrieparameter zu begrenzen, dürfen die Messunsicherheiten der relativen Positionsparameter die folgenden Werte nicht überschreiten:

- Differenz der Radradien (gemessen an den Laufflächenbezugspunkten der Profile): 0,2 mm;
- Radrückenabstand: 0,5 mm;
- Spurweite: 0,5 mm.

ANMERKUNG 1 Toleranzen für die Durchmesserdiffereenz von Rädern an derselben Achse sind in der EN 15313 für neue und neu profilierte Radsätze festgelegt.

ANMERKUNG 2 Für die Beurteilung der äquivalenten Konizität ist die Summe der Toleranzen von Radrückenabstand und Spurweite der relevante Parameter.

7 Plausibilitätsprüfung und Verarbeitung von gemessenen Rad- und Schienenprofilen

Für die Messung von Rad- und Schienenprofilen steht eine Vielzahl von Messgeräten mit unterschiedlichen Messprinzipien und unterschiedlicher Messempfindlichkeit für verschiedene Messbedingungen zur Verfügung. Vor der Verwendung gemessener Profile für die Berechnung von Berührgeometrieparametern müssen zusätzlich zu den bereits vorgenommenen Prüfungen der Messsysteme folgende Vorbearbeitungsschritte durchgeführt werden:

- Plausibilitätsprüfung;
- Beseitigung von Ausreißerpunkten;
- Profilglättung und/oder Interpolation.

Die Plausibilitätsprüfung stellt fest, ob die relevante Rad-Schiene-Berührzone vollständig gemessen wurde. Normalerweise sind die folgenden Bereiche relevant, siehe Bild 3:

- bei Radprofilen der Bereich von der Spurkranzkuppe bis zum Punkt auf der Lauffläche 90 mm vom Spurkranzdickenmesspunkt;
- bei Schienenprofilen der Bereich vom Messpunkt der Spurweite bis zum Punkt 2 mm unter der Schienenoberkante auf der Außenseite.

Andere Plausibilitätsprüfungen, beispielsweise für den maximalen Abstand zwischen benachbarten Punkten, werden ebenfalls empfohlen.

Profile, die eine Plausibilitätsprüfung nicht bestehen, müssen von der Analyse ausgeschlossen werden.

Maße in Millimeter

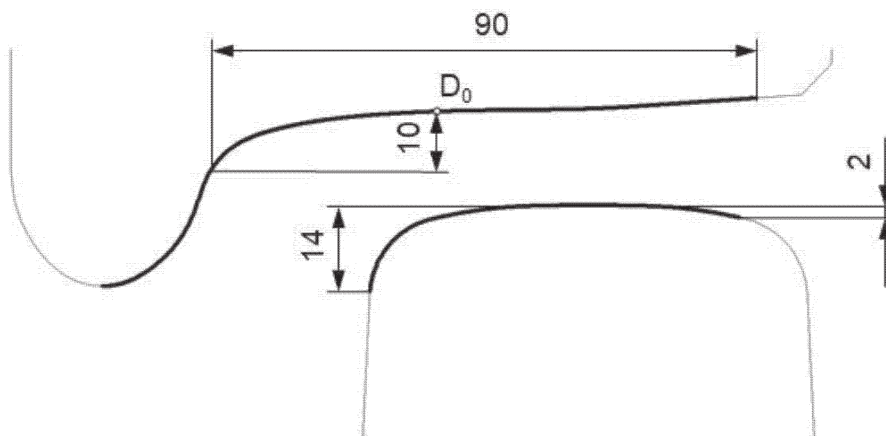


Bild 3 — Typische relevante Rad-Schiene-Berührzonen

Im nächsten Schritt kann es notwendig sein, Profilpunkte, die nicht zur kontinuierlichen Profilform passen, zu erkennen und zu eliminieren. Diese Ausreißer können zum Beispiel identifiziert werden, indem der Winkel berechnet wird, der durch die Strecken zwischen den jeweiligen Datenpunkten und den zwei benachbarten Punkten gebildet wird, oder indem der Abstand jedes Profilpunkts mit einem geglätteten Profil verglichen wird.

Die in einem auf das Gleis bezogenen Koordinatensystem dargestellten kartesischen Koordinaten beider Räder und beider Schienen können für die Verwendung in den folgenden Verfahrensschritten bearbeitet werden (insbesondere mittels Glättung oder Interpolation). Zur Überprüfung der Qualität der Glättungs- oder Interpolationsmethode muss der in Abschnitt 12 beschriebene Validierungstest verwendet werden.

8 Ermittlung der Rad-Schiene-Berührungspunkte und Berührgeometriefunktionen

8.1 Allgemeines

Für das beschriebene Ermittlungsverfahren werden folgende Annahmen zugrunde gelegt:

- die Räder sind über den Umfang gleich und werden durch je ein Profil je Rad dargestellt;
- die Radprofile werden für die Radsatzposition senkrecht zur Gleistangente dargestellt;
- die Schienen liegen gerade und parallel zueinander und werden durch je ein Profil je Schiene dargestellt;
- die Querverschiebung des Radsatzes, wie sie in diesem Dokument verwendet wird, wird auf Höhe der Schienenoberkante betrachtet;
- in der Berechnung werden der komplette Radsatz und das Gleis als starr betrachtet und nur Punktkontakte berücksichtigt;
- der Wankwinkel des Radsatzes (Drehung um eine Achse längs des Gleises) bei der Radsatzquerverschiebung im Gleis wird nicht berücksichtigt.

Der elastische Kontakt ist realistischer als der starre Kontakt, wobei er schwieriger zu berechnen ist und von der vertikalen Radkraft abhängt. Deswegen ist es zulässig den elastischen Kontakt zu verwenden. In diesem Fall werden die durch Berührungspunktsprünge verursachten Diskontinuitäten in der Δr -Funktion geglättet.

Die Einbeziehung des Wankwinkels hat nur bei großen Radsatzamplituden mit Spurkranzanlauf wesentlichen Einfluss auf die Δr -Funktion. Daher kann dieser Effekt vernachlässigt werden, es ist jedoch erlaubt, ihn zu berücksichtigen.

8.2 Bestimmung der Rollradiendifferenzfunktion

Der erste Schritt zur Berechnung der Berührgeometriefunktionen besteht darin, die Berührungspunktpositionen an jedem Rad und jeder Schiene als Funktion der Radsatzquerverschiebung zu bestimmen.

Die Rollradiendifferenzfunktion $\Delta r = f(y)$ kennzeichnet die Differenz zwischen dem rechten und dem linken Rollradius $\Delta r = r_1 - r_2$ in Abhängigkeit von der Radsatzquerbewegung y auf dem Gleis.

Bei der Bestimmung der Rollradiendifferenzfunktion muss für den Fall einer signifikanten Differenz der Raddurchmesser der tatsächliche Radius jedes Rades berücksichtigt werden.

Dann muss die Rollradiendifferenz $\Delta r = f(y)$, die die Differenz der Rollradien links und rechts bei einer Querverschiebung y des Radsatzes im Gleis relativ zur Mittelstellung darstellt, für Querverschiebungen bis zu einem Höchstwert bestimmt werden. Für die Berechnung der äquivalenten Konizität muss die Rollradiendifferenzfunktion in maximalen Schritten von $\Delta y = 0,2 \text{ mm}$ bis $|\Delta r| = |r_1 - r_2| \geq 5 \text{ mm}$ bestimmt werden. Für die Berechnung des Rollradienkoeffizienten ist eine Schrittweite von höchstens $\Delta y = 0,1 \text{ mm}$ zu verwenden und die Funktion muss bis $|\Delta r| = |r_1 - r_2| \geq 10 \text{ mm}$ berechnet werden. Die resultierende Funktion darf für jeden y -Wert nur einen Δr -Wert haben.

ANMERKUNG Ein Beispiel für $\Delta r = f(y)$ ist in Bild A.1 dargestellt. Die größte Querverschiebung zur Bestimmung der geometrischen Funktionen hängt vom seitlichen Spurspiel zwischen Rad und Schiene ab.

8.3 Andere Rad-Schiene-Berührgeometriefunktionen

Die Berührwinkeldifferenzfunktion $\Delta \tan \gamma = f(y)$ kennzeichnet die Differenz zwischen den Tangenten des rechten und des linken Berührwinkels $\Delta \tan \gamma = \tan \gamma_1 - \tan \gamma_2$ in Abhängigkeit von der Querverschiebung y des Radsatzes auf dem Gleis. Für die Berechnung der Berührwinkeldifferenzfunktion sind die Berührwinkel an den linken und rechten Rädern so definiert, dass der Berührwinkel am Spurkranz an beiden Rädern positiv ist (ca. 70°).

Die Wankwinkelfunktion $\varphi = f(y)$ beschreibt die Drehung des Radsatzes um die Längsachse in Abhängigkeit von der Querverschiebung y des Radsatzes auf dem Gleis. Wenn die Wankwinkelfunktion für eine bestimmte Anwendung benötigt wird, muss das Rollen des Radsatzes um die Längsachse berücksichtigt werden.

ANMERKUNG Es gibt weitere nützliche Parameter zur Beschreibung der Rad-Schiene-Berührgeometrie, die aber in diesem Dokument nicht behandelt werden, z. B. die Berührungsbewegung, die Änderungsrate der Kontaktbandbreite und die Kontaktdichte.

9 Bestimmung der äquivalenten Konizität und des zugehörigen Nichtlinearitätsparameters

9.1 Hintergrund zur äquivalenten Konizität

9.1.1 Mathematische Beschreibung der kinematischen Querbewegung des Radsatzes

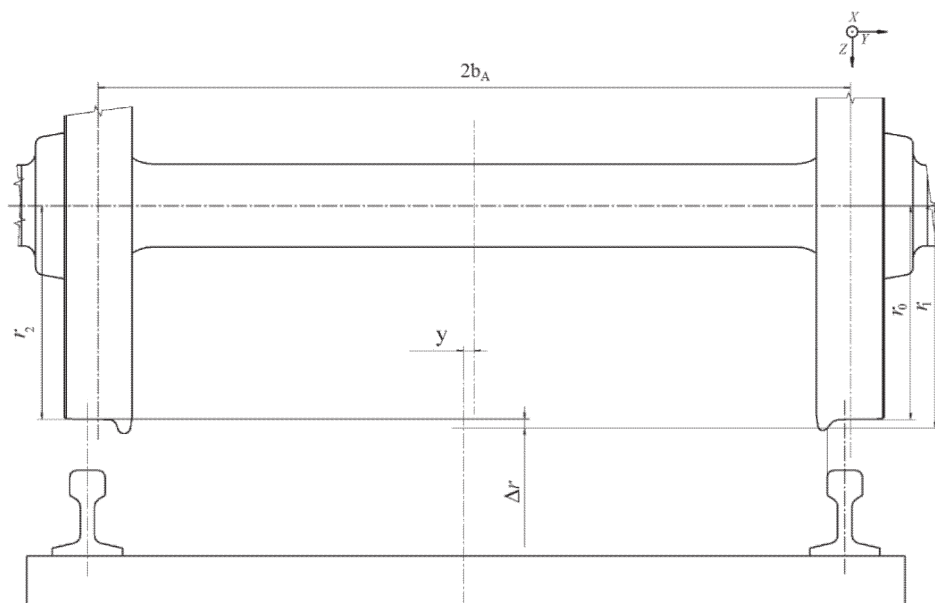


Bild 4 — Maße am Radsatz

Die kinematische Querbewegung eines freien, im Gleis laufenden Radsatzes, (Bild 4), ohne Trägheit wird durch folgende Differentialgleichung (1) beschrieben:

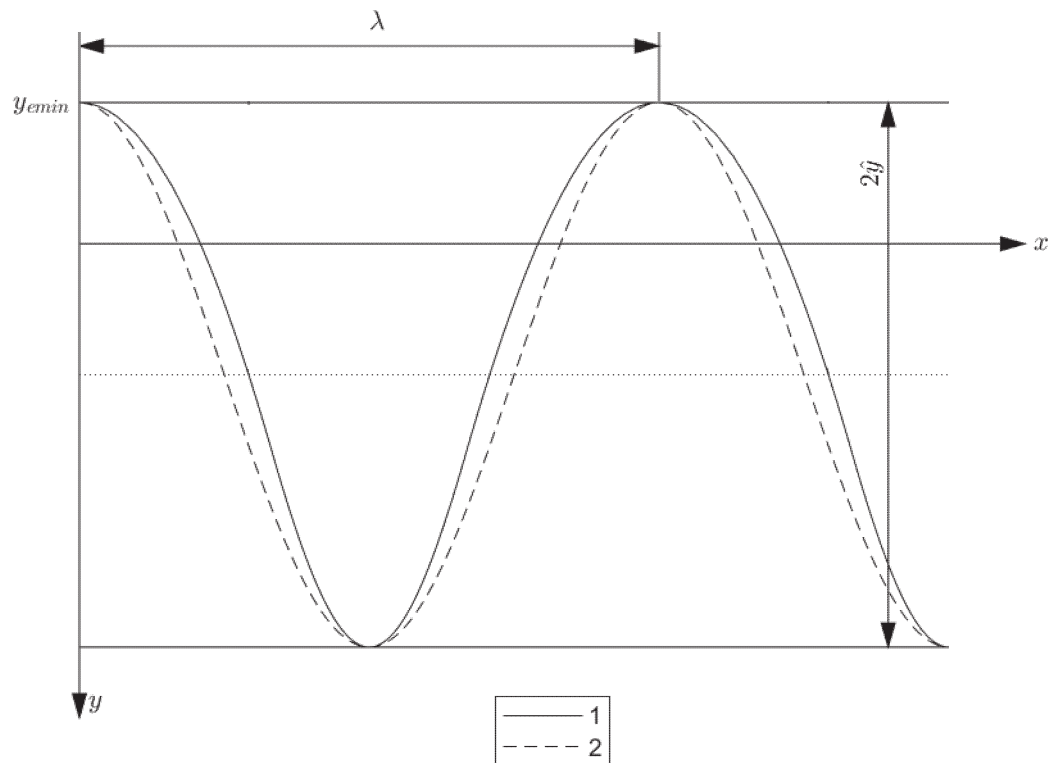
$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{\Delta r(y)}{2b_A r_0} = 0 \quad (1)$$

Das zuvor bestimmte $\Delta r = f(y)$ wird zusammen mit folgenden Anfangsbedingungen verwendet:

$$y = y_{\min} \quad \text{für } x = 0 \quad (2)$$

$$\frac{dy}{dx} = 0 \quad \text{für } x = 0 \quad (3)$$

Die Integration der kinematischen Bewegungsgleichung (1) unter Verwendung der Anfangsbedingungen (2) und (3) führt zu einer periodischen Bewegung des Radsatzes mit einer Doppelamplitude von $2\hat{y}$ und einer Wellenlänge λ , wie in Bild 5 dargestellt.



Legende

- 1 kinematische Bewegung eines Radsatzes
- 2 sinusförmige Bewegung des äquivalenten Kegelradsatzes

Bild 5 — $y = f(x)$ Funktion

9.1.2 Bestimmung der Wellenlänge eines Kegelradsatzes

Bei einem Radsatz mit konischen Radprofilen, mit einem Winkel γ ist die Rollradiendifferenz linear mit:

$$\Delta r(y) = 2y \tan \gamma \quad (4)$$

Gleichung (1) wird zu:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{\tan \gamma}{b_A r_0} y = 0 \quad (5)$$

eine Differentialgleichung zweiter Ordnung mit konstanten Koeffizienten, deren Lösung eine Sinuskurve mit der Wellenlänge λ ist

$$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{b_A r_0}{\tan \gamma}} \quad (6)$$

ANMERKUNG Gleichung (6) ist auch als Klingel'sche Formel bekannt.

9.2 Bestimmung der äquivalenten Konizität

Wenn die Räder des Radsatzes keine konischen Profile aufweisen, kann weiterhin mithilfe von verschiedenen Methoden die lineare Differentialgleichung verwendet werden, wobei $\tan \gamma$ durch $\tan \gamma_e$, die „äquivalente Konizität“, ersetzt wird.

Laut Definition ist die äquivalente Konizität gleich dem Tangens des Kegelwinkels eines Radsatzes mit Kegelrädern, deren kinematische Bewegung für eine bestimmte Amplitude der Radsatzquerbewegung die gleiche Wellenlänge wie der gegebene Radsatz hat:

$$\tan \gamma_e(\hat{y}) = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 b_A r_0 \quad (7)$$

Zur Bestimmung der Wellenlänge der kinematischen Radsatzbewegung gibt es verschiedene Methoden:

- zweistufige Integration der nichtlinearen Differentialgleichung der Bewegung (siehe Anhang D);
- direkte Integration der nichtlinearen Differentialgleichung der Bewegung (siehe Anhang E);

oder zur direkten Bestimmung der äquivalenten Konizität:

- lineare Regression der Δr -Funktion (siehe Anhang F);
- harmonische Linearisierung (siehe Anhang G).

Die beiden letzteren Verfahren beruhen nicht direkt auf der Definition der äquivalenten Konizität (gleiche Wellenlänge wie die Querbewegung des äquivalenten konischen Radsatzes). Diese Methoden sind jedoch im Allgemeinen eine gute Annäherung und können in vielen Fällen nützlich sein.

ANMERKUNG 1 Anhang H gibt Auskunft darüber, wie mit Sonderfällen der Δr Funktion umzugehen ist.

Die äquivalente Konizität muss für einen festgelegten Bereich der Amplitude $\hat{y}$ bestimmt werden. In Anhang C wird eine Methode zur Ableitung der minimalen und maximalen Querverschiebung des Radsatzes als Funktion der Amplitude beschrieben.

ANMERKUNG 2 Ein typischer Bereich für die Bewertung der äquivalenten Konizität für Änderungen in $\hat{y}$ beträgt 1 mm bis 5 mm bei einer Schrittweite von $\Delta \hat{y} = 0,5$ mm. Für Fälle mit sehr großem Spurspiel kann es notwendig sein, größere Amplituden $\hat{y}$ einzubeziehen. Ein Beispiel für die grafische Darstellung der Berechnungsergebnisse ist in Bild A.1, Bild A.2 und Bild A.3 im Anhang A enthalten.

9.3 Bestimmen des Nichtlinearitätsparameters

Das dynamische Verhalten eines Fahrzeugs hängt nicht nur vom Wert der äquivalenten Konizität für eine bestimmte Radsatzverschiebungsamplitude ab, sondern auch von den Gesamteigenschaften der Berührgeometrie eines Radsatzes auf dem Gleis. Der Wert der äquivalenten Konizität für eine bestimmte Radsatzverschiebungsamplitude eignet sich gut das Fahrzeugverhalten hinsichtlich Instabilität zu beschreiben. Ein zweiter Parameter, der als Nichtlinearitätsparameter bezeichnet wird, wird zusätzlich zu der äquivalenten Konizität verwendet, um die Darstellung der Berührgeometrie eines Radsatzes auf dem Gleis zu verbessern. Dieser bezieht sich auf das Fahrzeugverhalten in der Nähe der kritischen Geschwindigkeit und auf die Empfindlichkeit des Fahrzeugs gegenüber lateralen Anregungen.

Der Nichtlinearitätsparameter N_p ist definiert als die Steigung der Funktion der äquivalenten Konizität zwischen dem Konizitätswert $\tan \gamma_e(\hat{y} - \Delta \hat{y})$ und dem Wert $\tan \gamma_e(\hat{y} + \Delta \hat{y})$:

$$N_p(\hat{y}, \Delta \hat{y}) = \frac{\tan \gamma_e(\hat{y} + \Delta \hat{y}) - \tan \gamma_e(\hat{y} - \Delta \hat{y})}{2\Delta \hat{y}} \quad [1/\text{mm}]$$

Normalerweise wird der Nichtlinearitätsparameter für die Radsatzverschiebungsamplitude $\hat{y} = 3$ mm und die Breite des Intervalls $\Delta \hat{y} = 1$ mm berechnet. In diesem Fall kennzeichnet N_p die Steigung der Konizitätsfunktion zwischen Radsatzverschiebungsamplituden von 2 mm und 4 mm.

ANMERKUNG Simulationsstudien zeigen, dass das Fahrzeugverhalten bei Geschwindigkeiten nahe der Instabilitätsgrenze üblicherweise vom Verlauf der Funktion der äquivalenten Konizität abhängt, der durch den Nichtlinearitätsparameter repräsentiert wird. Wenn die Funktion der äquivalenten Konizität einen positiven Nichtlinearitätsparameter aufweist, erscheint der Grenzzzyklus des Radsatzes plötzlich und wächst schnell auf große Amplituden, oft bis zum Spurkranzanlauf. Wenn die Funktion der äquivalenten Konizität einen negativen Nichtlinearitätsparameter aufweist, beginnt der Grenzzzyklus des Radsatzes bei niedriger Geschwindigkeit mit einer kleinen Radsatzamplitude, die mit zunehmender Geschwindigkeit langsam wächst. In beiden Fällen wird die Instabilitätsgrenze nach EN 14363 bei einer ähnlichen Geschwindigkeit erreicht. Das beschriebene Phänomen beeinflusst auch das Fahrzeugverhalten bei Geschwindigkeiten vor Erreichen der Instabilitätsgrenze. In diesem Fall führt eine Konizitätsfunktion mit negativem N_P zu höheren Querkraften zwischen Rad und Schiene und größeren Querschwingungen als eine Konizitätsfunktion mit positivem N_P .

10 Bestimmung des Rollradienkoeffizienten

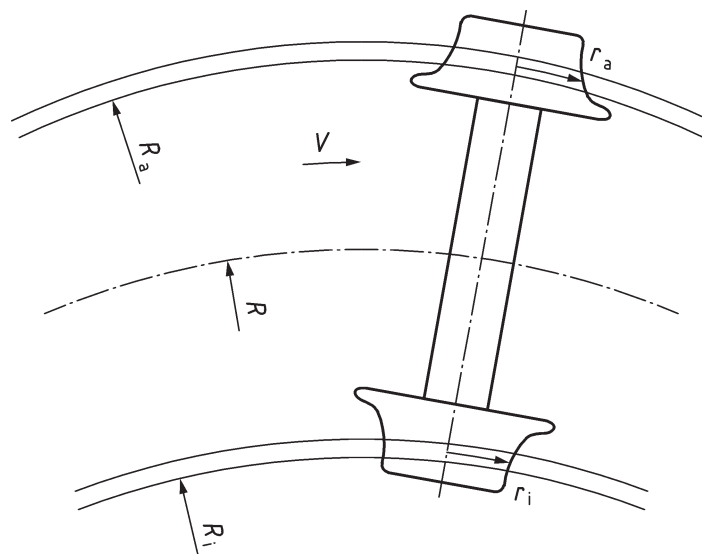
10.1 Hintergrund und Definition

Das Verhalten eines Fahrzeugs in einem Gleisbogen wird durch eine Anzahl von Faktoren einschließlich der Federungscharakteristiken des Fahrzeugs und der Rad-Schiene-Berührgeometrie bestimmt. Der Rollradienkoeffizient ist eine Möglichkeit, die Rad-Schiene-Berührgeometrie in einem Gleisbogen darzustellen. Eine Angabe dieser Information kann nützlich sein, um das Bogenlaufverhalten eines Fahrzeugs zu verstehen.

ANMERKUNG 1 Der Rollradienkoeffizient ist eine andere Darstellung des Radialstellungsindex, der zuvor in UIC 518 und EN 14363 eingeführt wurde.

Die beiden Räder eines Radsatzes sind fest miteinander verbunden und müssen daher bei Bogenfahrt mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit rotieren.

Die Laufflächen der beiden Räder sind üblicherweise so profiliert, dass, wenn der Radsatz zur Außenseite des Gleisbogens hinbewegt wird, der Rollradius des Außenrads größer wird als der Rollradius des Innenrads (Bild 6). Je größer die Querverschiebung wird, desto größer wird die Rollradiendifferenz Δr .



Legende

R	mittlerer Gleisbogenradius	V	Geschwindigkeit des Fahrzeugs
R_a	Bogenradius der Außenschiene	r_a	Radius am Berührungspunkt des Außenrads
R_i	Bogenradius der Innenschiene	r_i	Radius am Berührungspunkt des Innenrads

Bild 6 — Radsatz, der durch einen Gleisbogen fährt

Aufgrund des etwas größeren Bogenradius der Außenschiene gegenüber der Innenschiene muss das Außenrad eine größere Strecke als das Innenrad zurücklegen. Um diese Längendifferenzen mindestens auszugleichen und eine radiale Position eines freien und ungefederten Radsatzes zu erreichen, ist eine entsprechende Rollradiendifferenz zwischen Außen- und Innenrad notwendig:

$$\frac{r_a}{r_i} \geq \frac{R_a}{R_i} \Rightarrow \frac{r_0 + \Delta r_a}{r_0 - \Delta r_i} \geq \frac{R + b_A}{R - b_A}$$

Werden nur Effekte erster Ordnung betrachtet, kann gezeigt werden, dass:

$$r_a - r_i = \Delta r \geq r_0 \frac{2b_A}{R}$$

oder

$$R \geq r_0 \frac{2b_A}{\Delta r}$$

Da der Rollradienkoeffizient verwendet wird, um aufzuzeigen, ob diese Bedingung ohne Spurkranzanlauf für einen gegebenen Gleisbogenradius und eine gegebene Rad-Schiene-Profilkombination erreicht werden kann, ist es notwendig, eine Rollradiendifferenz Δr_E an einem Punkt E der Rollradiendifferenzfunktion vor Erreichen des Spurkranzkontaktes zu bestimmen, siehe 10.2. Der kleinste entsprechende Gleisbogenradius R_E ist gegeben durch:

$$R_E = r_0 \frac{2b_A}{\Delta r_E}$$

Der Rollradienkoeffizient ist definiert als:

$$\rho_E = \frac{R}{R_E} - 1 = \frac{R}{r_0 \cdot 2b_A} \cdot \Delta r_E - 1$$

was bedeutet:

- dass bei $\rho_E \geq 0$ Radialstellung möglich ist;
- und dass bei $\rho_E < 0$ keine Radialstellung möglich ist, sondern Spurkranzanlauf auftritt, bevor eine Rollradiendifferenz Δr erreicht wird, die groß genug für den betreffenden Gleisbogen ist.

ANMERKUNG 2 Der Radialstellungsindex nach UIC 518 und EN 14363 ist definiert als:

$$q_E = \frac{R_E}{R}$$

was bedeutet:

- dass bei $q_E \leq 1$ Radialstellung möglich ist;
- und dass bei $q_E > 1$ keine Radialstellung möglich ist, sondern Spurkranzanlauf auftritt, bevor eine Rollradiendifferenz Δr erreicht wird, die groß genug für den betreffenden Gleisbogen ist.

Daher kann der Rollradienkoeffizient auch aus einem Radialstellungsindex erhalten werden:

$$\rho_E = \frac{1}{q_E} - 1$$

Der Radialstellungsindex q_E nimmt eine positive Steigung der $\Delta r(y)$ -Funktion an. Wenn $\Delta r_E = 0$, dann sind R_E und q_E mathematisch nicht definiert. Der Vorteil des Rollradienkoeffizienten ρ_E ist, dass er die Beurteilung aller realen Berührverhältnisse erlaubt, um ein gutes oder ein schlechtes Bogenlaufverhalten anzuzeigen (positive oder negative Werte von Δr_E und $\Delta r_E = 0$).

10.2 Bestimmung des Punktes E für die Berechnung des Rollradienkoeffizienten

Der Rollradienkoeffizient ρ_E ist laut Definition vom Gleisbogenradius R_E abhängig, der sich aus der Rollradiendifferenz Δr_E berechnet, die für kinematische Rollbewegungen (Rollen ohne Schlupf) zur Verfügung steht.

Die Definition des entsprechenden Punktes E auf der Δr -Funktion setzt voraus, dass eine Radialstellung des Radsatzes möglich ist, bis der Punkt der Diskontinuität (Punkt A°) erreicht ist, siehe Bild 7. Die definierte y -Koordinate von Punkt E ist $y_E = y_A - 1$ mm für Linksbögen und $y_E = y_A + 1$ mm für Rechtsbögen.

Abhängig von der Bogenrichtung muss entweder der rechte oder der linke Teil der Δr -Funktion untersucht werden, da der Radsatz (im Allgemeinen) der äußeren Schiene und nicht der inneren Schiene des Gleisbogens folgt. Für einen Linksbogen wird der rechte Teil der Δr -Funktion untersucht und umgekehrt.

Maße in Millimeter

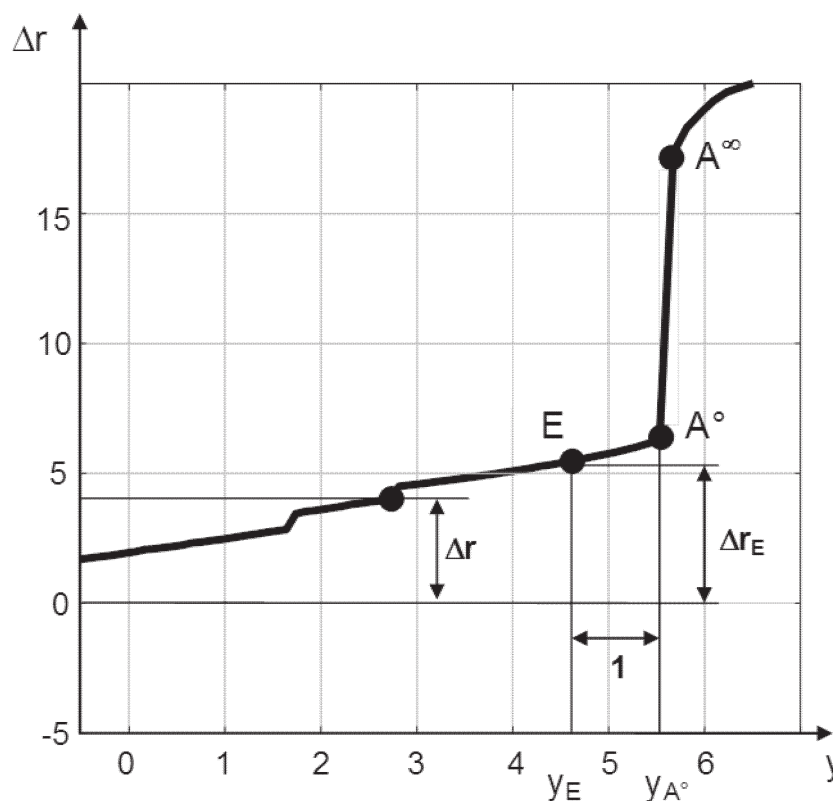


Bild 7 — Beispiel einer $\Delta r(y)$ -Funktion mit Punkten zur Berechnung von ρ_E für einen Linksbogen

ANMERKUNG Bei der Auswertung von verschiedenen realen Rad-Schiene-Profilkombinationen wurde beobachtet, dass Δr -Funktionen möglich sind, die negative Δr_E -Werte für Rechts- und Linksbögen aufweisen.

Die Grundlage für die Berechnung des Rollradienkoeffizienten ist die Rollradiendifferenzfunktion $\Delta r(y)$. Die Berechnung von $\Delta r(y)$ ist in 8.2 angegeben.

Die Δr -Funktion muss auf Diskontinuitäten überprüft werden. Die Diskontinuität wird durch folgendes Vorgehen ermittelt:

- ausgehend von einer Suche $\Delta r = 0$ nach dem ersten Punktpaar $A^\circ (y_{A^\circ}, \Delta r_{A^\circ})$ und $A^\infty (y_{A^\infty}, \Delta r_{A^\infty})$ im Bereich $0 \leq \Delta r \leq 10 \text{ mm}$ für Linksbögen und $-10 \text{ mm} \leq \Delta r \leq 0$ für Rechtsbögen mit $|y_{A^\circ} - y_{A^\infty}| = 0,1 \text{ mm}$ und $|\Delta r_{A^\circ} - \Delta r_{A^\infty}| \geq 3 \text{ mm}$ unter Berücksichtigung der Einschränkungen $y_{A^\circ} < y_{A^\infty}$ für Linksbögen und $y_{A^\infty} < y_{A^\circ}$ für Rechtsbögen;
- wenn keine Diskontinuität vorliegt, wird Punkt A° als letzter Punkt vor $|\Delta r| = 10 \text{ mm}$ definiert, wenn bei $y = 0$ begonnen wird.

11 Andere Rad-Schiene-Berührgeometrieparameter

Für Simulationszwecke kann es nützlich sein, linearisierte Parameter für die Berührwinkeldifferenzfunktion und die Wankwinkelfunktion zu verwenden. Diese Parameter sind:

- Berührwinkelparameter ε_e ;
- Wankwinkelparameter σ_e .

Das harmonische Linearisierungsverfahren zur Bestimmung dieser Parameter ist in Anhang G beschrieben.

12 Überprüfung der Berechnungssoftware für Berührgeometrieparameter

12.1 Übersicht

Um zu überprüfen, ob die Berechnungssoftware die in diesem Dokument angegebenen Ergebnisse erzielen kann, muss die Software wie nachfolgend beschrieben bewertet werden.

Sowohl das Verfahren zur Bestimmung der äquivalenten Konizität und des Rollradienkoeffizienten sowie das Glättungsverfahren für Profildaten müssen durch Vergleichsberechnungen mit definierten Referenzprofilen überprüft werden. Dies wird durch zwei Schritte erreicht:

- Schritt 1 validiert die Berechnungsalgorithmen für die Berührgeometrieparameter;
- in Schritt 2 wird der Glättungsalgorithmus für definierte Fehler ausgewertet, um Auskunft über den möglichen Einsatzbereich in Bezug auf die Messunsicherheit eines Messsystems geben zu können.

Dieses Dokument enthält keine Vergleichsberechnungen für die folgenden Berührgeometrieparameter: Nichtlinearitätsparameter, Berührwinkelparameter und Wankwinkelparameter.

12.2 Validierung der Berechnungsalgorithmen

Für diesen Schritt müssen die Berechnungen für alle Kombinationen der in Anhang I angegebenen Referenzprofile durchgeführt werden, einschließlich des Einflusses asymmetrischer Δr -Funktionen, die durch unterschiedliche Raddurchmesser oder unterschiedliche Radprofile an den beiden Rädern erzeugt werden.

ANMERKUNG 1 Die in Anhang I angegebenen Referenzprofile werden lediglich für die Vergleichsberechnung definiert, um den Algorithmus unter möglichst vielfältigen Bedingungen zu prüfen. Sie haben keinerlei praktische Bedeutung für die Entwicklung eines realen Profils.

Die Berechnungsalgorithmen (und Interpolationsalgorithmen) werden auf die Referenzprofile in Anhang I angewendet. Dies ermöglicht die Bestimmung der Berührpunkte, um die Rollradiendifferenz in Abhängigkeit von der Querposition des Radsatzes zu berechnen. Ausgehend von dieser Funktion werden die äquivalente Konizitätsfunktion sowie der Wert von Δr_E , der zum Rollradienkoeffizienten führt, berechnet.

Für die äquivalente Konizitätsfunktion validiert ein Vergleich der erzielten Ergebnisse für $\hat{y} = 1$ mm bis 6 mm mit den Referenzergebnissen in Anhang J und einem definierten Feld zulässiger Toleranzen in Anhang K die bewerteten Algorithmen (oder auch nicht).

Zur Validierung des Algorithmus für die Bestimmung des Rollradienkoeffizienten müssen die Δr_F -Werte für die verschiedenen Profilkombinationen mit den in Anhang J angegebenen Referenzergebnissen mit einer Toleranz von $\pm 0,15$ mm verglichen werden.

ANMERKUNG 2 Die Referenzergebnisse wurden analytisch (ohne Schrittweite) berechnet, wobei der Unterschied zu Berechnungen mit Schrittweiten nach 8.2 nicht signifikant ist.

ANMERKUNG 3 Bei Verfahren mit elastischem Kontakt wird die angewendete Radlast in der obigen Beurteilung normalerweise reduziert.

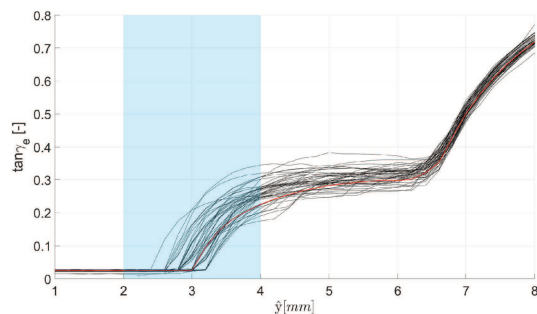
12.3 Beurteilung des Glättungsverfahrens

In diesem Schritt werden den Referenzschienenprofilen und Referenzradprofilen zufällige Fehler hinzugefügt, um den Einfluss von Messunsicherheiten auf die Profilkordinaten darzustellen. Dann werden die Glättungs- und Berechnungsalgorithmen der Software angewendet und der Effekt der Profilstörungen auf die resultierenden Rad-Schiene-Berührparameter, äquivalente Konizität und Rollradienkoeffizienten durch Vergleich mit den durch die gleiche Software erhaltenen Ergebnissen für die nominalen Referenzprofile quantifiziert (Referenzfunktionen). Die Ergebnisse liefern Informationen über die Empfindlichkeit der Ausgangsparameter für Eingabefehler und können zur Angabe des Anwendungsbereichs verwendet werden, für den die getestete Software geeignet ist.

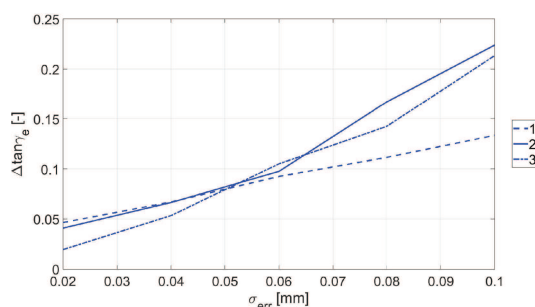
Um die Tauglichkeit des Glättungsprozesses zu überprüfen, muss zuerst nachgewiesen werden, dass die in 12.2 beschriebenen Kriterien für die nominalen Referenzprofile mit Glättung noch erfüllt sind.

Für eine allgemeine Beurteilung des Glättungsprozesses werden die Fehlerprofile erzeugt, indem gleichzeitig zu den lateralen (y) und vertikalen (z) Profilkordinaten des Referenzschienenprofils A und der Referenzradprofile A, B und C, die in Anhang I enthalten sind, zufällige Fehler hinzugefügt werden. Die zufälligen Fehleramplituden sind durch zentrierte, doppelseitige Normalverteilungen gegeben. Die entsprechenden Standardabweichungen müssen zwischen 0,02 mm und 0,10 mm in Schritten von 0,02 mm variieren. Für jede Fehlerstufe (Standardabweichung) muss eine ausreichende Anzahl zufällig gestörter Profile (≥ 50) erzeugt werden. Die Beurteilung des Glättungsprozesses muss durch getrennte Berechnungen für Fälle mit zufälligen Profilfehlern erfolgen, die nur auf das Rad oder nur auf die Schiene oder sowohl auf das Rad als auch auf die Schiene angewandt werden. Zur Beurteilung des Glättungsprozesses für eine begrenzte Anwendung, z. B. die Beurteilung von gemessenen Schienenprofilen mit einem Referenzradprofil oder die Beurteilung von gemessenen Radprofilen mit einem Referenzschienenprofil, dürfen alternative Referenzprofile und Profilfehler verwendet werden. Die ausgewählten Fälle und deren Rechtfertigung müssen dokumentiert werden.

Die Auswirkung des Glättungsprozesses auf die äquivalente Konizität wird durch die absoluten Differenzen zwischen den Konizitätsfunktionen der gestörten Profile und der entsprechenden Referenzfunktion quantifiziert, siehe Bild 8 (links). Die Differenzen werden für laterale Radsatzamplituden im Bereich zwischen 2 mm und 4 mm (schattiert in Bild 8) in 0,2 mm-Schritten berechnet. Schlussendlich ist die Qualitätszahl für jede Fehlerstufe durch den 95 %-Wert der Gesamtverteilung dieser Unterschiede gegeben. Die Qualitätszahlen sind über der entsprechenden Profilfehlerstufe grafisch dargestellt, siehe Bild 8 (rechts).



a) Beispiel für die Verteilung von Konizitätsfunktionen (hohe Fehlerstufe für Rad B – Schiene A)



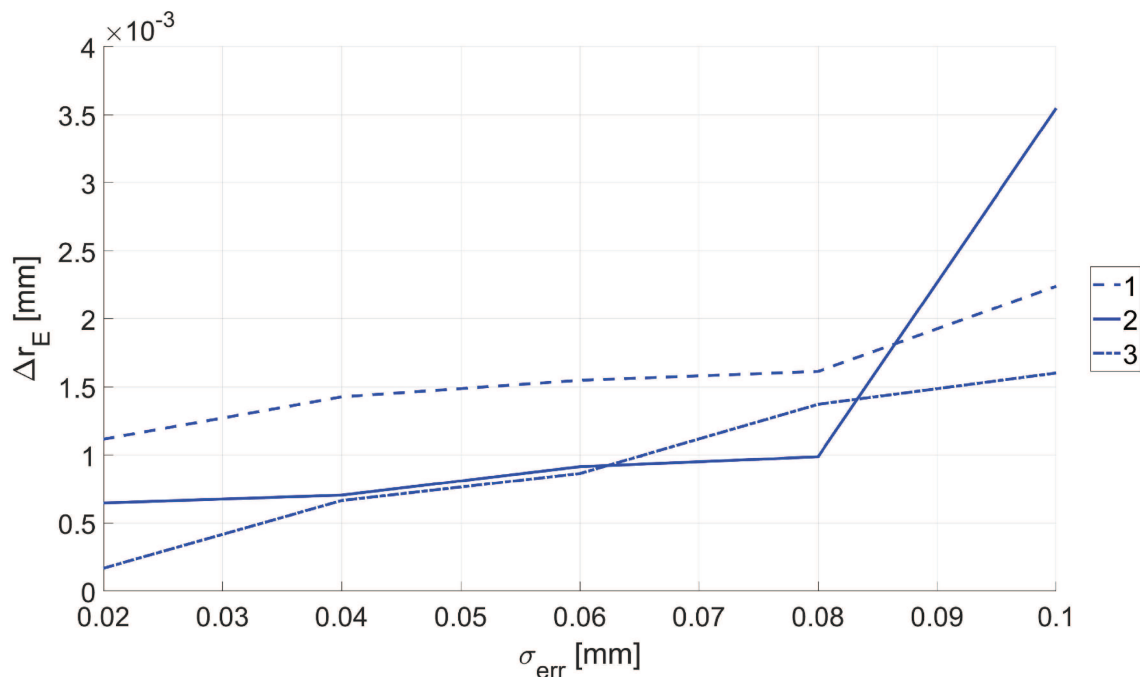
b) Beispiel für Qualitätszahlen für die äquivalente Konizität als Funktion der Fehlerstufe

Legende

- 1 Ergebnisse für Profilkombination Rad A – Schiene A
- 2 Ergebnisse für Profilkombination Rad B – Schiene A
- 3 Ergebnisse für Profilkombination Rad C – Schiene A

Bild 8 — Beispiel für die Bewertung des Glättungsprozesses

Die Qualitätszahl für den Rollradienkoeffizienten wird direkt aus den Rollradiendifferenzfunktionen unter Verwendung der Rollradiendifferenzen am Punkt E (Δr_E) abgeleitet. Sie ergibt sich aus dem 95 %-Wert der absoluten Differenzen zwischen den Lösungen für das gestörte Profil und dem Referenzprofil und wird als Funktion der Fehlerstufe in einem Diagramm dargestellt, siehe Bild 9.



Legende

- 1 Ergebnisse für Profilkombination Rad A – Schiene A
- 2 Ergebnisse für Profilkombination Rad B – Schiene A
- 3 Ergebnisse für Profilkombination Rad C – Schiene A

Bild 9 — Beispiel von Qualitätszahlen für Rollradienunterschiede am Punkt E (Δr_E) als Funktion der Fehlerstufe

Die erzielten Ergebnisse müssen in der Dokumentation der Software angegeben werden.

13 Beurteilung des gesamten Prozesses zur Bestimmung der Rad-Schiene-Berührgeometrieparameter

13.1 Allgemeines

Der gesamte Prozess zur Ermittlung der Rad-Schiene-Berührgeometrieparameter aus gemessenen Daten wird in mehreren Stufen bewertet:

- die Algorithmen für die Berechnung der äquivalenten Konizität und des Rollradienkoeffizienten werden validiert, wobei die Vergleichsprofile nach 12.2 angewandt werden;
- der Einfluss von Messfehlern wird nach 12.3 überprüft;
- Der gesamte Prozess wird in einem Praxistest auf Reproduzierbarkeit geprüft.

Das Ergebnis der Reproduzierbarkeitsbeurteilung ist eine Schätzung der Unsicherheit des gesamten Prozesses.

Die Anzahl der zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit zu verwendenden Messungen hängt von der Art des Messsystems (manuell oder automatisch) ab, die Richtlinien sind jedoch dieselben.

Abhängig von der beabsichtigten Anwendung umfasst die Beurteilung des Gesamtprozesses die Beurteilung der äquivalenten Konizität und/oder des Rollradienkoeffizienten, abgeleitet aus:

- gemessenen Schienenprofilen und Referenzradprofilen;
- Referenzschienenprofilen und gemessenen Radprofilen; und/oder
- gemessenen Schienenprofilen und gemessenen Radprofilen.

Andere Rad-Schiene-Berührgeometrieparameter können bei Bedarf ebenfalls berücksichtigt werden.

Für die Beurteilung der äquivalenten Konizität, siehe 9.2, wird der Wert für eine Amplitude $\hat{y} = 3 \text{ mm}$ vorgeschlagen, aber es kann ein anderer Wert gewählt werden, wenn er für bestimmte Anwendungen relevant ist.

Für die Beurteilung des Rollradienkoeffizienten, siehe Abschnitt 10, wird der Δr_E -Wert vorgeschlagen.

Die Auswahl eines Referenzradprofils zur Beurteilung des Schienensystems oder eines Referenzschienenprofils zur Beurteilung des Radsystems muss sorgfältig abgewogen werden, damit der Einfluss der gemessenen Profile in den resultierenden Berührgeometrieparametern deutlich erkennbar ist. Wenn beispielsweise das Schienensystem beurteilt wird, liefert ein konisches oder zylindrisches Radprofil keine nützliche Information.

Die abschließende Beurteilung der Berührgeometrieparameter, z. B. die Berechnung eines gleitenden Mittelwerts über 100 m muss entsprechend der beabsichtigten Anwendung durchgeführt werden.

13.2 Reproduzierbarkeit der Berührgeometrieparameterbestimmung basierend auf Schienenprofilmessungen

13.2.1 Manuelle Schienenprofilmessgeräte

Um die Reproduzierbarkeit der Rad-Schiene-Berührgeometrieparameterauswertungen auf der Grundlage von Schienenprofil-Messungen vor Ort zu bestimmen, müssen die Ergebnisse (z. B. äquivalente Konizität, Rollradienkoeffizient) verschiedener Schienenprofilmessungen an derselben Schienenposition miteinander verglichen werden. Die ausgewählten Gleisabschnitte müssen eine große Bandbreite an Schienenverschleißbedingungen umfassen.

Die folgenden Bedingungen, sofern zutreffend, müssen für jeden Gleisabschnitt gelten:

- Messung durch verschiedene geschulte Anwender (mindestens drei Anwender werden empfohlen);
- beide Messrichtungen des Messsystems (Verwendung beider Messköpfe für Doppelkopfsysteme).

Alle nicht von der Untersuchung erfassten Bedingungen müssen im Bericht begründet werden.

Nach jeder Messung muss das Messsystem vollständig entfernt, um 180 Grad gedreht und wieder auf die Schiene gesetzt werden.

Um zuverlässige Ergebnisse der statistischen Analyse zu erhalten, sind insgesamt mindestens 40 Messungen erforderlich, einschließlich einer Mindestanzahl von 3 verschiedenen Gleisabschnitten und 12 Messungen pro Gleisabschnitt.

Die Anzahl und Merkmale der Gleisabschnitte und die Anzahl der in der Studie berücksichtigten Messungen müssen angegeben werden.

Um die Reproduzierbarkeit der Bestimmung von Berührgeometrieparametern abschätzen zu können, müssen die Differenzen zum Mittelwert jedes betrachteten Parameters an jedem Messort berechnet werden. Danach muss das 95. Perzentil der absoluten Werte aller Differenzen als eine Schätzung der Unsicherheit des vollständigen Prozesses berechnet werden.

13.2.2 Fahrzeuggebundene Schienenprofil-Messsysteme

Um die Reproduzierbarkeit der Rad-Schiene-Berührgeometrieparameterauswertungen auf der Grundlage von Schienenprofil-Messungen vor Ort zu bestimmen, müssen die Ergebnisse (z. B. äquivalente Konizität, Rollradienkoeffizient) verschiedener Schienenprofilmessungen an denselben Gleisabschnitten miteinander verglichen werden.

Bei fahrzeuggebundenen Messsystemen müssen die Gleisabschnitte eine Vielzahl von Gleiskonstruktionsmerkmalen (Gleisbögen verschiedener Radien und Richtungen, erhebliche Überhöhung) und Schienenverschleißbedingungen abdecken. Für jede Gleisbedingung muss die Gesamtlänge mindestens 200 m betragen und Ergebnisse von mindestens 50 gemessenen Querschnitten enthalten. Die Gesamtlänge aller Gleisabschnitte sollte mindestens 5 km betragen.

Die folgenden Bedingungen müssen für jeden Gleisabschnitt variiert werden, wenn sie für das Messsystem anwendbar sind:

- Messgeschwindigkeit: mit mindestens der minimal und maximal möglichen Messgeschwindigkeit;
- beide Messrichtungen (vorwärts/rückwärts);
- beide Orientierungen des Messsystems (um 180° gedreht).

Alle nicht in der Untersuchung erfassten Bedingungen müssen im Bericht begründet werden.

Um zuverlässige Ergebnisse der statistischen Analyse zu erhalten, ist eine Mindestanzahl von 8 Messläufen pro Gleisabschnitt erforderlich.

Die Anzahl und Merkmale der Gleisabschnitte und die Anzahl der in der Studie berücksichtigten Messläufe müssen angegeben werden.

Um eine ausreichende Übereinstimmung zu erzielen, muss sichergestellt sein, dass die zu vergleichenden Schienenprofilmessungen an der gleichen Stelle der Fahrbahn mit einer angemessenen Toleranz durchgeführt werden. Daher ist eine Synchronisation der Messläufe notwendig.

ANMERKUNG 1 Zur Synchronisation werden häufig gemessene Spurweitensignale verwendet. Auch zusätzliche Ortsmarker sind nützlich, um die Lokalisierungsgenauigkeit zu verbessern. Eine Unterteilung der Fahrbahn in äquidistante Gleisabschnitte von z. B. 200 m Länge kann ebenfalls zur Verbesserung der Synchronisation beitragen.

Um die Reproduzierbarkeit der Bestimmung von Berührgeometrieparametern abschätzen zu können, müssen die Differenzen zum Mittelwert jedes betrachteten Parameters an jedem Messort der synchronisierten Datensätze berechnet werden. Danach muss das 95. Perzentil der absoluten Werte aller Differenzen als eine Schätzung der Unsicherheit des Gesamtprozesses berechnet werden.

ANMERKUNG 2 Die grafische Darstellung der Häufigkeitsverteilung der berechneten Differenzen ermöglicht ein besseres Verständnis für die Eigenschaften des Messsystems.

ANMERKUNG 3 Typische Werte für die Unsicherheit des Gesamtprozesses zur Bestimmung der äquivalenten Konizität liegen unter 0,05.

13.3 Reproduzierbarkeit der Berührgeometrieparameterbestimmung basierend auf Radprofilmessungen

13.3.1 Manuelle Radprofilmessgeräte

Um die Reproduzierbarkeit der Rad-Schiene-Berührgeometrieparameterauswertungen auf der Grundlage von Messungen von Radprofilen unter normalen Betriebsbedingungen zu bestimmen, müssen die Ergebnisse (z. B. äquivalente Konizität, Rollradienkoeffizient) verschiedener Radprofilmessungen an demselben Radsatz miteinander verglichen werden. Die ausgewählten Radsätze müssen eine große Bandbreite an Radverschleißbedingungen umfassen.

Die folgenden Bedingungen, sofern zutreffend, müssen für jeden Radsatz gelten:

- Messung durch verschiedene geschulte Anwender (mindestens drei Anwender werden empfohlen);
- beide Messrichtungen des Messsystems (Verwendung beider Messköpfe für Doppelkopfsysteme).

Alle nicht von der Untersuchung abgedeckten Bedingungen müssen im Bericht begründet werden.

Nach jeder Messung muss das Messsystem vollständig entfernt, um 180° gedreht und wieder auf den Radsatz gesetzt werden.

Um zuverlässige Ergebnisse der statistischen Analyse zu erhalten, sind insgesamt mindestens 40 Messungen erforderlich, einschließlich einer Mindestanzahl von 3 verschiedenen Radsätzen und 12 Messungen pro Radsatz.

Die Anzahl der Radsätze und der in der Studie berücksichtigten Messbedingungen müssen angegeben werden.

Um die Reproduzierbarkeit der Bestimmung von Berührgeometrieparametern abschätzen zu können, müssen die Differenzen zum Mittelwert jedes betrachteten Parameters für jeden Radsatz berechnet werden. Danach muss das 95. Perzentil der absoluten Werte aller Differenzen als eine Schätzung der Unsicherheit des Gesamtprozesses berechnet werden.

ANMERKUNG Wenn sich die Messbedingungen wesentlich von den Bedingungen der Reproduzierbarkeitsprüfung unterscheiden, kann dies die erreichbaren Unsicherheitswerte beeinflussen.

13.3.2 Gleisgebundene Radprofil-Messsysteme

Um die Reproduzierbarkeit der Rad-Schiene-Berührgeometrieparameterauswertungen auf der Grundlage von Messungen von Radprofilen im Betrieb zu bestimmen, müssen die Ergebnisse (z. B. äquivalente Konizität, Rollradienkoeffizient) verschiedener Radprofilmessungen an denselben Radsätzen miteinander verglichen werden.

Für gleisgebundene Messsysteme müssen die verschiedenen Radsätze eine große Bandbreite von Radsatztypen (Fahrzeugtyp, Achslast und Raddurchmesser, wo zutreffend) und Radverschleißbedingungen abdecken. Es müssen mindestens 10 Radsätze verwendet werden.

Die folgenden Bedingungen müssen für jeden Radsatz variiert werden, wenn sie für das Messsystem anwendbar sind:

- Messgeschwindigkeit: mit mindestens der minimal und maximal möglichen Messgeschwindigkeit;
- beide Messrichtungen (vorwärts/rückwärts);
- beide Orientierungen des Fahrzeugs (um 180° gedreht).

Alle nicht von der Untersuchung abgedeckten Bedingungen müssen im Bericht begründet werden.

Um zuverlässige Ergebnisse der statistischen Analyse zu erhalten, ist eine Mindestanzahl von 8 Messläufen pro Radsatz erforderlich.

Die Anzahl und Merkmale der Radsätze und die Anzahl der in der Studie berücksichtigten Messläufe müssen angegeben werden.

Um die Reproduzierbarkeit der Bestimmung von Berührgeometrieparametern abschätzen zu können, müssen die Differenzen zum Mittelwert jedes betrachteten Parameters für jeden Radsatz berechnet werden. Danach muss das 95. Perzentil der absoluten Werte aller Differenzen als eine Schätzung der Unsicherheit des vollständigen Prozesses berechnet werden.

ANMERKUNG 1 Die grafische Darstellung der Häufigkeitsverteilung der berechneten Differenzen ermöglicht ein besseres Verständnis der Eigenschaften des Messsystems.

ANMERKUNG 2 Typische Werte für die Unsicherheit des Gesamtprozesses zur Bestimmung der äquivalenten Konizität liegen unter 0,05.

Anhang A (informativ)

Beispiel für die Darstellung von Berührgeometriefunktionen

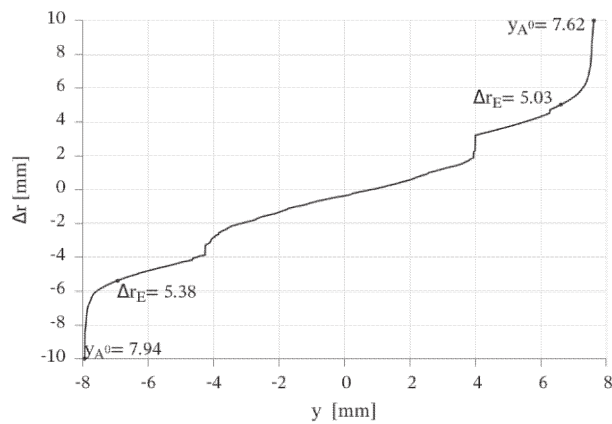


Bild A.1 — Funktion der Rollradiendifferenz $\Delta r = f(y)$

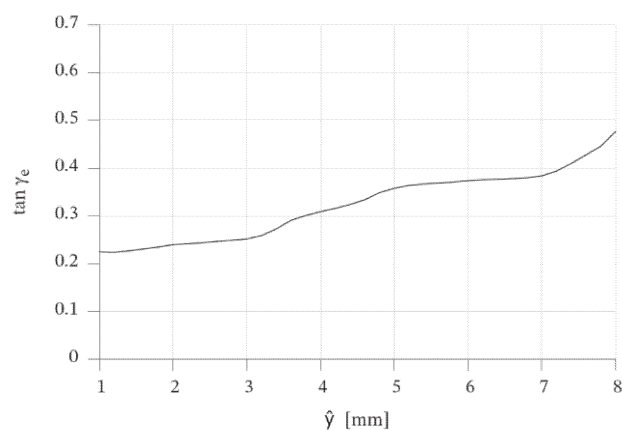


Bild A.2 — Funktion der äquivalenten Konizität $\tan \gamma_e = f(y)$

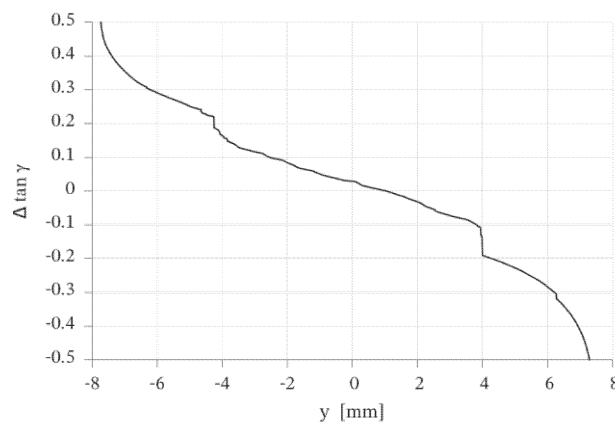


Bild A.3 — Funktion der Differenz der Tangenten der Berührwinkel $\Delta \tan \gamma = f(y)$

Anhang B (informativ)

Ableitung der kinematischen Gleichung der Radsatzbewegung

Die Bewegung des Schwerpunkts des Radsatzes im Gleis (Bild B.1 und Bild B.2) kann auf der Grundlage des Winkels in einer Gleichung dargestellt werden:

$$\psi = \frac{\dot{y}}{\dot{x}} = \frac{dy}{dx} \quad (\text{B.1})$$

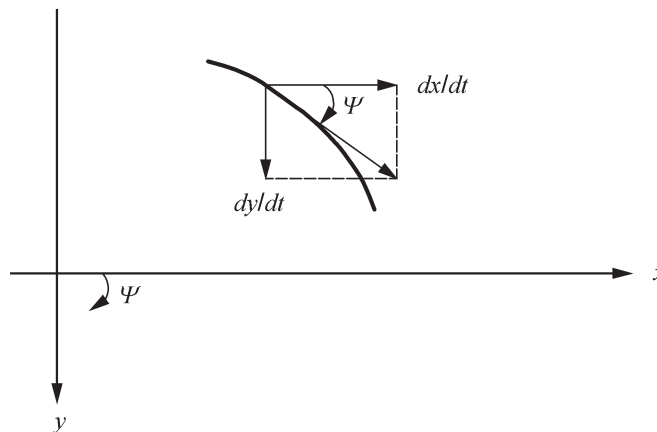


Bild B.1 — Darstellung von dx, dy

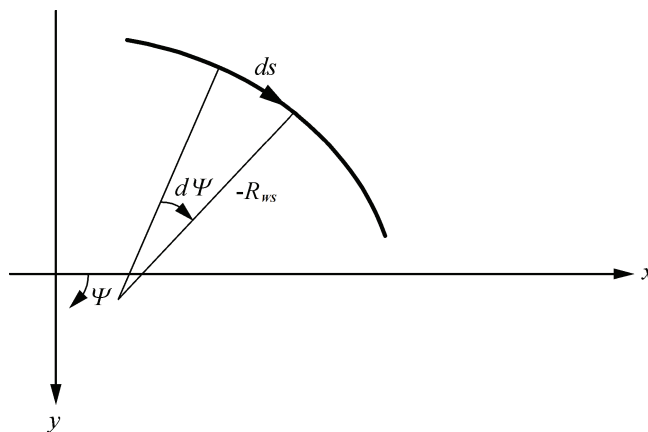


Bild B.2 — Darstellung von $ds, d\psi$

$$ds = -R_{ws} d\psi$$

für einen kleinen Winkel ψ gilt $ds \cong dx$ und somit

$$dx = -R_{ws} d\psi \quad (\text{B.2})$$

Unter Berücksichtigung von Gleichung (B.1) erhält man:

$$\psi = \frac{dy}{dx} = - \frac{dy}{R_{WS} d\psi}$$

d. h.

$$\psi d\psi = - \frac{dy}{R_{WS}} \quad (\text{B.3})$$

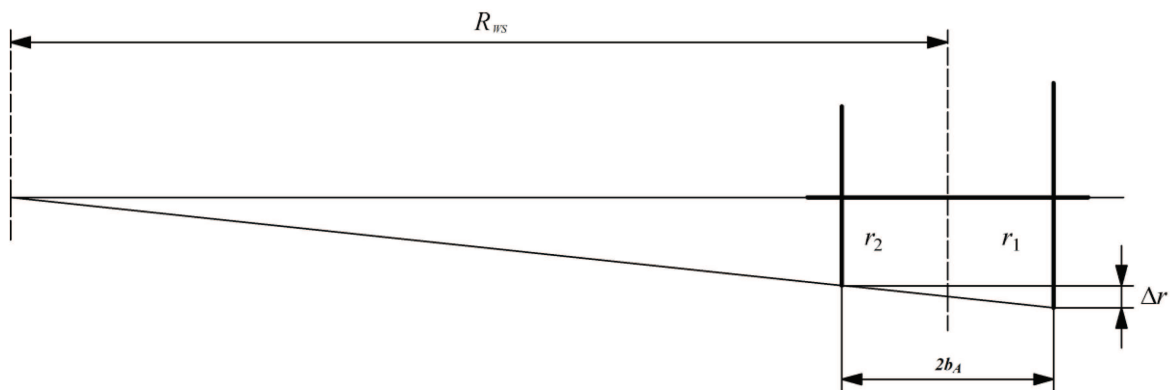


Bild B.3 — Darstellung von r_1, r_2, b_A

Aus Bild B.3 erhält man:

$$\frac{R_{WS}}{2b_A} = \frac{\frac{r_1 + r_2}{2}}{r_1 - r_2}$$

Dabei ist

$$\frac{r_1 + r_2}{2} = r_0$$

$$r_1 - r_2 = \Delta r$$

Folglich erhält man:

$$R_{WS} = \frac{2b_A r_0}{\Delta r} \quad (\text{B.4})$$

danach wird R_{WS} in (B.3) übernommen; dies ergibt:

$$\psi d\psi = \frac{-\Delta r(y) dy}{2b_A r_0} \quad (\text{B.5})$$

$$\frac{\psi}{dy} d\psi + \frac{\Delta r(y)}{2b_A r_0} = 0$$

Mit

$$\psi = \frac{dy}{dx}$$

und

$$\frac{d\psi}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2}$$

wird die kinematische Gleichung der Radsatzbewegung zu

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{\Delta r(y)}{2b_A r_0} = 0 \quad (\text{B.6})$$

Anhang C (informativ)

Bestimmung der maximalen Querverschiebungen

Die Lösung der in Anhang B beschriebenen Bewegungsgleichung ist eine periodische Bewegung mit maximalen Querverschiebungen bei y_{emax} und y_{emin} und einer Amplitude $\hat{y} = (y_{\text{emax}} - y_{\text{emin}})/2$. Einige Verfahren zur Berechnung der äquivalenten Konizität erfordern y_{emax} und y_{emin} als Funktionen von $\hat{y}$. Dies ist einfach für symmetrische Profile, wo $y_{\text{emax}} = -y_{\text{emin}} = \hat{y}$. Bei asymmetrischen Profilen können diese Funktionen mithilfe der Gleichung (B.5) berechnet werden:

$$\psi d\psi = -\frac{1}{2b_A r_0} \Delta r(y) dy.$$

Die Integration der Querverschiebung von y_1 nach y_2 ergibt

$$\frac{1}{2}\psi_2^2 - \frac{1}{2}\psi_1^2 = -\frac{1}{2b_A r_0} \int_{y_1}^{y_2} \Delta r(y) dy.$$

Eine Halbwelle verläuft zwischen zwei Spitzen von $y_1 = y_{\text{emin}}$, $\psi_1 = 0$ nach $y_2 = y_{\text{emax}}$, $\psi_2 = 0$. Damit kann y_{emax} als der Wert von y bestimmt werden, wo das Integral von Δr , beginnend bei y_{emin} , Null wird. Es ist auch möglich, das Integral einmal über den gesamten verfügbaren Bereich von y zu berechnen und dann entsprechende Paare von y_{emin} und y_{emax} bei identischen Werten des Integrals zu finden.

Dieses Verfahren ist in Bild C.1 für den Vergleichsfall „Geändertes Rad A (–2 mm am linken Raddurchmesser)/Schiene A“ dargestellt. Das oberste Diagramm stellt die Δr -Funktion gegenüber der Querverschiebung y grafisch dar. Das zentrale Diagramm zeigt das Integral der Δr -Funktion, verschoben entlang der Ordinate, um beim Minimum Null zu sein, was $\Delta r = 0$ entspricht. Die horizontalen Linien verbinden entsprechende Paare von y_{emin} und y_{emax} . Die Mittelpunkte dieser Linien sind durch Punkte gekennzeichnet. Die gleichen Linien sind im untersten Diagramm noch einmal grafisch dargestellt, jedoch mit der Amplitude $\hat{y} = (y_{\text{emax}} - y_{\text{emin}})/2$ auf der Ordinate. Dies führt zu der gewünschten Beziehung zwischen $\hat{y}$ und y_{emin} und y_{emax} . Die Ausgangswerte von y_{emin} und y_{emax} werden typischerweise in $\hat{y}$ -Schritten von 0,1 mm interpoliert.

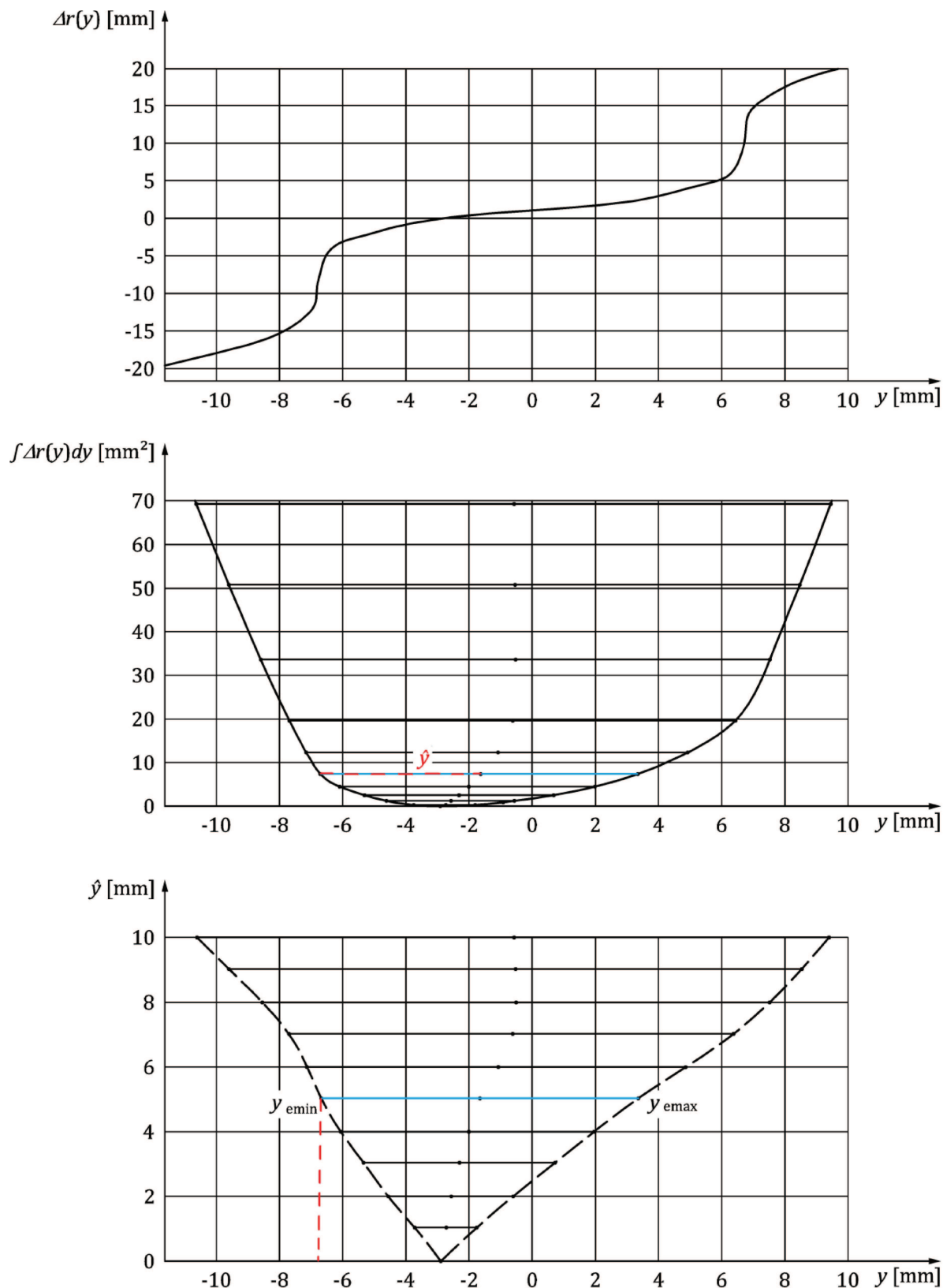


Bild C.1 — Veranschaulichung der Bestimmung von Amplituden

Anhang D (informativ)

Verfahren zur Bestimmung der Wellenlänge der Radsatzbewegung durch zweistufige Integration der nichtlinearen Differentialgleichung

D.1 Allgemeines

Dieser Anhang stellt ein Verfahren zur Berechnung der Wellenlänge der Querbewegung des Radsatzes durch eine zweistufige numerische Auswertung vor:

- 1) Berechnung $\psi(y)$ mit Gleichung (B.5);
- 2) Berechnung $x(y)$ durch Einfügen von $\psi(y)$ in Gleichung (B.1) und Bestimmung der Wellenlänge der Radsatzbewegung.

Diese Stufen werden im Folgenden näher beschrieben.

D.2 Stufe 1

Dieser Schritt ist ähnlich der Berechnung der Amplituden in Anhang C. Integration der Gleichung (B.5)

$$\psi d\psi = -\frac{1}{2b_A r_0} \Delta r(y) dy$$

von y_1 bis y ergibt:

$$\frac{1}{2}\psi^2 - \frac{1}{2}\psi_1^2 = -\frac{1}{2b_A r_0} \int_{y_1}^y \Delta r(y) dy.$$

Mit den Anfangsbedingungen $y_1 = y_{\text{emin}}$, $\psi_1 = 0$:

$$\psi(y) = \sqrt{-\frac{2}{b_A r_0} \int_{y_{\text{emin}}}^y \Delta r(y) dy}$$

D.3 Stufe 2

Aus Gleichung (B.1) folgt:

$$dx = \frac{1}{\psi(y)} dy$$

und

$$x_2 - x_1 = \int_{y_1}^{y_2} \frac{1}{\psi(y)} dy$$

Eine Halbwelle zwischen zwei Spitzen verläuft von $y_1 = y_{\min}$, $x_1 = 0$ nach $y_2 = y_{\max}$, $x_2 = \lambda/2$. Damit kann die Wellenlänge λ als das mit 2 multiplizierte Integral von $1/\psi(y)$ über den Bereich von y innerhalb eines halben Zyklus bestimmt werden:

$$\lambda = 2 \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \frac{1}{\psi(y)} dy$$

Da bei $y_{\min}$ und $y_{\max}$ der Nenner $\psi(y) = 0$ ist, wird der Integrand an den Endpunkten des Integrationsintervalls unendlich. Dies wird als uneigentliches Integral bezeichnet. Durch numerische Integration (Quadratur) kann dieses wie im folgenden MATLAB®¹ Code für eine einzelne Welle gezeigt gelöst werden.

```
function lambda = integral_invpsi(y,psi2)
% Solution of integral of 1/psi for computation of wavelength
%
% Input:
%   y    ... vector of y from yemin to yemax
%   psi2 ... vector of psi^2 corresponding to y (result of step 1)
% Output:
%   lambda ... wavelength corresponding to yemin and yemax
% Intrinsic MATLAB functions used:
%   integral ... numerical quadrature
%   interp1 ... interpolation (here set to linear interpolation)
%   sqrt ... square root
function_to_call = @invpsi_y;
lambda = 2 * integral(function_to_call, y(1), y(end));
function invpsi = invpsi_y(yi)
invpsi = 1 ./ sqrt(interp1(y, psi2, yi, 'linear')) );
end
end
```

Während uneigentliche Integrale mit einem Integranden $1/x$ bei $x = 0$ divergieren, konvergieren sie mit einem Integranden von $1/\sqrt{x}$. Daher wird das Quadrat von ψ (bezeichnet mit psi2), das direkt in Schritt 1 erhalten werden kann, im Code verwendet. Die Quadratwurzel wird nach einer linearen Interpolation gezogen, um die konvergierende Form an den Endpunkten zu erhalten.

Alternativ darf anstelle der numerischen Quadratur wie oben mit der Funktion `integral` auch eine trapezförmige Integration verwendet werden. In diesem Fall muss darauf geachtet werden, dass der Integrand nicht unendlich wird. Dies kann durch die Annäherung von $1/\psi(y_{\min})$ durch $1/\psi(y_{\min} + \varepsilon)$ und $1/\psi(y_{\max})$ durch $1/\psi(y_{\max} - \varepsilon)$ mit $\varepsilon \ll 0,01$ mm erreicht werden. Da jedoch das auf diese Weise erhaltene Ergebnis vom ε -Wert abhängt, kann dieses Verfahren unzuverlässig sein, und es kann weniger effizient sein als die oben beschriebene numerische Quadratur.

Das Integral muss für jede Amplitude der Radsatzquerbewegung gelöst werden, um die jeweiligen Wellenlängen der kinematischen Radsatzbewegung zu finden.

1 MATLAB® ist ein Beispiel für ein geeignetes handelsübliches Produkt. Diese Angabe dient nur zur Unterrichtung der Anwender dieses Dokuments und bedeutet keine Empfehlung dieses Produktes durch CEN oder CENELEC.

Anhang E (informativ)

Verfahren zur Bestimmung der Wellenlänge der Radsatzbewegung durch direkte Integration der nichtlinearen Differentialgleichung

Dieses Verfahren basiert auf der numerischen Integration der Differentialgleichung der kinematischen Radsatzbewegung im Wegbereich, wie in Gleichung (B.6) angegeben. Diese Differentialgleichung zweiter Ordnung muss in ein System von Differentialgleichungen erster Ordnung umgewandelt werden und mit numerischen Methoden, wie z. B. Runge-Kutta, gelöst werden. In jedem Fall wird empfohlen, eine adaptive Schrittweitensteuerung zu verwenden, um den Rechenaufwand zu reduzieren und Rundungsfehler vorzubeugen.

Die Anfangsbedingungen für die Integration werden normalerweise als $y = y_{\text{emax}}$ und $\dot{y} = 0$ genommen. Um die Wellenlänge der Radsatzbewegung zu bestimmen, muss das Integrationsintervall mindestens die Hälfte eines Zyklus bis wieder $\dot{y} = 0$ zurücklegen. Wenn andere Anfangsbedingungen verwendet werden, kann es notwendig sein, den vollständigen Zyklus zu berechnen. Eine gute Überprüfung der ausgewählten Fehlertoleranzen besteht darin, den vollständigen Zyklus zu berechnen und die laterale Position am Anfang und Ende zu vergleichen.

Das Ergebnis der numerischen Integration ist der Wegschrieb der Radsatzquerbewegung $y = f(x)$. Daraus kann die Wellenlänge λ bestimmt werden.

Für dieses Verfahren ist es nicht notwendig, den Bereich der Querverschiebungen vorher zu berechnen, da die Amplitude ein Ergebnis der Berechnung ist. Wenn jedoch die äquivalente Konizität für verschiedene Amplituden erforderlich ist, kann es die Effizienz der Berechnung erhöhen, wenn die zugehörigen Bereiche der Querverschiebung wie in Anhang C beschrieben bestimmt werden.