

## 2 Kinematische Planungsgrundlagen

Die ältesten Bahnstrecken wurden weitgehend geradlinig trassiert, weil man zunächst Sorge vor Entgleisungen selbst in großen Gleisbogen hatte. Später ging man dazu über, die Trassierung aus Kostengründen der Landschaft anzupassen, etwa entlang Flüssen zu trassieren. Dies hatte auch den Vorteil, dass die Steigungen gering waren – ein Aspekt, der seinerzeit eine größere Bedeutung hatte als eine kürzere Trassierung. Zuweilen sind Bahnstrecken auch deshalb in Flusstälern trassiert worden, weil man sie im Falle eines Krieges auf diese Weise vor militärischen Angriffen schützen wollte.

### 2.1 Geschwindigkeit als Planungsziel

Die Fahrzeit ist ein wesentliches Merkmal für die Entscheidung über die Nutzung von Verkehrsmitteln.

In ihrer Anfangszeit im 19. Jahrhundert war die Eisenbahn konkurrenzlos schnell. Mit dem Aufkommen des Straßen- und Luftverkehrs ging dieser Vorteil zum Teil verloren. Es gibt jedoch Relationen, besonders zwischen großen Städten, in denen die Fahrzeiten der Bahn niedriger liegen als die Fahrzeiten des Pkw. Etwa bis zu einer (Bahn-)Fahrzeit von 4 Stunden ist die Bahn auch gegenüber dem Luftverkehr im Vorteil.

Unglücklicherweise stammt die Trassierung der meisten Eisenbahnstrecken aus dem 19. Jahrhundert, sodass die Trassen wegen ihrer engen Kurvenradien nicht für die heutigen hohen Geschwindigkeiten geeignet sind. Um diesem Missstand zu begegnen, können neue Strecken gebaut oder vorhandene Strecken für höhere Geschwindigkeiten ausgebaut werden.

### 2.2 Geschwindigkeit und Beschleunigung

In der Anfangszeit der Eisenbahn äußerten Ärzte Bedenken, ob große Geschwindigkeiten – damals 40 km/h – dem menschlichen Organismus zuträglich seien. Heute können wir sagen, dass diese Sorgen unbegründet waren. Fahrten in einem Hochgeschwindigkeitszug mit 300 km/h oder Flüge mit einer dreimal so großen Geschwindigkeit haben keinen merklichen Einfluss auf das Wohlbefinden. Allerdings nur unter einer Bedingung: Die Geschwindigkeit muss konstant sein. Anfahr- und Bremsvorgänge sowie Kurvenfahrten werden nämlich in der Tat als außerordentlich unangenehm empfunden. Alle diese Vorgänge haben etwas gemeinsam: Sie sind mit Beschleunigungen verbunden.

Bewegungen auf gerader Bahn mit konstanter Geschwindigkeit werden ebenso empfunden wie Stillstand. Beschleunigte Bewegungen wirken hingegen auf das Gleichgewichtsorgan.

Eine Beschleunigung ist eine Änderung der Geschwindigkeit über die Zeit:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}. \quad (2.1)$$

Die Einheit der Beschleunigung ist somit  $\frac{m/s}{s} = \frac{m}{s^2}$ .

Die physikalische Beschreibung der Fahrt eines Fahrzeugs auf gekrümmter Bahn (d.h. in einer Kurve) kann auf zweierlei Weise formuliert werden:

- Aus der Sicht eines Beobachters: Eine äußere Kraft bewirkt, dass das Fahrzeug einen Bogen befährt. Die Kraft wird vom Fahrzeug an die Insassen weitergegeben. Im Straßenverkehr wird die Kraft durch die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn aufgebracht; im Schienenverkehr bewirkt die Biegung des Gleises die Richtungsänderung.
- Aus der Sicht eines Insassen: Der Körper möchte der Richtungsänderung des Fahrzeugs nicht folgen und wird dadurch nach außen gedrückt. Die dabei subjektiv empfundene Kraft wird als **Fliehkraft** oder **Zentrifugalkraft** bezeichnet.

Beide Beschreibungen sind physikalisch gleichwertig. Die Sicht der Insassen eines Fahrzeugs ist anschaulicher und wird daher im Weiteren bevorzugt.

## 2.3 Die Fliehkraft begrenzt die zulässige Geschwindigkeit

Ein Beispiel für die Kreisbewegung eines Gegenstands ist das Schleudern eines Gewichtes durch einen Hammerwerfer. Offensichtlich muss er eine Kraft aufbringen, um den Hammer in seiner Kreisbahn zu halten. Zugleich wird auch der Betrag seiner (d.h. des Hammers) Geschwindigkeit vergrößert. Nachdem der Hammer losgelassen wird, fliegt er, wie nach dem Trägheitssatz zu erwarten, in gerader Linie. Aus dem Bewegungsablauf des Hammerwerfers lässt sich schließen, dass er die maximale Kraft in dem Augenblick aufbringt, in dem er den Hammer loslässt. Zugleich hat der Hammer in diesem Augenblick die maximale Geschwindigkeit. Offensichtlich ist die Fliehkraft also von der Bahngeschwindigkeit des Körpers, hier des Hammers, abhängig.

Die Fliehkraft ist proportional zum Quadrat der Bahngeschwindigkeit des Körpers und umgekehrt proportional zum Radius. In mathematischer Ausdrucksweise:

$$F_z = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad (2.2)$$

Es gibt verschiedene beschleunigte Bewegungen:

**Anfahren:**

Geschwindigkeitserhöhung;

**Bremsen:**

Geschwindigkeitsverringern;

**Bogenfahrten:**

Änderung des Geschwindigkeitsvektors.

Nur geradlinige Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit sind dem Zustand der Ruhe äquivalent. Ein Körper würde sich niemals von allein auf einer gekrümmten Bahn bewegen. Es braucht eine Kraft, um ihn dazu zu „zwingen“.

mit  
 $F_z$  = Zentrifugalkraft (Fliehkraft);  
 $m$  = Masse des Körpers ;  
 $v$  = Geschwindigkeit des Körpers;  
 $r$  = Radius der Kreisbahn.

Verdoppelt sich die Geschwindigkeit, so vervierfacht sich die Fliehkraft. Verringert sich der Radius auf die Hälfte, so verdoppelt sich die Fliehkraft.

Die Begriffe „Zentrifugalkraft“ und „Fliehkraft“ sind synonym, für die entsprechende Beschleunigung ist ausschließlich der Begriff „Zentrifugalbeschleunigung“ gebräuchlich.

Da jede Kraft als Produkt von Masse und Beschleunigung ausgedrückt werden kann, gilt für die Zentrifugalbeschleunigung:

$$a_z = \frac{F_z}{m} = \frac{v^2}{r} \quad (2.3)$$

### Beispiel 2.1

Eine Straßenbahn befährt einen engen Bogen mit einem Radius von 25 m mit einer Geschwindigkeit von 20 km/h. Wie groß ist die Zentrifugalbeschleunigung, die auf die Fahrgäste wirkt?

Lösung:

Mit  $v = 20 \text{ km/h} = 5,55 \text{ m/s}$  und  $r = 25 \text{ m}$  folgt:

$$a_z = \frac{F_z}{m} = \frac{5,55^2}{25} = 1,23 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

(Anmerkung: Durch die Wirkung der Federung neigt sich das Fahrzeug im Bogen nach außen (siehe Bild 2.1). Aus diesem Grund ist die Zentrifugalbeschleunigung in der Realität etwas größer als hier berechnet.)



**Bild 2.1** Wirkung der Fliehkraft im Kreisbogen ohne Überhöhung

Durch Einbau einer Überhöhung kann die Beschleunigung verkleinert oder die Geschwindigkeit vergrößert werden. Siehe dazu *Abschnitt 3.2.4*.

Würde der ICE mit einer Geschwindigkeit von 250 km/h durch einen Bogen mit dem Radius 25 m fahren, so betrüge die Zentrifugalbeschleunigung 193 m/s<sup>2</sup>! Das wäre fast das 20-fache der Erdbeschleunigung.

### Beispiel 2.2

Ein ICE-Zug fährt durch einen Bogen mit dem Radius 5000 m. Er fährt mit einer Geschwindigkeit von 250 km/h. Wie groß ist die Zentrifugalbeschleunigung, die auf die Fahrgäste wirkt?

Lösung:

Mit  $v = 250 \text{ km/h} = 69,4 \text{ m/s}$  und  $r = 5000 \text{ m}$  folgt:

$$a_z = \frac{F_z}{m} = \frac{69,4^2}{5000} = 0,96 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

## 2.4 Ruck

Unter einem Ruck versteht man eine Änderung der Beschleunigung.

**Beispiel für einen Ruck:** der Augenblick, in dem ein bremsendes Fahrzeug anhält. Vor dem Anhalten wirkt eine Verzögerung (negative Beschleunigung), die beim Stand des Fahrzeugs auf Null abfällt.

Beim Übergang von einer geradlinigen in eine Kreisbewegung tritt ebenfalls ein Ruck auf, weil eine Beschleunigung einsetzt. Dies ist der Augenblick, in dem im Speisewagen der Kaffee in der Tasse überschwappt.

Mathematisch ist der Ruck  $\kappa$  die Ableitung der Beschleunigung nach der Zeit:

$$\kappa = \frac{da}{dt} \quad (2.4)$$

In einem realen Fahrzeug wird das Differential  $dt$  nicht infinitesimal klein, weil die Achsen den Anfangspunkt des Bogens nicht alle gleichzeitig befahren; außerdem bewirkt die Federung eine Verzögerung bei der Kraftübermittlung.

Deshalb reicht es für den praktischen Gebrauch aus, mit einem endlichen  $\Delta t$  zu rechnen. Bei der Eisenbahn ist es üblich, lediglich die Differenz  $\Delta a$  ohne expliziten Bezug auf die Zeitspanne, in welcher der Wechsel der Beschleunigungen stattfindet, anzusetzen.

In der Praxis der Trassierung wird die Beschleunigung  $a$  durch eine anschaulichere Größe ersetzt (siehe *Abschnitt 3.1.2*).

### Beispiel 2.3

Ein ICE-Zug fährt durch einen Bogen mit dem Radius 5000 m. Er fährt mit einer Geschwindigkeit von 250 km/h. Wie groß ist die Änderung der Zentrifugalbeschleunigung, die am Anfang des Bogens auf die Fahrgäste wirkt, wenn zuvor eine Gerade durchfahren wurde?

In diesem Beispiel wird noch nicht von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, die Gleise in Querrichtung zu neigen. Siehe dazu *Abschnitt 2.5.2*.

#### Lösung:

Mit  $v = 250 \text{ km/h} = 69,4 \text{ m/s}$  und  $r = 5000 \text{ m}$  folgt:

$$\Delta a = a_{\text{Bogen}} - a_{\text{Gerade}} = a_{\text{Bogen}} - 0 = \frac{69,4^2}{5000} = 0,96 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Die zuträglichen Grenzen für die Beschleunigungsdifferenz liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie die Grenzen für die Beschleunigung selbst: Im Bereich um  $\Delta a = 1 \text{ m/s}^2$  schwappt das Getränk noch nicht über. Auf schnell befahrenen Strecken werden noch engere Grenzen als im obigen Beispiel gesetzt, weil Fahrgäste dort nicht mit plötzlichen Beschleunigungsänderungen rechnen. Bei großen Geschwindigkeiten wird die Ruckbe-

schränkung maßgebend, weil sie dann engere Grenzen setzt als die Beschränkung der Seitenbeschleunigung.

Um diesen unerwünschten Effekt zu vermeiden, gibt es unter Umständen die Möglichkeit, einen **Übergangsbogen** einzufügen. Diese besondere Form des Bogens beginnt mit einem unendlich großen Radius; bei Durchfahren des Übergangsbogens wird der Radius sukzessive verkleinert. Auf diese Weise wird die Beschleunigungsveränderung auf eine größere Länge und eine größere Zeit verteilt.

Die Verwendung und Bemessung von Übergangsbogen wird ausführlich in den *Abschnitten 2.5.4* und *3.2.7* erläutert.

## 2.5 Trassierungselemente

Der Fahrweg einer Bahn wird auch als „Trasse“ bezeichnet. „Trassierung“ ist das Ergebnis der Planung einer Trasse oder auch der ingenieurtechnische Prozess, der zu dem Ergebnis führt. Geometrische Elemente, die in der Trasse Anwendung finden, sind Trassierungselemente. Trassierungselemente im Grundriss sind Geraden, Kreisbogen und Übergangsbogen. Zu den im Aufriss zu betrachtenden Trassierungselementen gehören Längsneigungen („Steigung/Gefälle“).

Das **Betriebsprogramm** ist eine Vorstufe zum Fahrplan. Es enthält die wunschgemäßen Ankunfts- und Abfahrtsdaten sowie Fahrzeiten der Züge. Quelle des Betriebsprogramms sind Marktstudien der Verkehrsunternehmen.

Bei der Wahl der Trassierungselemente sind unter anderem die langfristige Nutzung der Strecke, die zum Einsatz kommenden Fahrzeuge und das **Betriebsprogramm** zu berücksichtigen.

Die bei den Bahnen angewendeten Trassierungselemente werden in den folgenden Abschnitten kurz vorgestellt. Konkrete Bemessungsparameter werden in *Kapitel 3* behandelt.

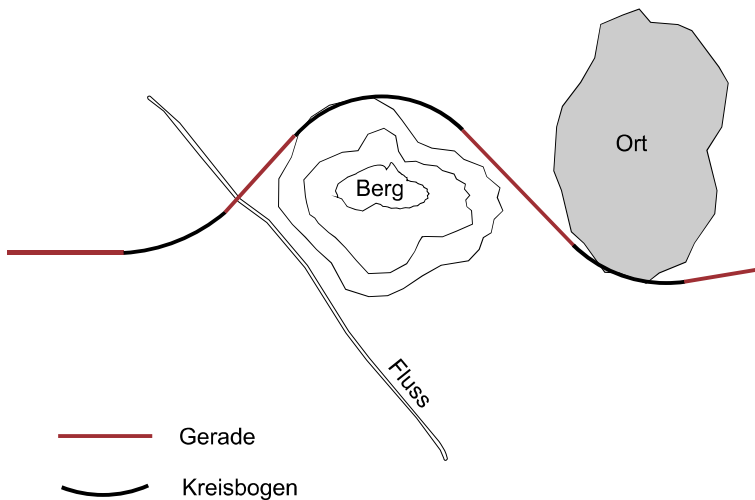
### 2.5.1 Gerade und Kreisbogen

Geraden und Kreisbogen sind die Grundelemente der Trassierung im Grundriss, Längsneigungen sind die Grundelemente im Aufriss.

Die Gerade ist die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten. Sie erlaubt die kürzeste Fahrzeit sowie die geringsten Baukosten. Aus diesem Grund wird die Verwendung von Geraden in der Trassierung bevorzugt. In der modernen Straßenplanung werden Geraden nicht gern gesehen, weil sie auf die Fahrer einschläfernd wirken und in Verbindung mit Übergängen von Gefälle- in Steigungsstrecken zu falschen Entfernungseinschätzungen führen. Diese Nachteile sind bei den Bahnen nicht von Bedeutung. Bei den Bahnen ist die Gerade daher das zu bevorzugende Trassierungselement.

Ausschließlich mit Geraden zu trassieren ist in der realen Welt niemals möglich. Wenn eine Trasse von A nach B herzustellen ist, müssen die zwischen den beiden Orten liegenden Hindernisse umgangen werden. Es entsteht eine Abfolge von Geraden und Bogen, die Bogen sind dabei in der

Regel Kreisbogen mit konstantem Radius. Sehr vereinfacht ist dies in *Bild 2.2* dargestellt. Kürzere Abfolgen von Geraden und Kreisbogen als hier dargestellt sind ebenfalls üblich.



**Bild 2.2** Grobtrassierung mit Geraden und Kreisbogen

Bei der Fahrt durch einen Kreisbogen wirkt auf die Fahrzeuge und Reisenden eine konstante Fliehkraft. Wenn diese zu groß ist, kann dies drei unangenehme Konsequenzen haben:

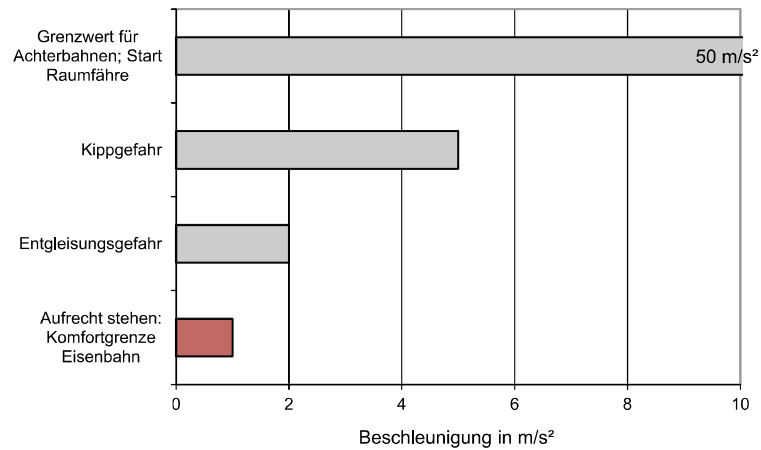
- Komfortbeeinträchtigung der Reisenden, Verrutschen von Ladung;
- Entgleisung;
- Kippen des Fahrzeugs.

Die Komfortbeeinträchtigung der Reisenden tritt bereits bei deutlich kleineren Kräften ein als Entgleisung und Kippen. Die übliche Komfortgrenze für die Seitenbeschleunigung (als masseunabhängiger Ausdruck für die Fliehkraft) liegt bei etwa  $1 \text{ m/s}^2$ . Die Grenzwerte, ab denen mit **Entgleisen** bzw. Kippen des Fahrzeugs zu rechnen ist, liegen wesentlich höher (siehe *Bild 2.3*).

Da die auftretende Seitenbeschleunigung im Kreisbogen von Radius und Geschwindigkeit abhängt, entscheidet das Verhältnis beider Werte über die Zulässigkeit einer Trassierung.

Der Radius steht dabei im Nenner, was mitunter für das Rechnen hinderlich ist, weil in Geraden  $r = \infty$  gilt. Aus diesem Grunde wird für Rechenaufgaben besser die **Krümmung  $k$**  verwendet. Sie ist definiert als der Kehrwert des Radius. In der Geraden ist  $k = 0$ .  $k \rightarrow \infty$  würde einen Knick darstellen und kommt daher in der Trassierung nicht vor.

In *Bild 2.2* ist die klassische wirtschaftliche Trassierung dargestellt: Die Bahnstrecke überquert den Fluss im rechten Winkel, um die Länge der Brücke zu minimieren. Die Trassierung um den Berg herum verringert die Längsneigungen und den Aufwand weiterer Kunstbauten, die Umgehung des Ortes vermeidet Konflikte mit Betroffenen und vorhandener Bausubstanz. Auf der anderen Seite führt diese Trassierung unter Umständen in den Bogen zu Einschränkungen der zusätzlichen Geschwindigkeit. Eine aufwendigere Trassierung mit längeren Brücke und Tunneln würde diesen Nachteil vermeiden. Die Entscheidung darüber ist unter **wirtschaftlichen** Gesichtspunkten nach einem Vergleich von Kosten und Nutzen verschiedener Varianten zu treffen.



**Bild 2.3** Folgen von Seitenbeschleunigungen

Weil es bei den Eisenbahnen nur große Radien  $> 150$  m gibt, wird der Kehrwert von  $r$  mit 1000 multipliziert:  $k = \frac{1000}{r}$ . Dies hat den Vorteil, dass bei den Rechnungen nicht zu viele Nachkommastellen mitgeführt werden müssen. Zur Vermeidung von Rundungsfehlern darf bei der Planung erst nach der dritten Nachkommastelle von  $k$  gerundet werden.

### 2.5.2 Überhöhung und Überhöhungsrampe



**Bild 2.4** Fahrt in überhöhtem Kreisbogen, Überhöhung  $\leq 100$  mm

Ein Radfahrer legt sich in der Kurve nach innen. Dadurch wirkt eine Komponente seiner Gewichtskraft der Zentrifugalkraft entgegen, sodass diese sich verringert und bei gleichem Radius eine höhere Kurvengeschwindigkeit erreicht werden kann.

Es gibt einige Züge, die sich selbst „in die Kurve legen“ können (Neigetechnik, siehe *Kapitel 3.6*). Bei diesen Zügen wird im Bogen der Wagenkasten angehoben. Die damit erreichbaren Geschwindigkeitserhöhungen sind jedoch bescheiden, und die Beschaffungskosten dieser Züge sind hoch.

Man kann die Neigung eines Zuges im Kreisbogen aber auch dadurch erreichen, dass man das Gleis entlang seiner Längsachse neigt. Dazu wird die äußere Schiene einige Zentimeter höher als die innere Schiene eingebaut. Diesen Höhenunterschied nennt man **Überhöhung**.

Wie groß die Überhöhung sein muss, hängt unter anderem von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs und dem Radius des Kreisbogens ab und wird in *Abschnitt 3.1.1* hergeleitet.

In Deutschland wird die innere Schiene in konstanter Höhe belassen und die äußere Schiene angehoben. Nachteil dieser Lösung ist die fühlbare Anhebung des Wagenkastens auf der Außenseite des Gleises. Eine Drehung des Gleises um ihre Mittelachse analog dem Vorgehen beim Straßenbau vermeidet diesen Nachteil, wird aber in Deutschland wegen des Mehraufwands bei der Absteckung und beim Einbau nicht angewendet. Das Trassierungselement wird als **Überhöhungsrampe** (gelegentlich auch kurz als „Rampe“) bezeichnet. Die einfachste Variante ist dabei, die äußere Schiene **linear** anzuheben. Im Aufriss ergibt sich dadurch das Höhenbild der beiden Schienen entsprechend *Bild 2.6*: Die rechte Schiene verbleibt in der Rechtskurve in ihrer ursprünglichen Höhenlage, während die linke Schiene allmählich angehoben wird. Alternativ kann auch eine nicht-lineare („geschwungene“) Rampenform mit expliziter Berechnung des Ausrundungsbereiches gewählt werden. Siehe dazu *Abschnitt 3.2.6*.

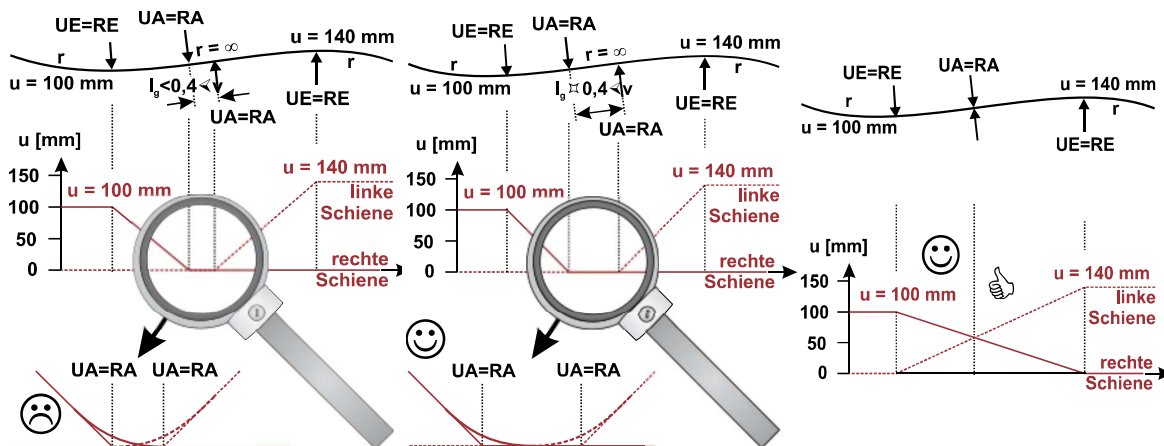
Am Anfang und am Ende der Rampe ändert sich die Anrampungsneigung plötzlich. Der „Knick“, der dadurch im Gleis entsteht, wird beim Einbau ohne rechnerischen Nachweis ausgerundet. Folgten zwei Rampen in zu kurzem Abstand einander, so würden sich die Ausrundungsbereiche überschneiden. Deshalb muss zwischen zwei Rampen, jedenfalls sofern die Anhebung des Gleises linear erfolgt, eine Zwischengerade eingefügt werden (siehe *Bild 2.6*). Als Sonderlösung für eine Trassierung ohne Zwischengerade kann die **Gleisschere**, auch **Scherenrampe** genannt, angewendet werden. Bei dieser Lösung wird die äußere Schiene abgesenkt und die innere parallel dazu angehoben (siehe *Bild 2.6* rechte Spalte).



**Bild 2.5** Überhöhung im Kreisbogen (im Bau)

**Legende**

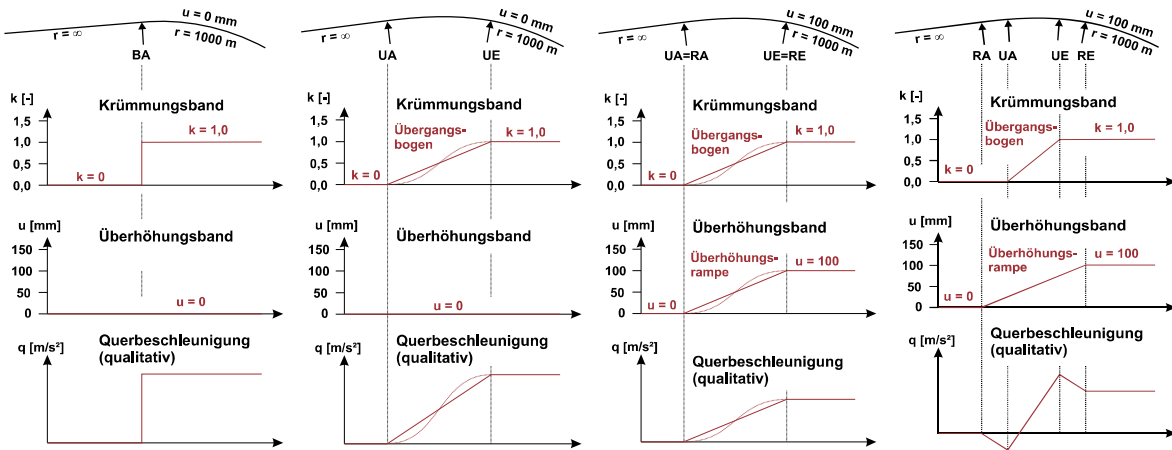
- r: Radius [m]
- u: Überhöhung [mm], die dargestellten Werte sind nur Beispielwerte!
- Planung: —
- Unter Betrieb: —
- UA: Übergangsbogenanfang
- UE: Übergangsbogenende
- RA: (Überhöhungs-) Rampenanfang



**Bild 2.6** Links: nicht zulässig: Zwischengerade zu kurz; Mitte: zulässig mit Zwischengerade. Rechts: zulässig ohne Zwischengerade (Gleisschere)



Der Übergangsbogen soll mit der Überhöhungsrampe zusammenfallen, damit die Krümmung in gleicher Weise zunimmt wie die Überhöhung. Würde der kürzere Übergangsbogen nicht auf die Länge der längeren Überhöhungsrampe gestreckt, so würde die Überhöhung schon in der Geraden beginnen. Der Beschleunigungsverlauf würde so aussehen wie in *Bild 2.7 rechts*. Die Zusammenlegung von Überhöhungsrampe und Übergangsbogen führt zu einem höheren Fahrkomfort. Das rechnerisch kürzere der beiden Trassierungselemente wird auf die Länge des längeren gestreckt. In den meisten Fällen ist die Überhöhungsrampe rechnerisch länger (siehe dazu *Kapitel 3.2*).



**Bild 2.7** Krümmungs- und Beschleunigungsverlauf beim Übergang zwischen Gerade und Kreisbogen

**Links:** ohne Übergangsbogen; **2. von links:** ohne Überhöhung mit Übergangsbogen; **3. von links:** ohne Überhöhung mit Übergangsbogen und Überhöhung; **rechts:** Übergangsbogen kürzer als die Überhöhungsrampe (zu vermeiden)

Legende	
r:	Radius [m]
u:	Überhöhung [mm]
k:	Krümmung [-] ( $=1000/r$ )
q:	Querbeschleunigung [ $m/s^2$ ]
UA:	Übergangsbogenanfang
UE:	Übergangsbogenende
RA:	(Überhöhungs-) Rampenanfang
RE:	(Überhöhungs-) Rampenende

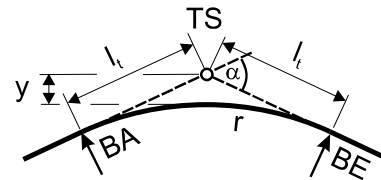
Übergangsbögen und Überhöhungsrampen	
Übergangsbogen mit gerader Krümmungslinie bzw. gerader Überhöhungsrampe	—
Übergangsbogen mit geschwungener Krümmungslinie bzw. geschwungene Überhöhungsrampe	⋯

**Legende und Erläuterung zu Bild 2.7**

Der Abstand zwischen dem Tangentschnittpunkt und dem Anfang sowie dem Ende des Kreisbogens wird als Tangentenlänge bezeichnet. Die Tangentenlänge beträgt

$$l_t = r \cdot \tan \frac{\alpha}{2}. \quad (2.5)$$

Dabei sind  $r$  der Radius des Kreisbogens und  $\alpha$  der in *Bild 2.8* angegebene (spitze) Winkel zwischen den Tangenten.



**Bild 2.8** Darstellung eines Bogens im Lageplan

2

### 2.5.3 Übergangsbogen

Beim unmittelbaren Übergang von der Geraden in den Kreisbogen und umgekehrt (Abschn. 2.5.3) ist die plötzliche Änderung des Radius unangenehm spürbar. Um diese Form des Rucks zu vermeiden, ist es üblich, einen Bogen einzuschalten, der am Ende der Geraden mit dem Radius  $r = \infty$  ( $k = 0$ ) beginnt und am Beginn des Bogens mit dem Bogenradius endet. Theoretisch kommen für diesen Zweck verschiedene Bogenformen in Frage. Am gebräuchlichsten ist die auch im Straßenbau verwendete Klothoide. Bei ihr wächst die Krümmung linear mit der Länge (**lineare Krümmungslinie**). Daneben gibt es auch geschwungene Krümmungslinien, die in *Abschnitt 3.2.7* näher betrachtet werden.

In *Bild 2.7* ist auch der Krümmungsverlauf von Übergangsbogen, die als Klothoide ausgeführt sind, in Form von Krümmungsbildern dargestellt. Anhand der Krümmungsbilder zeigt sich der Vorteil durch die Verwendung der Krümmung anstelle des Radius: Auf der  $x$ -Achse ist die Kilometrierung der Strecke dargestellt, auf der  $y$ -Achse wird die Krümmung abgetragen. In der Geraden ist die Krümmung Null (Radius unendlich groß), im Kreisbogen hat die Krümmung einen von Null verschiedenen, konstanten Wert (entspricht konstantem Radius); dazwischen wächst die Krümmung linear an. Wäre kein Übergangsbogen vorhanden, so würde die Krümmung sprunghaft anwachsen (vgl. *Bild 2.7 links*).

Längs jeder Bahnstrecke sind Kilometerangaben angebracht (Kilometrierung). In der Richtung wachsender Kilometerangabe gilt die Krümmung einer Rechtskurve als positiv, die Krümmung einer Linkskurve als negativ.

Am Beginn und am Ende des Übergangsbogens tritt zwar kein Krümmungssprung und damit auch kein Ruck auf, wohl aber wegen des Knicks im Krümmungsverlauf eine plötzliche Änderung der Krümmungsänderung. Mit nichtlinearen Formen des Übergangsbogens lassen sich diese Knicke vermeiden. Für den Fahrkomfort spielt dies jedoch eine geringe Rolle.

# Sachwortverzeichnis

## A

Ablaufberg 168f  
 Abrückmaß 26, 44, 48  
 Abspannmast 134f  
 Abspannung 134, 136  
 Abstellbahnhof 166  
 Abzweigstelle 90f, 163, 174, 182f  
 Achszähler 201f  
 Akkutriebwagen 132  
 Allgemeines Eisenbahngesetz (AEG) 231  
 Andreaskreuz 211, 227  
 Annäherungsfahrzeit 214ff, 218  
 Anrampungsneigung 23, 41  
 Aufsetz-IBP-Mast 135  
 Aufsetzwinkelmast 135f  
 Ausfahrgruppe 169, 172f  
 Ausfahrtsignal 179f, 182ff, 191, 215  
 Ausführungsplanung 27  
 Ausleger 135f  
 Ausnahmewert 50  
 Ausrundungsbereich 23  
 Außenbogenweiche 45, 75f, 78f, 81, 85, 88f, 100, 102ff  
 Automatic Train Control (ATC) 192f  
 Automatic Train Protection (ATP) 192f, 196  
 automatische Fahr- und Bremssteuerung (AFB) 198  
 automatische Freimeldeeinrichtung 212

## B

Backenschiene 76, 118  
 Bahnhof 68f, 72, 74, 91, 96f, 109, 116, 133, 135, 137, 151ff, 163ff, 178f, 182ff, 190ff, 199, 201ff, 210f, 215f, 218, 221f  
 Bahnhofsblock 206f  
 Bahnübergang 37, 175, 190, 207, 211ff, 228  
 Bake 200, 228  
 Balise 200  
 Bau- und Betriebsordnung für Straßen-

bahnen (BOStrab) 231  
 Baugesetzbuch 234  
 Befehl 198, 204ff, 210f  
 Begegnungsbahnhof 154, 156  
 Beharrungsgeschwindigkeit 26  
 behinderungsfrei 217f, 221  
 Bergbremse 169  
 Beschaffungskosten 22  
 Beschleunigung 13, 16ff, 24, 27, 29ff, 34, 36f, 39, 43, 49ff, 66, 80, 82, 100, 139ff, 149f, 218  
 Beschleunigungsänderung 19, 27, 52  
 Beschleunigungsdifferenz 19, 39  
 Betriebsprogramm 20, 28, 154  
 Betriebsüberholungsgleis 158  
 Betriebszentrale 204  
 Bitumenbauweise 117  
 Blockabschnitt 185, 217  
 BLOSS-Rampe 40, 42, 44f  
 Bogenkreuzung 83, 93  
 Bogenkreuzungsweiche 83  
 Bogenradius 25, 32, 35, 76, 78, 82, 147  
 Bogenweiche 45, 63, 66, 68, 75ff, 85ff, 92f, 98, 100, 102ff  
 Bremse 13, 17, 19, 48, 143ff, 152, 168f, 184, 188, 190, 200f  
 Bremsprobe 144, 169  
 Bundesschienenwegeausbaugesetz (BSchWAG) 226, 228

## C

Container 167, 170ff

## D

Deutsche Bahn 32f, 36, 40, 52, 63, 116, 209, 219, 224ff, 228, 231  
 Deutsche Bundesbahn 225, 229ff  
 Deutsche Reichsbahn 225, 229  
 Drehgestell 15, 35, 41, 44, 145, 147, 149

Dr-Stellwerk 208f  
 Druckluftbremse 143f  
 Durchgangsbahnhof 154, 156  
 Durchrutschweg 177ff, 184f, 192, 194f, 202, 215, 216, 218

## E

Einfahrgeschwindigkeit 179f, 191  
 Einfahrgruppe 168  
 Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) 33f, 36f, 42, 48, 152, 162, 231f  
 Eisenbahnbundesamt (EBA) 34, 223, 225, 228, 230  
 Eisenbahn-Infrastrukturunternehmer (EIU) 149, 153, 223ff, 228  
 Eisenbahn-Signalordnung (ESO) 230f  
 Eisenbahnüberführung 227  
 Eisenbahn-Verkehrsunternehmen (EVU) 223ff  
 Elektronisches Stellwerk 203f, 206ff  
 Entwässerung 72, 114, 123  
 Entwurfsplanung 27  
 Ermessensgrenze 33f, 36ff, 40, 42, 44, 50, 52, 60, 82, 98  
 Ersatzsignal 210  
 European Train Control System (ETCS) 199f, 231

## F

Fahrdienstleiter 205ff  
 Fahrdrabt 132f, 145  
 Fahrdrabtklemme 133  
 Fahrdynamik 139, 147  
 Fahrleitung 123, 132f, 190, 199  
 Fahrplan 20, 122, 139, 152ff, 181, 190, 213ff, 226, 231  
 fahrplanunabhängig 222  
 Fahrstraße 175, 180f, 183, 193, 202f, 204, 206ff, 213f, 216  
 Fahrstraßenauflösezeit 213f  
 Fahrstraßenbildezeit 213f

Fahrweg 13f, 20, 29, 63, 107, 152f, 169, 174ff, 179ff, 184ff, 190, 192f, 200, 203ff, 208f, 214, 224, 226  
 Fahrzeit 16, 20, 28, 34, 112, 139ff, 154, 186, 190, 198, 213ff, 218ff  
 Fahrzeugbegrenzungslinie 121  
 Fahrzeugkonzept 147f  
 Fail-Safe-Technik/Prinzip 200ff, 208, 209  
 Federbügel 111  
 Fernüberwachung 211  
 Feste Fahrbahn 37, 60f, 112, 114, 116f  
 Flankenfahrt 179f  
 Fliehkraft 15, 17f, 21, 27, 29, 35  
 Fließverfahren 172f  
 Flügelzugkonzept 149  
 Folgeverspätung 218, 220f  
 Formsignal 178, 187ff, 191, 194, 200, 204  
 Freimeldeeinrichtung 211  
 Frostschuttschicht 107, 113

**G**

Ganzzug 167  
 Gefälle 20, 26, 48, 168f, 179  
 Gemeindeverkehrsfinanzierungsge-  
 setz (GVFG) 226, 229  
 Gerade Überhöhungsrampe 41f, 44  
 Geschwindigkeits-Zugkraft-Diagramm  
 142  
 geschwungene Überhöhungsrampe  
 40, 42  
 Gleisabstand 45f, 71ff, 87f, 93, 100,  
 120, 123, 127ff, 135, 155, 185  
 Gleisanlage 114, 154, 157, 166f, 192,  
 204  
 Gleisbauverfahren 115  
 Gleisbildstellwerk 208  
 Gleisbogen 14, 16, 35, 66f, 69f, 74,  
 88, 105, 178  
 Gleisquerschnitt 121  
 Gleisschotter s. Schotterbett  
 Gleissperre 181  
 Gleisstromkreis 108, 202f  
 Gleistragplattensystem 117  
 Gleisverbindung 69, 91f, 172  
 Gleisverziehung 45ff, 155  
 Gleiswechsel 69f, 88, 185  
 Gleitreibung 13, 147f

Grennzeichen 177f  
 Güterverkehr 26, 48, 97, 115, 144,  
 146, 148, 167f, 172, 224ff

**H**

H-Tafel 185  
 Haftreibung 13, 141f, 150  
 Hauptgleis 35, 130, 136, 157f, 191,  
 199  
 Hauptpersonenzuggleis 158  
 Hauptsignal 174, 183ff, 212ff  
 Heißläuferortungsanlage 144  
 Herzstück 64ff, 76, 83, 93ff, 103f, 107,  
 119f  
 Herzstückspitze 67, 69, 83, 93, 103f,  
 119f, 158  
 Holzschwelle 109ff, 120

**I**

interoperabilität 127, 231  
 induktive Zugbeeinflussung (INDUSI)  
 194  
 Innenbogenweiche 75f, 78, 81, 86,  
 88f, 102ff

**K**

Kettenwerks oberleitung 132  
 Kilometrierung 25, 79  
 Kinematik 139  
 kinematischer Regellichtraum 121  
 Klammerspitzenverschluss 118  
 Klemmplatte 111  
 Klothoide 25f, 42, 45, 90f  
 Klothoidenweiche 80, 83, 90ff  
 Klotzbremse 144  
 Knotenbahnhof 170  
 Knotenpunktsystem 170  
 kombinierter Verkehr 167, 170ff  
 Kopfbahnhof 154, 56, 180  
 Kreisbogen 18, 20ff, 34f, 41, 45f, 49f,  
 53, 63, 66, 69, 74, 76, 90f, 97  
 Kreuzung 36f, 63, 83, 93ff, 107, 153ff,  
 163, 174, 198f, 221, 227  
 Kreuzungsbahnhof 154ff  
 Kreuzungsweiche 36f, 63, 83, 93ff

Krümmung 21, 24f, 41ff, 53, 56, 59,  
 61, 67, 73, 75ff, 84ff, 94, 100, 102  
 Krümmungssprung 25, 43  
 Ks-System 188ff, 191  
 Kupplung 35, 72, 146f, 150, 168  
 Kurvengeschwindigkeit 22  
 Kurvenradien 16

**L**

Lageplan 25f, 53, 64f, 68, 75, 91f,  
 153, 159, 177f, 186f  
 Langsamfahrstelle 112, 140f, 188,  
 210, 219  
 Längsneigung 20f, 26f, 48f, 58, 138f,  
 218, 232  
 Längsspannweite 128, 134  
 lichte Höhe 129, 132f, 137f  
 Lichtraum(-profil) 121ff, 127, 137, 162  
 Linienbetrieb 154, 157  
 Linienzugbeeinflussung (LZB) 198ff  
 Lokbespannter Zug 148, 150  
 Loop 200  
 LZB 198ff

**M**

Magnetschienenbremse 143, 145  
 Mechanisches Stellwerk 68, 202f,  
 204, 206f, 214  
 Mehrabschnittssystem 189f, 198  
 Mindestlänge 34, 39, 41, 43f, 46, 53,  
 57, 73f  
 Mindestzugfolgezeit 217ff, 221f

**N**

Nachordnungsgruppe 169  
 Nahüberwachung 211  
 Nebengleis 88, 108, 128, 159  
 Neigetechnik 22, 51f, 58, 150  
 Neigungswechsel 26f, 48, 57  
 nichtbundeseigene Eisenbahn 223  
 nichttechnische Sicherung 210  
 Nutzbremse 143, 145

**O**

Oberbau 36f, 52f, 60, 107, 111ff, 116f, 123, 126, 228  
 Oberleitung 14, 132ff  
 Oberleitungsportal 135  
 Öffentlicher Nahverkehr 163, 228f  
 Organisation 213, 223

**P**

PANDROL 111  
 Personenbahnhof 166  
 Planfeststellung 223, 232f  
 Planmsschutzschicht 107, 113ff  
 pneumatische Bremse 143  
 Pufferzeit 218ff  
 Punktförmige Zugbeeinflussung (PZB 90) 193ff, 200f

**Q**

Querschnitt 116, 120f, 123ff, 136  
 Querseil 135  
 Quertragwerk 135f

**R**

Radlenker 35, 64, 108, 119  
 Rampe 22ff, 33f, 38ff, 44, 50, 52ff, 72, 88, 98, 121, 162, 168, 171  
 Rangierbahnhof 167ff, 172  
 Rangierfahrt 151f, 163, 172, 176, 178, 180ff, 187, 203  
 Rangierstraße 181, 203  
 Räumfahrzeit 213f, 218  
 Räumungsprüfung 209  
 Reaktionszeit 184, 216  
 Redundanz 200  
 Regelbauart der Oberleitung 133  
 Regelwert 33f, 36f, 42, 50, 56, 73, 82  
 Regionalisierungsgesetz 226, 228  
 Reibungsbremse 144f  
 reibungsfreie Bremsen 143, 145  
 Rheda 116f  
 Richtungsbetrieb 154, 157, 164, 221  
 Richtungsgleis(-bremse) 169  
 Rillenfahrdrabt 132  
 Rollreibung 13, 148, 167

Rollwiderstand 14  
 Ruck 19f, 25, 29, 31, 40, 46, 70, 80ff, 84ff, 89ff, 97ff  
 Ruckbeschränkung 19f  
 Rucknachweis 31, 40, 46, 70, 80f, 84ff, 89f, 94ff

**S**

Satellit 170  
 Sattelanhänger 171  
 Schaltgruppe 136f, 208  
 Scharfenbergkupplung 146f  
 Scheibenbremse 1404  
 Schienenauszug 36f, 83  
 Schienenbefestigung 110f, 117, 120  
 Schienennagel 111  
 Schleifbügel 132  
 Schleifstück 133  
 Schlusslicht 146, 209  
 Schotterbett 36f, 52, 56, 60, 107, 112, 115  
 Schraubenkupplung 146f  
 Schwelle 63ff, 70ff, 88, 97, 108ff, 115ff, 120, 127  
 Schwellenkopf 112  
 Schwellenlose Bauweise 117  
 Schwellenunterkante 112  
 Seitenbeschleunigung 20ff, 29, 31, 36f, 39, 43, 50f, 66, 100  
 Sicherheitsraum 123, 128  
 Sicherungssystem 13  
 Sichtzeit 213ff  
 Signal 71, 121, 131, 139, 153f, 163, 174ff, 228, 230ff  
 Signalabhängigkeit 175ff, 180, 185, 193, 201, 203, 204  
 Signalbegriff 187f  
 Signaltechnik 139, 174f, 197, 231  
 Simulation 221f  
 S-Kurve 45, 59, 70, 96  
 Spannungsgewicht 134  
 Spurführung 14f, 108  
 Spurkranz 15, 35, 147  
 Spurspiel 14  
 Stahlschwelle 110f  
 Stammgleis 63f, 66, 68, 76, 78f, 82ff, 89, 91, 98ff, 158  
 Standverfahren 173  
 Steigung 16, 20, 26, 48, 168, 179, 190

Stellwerk 63, 68, 152f, 176, 181, 185, 189f, 201ff, 214  
 Straßenüberführung 227  
 Streckenblock 176, 205f  
 Streckentrenner 136  
 Streckentrennung 136f  
 Stromabnehmer 133, 136  
 Stromschiene 132  
 Stromschienenoberleitung 132f  
 Stückgutverkehr 167

**T**

Talbremse 169  
 Tangentenlänge 25, 51, 64f, 76, 91  
 Technische Spezifikation Interoperabilität (TSI) 32, 48, 74, 231f  
 Teilauflösung 216  
 Tonfrequenz-Gleisstromkreis 202  
 Trageil 132f, 138  
 Transponder 200  
 Trasse 16, 20, 27, 232  
 Trassenfindung 27  
 Trassenführung 27  
 Trassierung 16, 19ff, 23f, 26, 28f, 31ff, 36ff, 41, 43, 46, 51ff, 62, 72f, 97, 107, 117, 120, 124, 139, 147, 150, 227, 231  
 Trassierungselement 20, 23f, 31ff, 37f, 44, 46, 73  
 Trassierungsparameter 29, 33, 36, 43  
 Trennungsbahnhof 153ff, 164f  
 Triebfahrzeug 132, 141ff, 145, 147f, 150, 152, 156, 159, 169, 174, 181, 186ff, 190, 192ff, 212, 214f, 231  
 Triebkopfbzug 149  
 Triebwagenzug 149f, 164, 199  
 Tunnel 21, 110, 116f, 123, 125, 133, 200

**U**

Überführung 49, 153, 157, 166, 212, 227  
 Überführungsfahrt 166  
 Übergangsbogen 20, 24ff, 31, 34f, 38f, 42ff, 52f, 55ff, 70, 80f, 90, 98f  
 Übergangsbogen nach Bloss 40, 42, 44, 56f

Überhöhung 18, 22ff, 27, 29ff, 43ff, 50ff, 58ff, 66, 69, 72, 75f, 82ff, 88ff, 97ff, 115, 117, 120, 124, 137f, 230  
 Überhöhungsfehlbetrag 30f, 36f, 42, 51f, 59f, 66, 69, 82f, 103, 120, 230  
 Überhöhungsformel, -nachweis 29, 31f, 35, 51, 54, 66, 76, 82ff, 89f, 97  
 Überhöhungsrampe 22ff, 33f, 38ff, 44, 50, 52, 54f, 72, 88, 98  
 Überholungsbahnhof 154ff, 182  
 Überholungsgleis 155, 158, 183, 216  
 Unterbau 107, 126

## V

verkehrstechnische Sicherung 210f  
 Verkehrsüberholungsgleis 156  
 Verschluss 118, 193, 203f, 206f  
 Verspätung 112, 196, 218ff  
 Vertikalbeschleunigung 49f  
 Vorentwurfsplanung 27f, 70, 86, 88  
 Vorsignal 182, 186ff, 192ff, 197f, 201, 216f

## W

Wachsamkeitstaste 195  
 Wagenkasten 15, 22f, 51f  
 Wagenladungsverkehr 167f  
 Wärter 205ff, 211  
 Wartezeit 153, 181, 221, 222  
 W-Befestigung 111  
 Wechselbehälter 167, 171  
 Weichenbau 75, 83, 107, 118  
 Weichengrundform 78f, 81, 84ff, 89, 98, 101, 103ff  
 Weichenneigung 67, 70, 72, 74, 87  
 Weichenschwelle 71, 120  
 Weichentyp 62, 68, 90f, 97, 119, 187  
 Weichenverbindung 45, 67, 69ff, 86ff, 92f, 96, 100, 102ff, 124, 127, 154f, 157f, 164, 183, 185  
 Wendezug 150  
 Wiener Bogen® 44f  
 Wirbelstrombremse 145

## Z

Zentrifugalkraft 17f, 22, 29f, 52  
 Zentrifugalbeschleunigung 18f, 82  
 ZÜBLIN 116  
 Zugbeeinflussung 177, 192ff, 196ff, 202  
 Zugstraße 181, 202  
 Zunge 63, 69, 90, 94ff, 118  
 Zungenweiche 63  
 Zustimmung 205  
 Zustimmungswert 33, 36f, 39f, 42, 50  
 Zwangspunkt 37, 60f, 82, 162  
 Zweiggleis 31, 63ff, 72ff, 89ff, 93ff, 98ff, 106, 157, 177f, 187  
 Zweiggleisbogen 66f, 69f, 74, 178  
 Zweiggleisgeschwindigkeit 67f, 82, 85f, 89f, 101, 103f, 187  
 Zweiggleisradius 66, 68, 75f, 84ff, 93, 95, 99  
 Zwischengerade 23, 34f, 45f, 48, 70ff, 88, 91  
 Zwischensignal 185f