

2.1.3 Gleisgeometrie

Die Gleisgeometrie umfasst alle Parameter zur Definition der Gleislage bezüglich horizontaler und vertikaler Lage und der Überhöhung (7-Linien-Modell). Sie wird in den Gleisnetzdaten abgelegt. Diese bestehen aus Lagepunkten, Höhenpunkten und Überhöhungspunkten. Weiterhin gehören linienförmige Elemente dazu:

- Lage – rechtes und linkes Gleis,
- Gradiente – rechtes und linkes Gleis,
- Überhöhung – rechtes und linkes Gleis,
- Kilometrierung (auch Stationierung).

Die einzelnen Elemente im „7-Linien-Modell“ werden durch ihre Parameter beschrieben.

Spezielle Gleisnetzdefinitionen garantieren die syntaktisch korrekte Verknüpfung von Punkt- und Linieninformationen zum „7-Linien-Modell“.

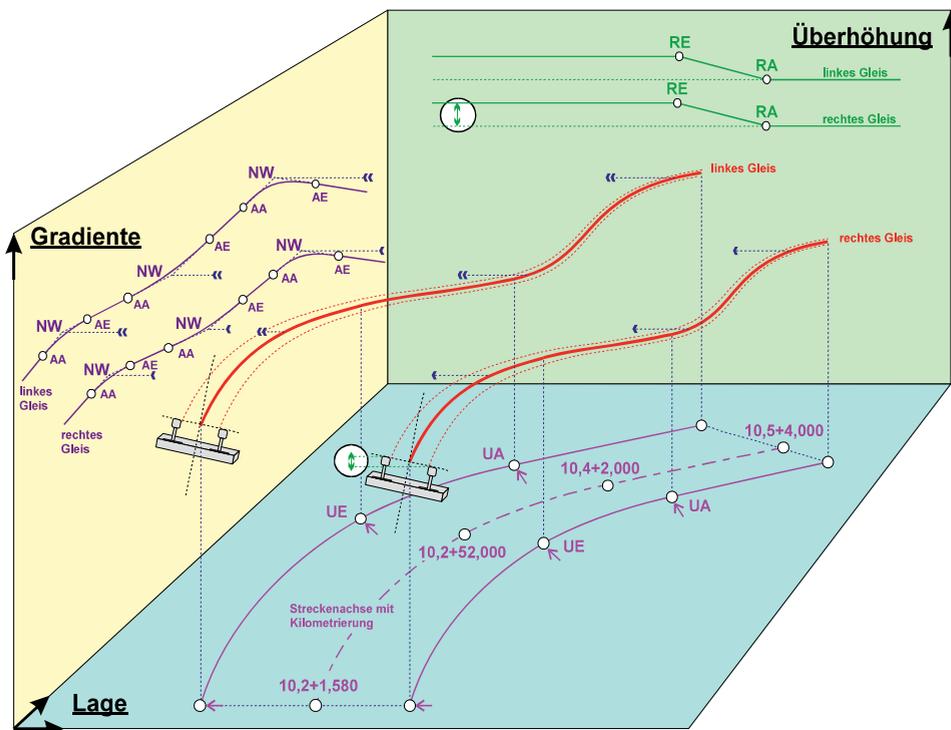


Abb. 2.3: „7-Linien-Modell“ (Gleisnetzdaten – Geometrie) (Deutsche Bahn)

Die Koordinaten der Gleisnetzdaten dienen sowohl der Steuerung von Gleisbaumaschinen als auch der Berechnung der absoluten Gleisgeometrie.

Innere und äußere Gleisgeometrie

Bei der Beurteilung der Gleisgeometrie wird nach äußerer (absoluter) und innerer (relativer) Geometrie unterschieden. Die absolute Lage, Höhe, Längs- und Querneigung des Gleises wird als äußere Geometrie bezeichnet, deren Änderung längs der Strecke als innere Geometrie. Die äußere Geometrie stellt den Bezug zur Umgebung her, die innere Geometrie betrachtet die Form des Gleises.

Die innere Geometrie hat auf die Fahrdynamik, den Verschleiß und den Fahrkomfort unmittelbaren Einfluss. Daher kommt ihr beim Beurteilen der Gleislagequalität besondere Beachtung zu. Dabei ist der geometrische Bezug des Gleiskörpers zu den benachbarten Bauwerken und Anlagen, wie Bahnsteigen, Tunnel, Brücken und insbesondere der Oberleitungsanlage, also die äußere Geometrie, nicht zu vernachlässigen.

2.1.3.1 Relative Gleislage

Bei der Gleisinstandsetzung wird ein vorhandenes, unter Betriebsbedingungen deformiertes Gleis so korrigiert, dass es nach der maschinellen Bearbeitung nahezu wieder der theoretisch festgelegten Gleislage und -höhe entspricht. Dafür sind folgende technologische Schritte notwendig:

- Feststellen von Betrag und Richtung der Gleisdeformation (Istgleislage),
- Verschieben des Gleises in die theoretisch richtige Lage (Sollgleislage).

Die horizontale Gleisverschiebung wird durch das sog. Richten, die vertikale durch das sog. Stopfen realisiert. Die Arbeiten werden meist mit Gleisstopf- und Richtmaschinen oder auch mit speziellen Kleinmaschinen durchgeführt. Bei einer Gleisinstandsetzung sind vertikal nur Hebungen möglich.

Ein liegendes, deformiertes Gleis wird, wie in Abbildung 2.4 dargestellt, von der Lage E_0 (Standlinie) in die Lage E_1 überführt. Wenn die Gleislage E_1 auf E_0 bezogen betrachtet wird, spricht man von der relativen Gleislage. Diese kann wie folgt definiert werden:

Lage und Höhe von Gleispunkten, bezogen auf benachbarte Punkte desselben Gleises bzw. zwischen zwei verschiedenen Linienzügen E_0 und E_1 (z. B. zwischen der Gleisachse eines deformierten, vorhandenen Gleises und dessen theoretisch richtigen Verlaufs in horizontaler und vertikaler Richtung). Die relative Gleislage sagt nichts über die Lage und Höhe der Gleispunkte in Bezug zu Punkten außerhalb der Gleise (z. B. Signale, Maste, Gebäude und andere Zwangspunkte) aus (siehe auch: Absolute Gleislage) (Autorenkollektiv 1981).

Die mathematischen Zusammenhänge der beiden Linienzüge (E_0 und E_1) in horizontaler Richtung wurden in der Vergangenheit in Verfahren zur Bearbeitung der relativen Gleislage dargestellt, z. B. Winkelbildverfahren und Abstandsbildverfahren.

In vertikaler Richtung werden sie im Allgemeinen durch einfache Berechnungen, wie im Kapitel 2.6 beschrieben, ausgeführt.

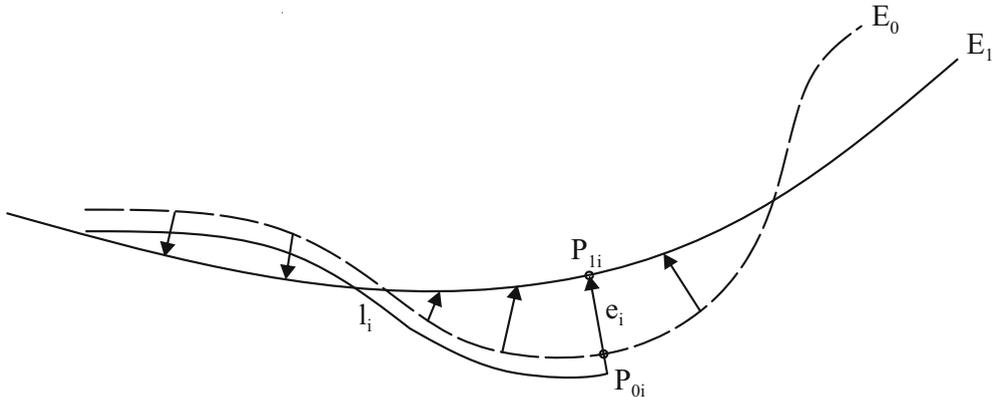


Abb. 2.4: Relative Lage zweier Gleisachsen

Die relative Gleislage wird durch die Größen

- l_i : Bogenlänge vom Nullpunkt der Linie bis zum Punkt P_{oi} ,
- e_i : Länge der Normalen zwischen den äquivalenten Punkten P_{oi} und P_{li} der Linien E_0 und E_1 ,
- Δh : Größe des Höhenunterschieds zwischen den äquivalenten Punkten P_{oi} und P_{li} der Linien E_0 und E_1

bestimmt.

Die relative Gleisgeometrie ist wie folgt definiert:

Lage und Höhe von Gleispunkten, bezogen auf benachbarte Punkte desselben Gleises. Die relative Gleisgeometrie hat keinen Bezug zu Punkten außerhalb des Gleises, z. B. zu Zwangspunkten (UIC-Kodex 728 E (2009)).

2.1.3.2 Absolute Gleislage

Bei der Gleiserneuerung ist dagegen das deformierte Gleis zum Zeitpunkt des Bauens nicht mehr vorhanden. Die theoretisch festgelegte Gleisgeometrie muss sich hierbei auf Punkte beziehen, die mit dem Gleis keinen unmittelbaren Zusammenhang haben (Abb. 2.5). Die Gleisgeometrie wird durch ein einheitliches Bezugssystem, das in der Örtlichkeit durch Festpunkte vermarktet sein kann, reproduziert. Damit kann die absolute Gleislage bestimmt werden.

Die absolute Gleisgeometrie ist wie folgt definiert:

In einem übergeordneten Bezugssystem positionierte Grundlage der Gleisdefinition mittels einer mathematisch definierten, kontinuierlichen Folge von Geometrieelementen in Lage, Höhe und Überhöhung, als Resultat der Gleisprojektierung und als Grundlage von Absteckung und Unterhalt der Gleise (UIC-Kodex 728 E (2009)).

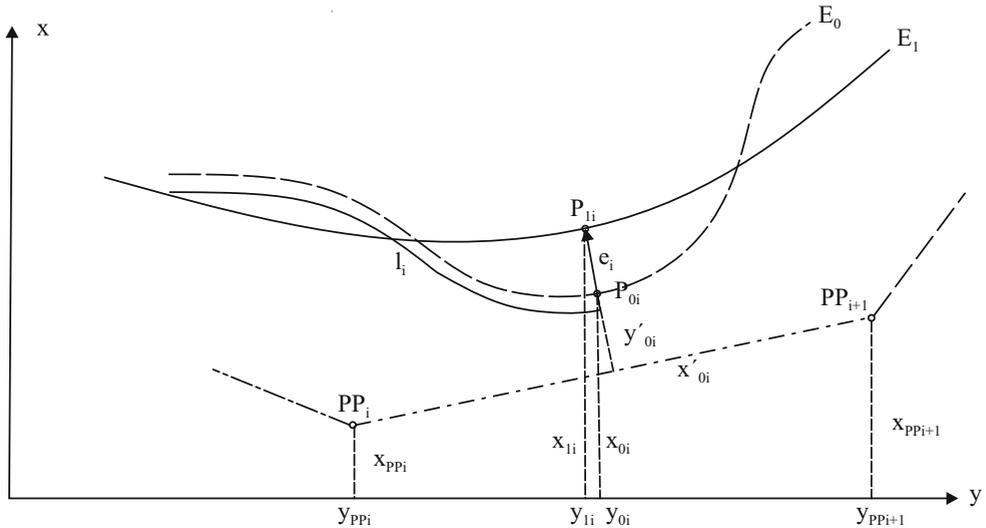


Abb. 2.5: Absolute und relative Gleislage zweier Gleisachsen

Die absolute Gleislage ist durch die Koordinaten

- y und x (Landes- oder übergeordnetes Koordinatensystem),
- y' und x' (lokales Koordinatensystem)

festgelegt.

2.1.3.3 Vergleich relative und absolute Gleislage

Die relative Gleislage sagt a priori nichts über die absolute Gleislage aus. Sie kann jedoch zur Bestimmung der absoluten Lage von E_1 verwandt werden, wenn diese von E_0 bekannt ist und die Abstandsmaße e_i zur Verfügung stehen (Abb. 2.5).

Eine Unterscheidung beider Begriffe ist notwendig, da sich die Mess- und Auswertverfahren zur Festlegung der relativen und absoluten Gleislage hinsichtlich des Messaufwands und der Genauigkeit wesentlich voneinander unterscheiden. Im Rahmen einer Gleisinstandsetzung kann das vorhandene, mit Lage- und Höhenabweichungen behaftete Gleis mit Gleisricht- und -stopfverfahren in den meisten Fällen sofort mit praktischer Genauigkeit in die Sollgleislage gebracht werden. Bei der Gleiserneuerung ist dies nicht möglich, da das deformierte Gleis ausgebaut worden ist. Hier wird mithilfe der im Handbuch Ingenieurgeodäsie (Band Grundlagen, Kap. 7 und 9) beschriebenen Verfahren zunächst die Trasse in die Örtlichkeit übertragen. Es handelt sich dabei um eine Folge von Einzelpunkten, die in einem definierten Abstand parallel zur Gleislage vermarktet werden. Die Punkte der Absteckungskurve sind die Grundlage für die Verlegung des Gleises. Die in den verschiedenen Richtlinien der Bahnen angegebene Vermessungsgenauigkeit für die Absteckung bezieht sich ausschließlich auf die Absteckungskurve. Zur Beurteilung der Gleislagefehler kommen zu diesen noch die Verlegefehler des Gleises hinzu, die im Wesentlichen vom Gleisbauverfahren und von der Sorgfalt, mit der die Gleisbauarbeiten ausgeführt wurden, abhängen. Dadurch ist es nicht von vornherein möglich, von

der Genauigkeit der Absteckungskurve auf die Genauigkeit der verlegten Gleisachse zu schließen. Daraus geht auch hervor, dass die Genauigkeitsgrenzen benachbarter Pfeilhöhen die relative Lage betreffen und mit der Genauigkeit der Absteckungskurve (absolute Gleislage) keinen unmittelbaren Zusammenhang haben können.

Das Gleis – auch ein mit hoher Genauigkeit verlegtes – wird im Laufe der Betriebsbelastung deformiert. Die Gleisdeformationen sind umso kleiner, je besser die Ist- und Sollwerte der Gleislage übereinstimmen. Die Überschreitung der Fliehbeschleunigung ist die Hauptursache für die horizontalen Gleisdeformationen. Da die Größe der Fliehbeschleunigung, wie aus Gleichung (2.1) hervorgeht – konstante Geschwindigkeit vorausgesetzt –, nur von der Krümmung k abhängt, ist zur Vermeidung von Lagedeformationen die Einhaltung einer hohen Krümmungsgenauigkeit notwendig.

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

- Beim Bau und bei der Instandsetzung von Gleisen ist auf die Herstellung einer Krümmung zu achten, die der Sollkrümmung sehr nahekommt.
- Die Herstellung der Sollwerte der absoluten bzw. relativen Gleislage schließt die Herstellung der entsprechenden Krümmung mit ein.
- Die Herstellung der Sollkrümmung ist dagegen von der absoluten bzw. relativen Gleislage vollkommen unabhängig, Gleichung (2.1) hat keine Beziehungen zur absoluten bzw. relativen Gleislage.

Diese Zusammenhänge werden in Abbildung 2.6 veranschaulicht, wobei mit E_0 nicht die Standlinie, sondern ein alternativer Entwurf gemeint ist.

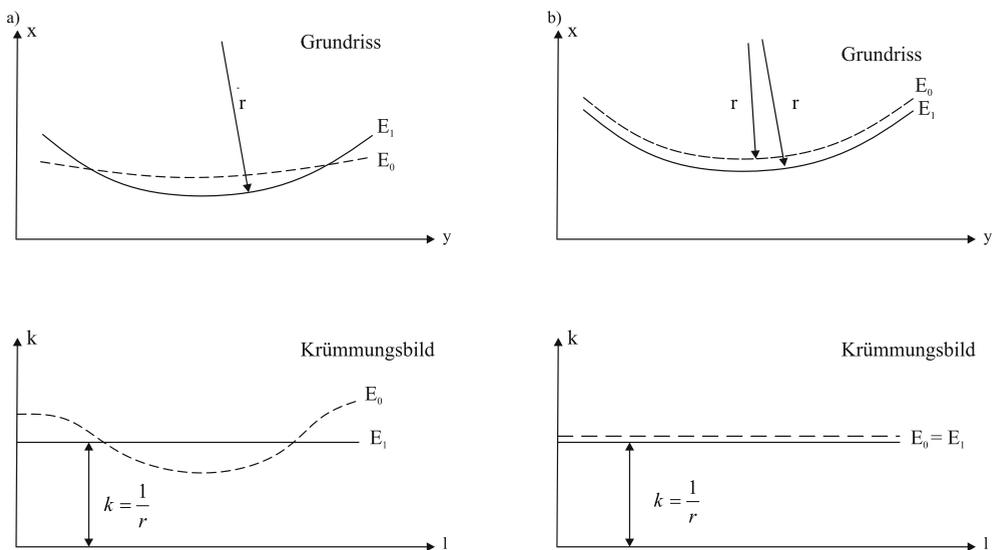


Abb. 2.6: Zusammenhang zwischen Lage und Krümmung der Entwürfe E_0 und E_1 : a) Die Lage von E_1 schmiegt sich der von E_0 an, die Krümmung beider Linien differiert; b) E_0 und E_1 haben eine unterschiedliche absolute Lage, jedoch gleiche Krümmung

Die geplante absolute Gleislage E_j (ausgezogene Linie) hat, wie in Abbildung 2.6a veranschaulicht, die richtige Krümmung (Sollwert).

Der mit Lageungenauigkeiten behaftete Linienzug E_o schmiegt sich der Sollgleislage E_j an. Es handelt sich um kleine Lageabweichungen. Die Krümmung von E_o zeigt jedoch gegenüber E_j größere Differenzen.

Das bedeutet, kleine Lageabweichungen bedingen große Krümmungsabweichungen.

In Abbildung 2.6b ist der Kreisbogen mit dem Radius r nicht in der Sollage E_j , sondern in E_o hergestellt worden. Dadurch treten große Lageabweichungen auf. Die Krümmung von E_o entspricht jedoch der Sollgröße.

Das bedeutet, große Lageabweichungen rufen kleine Krümmungsabweichungen hervor.

2.1.3.4 Genauigkeitsmaße für die Gleislagequalität

Aus den Darlegungen geht hervor, dass zur Beurteilung der Gleislage und -höhe und der fahrdynamischen Verhältnisse, die nur von der Krümmung abhängig sind, zwei Gruppen definiert werden müssen:

- Genauigkeitsmaße zur Beurteilung der Lage und Höhe und
- Genauigkeitsmaße zur Beurteilung der Krümmung.

Beide Genauigkeitsmaße sind voneinander unabhängig (Stange 1994). Die Genauigkeitsmaße zur Beurteilung der Gleislage (Abb. 2.7) werden in die Komponenten

- σ_t Standardabweichung in Richtung der Tangente und
- σ_n Standardabweichung in Richtung der Normalen

zerlegt, weil beide eine unterschiedliche Bedeutung für den Bau und den Betrieb von Eisenbahnen haben. Sie sind, wie die Darlegungen im Handbuch Ingenieurgeodäsie (Band Grundlagen, Kap. 9) und im Kapitel 3.4 zeigen, der direkten Messung und damit der Überprüfung zugänglich.

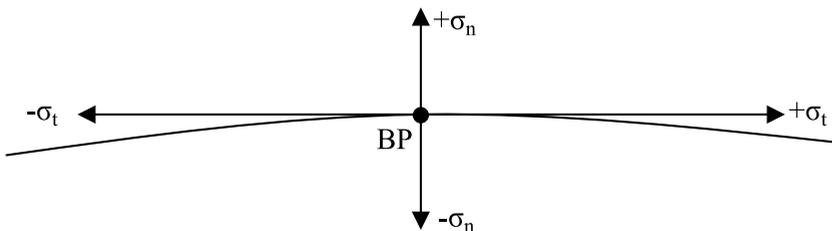


Abb. 2.7: Absteckungsfehler in tangentialer und normaler Richtung

Die Krümmung im Bogenpunkt (BP) ist, da sie als lokales Element im unendlich Kleinen definiert wird, der direkten Messung nicht zugänglich.

Krümmung

Die Krümmung einer Kurve ist die Richtungsänderung der Tangente in Bezug auf die Längenänderung, wobei ρ allgemein den Radius (auch im Übergangsbogen) bezeichnet.

$$k = \frac{d\tau}{dl} = \frac{1}{\rho} \quad (2.16)$$

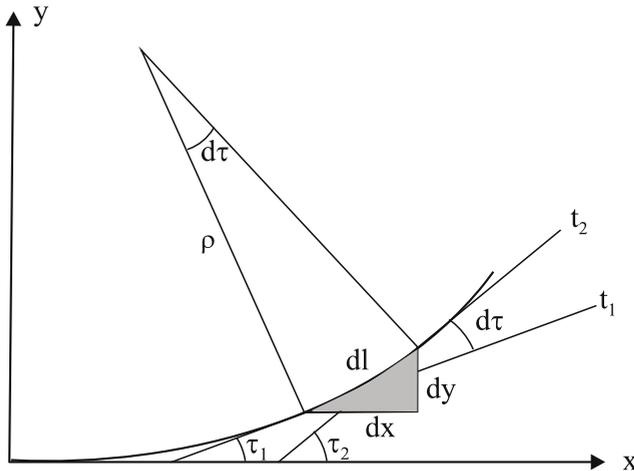


Abb. 2.8: Bogendifferenzial zur Ableitung der Krümmung

$$\tau_2 = \tau_1 + d\tau \quad (2.17)$$

Die Krümmung kann deshalb nur punktweise durch Messen der Pfeilhöhen wie folgt bestimmt werden.

Unter der Voraussetzung eines flachen Bogenverlaufs wird in Stange (1994) der Zusammenhang zwischen Pfeilhöhe h und der mittleren Krümmung k_m mit Abbildung 2.9a

$$h = \frac{\Delta l^2}{2} \cdot k_m \quad (2.18)$$

Allgemein, wenn die benachbarten Sehnen ungleich lang sind, mit Abbildung 2.9b

$$h = \frac{a \cdot b}{2} \cdot k_m \quad (2.19)$$

abgeleitet. Es handelt sich um die Pfeilhöhe eines Kreisbogens durch die drei benachbarten Punkte. Die Kurve wird durch einen Kreisbogen mit dem mittleren Radius

$$r_m = \frac{1}{k_m} \quad (2.20)$$

angenähert.

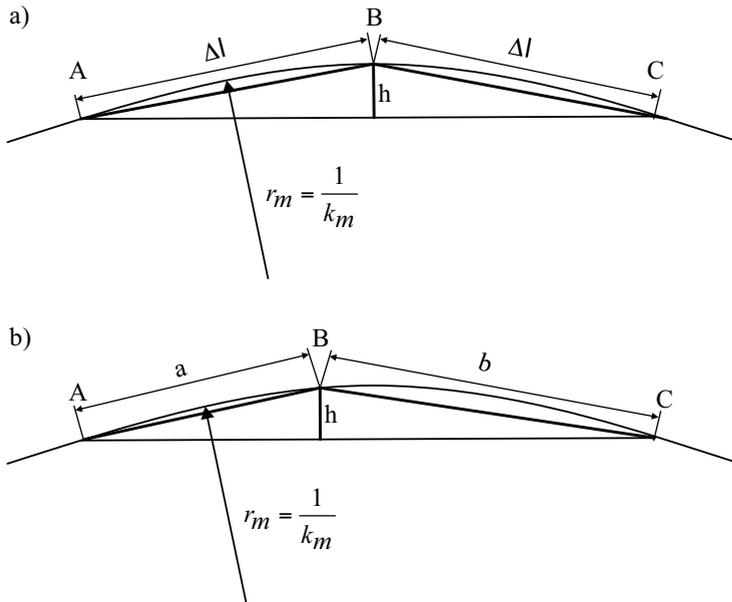


Abb. 2.9: Zusammenhang zwischen Pfeilhöhe und Krümmung: a) gleichmäßige Trassenteilung, b) ungleichmäßige Trassenteilung

Die folgenden grundsätzlichen Untersuchungen beschränken sich auf eine mit gleichen Punktabständen versehene Kurve. Die gefundenen Ergebnisse lassen sich in gleicher Weise auch auf Kurven mit ungleichmäßiger Trassenteilung übertragen.

Aus der Umkehrung der Gleichung (2.18) folgt:

$$k_m = \frac{2}{\Delta l^2} \cdot h \quad (2.21)$$

Der Standardabweichung der Krümmung wird durch Differenzieren zu

$$\sigma_k = \frac{2}{\Delta l^2} \cdot \sigma_h \quad (2.22)$$

bestimmt.

Die zu erwartenden Krümmungsfehler einer Absteckungskurve, deren Pfeilhöhen direkt gemessen wurden, lassen sich mit Gleichung (2.22) auf einfache Weise berechnen.

Wird die Gleislage mit einem Absteckungsverfahren von Festpunkten aus abgesteckt (absolute Lage), so liegen die Pfeilhöhenfehler σ_h dieser Absteckungskurve a priori nicht vor. Sie müssen erst über die Lagefehler der abgesteckten Punkte bestimmt werden. Dabei übt die Lagestandardabweichung in Richtung der Tangente s_l keinen nennenswerten Einfluss auf die Pfeilhöhenfehler aus, sodass er in den folgenden Betrachtungen vernachlässigt wird.