



DIPLOMARBEIT

Master Thesis

Optimierung der Abstimmung von Fahrgeschwindigkeit und Trassierungsparametern im Wiener U-Bahn-Netz am Beispiel der Linie U3

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des
akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Ostermann

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Paul Steckler

am Institut für Verkehrswissenschaften E230,
Forschungsbereich für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen

eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Bernhard Ackerl, BSc

Matr.Nr.: 9825150

Obere Donaustraße 15a/3/1

1020 Wien

Wien, im April 2014

.....

Zug fährt ab!

[Ansage in der Wiener U-Bahn bei der Abfertigung eines Zuges]

Danksagung

Mein Dank gilt all jenen, die mich beim Verfassen der Diplomarbeit begleitet und betreut haben. In fachlicher Hinsicht gilt dieser Dank in erster Linie Herrn Univ.Ass. Dipl.-Ing. Paul Steckler und Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Ostermann stellvertretend für den Forschungsbereich für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen des Instituts für Verkehrswissenschaften der TU Wien.

Für die Unterstützung während meines gesamten Studiums bedanke ich mich ganz herzlich bei meiner Familie und im Speziellen bei meiner Frau Mag. Sandra Karanitsch-Ackerl. Ich widme diese Arbeit meinem Sohn Moritz.

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die Diplomarbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe. Weiters versichere ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde aus Gründen der besseren Lesbarkeit auf geschlechtsneutrale Formulierungen verzichtet. Es sind jedoch immer beide Geschlechter im Sinne der Gleichbehandlung angesprochen.

Kurzfassung

Die Wiener U-Bahn ist, wie auch viele andere spurgebundene öffentliche Personenverkehrsmittel, durch eine relativ hohe Fahrgeschwindigkeit, kurze Stationsabstände und das Fehlen von Zügen, die in den Stationen nicht halten, gekennzeichnet. Daher legen die Fahrzeuge der U-Bahn einen großen Anteil der Strecken in beschleunigter Bewegung mit veränderlicher Geschwindigkeit zurück. Üblicherweise beziehen sich die Regelwerke zur Wahl der Trassierungsparameter aber auf konstante Entwurfsgeschwindigkeiten. So enthält die Trassierungsvorschrift der Wiener U-Bahn zwar den Hinweis, dass die tatsächlichen Geschwindigkeiten von Zugspitze und Zugende bei der Ermittlung der Überhöhung zu berücksichtigen sind, aber keine Informationen darüber, in welcher Art und Weise das zu erfolgen hat.

Der erste Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, welcher Überhöhungsverlauf bei konstanten Fahrgeschwindigkeiten hinsichtlich des Fahrkomforts und des Verschleißes zu optimalen Ergebnissen führt. Davon ausgehend werden Berechnungsansätze für die Ermittlung der optimalen Überhöhung für die beschleunigte Fahrt ermittelt.

Der zweite Teil der Arbeit besteht in der Auswertung von Messdaten zur Krümmung und Überhöhung, die mit dem Gleismesswagen der Wiener U-Bahn auf der Linie U3 durchgeführt wurden. Dazu wird zunächst der Verlauf der Fahrgeschwindigkeit auf Basis der Messdaten eines regulären U-Bahn-Zuges rechnerisch modelliert. Aus der Geschwindigkeit und der Soll-Krümmung wird anschließend mit den Berechnungsansätzen für die optimale Überhöhung der Wertebereich der optimalen Überhöhung entlang der gesamten Strecke berechnet.

Der Vergleich zwischen den vorhandenen, gemessenen Trassierungsdaten und den berechneten Sollwerten zeigt einerseits, dass in einigen Bereichen der Strecke die technisch mögliche Geschwindigkeit nicht ausgenutzt werden kann, da aufgrund der Überschreitung von Grenzwerten der Trassierungsparameter die Geschwindigkeit beschränkt werden muss. Andererseits kann man feststellen, dass in Bezug auf den Fahrkomfort und den Verschleiß an vielen Stellen entlang der Linie U3 Verbesserungen durch die Änderung des Überhöhungsverlaufs erzielt werden könnten.

Die Arbeit liefert einen Beitrag zur Beurteilung von bestehenden Bahnstrecken des öffentlichen Personennahverkehrs sowie einen Ansatz zur Berücksichtigung von Beschleunigungsbereichen bei der Errichtung von neuen Linien.

Abstract

Vienna's metro, like many other public metropolitan railway systems, is characterized by relatively high maximum speed, short distances between stations, and the absence of trains passing through stations. Hence, metro trains are passing most of the tracks in accelerated movement. But alignment rules and standards usually imply constant design speed. In contrast to that, the consideration of the difference in speed between the head and the rear of the train is requested in the alignment rules of Vienna's metro, although the method to be applied is not specified.

The first part of this study deals with the question, which level of superelevation leads to the best results in terms of travelling comfort and abrasion. Based on this, calculation formulas for the optimal superelevation for accelerated movements are determined.

In the second part, measured curvature and superelevation data of the line U3 from the rail test car of Vienna's metro is analyzed. For that purpose, the trend of the ride speed is modelled according to measured data of a regular train. Together with the nominal curvature, this modelled speed is the base to calculate the range of the optimal superelevation along the route.

Comparing the measured alignment data and the calculated nominal values shows that the technically possible speed has to be limited in some areas in order not to exceed the critical alignment values. Moreover, it was detected that – concerning travelling comfort and abrasion – improvements could be achieved through modification of the superelevation's gradient in many parts of the line U3.

This study provides a contribution to the assessment of existing public metropolitan railway lines and a basis for the consideration of the accelerated movement of trains during the construction of new lines.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	v
Ehrenwörtliche Erklärung.....	v
Kurzfassung.....	vii
Abstract	ix
Inhaltsverzeichnis.....	xi
1 Einleitung.....	1
1.1 Zielsetzung.....	2
2 Grundlagen.....	4
2.1 Trassierungselemente.....	4
2.1.1 Trassierungselemente im Grundriss.....	4
2.1.2 Trassierungselemente im Aufriss.....	5
2.2 Fahrdynamik	5
2.2.1 Längsbeschleunigung.....	7
2.2.1.1 Anfahren	7
2.2.1.2 Bremsen	11
2.2.1.3 Fahrschaubild	13
2.2.2 Bogenfahrt, Fliehbeschleunigung	17
2.2.3 Überhöhung.....	19
2.2.3.1 Ausgleichende Überhöhung.....	19
2.2.3.2 Fehlüberhöhung, freie Seitenbeschleunigung.....	21
2.2.3.3 Überhöhungsüberschuss	22
2.2.4 Querruck, Seitenruck.....	23
2.2.5 Übergangsbogen und Überhöhungsrampe	25
2.2.6 Verwindung, Wankwinkelgeschwindigkeit.....	27
2.2.7 Schwerpunktstrassierung, Wiener Bogen®.....	29
2.2.8 Vertikale Beschleunigungen	32
2.3 Zwangspunkte der Trassierung.....	33
2.4 Trassierungsvorschrift der Wiener U-Bahn.....	34
2.4.1 Entwurfsgeschwindigkeit.....	34
2.4.2 Freie Seitenbeschleunigung, Überhöhung und Mindestradien	34
2.4.3 Ruck, Übergangsbögen und Überhöhungsrampen.....	36
2.4.4 Längsneigungen und Ausrundungen.....	37
2.4.5 Bahnsteige	37
3 Trassierung mit optimaler Überhöhung.....	38

3.1	Optimale Überhöhung bei konstanten Fahrgeschwindigkeiten.....	38
3.1.1	Überhöhung bei Mischverkehr.....	38
3.1.2	Überhöhung für einheitliche Fahrgeschwindigkeiten.....	39
3.2	Eliminierung von Seitenbeschleunigungen in Beschleunigungsbereichen	43
3.2.1	Längsbeschleunigung ausschließlich auf geraden Gleisen	44
3.2.2	Veränderliche Überhöhung am Gleis	44
3.2.3	Einsatz von Neigezügen	45
3.2.4	Zusammenfassung der theoretischen Lösungen.....	46
3.3	Überhöhung bei ausschließlicher Beschleunigung.....	46
3.3.1	Obergrenze der optimalen Überhöhung.....	47
3.3.2	Untergrenze der optimalen Überhöhung.....	50
3.4	Überhöhung bei teilweiser Beschleunigung.....	53
3.4.1	Obergrenze der optimalen Überhöhung.....	53
3.4.2	Untergrenze der optimalen Überhöhung.....	55
3.5	Überhöhung im Haltestellenbereich	56
3.6	Überhöhung in Übergangsbögen.....	56
4	Die Wiener U-Bahn.....	58
4.1	Geschichte der Wiener U-Bahn.....	59
4.1.1	Die 1. Ausbaustufe (1969-1982).....	60
4.1.2	Die 2. Ausbaustufe (1984-2000).....	61
4.1.3	Die 3. Ausbaustufe (2001-2010).....	62
4.1.4	Die 4. Ausbaustufe (seit 2010).....	62
4.1.5	Die Zukunft des U-Bahn-Netzes	63
4.2	Spurführung, Oberbau	63
4.3	Zugsteuerung und Zugsicherung.....	65
4.4	Die Linie U3	66
4.5	Fahrzeuge	69
4.5.1	Fahrzeuge der Linien U1 – U4	70
4.5.1.1	Type U	70
4.5.1.2	Type U ₁₁ /U ₁	71
4.5.1.3	Type U ₂	72
4.5.1.4	Type V/v	72
4.5.1.5	Übersicht der technischen Daten.....	74
4.5.2	Fahrzeuge der Linie U6	75
4.6	Gleismessung.....	75
4.6.1	Der Gleismesswagen der Wiener U-Bahn	76
4.6.2	Daten der Gleismessungen.....	76
5	Auswertung der Gleismessungen	78

5.1	Methodik.....	78
5.2	Streckendaten.....	78
5.3	Ermittlung einer realitätsnahen Beschleunigungsfunktion.....	81
5.3.1	Messdaten zur Anfahrbeschleunigung.....	82
5.3.2	Kalibrierung der Beschleunigungsdaten	83
5.3.3	Modellierung des gemessenen Beschleunigungsverlaufes.....	84
5.3.3.1	Gleis 1.....	86
5.3.3.2	Gleis 2.....	89
5.3.4	Modellierung des Geschwindigkeitsverlaufs	90
5.3.4.1	Gleis 1.....	90
5.3.4.2	Gleis 2.....	92
5.4	Ermittlung einer realitätsnahen Bremsfunktion.....	93
5.4.1	Gleis 1	94
5.4.2	Gleis 2.....	96
5.5	Vergleich von optimaler und realer Überhöhung.....	97
5.5.1	Vorgangsweise zur Auswertung der Messergebnisse.....	97
5.5.2	Linie U3, Gleis 1	100
5.5.2.1	Abschnitt Ottakring – Kandlerstraße	100
5.5.2.2	Abschnitt Kandlerstraße – Hütteldorfer Straße.....	102
5.5.2.3	Abschnitt Hütteldorfer Straße – Johnstraße.....	104
5.5.2.4	Abschnitt Johnstraße – Schweglerstraße.....	106
5.5.2.5	Abschnitt Schweglerstraße – Westbahnhof.....	108
5.5.2.6	Abschnitt Westbahnhof – Zieglergasse.....	110
5.5.2.7	Abschnitt Zieglergasse – Neubaugasse	112
5.5.2.8	Abschnitt Neubaugasse – Volkstheater.....	114
5.5.2.9	Abschnitt Volkstheater – Herrengasse	116
5.5.2.10	Abschnitt Herrengasse – Stephansplatz	118
5.5.2.11	Abschnitt Stephansplatz – Stubentor	120
5.5.2.12	Abschnitt Stubentor – Landstraße	122
5.5.2.13	Abschnitt Landstraße – Rochusgasse	124
5.5.2.14	Abschnitt Rochusgasse – Kardinal-Nagl-Platz	126
5.5.2.15	Abschnitt Kardinal-Nagl-Platz – Schlachthausgasse.....	128
5.5.2.16	Abschnitt Schlachthausgasse – Erdberg.....	130
5.5.2.17	Abschnitt Erdberg – Gasometer	132
5.5.2.18	Abschnitt Gasometer – Zippererstraße.....	134
5.5.2.19	Abschnitt Zippererstraße – Enkplatz	136
5.5.2.20	Abschnitt Enkplatz – Simmering	138
5.5.3	Linie U3, Gleis 2	140

5.5.3.1	Abschnitt Simmering – Enkplatz.....	140
5.5.3.2	Abschnitt Enkplatz – Zippererstraße.....	142
5.5.3.3	Abschnitt Zippererstraße – Gasometer	144
5.5.3.4	Abschnitt Gasometer – Erdberg.....	146
5.5.3.5	Abschnitt Erdberg – Schlachthausgasse	148
5.5.3.6	Abschnitt Schlachthausgasse – Kardinal-Nagl-Platz.....	150
5.5.3.7	Abschnitt Kardinal-Nagl-Platz – Rochusgasse	152
5.5.3.8	Abschnitt Rochusgasse – Landstraße.....	154
5.5.3.9	Abschnitt Landstraße – Stubentor.....	156
5.5.3.10	Abschnitt Stubentor – Stephansplatz	158
5.5.3.11	Abschnitt Stephansplatz – Herrengasse.....	160
5.5.3.12	Abschnitt Herrengasse – Volkstheater.....	162
5.5.3.13	Abschnitt Volkstheater – Neubaugasse	164
5.5.3.14	Abschnitt Neubaugasse – Zieglergasse	166
5.5.3.15	Abschnitt Zieglergasse – Westbahnhof	168
5.5.3.16	Abschnitt Westbahnhof – Schweglerstraße.....	170
5.5.3.17	Abschnitt Schweglerstraße – Johnstraße.....	172
5.5.3.18	Abschnitt Johnstraße – Hütteldorfer Straße	174
5.5.3.19	Abschnitt Hütteldorfer Straße – Kendlerstraße.....	176
5.5.3.20	Abschnitt Kendlerstraße – Ottakring.....	178
5.6	Zusammenfassung und Interpretation der Auswertungsergebnisse	180
5.6.1	Krümmungswechsel ohne Übergangsbögen	180
5.6.2	Eingebaute Überhöhung unter der Mindestüberhöhung	181
5.6.3	Kreisbögen mit zu geringer Überhöhung	183
5.6.4	Kreisbögen mit veränderlicher Überhöhung.....	186
5.6.5	Übergangsbögen mit zu geringer Überhöhung.....	187
5.6.6	Übergangsbögen mit zu großer Überhöhung.....	188
5.6.7	Optimal überhöhte Bögen.....	189
6	Schlussfolgerung.....	190
	Anhang A: Coriolis-Kraft bei der Wr. U-Bahn.....	193
	Anhang B: Übersichtsplan der Linie U3	195
	Anhang C: Datenfiles der Trassierung U3.....	197
	Literaturverzeichnis	198
	Abbildungsverzeichnis	202
	Tabellenverzeichnis	207

1 Einleitung

Im Verlauf einer Eisenbahnfahrt wirken sowohl auf die Eisenbahnwagen als auch auf das Transportgut und die Fahrgäste Beschleunigungskräfte längs zur Fahrtrichtung sowie quer dazu in vertikaler und horizontaler Richtung.

Hohe Beschleunigungen führen zu einer großen Belastung von Oberbau und Wagenmaterial und erhöhen somit die Abnutzung und den Instandhaltungsaufwand. Sie führen außerdem zu einer Verminderung der Lagesicherheit der Ladung und einer Verringerung des Fahrkomforts. Große Beschleunigungskräfte beeinflussen auch die Entgleisungs- und Kippsicherheit eines Zuges. Man ist daher im Eisenbahnverkehr generell darauf bedacht, die auftretenden Beschleunigungen auf ein verträgliches Maß zu minimieren.

Beschleunigungskräfte entlang der Gleisachse, also in Längsrichtung des Zuges, ergeben sich hauptsächlich aus den Anfahr- und Bremsvorgängen des Zuges und können somit durch entsprechende Beschränkungen im Betrieb unabhängig von der Linienführung der Strecke begrenzt werden.

Die in Querrichtung zur Gleisachse auftretenden Beschleunigungen (sowohl horizontal als auch vertikal) rühren von der Streckenführung bzw. Trassierung des Gleises her und sind zusätzlich abhängig von der jeweiligen Fahrgeschwindigkeit des Zuges. Um diese Kräfte zu begrenzen, werden bei der Planung von Eisenbahnstrecken Trassierungsvorschriften herangezogen, welche Regel- und Grenzwerte der Trassierungsparameter in Abhängigkeit von der Entwurfsgeschwindigkeit vorsehen.

Bei der Vollbahn mit gemischtem Verkehr aus Güter- und Personenzügen werden für die Trassierungsparameter oftmals sogenannte Regelwerte in Abhängigkeit von der Entwurfsgeschwindigkeit gewählt. Diese gewährleisten die Einhaltung der Beschleunigungsgrenzwerte bei der Fahrt mit der maximal zulässigen Geschwindigkeit, sind jedoch eigentlich für eine geringere Geschwindigkeit ausgelegt. Dadurch wird erreicht, dass die wirksamen Beschleunigungskräfte auf langsamer fahrende Güterzüge, die hinsichtlich der Beanspruchung von Gleis und Oberbau in der Regel maßgeblich sind, nicht zu groß werden.

Bei einem unabhängigen ÖPNV-Netz wie jenem der Wiener U-Bahn ist es jedoch so, dass der überwiegende Anteil der Züge mit einem annähernd gleichen Geschwindigkeitsprofil unterwegs ist, und dass alle regulären Züge in allen Stationen halten. Hinsichtlich der Trassierungsparameter

ist es also bei einem derartigen Netz möglich, diese so zu wählen, dass die auftretenden Beschleunigungskräfte bei den tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten jeweils minimal werden.

Diese Forderung bedeutet aber auch, dass – im Gegensatz zur Trassierung nach einer Entwurfsgeschwindigkeit – die Geschwindigkeit für die Wahl der Trassierungselemente nicht mehr eindeutig ist, da bei einer beschleunigten Fahrt jeder Radsatz des Zuges einen bestimmten Streckenpunkt mit einer unterschiedlich großen Geschwindigkeit passiert.

1.1 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Diplomarbeit ist es, eine bestehende Linie der Wiener U-Bahn dahingehend zu untersuchen, ob die vorhandenen Trassierungsparameter optimal im Hinblick auf die tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten sind. Mit dem Begriff der optimalen Trassierungsparameter wird allgemein jene Trassierung bezeichnet, bei der die wirkenden Beschleunigungen auf Wagen und Fahrgäste ein Minimum erreichen. Aus den Ergebnissen dieser Analyse sollen gegebenenfalls mögliche Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Im ersten Teil der Arbeit werden die Zusammenhänge zwischen den physikalischen Grundlagen einer Eisenbahnfahrt und den Trassierungsparametern als Zusammenfassung des aktuellen Standes der Fachliteratur unter Berücksichtigung der Eigenheiten der Wiener U-Bahn abgebildet.

Anschließend werden Überlegungen angestellt, wie die Überhöhung einer bestehenden Eisenbahnstrecke im Hinblick auf die davon abhängigen Beschleunigungsgrößen optimiert werden kann. Ausgehend von den bestehenden Trassierungsvorschriften, die für konstante Fahr Geschwindigkeiten ausgelegt sind, werden Regeln für den Umgang mit den variablen Geschwindigkeiten von beschleunigten Zügen aufgestellt.

Im zweiten Teil der Arbeit wird ein Überblick über die Charakteristika der Wiener U-Bahn und die untersuchten Streckenabschnitte entlang der Linie U3 gegeben. Für diese Streckenabschnitte liegen durch Messfahrten mit einem Gleismesswagen erhobene Daten der Trassierung vor. Weiters gibt es Daten zum tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeitsprofil entlang der Linie U3, die aus Beschleunigungsmessungen in einem als Sonderzug geführten U-Bahn-Zug stammen.

Aus diesen Daten zum Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsverlauf wurde eine mittlere Beschleunigungskurve erstellt. Mithilfe dieses Beschleunigungsmodells wurde auf Basis der planmäßigen Grundrisstrassierung der Strecke die Ober- bzw. Untergrenze der optimalen Überhöhung im Streckenverlauf ermittelt.

Durch eine Überlagerung dieses möglichen Bereichs der optimalen Überhöhung mit den Werten der tatsächlich eingebauten Überhöhung aus dem Gleismessschrieb können jene Streckenabschnitte identifiziert werden, wo die vorhandene Überhöhung nicht im optimalen Bereich liegt.

Als Ergebnis dieser Analyse werden jene Streckenabschnitte angeführt, die vom optimalen Zustand so weit abweichen, dass Linienkorrekturen sinnvollerweise durchgeführt werden sollten.

2 Grundlagen

2.1 Trassierungselemente

Die Trassierung einer Eisenbahnstrecke ist die geometrische Festlegung der räumlichen Lage der Gleisachse durch Trassierungselemente. Bei der konventionellen Trassierung wird der Streckenverlauf im Grundriss weitgehend unabhängig von der Höhenentwicklung betrachtet.

2.1.1 Trassierungselemente im Grundriss

Die Grundrisstrassierung wird mit den Elementen Gerade, Kreisbogen und Übergangsbogen beschrieben. Diese müssen derart angeordnet werden, dass sich die Richtung des Fahrwegs nur stetig ändert. [06]

Auf einer Ebene ist eine **Gerade** die kürzeste Verbindung zweier Punkte und somit prinzipiell das zu bevorzugende Trassierungselement beim Bahnbau. [07] Die Krümmung der Trasse im Bereich einer Geraden hat den Wert null, was dem Kehrwert eines unendlich großen Radius entspricht.

Eine Änderung der Fahrtrichtung wird in der Regel durch einen **Kreisbogen** realisiert, welcher durch Mittelpunkt und Radius definiert ist. Letzterer bezieht sich üblicherweise und auch im Netz der Wiener U-Bahn auf die Gleisachse. Aufgrund der besseren Darstellbarkeit wird in Längsschnitten einer Trassierung stets der Krümmungsverlauf anstelle der Werte der Radien eingezeichnet.

$$\kappa = \frac{1}{R} \quad (2.01)$$

κ [1/m]..... Krümmung

R [m]..... Bogenradius der Gleisachse

Die Krümmung ist gemäß (2.01) der Kehrwert des Radius und somit im Verlauf des Kreisbogens konstant. [07]

Bei der Trassierung von untergeordneten Bahnstrecken mit geringen Geschwindigkeiten kann fallweise mit Kreisbögen und Geraden das Auslangen gefunden werden. Zur Verbesserung der Laufruhe und des Fahrkomforts versucht man aber, Unstetigkeiten im Verlauf der Krümmung, wie sie beim Übergang von einer Geraden auf einen Kreisbogen auftreten, zu vermeiden. Des-

halb werden zwischen Trassierungselementen mit unterschiedlichen Krümmungen Übergangsbögen angeordnet. [07]

Ein **Übergangsbogen** weist eine über seinen Verlauf stetige Änderung der Krümmung auf, wobei die Anfangs- und Endwerte der Krümmung mit den jeweils angrenzenden Trassierungselementen übereinstimmen sollen. [07]

Diese Anforderungen können durch unterschiedliche geometrische Kurven erreicht werden. Die derzeit in Europa gebräuchlichste geometrische Figur zur Realisierung eines Übergangsbogens ist die Klothoide, deren Merkmal ein linearer Verlauf der Krümmung zwischen dem Start- und dem Endwert ist. [04]

2.1.2 Trassierungselemente im Aufriss

Die Trassierungselemente im Aufriss beschreiben die **Gradienten** (Neigungslinie) der Bahnstrecke. Sie besteht aus geraden Abschnitten mit gleichbleibender Längsneigung. Bei einer positiven Längsneigung spricht man von einer Steigung, bei negativer Neigung von Gefälle. Zur Ausrundung der Neigungswechsel kommen Kreisbögen zur Anwendung. [06] [07]

Zu den Trassierungselementen zählen außerdem die Überhöhung, also die Differenz der Höhenlage von Außen- und Innenschiene, sowie die Überhöhungsrampen zur Überwindung von Überhöhungsdifferenzen in Längsrichtung des Gleises. [16]

2.2 Fahrdynamik

Während einer Eisenbahnfahrt wirken auf das Wagenmaterial, die Ladung und die Passagiere Beschleunigungen, die von unterschiedlichen Ursachen herrühren. Um die Beschleunigungen im Hinblick auf ihren Entstehungsmechanismus besser untersuchen zu können, werden diese im Folgenden nach den Raumrichtungen getrennt beschrieben. Das Bezugssystem wird entlang der Gleisachse mit dem Zug bewegt. In der Realität treten die Beschleunigungen natürlich überlagert auf und wirken als eine Resultierende auf den Fahrgast bzw. auf die Wagen. [09]

Vertikalbeschleunigungen, die neben der Erdbeschleunigung wirken, entstehen in erster Linie durch das Befahren von Neigungswechseln. Sie sind geschwindigkeitsabhängig.

Quer zur Fahrtrichtung treten bei der Bogenfahrt geschwindigkeitsabhängige **Seitenbeschleunigungen** zufolge der Fliehkraft auf. Die Wirkung dieser Beschleunigungen kann durch die optimale Wahl des Trassierungsparameters der Überhöhung zumindest teilweise kompensiert wer-

den. Die dafür notwendigen Überhöhungsrampen erzeugen jedoch Wankwinkelbeschleunigungen, die ebenfalls geschwindigkeitsabhängig sind und für Bezugspunkte außerhalb der Rollachse wiederum Anteile an Vertikal- bzw. Querbeschleunigungen ergeben.

In Fahrtrichtung kommt es zu **Längsbeschleunigungen** aufgrund der Veränderung der Geschwindigkeit beim Anfahren und beim Bremsen. Diese Beschleunigungen hängen nicht direkt von der Trassierung ab und sind naturgemäß nicht zu vermeiden, können aber durch die Wahl eines entsprechenden Geschwindigkeitsprofils begrenzt werden.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Optimierung von Trassierungsparametern einer U-Bahn-Linie. Hier sind die primären Trassierungselemente im Aufriss und Grundriss aufgrund der bestehenden Trassenführung baulich weitgehend fixiert und nur mit großem Aufwand zu verändern. Wesentlich einfacher ist es, im Zuge von Instandhaltungsarbeiten des Oberbaus die eingebaute Überhöhung zu adaptieren, sofern das Lichtraumprofil dies zulässt. Deshalb werden in dieser Arbeit in erster Linie alle Beschleunigungswirkungen untersucht, die von der Überhöhung, also der Differenz der Höhenlage von Außen- und Innenschiene, und der Ausbildung der Überhöhungsrampen abhängig sind.

Schwingungen des Wagenkastens aufgrund von Lage- oder Oberflächenfehlern der Schienen bzw. aufgrund von Unregelmäßigkeiten der Radreifen werden in dieser Arbeit ebenso vernachlässigt wie Schwingungen, die aus dem Sinuslauf der Radsätze resultieren, da diese Effekte nicht unmittelbar mit der Überhöhung, sondern eher mit Parametern wie dem Spurspiel, der äquivalenten Konizität, der Konstruktion der Radsätze und Drehgestelle oder dem eingebauten Mindestbogenradius zusammenhängen.

Beschleunigungen seitlich zur Fahrtrichtung, die aufgrund der Coriolis-Kraft infolge der Erdrotation auftreten, sind sehr klein im Vergleich zu Beschleunigungen aufgrund von Bogenfahrten und Geschwindigkeitsveränderungen. [siehe Anhang A] Sie werden daher in den folgenden Überlegungen ebenfalls nicht berücksichtigt.

Bei einer Beharrungsfahrt auf einem geraden Gleisabschnitt mit horizontaler Gleisebene (keine Querneigung, keine Längsneigung) wirkt bei einer idealisierten Betrachtung somit lediglich die vertikal nach unten gerichtete Erdbeschleunigung auf die Fahrzeuge und deren Insassen. Aus der Perspektive eines Fahrgasts wird diese Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit wie Stillstand empfunden, was gleichbedeutend ist mit einem hohen Maß an Fahrkomfort. [07] Das Fehlen von Seitenbeschleunigungen führt zu einer gleichmäßigen Belastung und infolge dessen zu einer

gleichmäßigen Abnutzung von linker und rechter Schiene und ist somit auch unter dem Gesichtspunkt der Instandhaltung optimal.

Bei den maximal zumutbaren Beschleunigungen besteht ein Unterschied zwischen sitzender und stehender Beförderung, die im ÖPNV durchaus üblich ist. Stehende Passagiere besitzen eine geringere Toleranz in Bezug auf die wirksamen Beschleunigungen, was bei den Grenzwerten der wirkenden Beschleunigungen im ÖPNV berücksichtigt werden sollte. [09]

2.2.1 Längsbeschleunigung

Die Veränderung der Fahrgeschwindigkeit über die Zeit wird durch eine Beschleunigung bzw. eine Verzögerung in Längsrichtung in Form von Anfahren oder Bremsen hervorgerufen. Die Geschwindigkeit selbst ist die Änderung des (zurückgelegten) Weges über die Zeit:

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} \quad (2.02)$$

$$v(t) = \frac{ds(t)}{dt} \quad (2.03)$$

a [m/s²] Beschleunigung

v [m/s] Geschwindigkeit des Fahrzeugs

t [s] Zeit

s [m] Weg

Als Richtwert gilt im ÖPNV eine Längsbeschleunigung von ca. 1,3 m/s², die im Sinne des Fahrkomforts nicht überschritten werden sollte. [44]

2.2.1.1 Anfahren

Eine beschleunigte Bewegung gehorcht dem zweiten Newton'schen Gesetz, wonach diese Beschleunigung durch eine in derselben Wirkungsrichtung angreifende Kraft verursacht wird.

$$F = m \cdot a \quad (2.04)$$

F [N] Kraft, die die Beschleunigung einer Masse hervorruft

m [kg] Masse des Zuges

Die für die Beschleunigung wirksame Kraft F gemäß (2.04) ist die Differenz aus der Zugkraft am Triebbradumfang und der Summe der entgegengesetzt wirkenden Widerstände.

Um ein Fahrzeug in Bewegung zu setzen, muss die Zugkraft also größer sein als die Summe der entgegengesetzt wirkenden Widerstände. [06]

$$F = F_z(v) - \sum W(v) \quad (2.05)$$

F_z [N] Zugkraft am Triebtradumfang

W [N] Widerstandskräfte

Die Widerstände setzen sich zusammen aus dem Anfahr- bzw. Losreißwiderstand, dem Neigungs- bzw. Steigungswiderstand, dem Krümmungs- bzw. Bogenwiderstand, dem Laufwiderstand für Fahrzeuge, dem Laufwiderstand für Züge und dem Luftwiderstand. [04] Diese Widerstandskräfte besitzen im Allgemeinen einen konstanten Teil, einen Teil der proportional mit der Fahrgeschwindigkeit ansteigt, sowie einen Teil, der mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunimmt.

Üblicherweise werden die Widerstandskräfte auf das Zuggewicht bezogen und in Promille angegeben. [46]

$$w = \frac{W}{g \cdot m} \quad (2.06)$$

w [‰] Widerstandskräfte bezogen auf das Zuggewicht

g [m/s²] Erdbeschleunigung $g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$

Somit entspricht diese bezogene Widerstandsgröße im Fall des Neigungswiderstandes näherungsweise gleich der Streckenneigung in Promille. [04]

Die Zugkraft am Triebtradumfang ist von der Geschwindigkeit abhängig. Einerseits nimmt sie bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen mit zunehmender Geschwindigkeit in Form einer Hyperbelfunktion („Leistungshyperbel“) ab, die sich aus der Funktion der Zugkraft in Abhängigkeit von der Leistung der Antriebe und der Geschwindigkeit ergibt. [06] [07]

$$F_z \leq Z_p = \frac{P}{v} \quad (2.07) [48]$$

Z_p [N] maximale Zugkraft aufgrund der Antriebsleistung

P [W] Summe der Leistung der Antriebe des Zuges

Andererseits kann sie nicht größer sein als die Reibungszugkraft, also die aufgrund des Reibungsgewichtes und des Haftreibungsbeiwertes zwischen Rad und Schiene maximal übertragbare Kraft.

$$F_Z \leq Z_R = \mu \cdot Q_R \quad (2.08) [48]$$

- Z_R [N] Reibungszugkraft
- μ [-] Haftreibungsbeiwert
- Q_R [N] Reibgewicht

Dabei ist zu beachten, dass das Reibgewicht die Summe aller Achslasten der angetriebenen Achsen einer Lokomotive bzw. eines Zuges ist. [04] Ein höherer Anteil an angetriebenen Achsen wirkt sich somit positiv auf die Größe der maximal erzielbaren Beschleunigung zufolge der übertragbaren Reibungszugkraft aus.

Der in (2.08) enthaltene Haftreibungsbeiwert μ ist keine konstante Größe, sondern wird mit zunehmender Geschwindigkeit kleiner. [04] Bei guten Verhältnissen liegt der Haftreibungsbeiwert für das Rad-Schiene-System bei einer Größenordnung von ca. 0,3. Umwelteinflüsse wie Feuchtigkeit und Verschmutzungen, wogegen eine unterirdische Streckenführung einen gewissen Schutz bietet, können diesen Wert jedoch drastisch verringern. [09]

Während die maximale Zugkraft am Triebbradumfang also mit steigender Geschwindigkeit abnimmt, nehmen der Luftwiderstand und die Laufwiderstände und somit die Summe der Widerstandskräfte mit steigender Geschwindigkeit zu. [04]

Der Zusammenhang zwischen Zugkraft, Widerstandskräften und der Fahrgeschwindigkeit ist in der folgenden Abb. 2.01 in Form eines Zugkraftdiagramms qualitativ dargestellt.

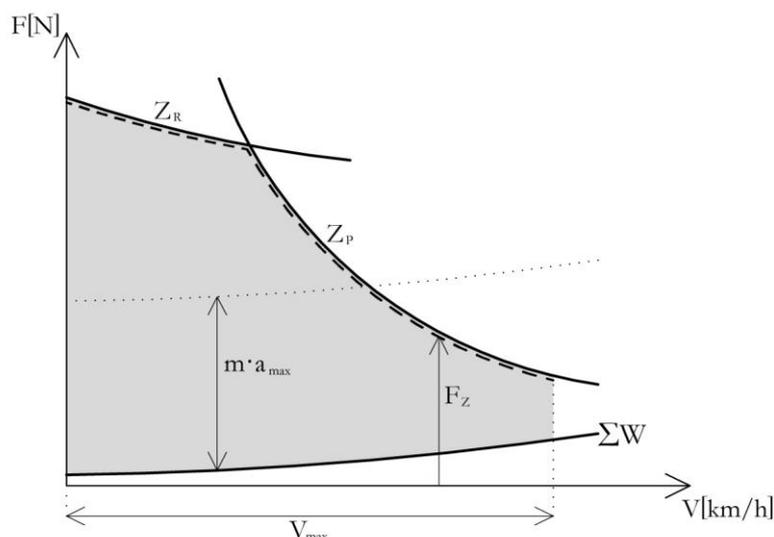


Abbildung 2.01: Zugkraftdiagramm: qualitativer Verlauf der maßgeblichen Kräfte

Für die Zugkraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ist jeweils der kleinste Wert aus der Reibungszugkraft Z_R und der Zugkraft aufgrund der Motorleistung Z_P maßgeblich. Diese maxi-

mal mögliche Zugkraft am Triebbradumfang wird hier mit F_Z bezeichnet und ist in Abb. 2.01 durch die strichlierte Linie dargestellt. Die Differenz dieser maximalen Zugkraft und der Summe der Widerstandskräfte ist die für die Beschleunigung wirksame Kraft F in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit. Dieser Wert ist in Abb. 2.01 jeweils der Vertikalabstand innerhalb der grauschraffierten Fläche.

In der Abb. 2.01 ist weiters eine punktiert dargestellte Kurve eingezeichnet, die parallel zur Kurve der Summe der Widerstandskräfte verläuft. Hierbei handelt es sich um jene Zugkraft, bei der die gewünschte Anfahrbeschleunigung genau erreicht wird. Somit ist ersichtlich, dass im Fall des in Abb. 2.01 gezeigten Zugkraftdiagramms die Reibungszugkraft für den Beschleunigungsverlauf nicht maßgeblich ist. Aufgrund des großen Anteils an angetriebenen Achsen der U-Bahn-Züge entspricht dies unter der Voraussetzung von guten Haftreibungs-Verhältnissen durchaus der Realität im Wiener U-Bahn-Netz, was durch die Analyse der Beschleunigungsmessungen in Kap. 5.3 bestätigt wird.

Aus der Gleichung (2.04) und der Abb. 2.01 lässt sich die maximal mögliche Anfahrbeschleunigung a in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit qualitativ darstellen. Sie ist aufgrund der konstanten Zugmasse m proportional zum Verlauf der Kraft F und wird aus Komfortgründen auf einen Maximalwert a_{\max} beschränkt, der im ÖPNV bei geringeren Geschwindigkeiten üblicherweise unter dem Wert der technisch möglichen Anfahrbeschleunigung liegt.

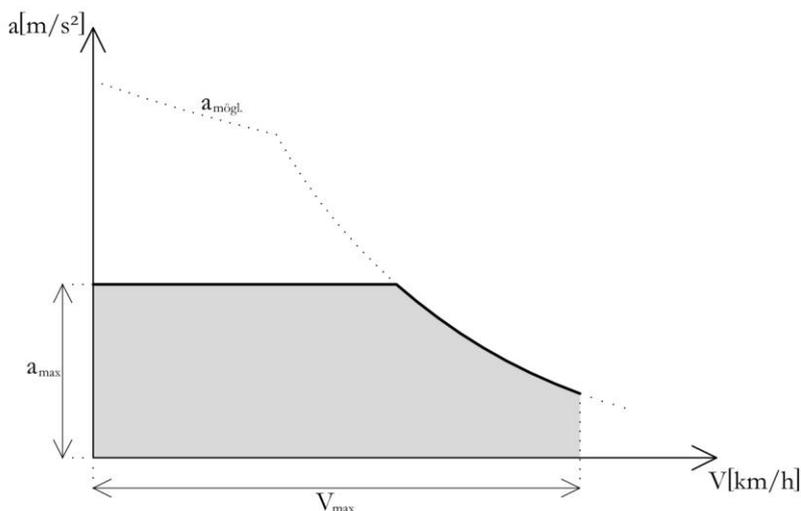


Abbildung 2.02: Qualitative Darstellung des Beschleunigungsverlaufes

Für den Fahrkomfort ist nicht nur die absolute Beschleunigungsgröße maßgeblich, sondern auch der Ruck, also ihre Änderung über die Zeit. In dem in Abb. 2.02 dargestellten Beschleunigungsverlauf gibt es an den Stellen $V = 0 \text{ km/h}$ und $V = V_{\max}$ theoretisch einen unendlich großen

Ruck. Im praktischen Fahrbetrieb ist es daher von Vorteil, die Beschleunigung stetig ansteigen bzw. abfallen zu lassen, um den Ruck zu begrenzen.

Ein aus Messdaten bestimmter, realer Beschleunigungsverlauf eines Wiener U-Bahn-Zuges ist im Kap. 5.3 dargestellt. Für die theoretischen Überlegungen in den Kapiteln 2 und 3 wurde zur Vereinfachung ein konstant beschleunigter Anfahr- und Bremsvorgang vorausgesetzt.

2.2.1.2 Bremsen

Beim Bremsen unterscheidet man im ÖPNV prinzipiell zwischen einer Betriebsbremsung, bei der die Beschleunigungsgrenzwerte zur Wahrung des Fahrkomforts eingehalten werden sollen, und einer Gefahrenbremsung, wo die maximal mögliche Bremsverzögerung angewendet werden soll, welche dann durchaus auch die Komfortgrenzen überschreiten darf. Den regulären Fall stellt die Betriebsbremsung dar, welche somit auch für die Abstimmung der Trassierungsparameter relevant ist.

Was die technischen Bremssysteme betrifft, so unterscheidet man grundsätzlich zwischen Reibungsbremsen und reibungsfreien Bremssystemen.

Klotz-, Trommel- oder Scheibenbremsen werden über eine Druckluftleitung oder elektrisch angesprochen, erzeugen die Bremskraft am Radreifen bzw. an der Radsatzwelle durch mechanische Reibung und gehören somit zu den Reibungsbremsen. Üblicherweise verfügen heutzutage alle Achsen eines Zuges über ein derartiges Bremssystem. Der Nachteil dabei sind der Verschleiß und die damit verbundene Notwendigkeit einer regelmäßigen Wartung sowie die Geräuschentwicklung. [07] Magnetschienenbremsen erzeugen die Bremskraft durch das direkte Anpressen eines Reibschuhes auf die Schiene durch magnetische Anziehungskraft und zählen somit ebenfalls zu den Reibungsbremsen. Der Bremsschuh ist dabei üblicherweise zwischen den Radsätzen eines Drehgestells eingebaut und erzeugt eine ruckartige, nicht regelbare Bremsung. Daher ist dieses System nur für Gefahrenbremsungen vorgesehen. [07] [46]

Zu den reibungsfreien Bremsen zählen die dynamischen Bremsen in Form der elektrischen Widerstandsbremse und der elektrischen Nutzbremse. Dabei funktioniert der Elektromotor des Antriebs als Generator, der eine Umwandlung der kinetischen Energie in Strom ermöglicht. Somit steht ein derartiges Bremssystem nur bei elektrisch angetriebenen Achsen zur Verfügung. Während eine Widerstandsbremse die elektrische Energie in Wärme umwandelt, wird sie bei der elektrischen Nutzbremse ins Netz rückgespeist. Die Bremskraft elektrischer Bremsen nimmt mit sinkender Geschwindigkeit ab. Durch die feinstufige Regelbarkeit dieser Bremssysteme werden diese bei Bahnen mit häufigem Anhalten, also im ÖPNV, gerne eingesetzt. [48] Ein weiteres

mögliches reibungsfreies Bremssystem ist die Wirbelstrombremse, die durch ein magnetisches Feld Wirbelströme im Schienenkopf erzeugt, welche das Fahrzeug abbremsen. Eine mögliche Beeinflussung der Gleistechnik und eine starke Wärmeentwicklung im Gleis sind die Nachteile dieses Systems. [07] Um ein Bremsversagen infolge eines Ausfalls des elektrischen Systems zu vermeiden, sind stets zusätzliche Bremsen am Zug notwendig. [46]

Während es beim Anfahren eines Zuges keine Rolle spielt, bei welchem exakten Streckenpunkt die Höchstgeschwindigkeit erreicht wird, ist beim Bremsvorgang ganz entscheidend, dass der Zug am Ende der Bremsung exakt in der richtigen Position am Bahnsteig zu stehen kommt. Diese Anforderung wird durch die folgenden Zusammenhänge zusätzlich erschwert: Erstens ist kein Bremssystem in der Lage, eine von der Fahrgeschwindigkeit unabhängige, konstante Bremskraft zu liefern. Zweitens kann der Zustand bzw. Verschmutzungsgrad des Gleises stark variieren und somit durch die Haftreibung zwischen Gleis und Schiene einen Einfluss auf die maximal übertragbare Bremskraft haben. Schließlich muss drittens das Stehenbleiben des Zuges am Bahnsteig auch beim Ausfall eines Bremssystems gewährleistet werden können. [09]

Somit ist es sowohl bei der manuellen Fahrt als auch bei der Automatikfahrt eines U-Bahn-Zuges notwendig, in den Bremsvorgang regelnd einzugreifen, was mit Hilfe der Linienzugbeeinflussung passiert. Dazu gibt es eine festgelegte Sollbremsparabel, der eine konstante Bremsverzögerung zu Grunde liegt. Sie stellt die maximal zulässigen Geschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand bis zum Halt in der Station dar.

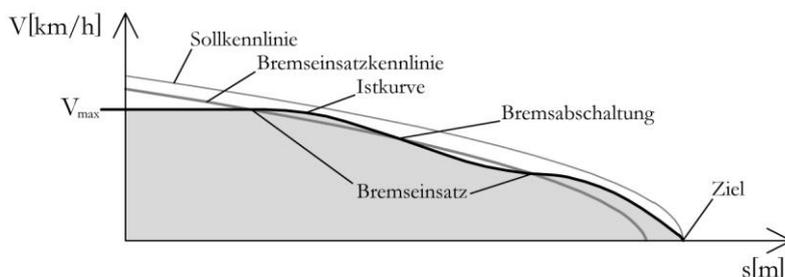


Abbildung 2.03: Bremsregelung, Geschwindigkeits-Weg-Diagramm

Überschreitet der Zug an einem bestimmten Punkt die nach der Bremsseinsatzkennlinie festgelegte Geschwindigkeit, wird die Bremsung verstärkt. Wenn die Bremsseinsatzkennlinie durch die Fahrgeschwindigkeit unterschritten wird, werden die Bremsen zurückgenommen bzw. abgeschaltet. Je reaktionsschneller und feinfühlicher die eingesetzten Bremssysteme sind, umso mehr wird sich die tatsächliche Bremskurve der Sollbremsparabel annähern. Durch die automatische Bremse ergibt sich aufgrund der schnellen Reaktion ein gleichmäßigeres und somit sichereres Bremsverhalten, als es mit manueller Steuerung erreicht werden kann. [48]

2.2.1.3 Fahrschaubild

In einem Fahrschaubild werden kinematische Bewertungsgrößen wie zum Beispiel die Geschwindigkeit und die Wegstrecke in Abhängigkeit voneinander in einem Diagramm dargestellt. [48] Daraus kann abgelesen werden, mit welcher Geschwindigkeit das Fahrzeug einen konkreten Streckenpunkt passiert. Diese Information ist notwendig, um die Überhöhung an jedem Punkt der Strecke auf die jeweilige Fahrgeschwindigkeit abzustimmen.

Für die Ermittlung des Fahrschaubildes einer beschleunigten Bewegung ist es notwendig, die Funktion der Beschleunigung über die Zeit zweimal zu integrieren. Um die analytische Lösung zur Berechnung des Fahrschaubildes herzuleiten, wird daher zur Vereinfachung angenommen, die Funktion der Beschleunigung über die Zeit sei eine abschnittsweise konstante Größe.

$$a(t) = a = \text{const.} \quad (2.09)$$

Unter Berücksichtigung von (2.09) wird (2.02) nun über die Zeit integriert:

$$\int a \cdot dt = v(t)$$

$$v(t) = a \cdot t + v_0 \quad (2.10)$$

Unter der Annahme einer Anfangsgeschwindigkeit von $v_0 = 0 \text{ m/s}$ wird der Ausdruck (2.10) in die Gleichung (2.03) eingesetzt und wieder über die Zeit t integriert:

$$\int a \cdot t \cdot dt = s(t)$$

$$s(t) = a \cdot \frac{t^2}{2} + s_0 \quad (2.11)$$

Unter der Annahme, die zurückgelegte Wegstrecke am Anfang des Beschleunigungsvorganges sei $s_0 = 0 \text{ m}$, ergibt sich aus einer Umformung der Gleichung (2.11) nach der Zeit t :

$$t_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{2 \cdot s}{a}} \quad (2.12)$$

Die positive Lösung aus der Gleichung (2.12) in die Gleichung (2.10) eingesetzt liefert die gesuchte Funktion der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Wegstrecke:

$$v(s) = \sqrt{2 \cdot a \cdot s} \quad (2.13) \text{ [02]}$$

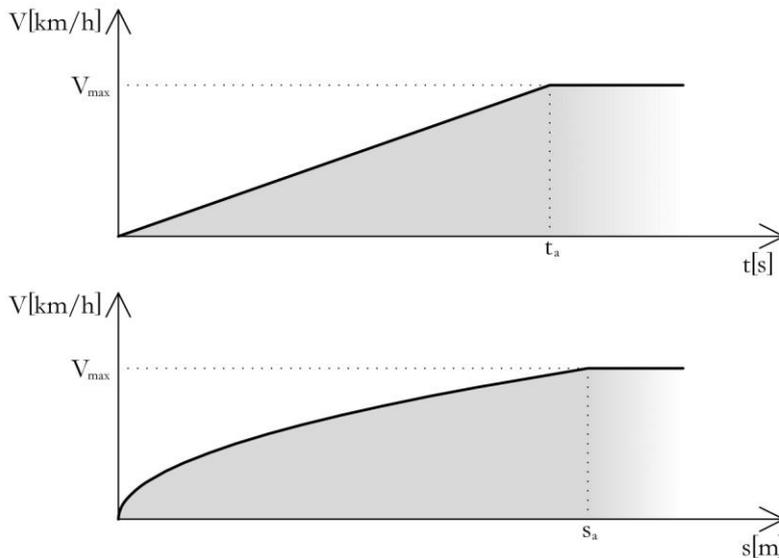


Abbildung 2.04: Geschwindigkeits-Zeit- und Geschwindigkeits-Weg-Diagramm einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung bis zur Höchstgeschwindigkeit

In der Abb. 2.04 ist der Geschwindigkeitsverlauf beim Anfahren mit einer konstanten Beschleunigung dargestellt. Für einen Bremsvorgang mit einer gleich großen konstanten Bremsverzögerung ergibt sich ein zur Abb. 2.04 um eine vertikale Achse gespiegelter Verlauf der Geschwindigkeit von der Maximalgeschwindigkeit bis auf 0.

Allerdings beziehen sich die in Abb. 2.04 dargestellten Diagramme nur auf den Beschleunigungsverlauf eines punktförmigen Objektes. Berücksichtigt man die Länge eines Zuges im Geschwindigkeits-Weg-Diagramm, zeigt sich, dass die verschiedenen Achsen des Zuges einen Streckenpunkt mit jeweils unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchlaufen. Ein derartiges Fahrtafelbild für die Strecke zwischen zwei Haltestellen mit einer Beschleunigungsphase, einer Beharrungsfahrt und einer Bremsphase für einen ganzen Zug ist in der folgenden Abb. 2.05 dargestellt:

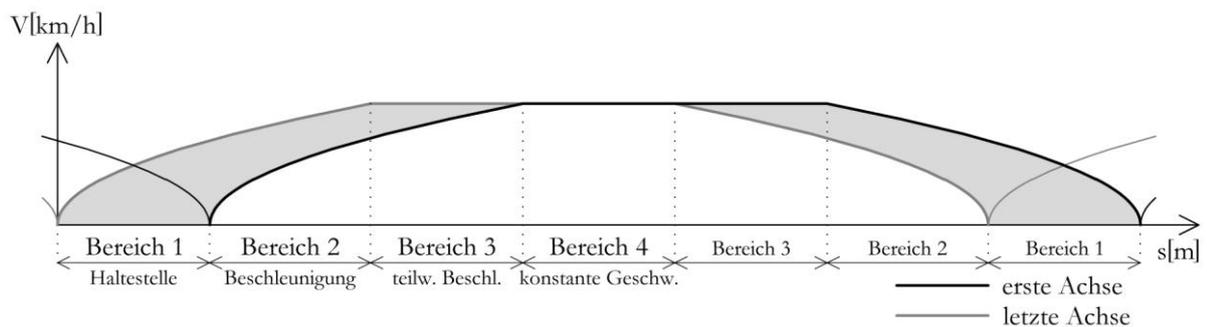


Abbildung 2.05: Fahrtafelbild eines konstant beschleunigten Zuges zwischen zwei Stationen

Die in Abb. 2.05 dargestellte Geschwindigkeit des Zuges in Abhängigkeit von der Strecke ist in die im Folgenden beschriebenen vier charakteristischen Bereiche unterteilt.

Bereich 1 – Haltestelle: In diesem Bereich kommt der Zug planmäßig zum Stillstand. Daher sind für die Festlegung der optimalen Überhöhung in erster Linie die Anforderungen für den Fahrgastwechsel zu berücksichtigen. Die größten auftretenden Geschwindigkeiten stammen im vorderen Bereich der Station von der beschleunigten Fahrt des Zuges beim Anfahren und im hinteren Bereich der Station von der verzögerten Bewegung des Zuges beim Bremsen.

Bereich 2 – Beschleunigung: Ein Streckenpunkt, der in diesem Bereich liegt, wird vom gesamten Zug in einer beschleunigten Bewegung passiert. Die Spreizung der auftretenden Geschwindigkeiten nimmt dabei mit zunehmender Geschwindigkeit ab. Diesen Bereich gibt es sowohl beim Anfahren als auch beim Bremsen eines Zuges unter der Voraussetzung, dass der Beschleunigungs- bzw. der Bremsweg größer sind als die Zuglänge.

Bereich 3 – teilweise beschleunigte Bewegung: In diesem Bereich erreicht der Zug seine planmäßige Höchstgeschwindigkeit. Ein Teil des Zuges durchläuft den Streckenpunkt also in einer beschleunigten Bewegung, während der restliche Teil des Zuges eine konstante Fahrgeschwindigkeit aufweist.

Bereich 4 – Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit: Der gesamte Zug passiert einen Streckenpunkt in diesem Bereich mit der gleichen Geschwindigkeit, in der Regel mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Dieser Bereich tritt nur dann auf, wenn der Abstand zwischen den beiden Haltestellen groß genug ist, um die Höchstgeschwindigkeit zu erreichen und sie länger als eine Zuglänge zu halten.

Ergänzend zum Fahrschaubild in Abb. 2.05 können bei einer Fahrt von Station zu Station auch andere charakteristische Geschwindigkeitsverläufe auftreten. Bei einem relativ kurzen Stationsabstand kann es sein, dass es keinen Bereich 4 gibt, den der ganze Zug mit der Höchstgeschwindigkeit passiert. Diese Situation ist in Abb. 2.06 dargestellt.

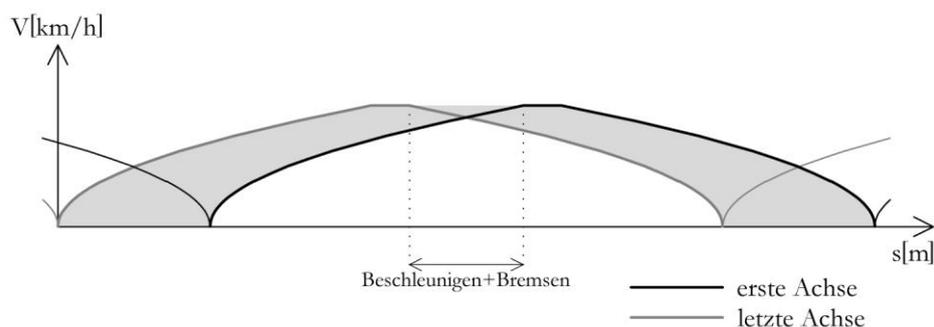


Abbildung 2.06: Fahrschaubild eines konstant beschleunigten Zuges zwischen zwei Stationen mit geringem Abstand

Zu beachten ist dabei, dass im mittleren Streckenbereich des Fahrschaubilds der Abb. 2.06 die Höchstgeschwindigkeit erreicht wird, die Geschwindigkeiten von Zugspitze und Zugende in diesem Bereich aber geringfügig unter der Höchstgeschwindigkeit liegen.

Ist der Stationsabstand noch kleiner, kann es sein, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit gar nicht erreicht wird. Diese Situation ist gemeinsam mit einer abschnittweisen Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit im Fahrschaubild der Abb. 2.07 dargestellt.

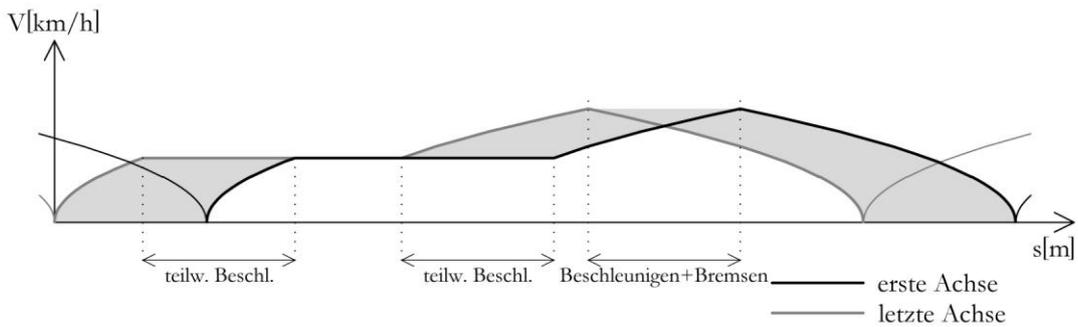


Abbildung 2.07: Fahrschaubild eines konstant beschleunigten Zuges mit abschnittweiser Geschwindigkeitsbeschränkung.

Die in der Abb. 2.05 getroffene Unterteilung des Fahrschaubilds in einzelne charakteristische Geschwindigkeitsbereiche wird im Kapitel 3 aufgegriffen, um die optimale Überhöhung in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit herzuleiten. Dabei sollen die in Abb. 2.06 und 2.07 dargestellten Situationen berücksichtigt werden.

In den Tagesrandzeiten, wenn die Fahrgastwechselzeiten in der Station sehr kurz sind, ist es sinnvoll, die gewonnene Zeit dafür zu verwenden, den Geschwindigkeitsverlauf zwischen den Haltestellen so zu verändern, dass der Energieverbrauch reduziert wird.

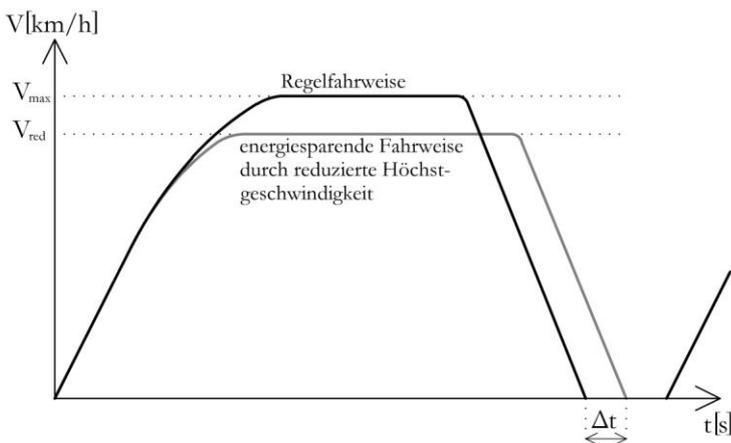


Abbildung 2.08: Energiesparende Fahrweise durch reduzierte Höchstgeschwindigkeit

Dies kann dadurch erreicht werden, dass die zwischen den Stationen gefahrene Höchstgeschwindigkeit reduziert wird, wie es in Abb. 2.08 dargestellt wird. Dadurch wird natürlich die Fahrzeit zwischen den beiden Haltestellen länger.

Eine andere Strategie ist der Verzicht auf jenen Anteil der Antriebskraft, der nach dem Erreichen der Höchstgeschwindigkeit das Beibehalten einer konstanten Geschwindigkeit ermöglicht. Somit wird die Beharrungsfahrt mit gleichbleibender Geschwindigkeit durch eine Ausrollphase ersetzt, in welcher der Zug aufgrund der wirkenden Widerstandskräfte an Geschwindigkeit verliert, wie in Abb. 2.09 gezeigt wird. Die Geschwindigkeit, ab der die Leistungsabschaltung eingesetzt wird, kann automatisch aufgrund der Haltezeit in der Station und des Fahrplans gewählt werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Art der energiesparenden Fahrweise am wirtschaftlichsten ist. [48]

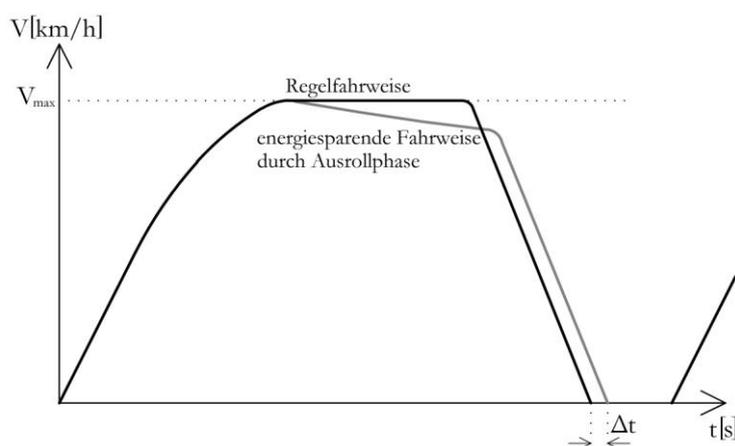


Abbildung 2.09: Energiesparende Fahrweise durch Ausrollphase nach Erreichen der Höchstgeschwindigkeit

Der Einsatz derartiger energiesparender Geschwindigkeitsprofile bedeutet für die Optimierung der Trassierungsparameter, dass entgegen der zuvor formulierten Vereinfachung doch nicht alle fahrplanmäßig verkehrenden Züge eines ÖPNV-Netzes die exakt gleiche Geschwindigkeit haben, sondern dass es dabei eine gewisse Bandbreite zu berücksichtigen gilt.

2.2.2 Bogenfahrt, Fliehbeschleunigung

Unabhängig von etwaigen Längsbeschleunigungen wirkt beim Durchfahren eines Kreisbogens auf ein Eisenbahnfahrzeug eine radial gerichtete Zentrifugalbeschleunigung gemäß folgender Formel:

$$a_R = \frac{v^2}{R} \quad (2.14)$$

a_R [m/s²]..... Flichbeschleunigung

Daraus ergibt sich eine auf das Fahrzeug wirkende Flichkraft zur Bogenaußenseite gemäß folgender Formel:

$$F_R = m \cdot \frac{v^2}{R} \quad (2.15)$$

F_R [N]..... Flichkraft

Die Flichkraft wird durch den Rad-Schiene-Kontakt über den Spurkranz in die bogenäußere Schiene eingeleitet [06] bzw. bei Vorhandensein einer Leitschiene im Bereich der Innenschiene auch durch diese übertragen. Im Fahrbetrieb ist die auftretende Seitenbeschleunigung unter anderem zu begrenzen, um die horizontale Lagesicherheit des Gleises und die Kipp- und Entgleisungssicherheit der Fahrzeuge zu gewährleisten. Abhängig vom Fahrzeugschwerpunkt besteht ab einer Seitenbeschleunigung von ca. 5 m/s² die Gefahr des Kippens der Fahrzeuge. Eine erhöhte Entgleisungsgefahr durch Aufklettern eines Spurkranzes besteht ab einer Seitenbeschleunigung von ca. 2 m/s². [07] Die Entgleisungssicherheit wird jedoch nicht in erster Linie durch die auftretende Seitenbeschleunigung maßgeblich beeinflusst, sondern durch die Art der Laufwerkskonstruktion und den eingebauten Bogenradius. [10] Jedenfalls lässt sich durch eine Verringerung der auftretenden Seitenbeschleunigungen der Verschleiß an Fahrzeugen, Schienen und am Gleiskörper vermindern und somit können die Wartungsintervalle verlängert werden.

Tatsächlich ist aber in der Regel das entscheidende Kriterium für die Begrenzung der Flichkraft der Fahrkomfort für die Fahrgäste bzw. die Ladungssicherung. Eine auf den Fahrgast wirkende seitliche Beschleunigung von 1 m/s² wird als Obergrenze für ein Verkehrsmittel mit Stehplätzen angesehen. [07] [49] Werden die Fahrgäste ausschließlich sitzend befördert, so können höhere Seitenbeschleunigungen toleriert werden. [09] [49] Üblicherweise wird ein Grenzwert von 0,65 m/s² oder 0,85 m/s² als Komfortkriterium für maximale seitliche Beschleunigungswerte angesetzt. [06]

Aufgrund von Drehbewegungen des gefederten und somit nachgiebig gelagerten Wagenkastens um die Längsachse bei seitlichen Beschleunigungen werden die auf die Fahrgäste wirkenden Beschleunigungen um den Wankzuschlag verstärkt. Daher müssen die Grenzwerte der Seitenbeschleunigung aus der Trassierung geringer angesetzt werden als die eigentlich aus Komfortgründen akzeptablen Werte. [10]

In den in der vorliegenden Arbeit vorgenommenen Überlegungen und Berechnungen wurde die Wirkung der Feder- und Dämpferelemente im Fahrwerk der Eisenbahnwagen jedoch nicht berücksichtigt.

2.2.3 Überhöhung

In geraden Gleisen sind die Schienenoberkanten beider Stränge in der Regel gleich hoch einzubauen. [49] Um bei einer Bogenfahrt der in Richtung der Bogenaußenseite wirkenden Zentrifugalbeschleunigung etwas entgegenzusetzen, ohne die Geschwindigkeit verringern bzw. den Bogenradius vergrößern zu müssen, wird in der Regel in einem Kreisbogen der bogenäußere Schienenstrang höher als der innere eingebaut. [06] Dies geschieht in Abhängigkeit vom Oberbausystem entweder durch das alleinige Anheben der Außenschiene oder durch ein gleichzeitiges Anheben der Außenschiene und Absenken der Innenschiene jeweils um die Hälfte des Betrags der Überhöhung.

Dadurch steht die Wirkungsrichtung der Erdbeschleunigung nun nicht mehr normal auf die Gleisebene und somit wirkt ein Anteil der Erdbeschleunigung als seitliche Beschleunigung normal zur Wagenachse in Richtung der tiefer liegenden Schiene.

2.2.3.1 Ausgleichende Überhöhung

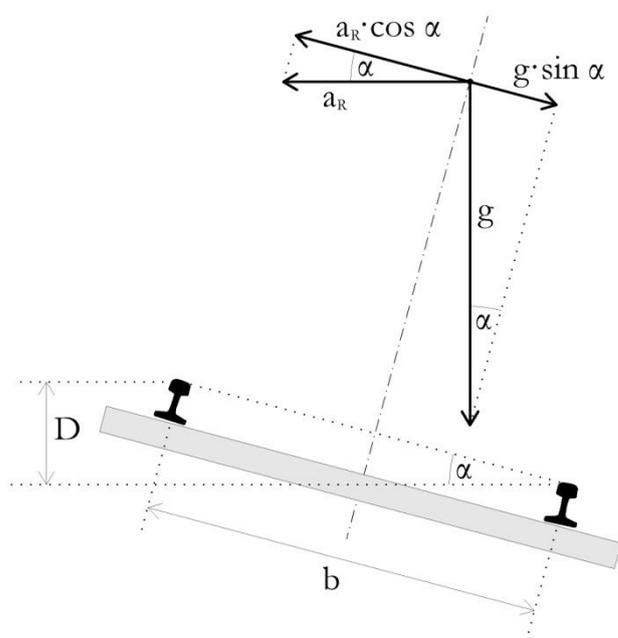


Abbildung 2.10: Beschleunigungen bei einer Bogenfahrt

Die ausgleichende bzw. theoretische Überhöhung ist jene Überhöhung, bei der die Resultierende der auf das Fahrzeug einwirkenden seitlichen Beschleunigungen null wird. Somit muss gemäß Abb. 2.10 die folgende Gleichung gelten:

$$a_R \cdot \cos \alpha = g \cdot \sin \alpha \quad (2.16)$$

Der Winkel α bezeichnet dabei die Querneigung der Gleisebene, gemäß Abb. 2.10 gilt:

$$\sin \alpha = \frac{D}{b} \quad (2.17) [06]$$

D [mm] eingebaute Überhöhung

b [mm] Lauflinienabstand, Abstand der Radaufstandspunkte

(für Normalspur gilt: $b = 1.500$ mm)

Die maximal zulässige eingebaute Überhöhung beträgt bei Bahnen mit Normalspur üblicherweise ca. 150 bis 180 mm. Dieser Grenzwert ist notwendig, um die einwirkenden Kräfte aus der Bogenfahrt auf den Oberbau zu beschränken und um die Hangabtriebskraft auf das Fahrzeug im Falle eines außerplanmäßigen Halts zu begrenzen.

Für die Wiener U-Bahn gilt ein Maximalwert für die zulässige Überhöhung von 150 mm. [13] Daher beträgt der Ausdruck $\cos \alpha$ in der Gleichung (2.16) mindestens 0,995. Dieser Ausdruck wird für die weiteren Rechenschritte näherungsweise gleich eins gesetzt, wodurch ein Fehler von maximal 0,5 % in Kauf genommen wird.

Somit kann die ausgleichende Überhöhung unter Berücksichtigung der Gleichungen (2.14), (2.16) und (2.17) folgendermaßen ermittelt werden:

$$D_{equ} = \frac{v^2}{R} \cdot \frac{b}{g} \quad (2.18)$$

D_{equ} [mm] ausgleichende bzw. theoretische Überhöhung

Durch das Einsetzen aller Konstanten ergibt sich die Berechnungsformel für die ausgleichende Überhöhung wie folgt:

$$D_{equ} = \frac{V^2}{3,6^2 \cdot R} \cdot \frac{1500}{9,81}$$

$$D_{equ} = 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} \quad (2.19) [06]$$

V [km/h] Geschwindigkeit des Fahrzeugs

2.2.3.2 Fehlüberhöhung, freie Seitenbeschleunigung

Ist die zur Gleisebene parallele Komponente der Fliehkraft in Abb. 2.10 größer als die entgegengesetzt wirkende Komponente der Erdbeschleunigung, so wirkt auf das Fahrzeug in der Bogenfahrt eine resultierende Seitenbeschleunigung zur Bogenaußenseite. Diese freie Seitenbeschleunigung ist proportional zur Fehlüberhöhung, mit der die Differenz von ausgleichender und eingebauter Überhöhung bezeichnet wird.

$$U = D_{equ} - D \quad (2.20)$$

U [mm]..... Fehlüberhöhung bzw. Überhöhungsfehlbetrag

Die Formel (2.20) setzt voraus, dass sich die eingebaute Überhöhung an der Bogenaußenseite befindet und die äußere Schiene somit höher liegt als die innere. Bei einer Überhöhung der Innenschiene, wie sie beim abzweigenden Strang einer in ein überhöhtes Gleis eingebauten Außenbogenweiche auftreten kann, ergibt sich die Fehlüberhöhung aus der Summe von eingebauter Überhöhung und ausgleichender Überhöhung.

Unter Berücksichtigung von (2.18) ergibt sich aus Gleichung (2.20) die Formel zur Ermittlung des Überhöhungsfehlbetrages wie folgt:

$$U = \frac{v^2}{R} \cdot \frac{b}{g} - D \quad (2.21)$$

Durch Einsetzen von Formel (2.19) in die Gleichung (2.20) ergibt sich die Bemessungsformel für die Fehlüberhöhung eines Gleises mit Normalspur wie folgt:

$$U = 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} - D \quad (2.22)$$

Analog zur Formel (2.18) lässt sich die Beziehung zwischen der Fehlüberhöhung und der freien Seitenbeschleunigung unter Berücksichtigung der Formel (2.13) wie folgt anschreiben:

$$U = a_q \cdot \frac{b}{g} \quad (2.23)$$

a_q [m/s²] freie bzw. unausgeglichene Seitenbeschleunigung

Für die freie Seitenbeschleunigung zufolge der Fliehkraft und der Überhöhung unter Vernachlässigung von Anteilen aus der Verwindung ergibt sich gemäß (2.21) und (2.23) somit der folgende Ausdruck:

$$a_q = \frac{v^2}{R} - D \cdot \frac{g}{b} \quad (2.24)$$

Diese freie Seitenbeschleunigung ist jene seitliche Beschleunigung, die auf die Fahrzeuge bzw. auf die Fahrgäste in Richtung der Bogenaußenseite einwirkt. Es ist jedoch nur möglich, den quasi-statischen Anteil der unausgeglichene Seitenbeschleunigung rechnerisch zu ermitteln. Der von der Laufgüte der Fahrzeuge und der Qualität der Gleislage abhängige dynamische Anteil kann nur durch Messungen ermittelt werden. Daher ist es sinnvoll, Grenzwerte für den geometrisch eindeutigen Begriff des Überhöhungsfehlbetrages festzulegen, anstatt für die Seitenbeschleunigung. [10]

Der empfohlene maximal zulässige Überhöhungsfehlbetrag nimmt ab einer Geschwindigkeit von ca. 100 km/h mit zunehmender Geschwindigkeit ab. Für den Geschwindigkeitsbereich eines städtischen Nahverkehrsmittels ist der maximal zulässige Wert somit in der Regel eine Konstante. [04] Er sollte im Nahverkehr auf etwa 80 bis 110 mm begrenzt werden, um einen guten Reisekomfort zu erzielen. [10]

Die Begrenzung des Überhöhungsfehlbetrages führt dazu, dass es in engen Kreisbögen notwendig ist, abhängig von der Entwurfsgeschwindigkeit eine Mindestüberhöhung vorzusehen. Diese Mindestüberhöhung ist gerade so groß, dass beim Durchfahren des Bogens mit der maximal zulässigen Geschwindigkeit die maximal zulässige Fehlüberhöhung auftritt.

2.2.3.3 Überhöhungsüberschuss

Ein Überhöhungsüberschuss ist eine negative Fehlüberhöhung. Er entsteht, wenn die parallel zur Gleisebene wirkende Komponente der Fliehkraft kleiner ist als die entgegengesetzt wirkende Komponente der Erdbeschleunigung. Anders formuliert ist bei einem Streckenabschnitt mit Überhöhungsüberschuss die eingebaute Überhöhung größer, als es die Geschwindigkeit und der Bogenradius erfordern würden. Dabei wirkt eine Seitenbeschleunigung in Richtung der Bogeninnenseite.

$$E = D - 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} \quad (2.25)$$

E [mm]..... Überhöhungsüberschuss

Somit kommt es automatisch zu einem Überhöhungsüberschuss, wenn ein Zug außerplanmäßig in einem Bereich mit eingebauter Überhöhung zum Stillstand kommt. Unter der Annahme, dass dies seltener passiert als das Durchfahren des Bogens mit der geplanten Höchstgeschwindigkeit,

ist der maximal zulässige Überhöhungsüberschuss in der Regel höher als die größte zulässige Fehlüberhöhung. [10]

In einigen Regelwerken ist festgelegt, dass die eingebaute Überhöhung nicht größer sein darf als die ausgleichende Überhöhung, was gleichbedeutend ist mit der Aussage, dass bei einer Fahrt mit der Entwurfsgeschwindigkeit kein Überhöhungsüberschuss auftreten darf. [10] Diese Regelung ist durchaus sinnvoll, da bei einer größeren als der auf die Entwurfsgeschwindigkeit bezogenen ausgleichenden Überhöhung die auftretenden Seitenbeschleunigungen für jeden Zug größer werden.

Darüber hinaus ist bei der Trassierung für die Vollbahn üblicherweise zu berücksichtigen, dass schnelle Reisezüge und langsame Güterzüge auf demselben Gleis unterwegs sind. Der Einbau einer ausgleichenden Überhöhung für die schnellen Züge führt somit zu einem Überhöhungsüberschuss für alle langsameren Züge und somit zu einer größeren Beanspruchung der Innenschiene. Aus diesem Grund wird in diesen Fällen mit einer sogenannten Regelüberhöhung trassiert, die sich zwischen den Werten der ausgleichenden Überhöhung von schnellen und langsamen Zügen befindet. Somit tritt bei schnellen Zügen eine Fehlüberhöhung auf und bei langsamen Güterzügen ein Überhöhungsüberschuss. [10]

Diese Problematik der unterschiedlichen Geschwindigkeiten einzelner Zuggattungen stellt sich in einem ÖPNV-Netz wie jenem der Wiener U-Bahn nicht in der für die Vollbahn beschriebenen Form. Hier treten unterschiedliche Geschwindigkeiten hauptsächlich in jenen Abschnitten auf, die der Zug in einer beschleunigten Bewegung durchfährt. Eine für die mittlere Geschwindigkeit der passierenden Wagen ausgleichende Überhöhung führt somit zu einem Überhöhungsüberschuss für den langsameren Teil des Zuges.

2.2.4 Querruck, Seitenruck

Wie die absoluten Beschleunigungsgrößen ist auch der auftretende Ruck relevant für den Fahrkomfort und die Belastungen des Rad-Schiene-Systems. Der echte Ruck bezeichnet im physikalischen Sinn die Änderung einer Beschleunigungsgröße je Zeiteinheit. Somit versteht man unter dem echten Querruck die Ableitung der Funktion der unausgeglichenen Seitenbeschleunigung nach der Zeit. [16]

$$r_q = \frac{da_q}{dt} \quad (2.26)$$

r_q [m/s³]..... Querruck, nicht ausgeglichene Querbeschleunigung je Zeiteinheit

Wie aus Gleichung (2.24) ersichtlich ist, ändert sich die Seitenbeschleunigung bei konstanter Geschwindigkeit entweder durch die Änderung der Krümmung oder durch die Änderung der Überhöhung. Beides tritt üblicherweise ausschließlich in einem Übergangsbogen auf. Der zulässige echte Querruck kann somit in einer Trassierungsvorschrift durch die Beschreibung der zulässigen Geometrie von Übergangsbögen und Überhöhungsrampe indirekt festgelegt werden.

Nachdem eine sprunghafte Überhöhungsänderung nicht ausführbar ist, entsteht bei einer sprunghaften Krümmungsänderung eine Unstetigkeitsstelle in der Beschleunigungsfunktion und somit theoretisch ein unendlich großer echter Ruck. Dies ist zum Beispiel beim unmittelbaren Übergang einer Gerade in einen Kreisbogen bzw. bei der unmittelbaren Abfolge zweier Kreisbögen mit unterschiedlichem Radius der Fall. Tatsächlich ist die auf die Fahrgäste wirkende Änderung der freien Seitenbeschleunigung in der Regel nicht ganz so abrupt, da die einzelnen Radsätze eines Wagens den Krümmungswechsel zeitlich versetzt passieren und die eingebauten Feder- und Dämpferelemente sowie das Spurspiel und die tatsächliche Gleislage den Ruck zeitlich etwas ausdehnen und dadurch abschwächen. [10]

Auf den Hauptgleisen einer Eisenbahnstrecke versucht man generell, abrupte Krümmungswechsel durch den Einbau von Übergangsbögen zu vermeiden. Auf den Zweigggleisen von Weichen werden diese aufgrund der gewünschten kompakten Bauform jedoch in der Regel weggelassen und die Krümmungswechsel in Kauf genommen. [10]

Zur einfacheren Beurteilung einer derartigen sprunghaften Änderung der unausgeglichenen Seitenbeschleunigung hat es sich im Eisenbahnwesen eingebürgert, die Differenz dieser Beschleunigungsgrößen ebenfalls als Ruck zu bezeichnen. [07] Um Verwechslungen zu vermeiden, wird daher die zuvor beschriebene Ableitungsfunktion der Beschleunigung als echter Ruck bezeichnet.

In der Abb. 2.11 ist der Verlauf von Seitenbeschleunigung und Ruck für einen nicht überhöhten Streckenabschnitt mit der Abfolge von Gerade, Übergangsbogen, Kreisbogen und Gerade dargestellt, der mit konstanter Geschwindigkeit durchfahren wird. Ohne Überhöhung ist die Seitenbeschleunigung bei konstanter Geschwindigkeit gemäß der Gleichung (2.24) proportional zum Krümmungsverlauf. Der dargestellte Krümmungsverlauf im Übergangsbogen ist konstant und entspricht somit dem einer Klothoide. Aus der Ableitung der Funktion der unausgeglichenen Seitenbeschleunigung gemäß (2.24) ergibt sich für einen linearen Krümmungsverlauf ein konstanter Ruck im Bereich des Übergangsbogens. Die Unstetigkeitsstelle der Seitenbeschleunigung beim Übergang von Kreisbogen auf Gerade führt theoretisch zu einem unendlich großen echten

Ruck an dieser Stelle. Zur Beurteilung des Rucks wird daher an dieser Stelle die Differenz der Seitenbeschleunigungen vor und nach der Unstetigkeitsstelle herangezogen.

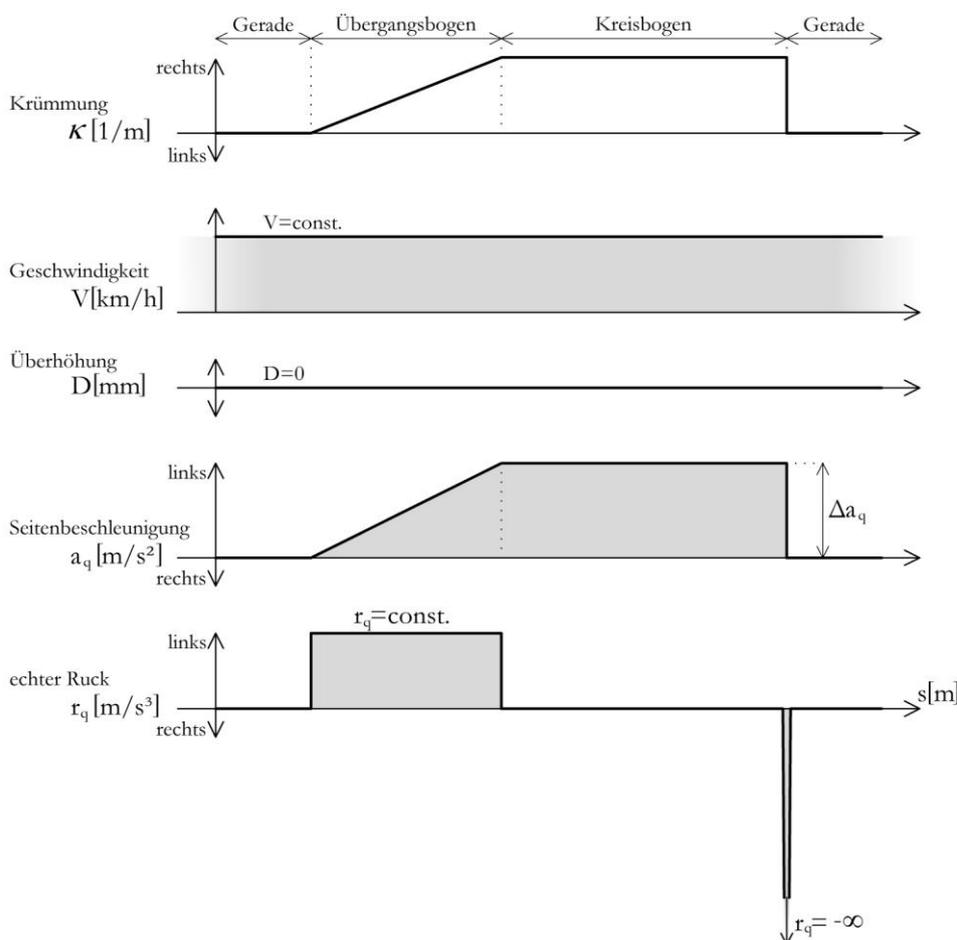


Abbildung 2.11: Verlauf von Seitenbeschleunigung und Ruck bei einer Bogenfahrt

2.2.5 Übergangsbogen und Überhöhungsrampe

Ein Übergangsbogen wird zwischen zwei Trassierungselementen mit unterschiedlicher Krümmung eingebaut, um Unstetigkeiten im Verlauf der Krümmung zu vermeiden. [06] Somit sind die Krümmungswerte am Beginn und am Ende eines Übergangsbogens durch die angrenzenden Elemente vorgegeben.

Ist der angrenzende Kreisbogen überhöht, dann muss es Bereiche geben, in denen die Überhöhung von null auf den gewünschten Zielwert anwächst. Dieser Anstieg der Überhöhung wird als Überhöhungsrampe bezeichnet und wird üblicherweise auf die Länge und Art des Übergangsbogens in der Form abgestimmt, sodass die Überhöhung stets proportional zum Krümmungsverlauf ist. [02] [10]

Für den Krümmungsverlauf zwischen Anfangs- und Endwert gibt es mehrere geometrische Lösungen. Die derzeit in Europa am häufigsten eingebaute Form des Übergangsbogens ist die Klothoide, deren Kennzeichen ein linearer Krümmungsverlauf in Abhängigkeit von der Wegstrecke ist. [04]

$$L \cdot R = A^2 \quad (2.27) \text{ [06]}$$

L [m]..... Übergangsbogenlänge

A [m]..... Klothoidenparameter

Das in Gleichung (2.27) beschriebene Bildungsgesetz der Klothoide zeigt, dass durch die Wahl des Klothoidenparameters A bestimmt wird, wie schnell sich die Krümmung mit fortschreitender Weglänge ändert. Durch die Festlegung von Mindestwerten für diesen Parameter kann somit der echte Seitenruck begrenzt werden, der beim Befahren einer nicht überhöhten Klothoide mit der Entwurfsgeschwindigkeit auftritt.

Wird die Überhöhungsrampe bei einer Klothoide proportional zum Krümmungsverlauf, also linear, eingebaut, entsteht jeweils am Anfang und Ende der Rampe ein vertikaler Knick in der überhöhten Schiene. Dieser Knick wird selbstverständlich nicht eingebaut, sondern es kommt in diesen Bereichen zu einer Ausrundung der Schiene, die jedoch bei kleinen Rampenneigungen weder rechnerisch nachgewiesen noch planmäßig erfasst wird. Trotz der dadurch entstehenden geringfügigen Abweichung zwischen der Form des Krümmungs- und des Überhöhungsverlaufs haben sich Klothoiden als Übergangsbögen bewährt. [10] Zu beachten ist jedoch, dass aufgrund der Ausrundungen im Überhöhungsverlauf, die über Anfang und Ende des Übergangsbogens hinausgehen, bei der Anordnung zweier Klothoiden direkt nebeneinander die planmäßigen Überhöhungen in den Anfangs- bzw. Endpunkten nicht ausgeführt werden können. [12]

Alternativen zur Form der Klothoide stellen Übergangsbögen mit geschwungenem Krümmungsverlauf dar, die mit einer Überhöhungsrampe mit einem gleichartigen geometrischen Verlauf kombiniert werden. Dazu zählen S-förmige Übergangsbögen mit der Geometrie zweier quadratischer Parabeln, sowie Übergangsbögen in Form zweier kubischer Parabeln. Weiters gibt es Parabeln vierten Grades als Übergangsbogenform sowie Übergangsbögen mit sinus- bzw. cosinusförmigen Krümmungslinien. [02] [06] [10] Nachdem diese geometrischen Formen im Netz der Wiener U-Bahn keine Anwendung finden, werden sie an dieser Stelle nicht ausführlicher beschrieben.

Geht eine Gerade ohne Übergangsbogen in einen Kreisbogen über, so ist die Gerade zugleich eine Tangente an den Kreis. Wird zwischen diesen Elementen ein Übergangsbogen angeordnet,

so bedingt die mit der Länge zunehmende Krümmung des Übergangsbogens, dass die Gerade nun keine Tangente an den Kreisbogen mehr darstellt, sondern um ein bestimmtes Maß abgerückt werden muss. [10] Die notwendige Größe dieser Tangentenabrückung ist von der gewählten Form des Übergangsbogens abhängig. In Bestandsgleisen ist es daher bei einer festgelegten Lage von Gerade und Kreisbogen in der Regel nachträglich nicht möglich, die Art des Übergangsbogens beliebig zu ändern.

Bei der Verwendung von Klothoiden wird empfohlen, zwischen zwei Übergangsbögen einen Streckenabschnitt mit gleichbleibender Krümmung einzubauen. Ist dies bei der Verbindung zweier gegenläufiger Kreisbögen nicht möglich, so soll die Krümmung zwischen den Kreisbögen linear verlaufen. [06] Das wird dadurch erzielt, dass für beide Klothoiden der Wert des Parameters A gleich groß gewählt wird. Der Verlauf der Überhöhung kann ebenfalls linear in Form einer Scherenrampe angeordnet werden. [06] [10]

Zwischen zwei gleichsinnig orientierten Kreisbögen mit unterschiedlichen Radien kann es ebenfalls erforderlich sein, einen Übergangsbogen vorzusehen. Eine derartige Trassierung wird als Korbbogen bezeichnet. [02]

Um einen geringfügigen Richtungswechsel eines Gleises zu bewerkstelligen, wird fallweise ein sogenannter Scheitelbogen eingebaut. Dabei handelt es sich um zwei direkt aneinander grenzende Übergangsbögen ohne dazwischen liegenden Kreisbogen. [10]

2.2.6 Verwindung, Wankwinkelgeschwindigkeit

Der Anstieg der Überhöhungsrampe, also die Änderung der Überhöhung in Abhängigkeit von der Wegstrecke, wird als Verwindung bezeichnet. Im Bereich einer Überhöhungsrampe gelten für die einzelnen Radsätze eines Wagens unterschiedliche Überhöhungen und die Radaufstandspunkte befinden sich nicht mehr in einer Ebene. Dadurch sind die Radlasten nicht mehr gleich verteilt und die Entgleisungssicherheit des ersten Radsatzes nimmt ab. Also ist die zulässige Verwindung in den Trassierungsvorschriften zu begrenzen. [49]

Ein weiterer Grund, die Größe der Verwindung zu begrenzen, ist ihr Einfluss auf die Wankwinkelgeschwindigkeit, die durch die Rotation eines Wagens beim Durchfahren einer Überhöhungsrampe entsteht. Bei einer konventionellen, auf die Gleisachse bezogenen Geometrie eines Übergangsbogens liegt die Rotationsachse in der Gleisebene. Wird ausschließlich die Außenschiene überhöht, so liegt die Drehachse im Bereich der bogeninneren Schiene. Werden Außen- bzw. Innenschienen in gleichem Maß höher bzw. tiefer eingebaut, wie es im Netz der

Wiener U-Bahn der Standard ist, liegt die Rotationsachse der Wankwinkelbewegung in der Gleisachse.

Der Verlauf der Wankwinkelgeschwindigkeit, also die Wankwinkelbeschleunigung und der Wankwinkelruck sind relevant für die Laufruhe und den Fahrkomfort. Durch den Abstand zwischen den Schwerpunkten von Fahrzeugen und Fahrgästen zur Rotationsachse der Wankwinkelbewegung führen Wankwinkelbeschleunigungen neben den Drehbeschleunigungen zu zusätzlichen horizontalen und fallweise auch zu vertikalen Beschleunigungen, die auf Fahrzeuge und Passagiere wirken.

Die Wankwinkelgeschwindigkeit ist die erste zeitliche Ableitung des Überhöhungswinkels des Gleises, der sich aus der Überhöhung dividiert durch den Lauflinienabstand ergibt. [12] Daraus erhält man jeweils durch nochmaliges Ableiten der Funktion nach der Zeit die Wankwinkelbeschleunigung und den echten Wankwinkelruck.

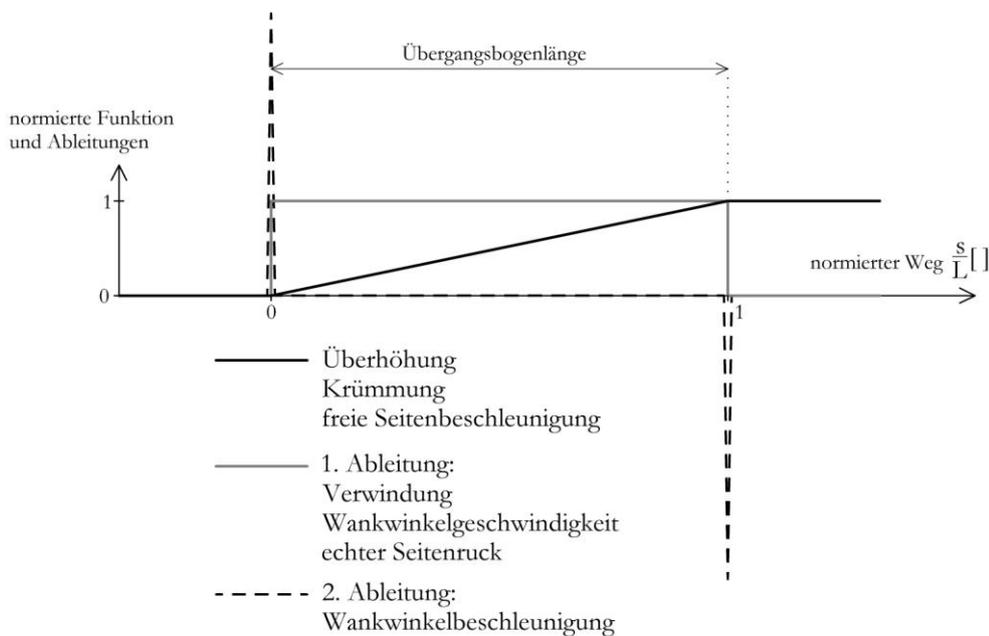


Abbildung 2.12: Normierte Krümmung bzw. Überhöhung und Ableitungsfunktionen einer Klothoide mit linearer Überhöhungsrampe

In der Abbildung 2.12 ist eine Klothoide mit linearer Überhöhungsrampe dargestellt, deren normierter linearer Krümmungs- und Überhöhungsverlauf ident sind. Diese Funktion entspricht weiters der unausgeglichene Seitenbeschleunigung in der Gleisebene. Die erste Ableitung dieser Funktion ist im Bereich des Übergangsbogens konstant und entspricht der Verwindung, der Wankwinkelgeschwindigkeit sowie dem echten Seitenruck. Sie weist am Anfangs- und Endpunkt der Klothoide eine Unstetigkeitsstelle infolge des Knicks im Krümmungs- bzw. Überhöhungsverlauf auf. Die zweite Ableitung ist im Bereich der Klothoide null und am Anfangs- und End-

punkt der Klothoide theoretisch unendlich. Sie entspricht dem Verlauf der Wankwinkelbeschleunigung beim Durchfahren einer Klothoide ohne Ausrundung der Endpunkte der Überhöhungsrampe.

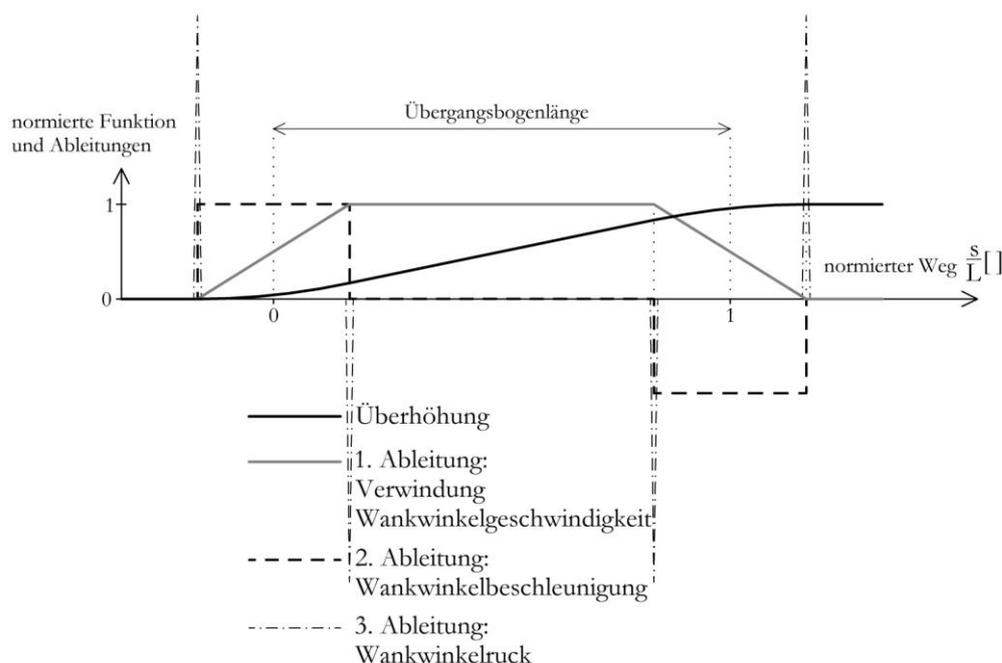


Abbildung 2.13: Normierte Überhöhung und Ableitungsfunktionen einer Klothoide mit linearer Überhöhungsrampe mit Ausrundungen

In der Abb. 2.13 ist der reale Verlauf einer geraden Überhöhungsrampe dargestellt, die an den Endpunkten ausgerundet ist. Unter der Annahme von Ausrundungen in Form einer quadratischen Parabel ergibt sich für die 2. Ableitung des Überhöhungsverlaufes, die Wankwinkelbeschleunigung, ein besserer Verlauf hinsichtlich des Fahrkomforts als in Abb. 2.12. Für die 3. Ableitung der Überhöhung, also den Wankwinkelruck, entstehen trotzdem theoretisch unendlich große Werte.

Wie bereits erwähnt, gibt es durch die Ausrundungen an den Enden der Klothoide eine eigentlich nicht gewünschte Abweichung zwischen dem Verlauf von Krümmung und Überhöhung. Dies führt zu einem erhöhten Verschleiß von Schienen und Rädern. Darüber hinaus werden an diesen Stellen häufiger Gleislagefehler beobachtet als in den übrigen Streckenabschnitten, da durch die Unstetigkeiten große Kräfte wirken. [01]

2.2.7 Schwerpunktstrassierung, Wiener Bogen®

Aufgrund dieser erwähnten Nachteile der konventionellen Trassierung unter Verwendung einer geraden Überhöhungsrampe hat man sich im Lauf der Zeit immer wieder damit beschäftigt, die Geometrie von Übergangsbogen und Überhöhungsrampe zu verbessern. Den meisten Lösungen

ist gemein, dass dabei die Fahrzeuge als Massenpunkt in der Gleisachse betrachtet werden und dass alle relevanten Beschleunigungen ebenfalls mit Hilfe dieser geometrischen Vereinfachung ermittelt werden. Jedoch befinden sich die Schwerpunkte von Eisenbahnwagen und Fahrgästen tatsächlich in einer Höhe von ca. 1,5 bis 1,8 m über der Gleisebene.

Wird diese tatsächliche Schwerpunktlage bei der Geometrie eines Übergangsbogens und der zugehörigen Überhöhungsrampe berücksichtigt, so spricht man von einer Schwerpunktstrassierung. Dabei wird der Schwerpunkt eines Fahrzeugs auf einer optimalen Raumkurve durch einen Bogen geführt und diese Kurve bildet gleichzeitig die Drehachse für die Wankwinkelbewegung. Dadurch ergibt sich ein optimaler Kräfteverlauf mit geringstmöglichen Verschleißerscheinungen. [01] Erste Überlegungen zu diesem Prinzip der Trassierung wurden bereits im Jahr 1903 angestellt. [15]

Eine tatsächlich in die Praxis umgesetzte Version dieses Prinzips ist der sogenannte Wiener Bogen®, der von Dr. H. Hasslinger entwickelt und in Zusammenarbeit mit den Wiener Linien und den ÖBB im Juli 2002 zum österreichischen und im Folgejahr zum europäischen Patent angemeldet wurde. [01] [02] Weitere geläufige Bezeichnungen sind „neue Übergangskurve“ bzw. A.T.M. (Advanced Track Alignment). [01] Das Prinzip des Wiener Bogens® ist, dass es durch den Verlauf von Radius und Überhöhung auf der Schwerpunktshöhe eines Fahrzeuges zu keinerlei Unstetigkeiten im Verlauf der auftretenden Beschleunigung und des Rucks kommt. [02]

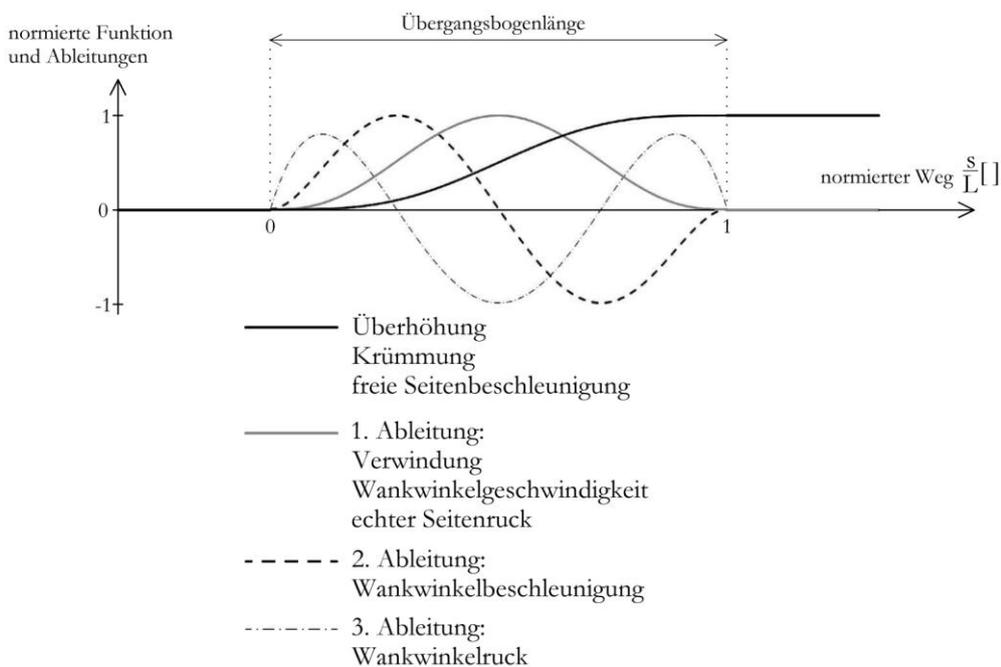


Abbildung 2.14: Normierte Überhöhung und Krümmung in Bezug auf die Schwerpunktlage sowie deren Ableitungsfunktionen für einen Wiener Bogen®

Beim Wiener Bogen® wird der Verlauf von Krümmung und Überhöhung in der Schwerpunkts-
höhe des Fahrzeugs durch eine Polynomfunktion 7. Grades beschrieben. Sie ist so gewählt, dass
sich bis zur 3. Ableitung keinerlei Unstetigkeitsstellen ergeben. Erst in der 4. Ableitung treten an
den Endpunkten des Übergangsbogens Sprünge im Verlauf auf, was für die Laufruhe und den
Fahrkomfort nicht von Bedeutung ist. In der Abb. 2.14 ist die normierte Grundfunktion für den
Wiener Bogen des Typs HHMP7 mit ihren normierten Ableitungsfunktionen dargestellt. Diese
Übergangsbogenform lässt sich durch die folgende Funktion beschreiben:

$$f\left(\frac{s}{L}\right) = \left(\frac{s}{L}\right)^4 \cdot \left(35 - 84 \cdot \frac{s}{L} + 70 \cdot \left(\frac{s}{L}\right)^2 - 20 \cdot \left(\frac{s}{L}\right)^3\right) \quad [12]$$

Diese Bogenform für den Schwerpunkt des Fahrzeugs bedingt eine Übergangsbogenform in der
Gleisebene, die am Beginn des Wiener Bogens® zuerst leicht in die Gegenrichtung des eigent-
lichen Bogens ausschwingt. [02] Der Gegenbogen zu Beginn lässt sich mit der Bogenfahrt eines
Fahrradfahrers vergleichen, der am Beginn einer Kurve ebenfalls einen Gegenbogen benötigt, um
sein Gewicht in Richtung der Bogeninnenseite zu verlagern, wo sich aus Gewicht und Fliehkraft
eine Resultierende in der Fahrzeugachse ergibt. Aufgrund desselben Prinzips ist am Ende des
Übergangsbogens vor dem anschließenden Kreisbogen ein kurzer Abschnitt notwendig, der eine
stärkere Krümmung als der angrenzende Kreisbogen aufweist.

Übergangsbögen vom Typ des Wiener Bogens® wurden erstmals im Jahr 2001 von der ÖBB auf
der Westbahn und von den Wiener Linien auf der Linie U4 zwischen den Stationen Friedens-
brücke und Spittelau eingebaut. [02] Weiters kamen im Zuge der Verlängerung der Linie U2
Wiener Bögen® zur Anwendung und bei Umbaumaßnahmen entlang der Linie U6. [17] Auch im
Netz der ÖBB wurden in Folge weitere Wiener Bögen® eingebaut.

Die eingebauten Übergangsbögen wurden durch vergleichende Beschleunigungsmessungen ein-
gehend geprüft, der Einfluss dieser Übergangsbogenform auf die notwendigen Erhaltungsmaß-
nahmen wurde beobachtet. Das Resultat dieser Untersuchungen ist, dass der Wiener Bogen® zu
einer größeren Laufruhe der Fahrzeuge und somit zu einem höheren Fahrkomfort der Passagiere
beiträgt. Weiters reduziert sich der Verschleiß und somit verlängern sich die notwendigen
Instandhaltungsintervalle, wodurch sich die höheren Kosten beim Einbau in wenigen Jahren
amortisieren. [15] [18]

Schließlich wurde die Anwendung der Schwerpunktstrassierung auch in den jeweiligen Tras-
sierungsvorschriften von ÖBB und Wiener U-Bahn verankert. Die aktuell gültige Fassung der
Trassierungsvorschrift der Wiener U-Bahn aus dem Jahr 2002 sieht bereits die „Neue Übergangs-
kurve“ als Standardelement zur Trassierung eines Übergangsbogens vor. [13]

Der Bau der U3 in ihrer heutigen Länge war jedoch bereits im Jahr 2000 abgeschlossen, einen größeren Umbau von Streckenabschnitten hat es entlang dieser Linie seither nicht gegeben. Daher sind die Übergangsbögen entlang der U3 noch allesamt in der damals üblichen Form von Klothoiden ausgebildet.

2.2.8 Vertikale Beschleunigungen

Gleich vorweg sei zum Thema der vertikalen Beschleunigungen festgehalten, dass bei einer Eisenbahnfahrt betragsmäßig die Erdbeschleunigung mit Abstand die größte wirkende Beschleunigungskomponente darstellt. Diese wird jedoch bei der Betrachtung und Begrenzung der vertikalen Beschleunigungen üblicherweise ausgeblendet, da die für den Fahrkomfort maßgeblichen Größen in vertikaler Richtung die zusätzlich zur Erdbeschleunigung wirkenden Beschleunigungskomponenten sind.

Diese entstehen in der Regel durch eine Änderung der Längsneigung der befahrenen Strecke. Die planmäßige Ausrundung der Neigungswechsel führt dazu, dass die beim Durchfahren der Ausrundung aufgrund der Fliehkraft wirkenden Vertikalbeschleunigungen in etwa konstant sind. Sie sind von der Fahrgeschwindigkeit und dem Radius der Ausrundungen abhängig und wirken gleichermaßen auf die Fahrzeuge und auf die Passagiere. Die Begrenzung dieser Beschleunigungen erfolgt neben dem Aspekt des Fahrkomforts auch aus Sicherheitsgründen, da eine große Abweichung der Radlast negative Auswirkungen auf die Spurführung haben kann. Aus diesem Grund finden sich in den Trassierungsvorschriften oftmals Regelungen, wonach das örtliche Zusammentreffen von Ausrundungen von Neigungswechseln und Weichen ebenso wie das Zusammentreffen der Ausrundungen mit Verwindungsbereichen einer Überhöhungsrampe zu vermeiden bzw. mit anderen Grenzwerten des Ausrundungsradius zu behandeln ist. [10]

Bei Bestandsstrecken einer U-Bahnlinie sind der Höhenverlauf der Gleise, die Neigungen und die Ausrundungsradien üblicherweise keine Trassierungsparameter, die sich ohne aufwändige Umbauarbeiten verändern lassen.

Vertikalbeschleunigungen können neben den Ausrundungen von Neigungswechseln ihre Ursache auch in der Geometrie der Überhöhungsrampen haben. Die konventionelle Trassierung bei der Vollbahn erzeugt durch das ausschließliche Anheben der Außenschiene in der Überhöhungsrampe eine Hubbewegung des Schwerpunktes der Wagen. Dazu kommt die Wirkung der Wankwinkelbeschleunigung, die mit der Entfernung des betrachteten Punktes von der Rollachse zunimmt.

Im Netz der Wiener U-Bahn hat man durch die Vorgangsweise, in der Überhöhungsrampe gleichzeitig eine Überhöhung der Außenschiene und eine Absenkung der Innenschiene vorzunehmen, erreicht, dass der Fahrzeugschwerpunkt in der Überhöhungsrampe einer Klothoide nur eine zusätzliche seitliche Verschiebung erfährt, aber keine vertikale. Für die Fahrgäste ergibt sich die Größe der Vertikalbeschleunigung aus der Wankwinkelbewegung aufgrund der Verwindung durch den horizontalen Abstand von der Wagenachse, die ja nahezu keine Vertikalbeschleunigung erfährt. Die Anwendung eines Wiener Bogens® als Übergangsbogen eliminiert zwar die zusätzlichen Seitenbeschleunigungen auf den Wagen aus der Verwindung, die Vertikalbeschleunigungen aufgrund der Verwindung treten jedoch in derselben Weise wie bei der Klothoide auf.

2.3 Zwangspunkte der Trassierung

Unter Zwangspunkten versteht man Situationen, die von außen bestimmte Trassierungsparameter in einem Streckenabschnitt vorgeben, ohne zu berücksichtigen, ob diese Werte fahrdynamisch optimal sind.

Zwänge entstehen beim Bau einer U-Bahn-Linie üblicherweise hinsichtlich der Lage der Stationen, der Gleisführung in den Stationen, der Lage jener Streckenabschnitte, die oberirdisch im Bestand bzw. unterirdisch in offener Bauweise hergestellt werden, sowie der Höhenlage aufgrund des Geländeverlaufs und bestehender Einbauten im Untergrund.

In dieser Arbeit geht es in erster Linie um die Optimierung der Überhöhung für eine bestehende Strecke und auch hier gilt es, neben den durch die Trassierungsvorschriften festgelegten Richtwerten, bestimmte Zwänge zu beachten.

Zwangspunkte für den Überhöhungsverlauf sind in diesem Sinne Bahnsteige, wo die Überhöhung unabhängig von der Linienführung im Grundriss begrenzt ist, um keine zusätzlichen Erschwernisse für den Fahrgastwechsel zu erzeugen, und auch Weichen.

Eine Weiche ist so konstruiert, dass die Schienenoberkanten des Stamm- und des Zweiggleises immer in einer Ebene liegen. Dadurch haben beide Gleise immer dieselbe Überhöhung, was auch für Bogenweichen gilt. [46] Durch die Höhenlage, die Steigung und die Überhöhung des Stammgleises ist somit das Weichenende im Zweiggleis in seiner räumlichen Lage exakt definiert. Jede Änderung der Überhöhung im Hauptgleis führt somit zu einer Änderung der Höhenlage des Zweiggleises. Im Falle von Gleiswechseln zwischen den beiden Tourengleisen, die nur aus den beiden Weichen bestehen, wird somit durch eine Überhöhungsänderung in einem Tourengleis automatisch die Höhenlage des anderen Gleises verändert.

Die eingebaute Überhöhung im Bereich der Weichen kann somit nur verändert werden, wenn die Machbarkeit der Änderung der Trassierung des Zweiggleises geprüft ist.

2.4 Trassierungsvorschrift der Wiener U-Bahn

Für die Trassierung der Wiener U-Bahn gilt ein internes Regelwerk der Wiener Linien mit dem Titel „Trassierungsvorschrift für die Wiener U-Bahn“ für die Planung von neuen sowie für Umbauten bestehender Linien. [13] Dieses Dokument befindet sich derzeit (Stand November 2013) in Überarbeitung, [41] wobei über die Art der geplanten Änderungen noch nichts bekannt ist. Daher beziehen sich die Verweise auf die Trassierungsvorschrift in dieser Arbeit auf die aktuell geltende Version aus dem Jahr 2002.

Die Trassierungsvorschrift gibt die Anforderungen an die Trassierung vor, indem sie Mindest- bzw. Höchstwerte von Trassierungsparametern festlegt. Im Folgenden findet sich eine Auflistung der für diese Arbeit relevanten Bestimmungen.

2.4.1 Entwurfsgeschwindigkeit

Die Entwurfsgeschwindigkeit auf Tourengleisen beträgt durchgehend (auch im Stationsbereich) 80 km/h. [13] Somit sind die Überhöhungen in allen Kreisbögen der Hauptgleise im Hinblick auf diese Entwurfsgeschwindigkeit zu wählen.

Für Betriebsgleise wie Abstellgleise, Überleitstellen und Verbindungsgleise gilt eine Entwurfsgeschwindigkeit von 40 km/h bzw. mindestens 25 km/h. [13] Die Untersuchung der Trassierung dieser Gleisbereiche ist jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit.

2.4.2 Freie Seitenbeschleunigung, Überhöhung und Mindestradien

Die freie Seitenbeschleunigung darf höchstens $0,654\text{m/s}^2$ betragen [13], was aufgrund der Gleichung (2.23) einer maximalen Fehlüberhöhung gemäß der folgenden Formel entspricht:

$$U_{\max} = a_{q,\max} \cdot \frac{b}{g} = 0,654 \cdot \frac{1500}{9,81} = 100\text{ mm} \quad (2.28)$$

$a_{q,\max}$ [m/s²] ... maximal zulässige freie Seitenbeschleunigung

U_{\max} [mm] maximal zulässige Fehlüberhöhung

Daraus kann man mit Hilfe der Gleichungen (2.19) und (2.20) ableiten, dass die Anordnung einer Überhöhung zwingend erforderlich ist, wenn der Bogenradius kleiner als der folgende ist:

$$R = 11,8022 \cdot \frac{V^2}{U_{\max}} = 11,8022 \cdot \frac{80^2}{100} = 755,341 \text{ m} \quad (2.29)$$

In engen Bögen mit einem maximalen Radius gemäß (2.29) lässt sich aufgrund des maximalen Überhöhungsfehlbetrages gemäß (2.28) die einzubauende Mindestüberhöhung somit wie folgt anschreiben:

$$D_{\min} = D_{\text{equ}} - U_{\max} = 11,8022 \cdot \frac{V^2}{R} - 100 \quad (2.30)$$

D_{\min} [mm] Mindestüberhöhung

Die Überhöhung wird im Netz der Wiener U-Bahn durch ein gleichzeitiges Anheben des äußeren und Absenken des inneren Schienenstranges jeweils um den halben Überhöhungsbetrag hergestellt. Dadurch liegt der Drehpunkt der Überhöhung bei einer geraden Überhöhungsrampe in der Gleisachse. Bei der Schwerpunktstrassierung ist die Drehachse 1,80 m über der Gleismittellinie anzusetzen. Die maximal zulässige Überhöhung beträgt laut Trassierungsvorschrift bei allen Gleisen 150 mm. [13]

Daraus lässt sich mit den Gleichungen (2.19) und (2.20) der zulässige Mindestradius der Wiener U-Bahn für die Fahrt mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit wie folgt ermitteln:

$$R_{\min} = 11,8 \cdot \frac{V_{\max}^2}{U_{\max} + D_{\max}} = 11,8 \cdot \frac{80^2}{100 + 150} = 302,1 \text{ m} \approx 303 \text{ m} \quad (2.31)$$

D_{\max} [mm] maximal zulässige eingebaute Überhöhung

V_{\max} [km/h] maximal zulässige Geschwindigkeit

Dieser Mindestradius von 303 m ist an einer anderen Stelle im Text der Trassierungsvorschrift auch noch einmal explizit angeführt. [13]

Die Überhöhung der Tourengleise muss unter Einbeziehung des Fahrtaubildes der U-Bahn-Züge erfolgen. Die fallweise unterschiedliche Geschwindigkeit von Zugspitze und Zugende ist zu berücksichtigen. Dabei ist davon auszugehen, dass alle Züge mit der gleichen Geschwindigkeit verkehren. [13]

Für die planmäßige Fahrt auf Tourengleisen sieht die Trassierungsvorschrift der Wiener U-Bahn allerdings vor, dass eine negative freie Seitenbeschleunigung vermieden werden soll. Sie ist nur

dann zugelassen, wenn es sich im Bereich des Beschleunigungsvorganges für einen Teil des Zuges unter Einhaltung aller Grenzwerte nicht anders möglich ist. [13]

2.4.3 Ruck, Übergangsbögen und Überhöhungsrampen

Der zulässige Ruck in Form der abrupten Änderung der freien Seitenbeschleunigung auf den Tourengleisen ist in der Trassierungsvorschrift mit einem Wert von $0,196 \text{ m/s}^2$ begrenzt. [13]

Zusätzlich ist in diesem Regelwerk angeführt, dass entlang der Tourengleise bei einem Krümmungswechsel in jedem Fall ein Übergangsbogen einzubauen ist, auch wenn die Änderung der freien Seitenbeschleunigung den Grenzwert nicht überschreitet, was die angeführte Begrenzung des Rucks eigentlich obsolet werden lässt.

Als Übergangsbogen soll bei Überhöhung die „Neue Übergangs-Kurve“ verwendet werden. Ohne Überhöhung oder bei beengten Verhältnissen kann die Klothoide verwendet werden. [13] Diese Bestimmung war zum Zeitpunkt der Planung und Errichtung der Linie U3 noch nicht in dieser Form Bestandteil der Trassierungsvorschrift, da zum damaligen Zeitpunkt die Klothoide als Übergangsbogen den Stand der Technik darstellte. Also ist davon auszugehen, dass beim Bau der U3 ausschließlich Übergangsbögen in Form von Klothoiden eingebaut wurden.

Bei der Trassierung mit Klothoiden gilt eine Mindestlänge der Trassierungselemente im Grundriss von 20 m. Der Parameter A einer Klothoide soll möglichst groß sein und darf 150 m nicht unterschreiten. [13]

Klothoiden sind mit einer geraden Überhöhungsrampe mit freien Ausrundungen am Anfang und am Ende zu kombinieren, Neue Übergangs-Kurven erfordern eine S-förmig geneigte Neue Überhöhungs-Rampe [13]

Die Grenzwerte für die maximal zulässige Rampenneigung hängen von der Übergangsbogenform, der Oberbauform und der Höchstgeschwindigkeit im betreffenden Streckenabschnitt ab. Für die Neue Übergangskurve gilt eine Obergrenze der Rampenneigung von 1:400 für Schotteroberbau und 1:350 im schotterlosen Oberbau.

Der Grenzwert für die Neigung der geraden Rampe im Schotteroberbau ist der Reziprokwert der zehnfachen Höchstgeschwindigkeit in km/h. Somit liegt bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h der Grenzwert der Rampenneigung bei 1:800. Für den schotterlosen Oberbau gilt der Reziprokwert der achtfachen Höchstgeschwindigkeit als Grenzwert der Rampenneigung, was für die Geschwindigkeit von 80 km/h eine Rampenneigung von 1:640 ergibt.

Unabhängig von der Geschwindigkeit darf bei einer geraden Rampe in Tourengleisen eine Rampenneigung von 1:600 jedoch nicht überschritten werden. [13]

2.4.4 Längsneigungen und Ausrundungen

Die maximale Neigung in Tourengleisen des Wiener U-Bahn-Netzes hat den Wert von 40 Promille. Neigungswechsel werden mit quadratischen Parabeln ausgerundet. [13]

Der Regelradius für Ausrundungen beträgt die quadrierte Geschwindigkeit in km/h, wobei der Mindestradius die Hälfte dieses Wertes ist. Bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h ist der Mindestausrundungsradius somit 3.200 m. In jedem Fall gilt unabhängig von der Geschwindigkeit auf Tourengleisen ein Mindestradius für vertikale Ausrundungen von 1.500 m. [13]

Im Bereich von 5 m vor Weichenanfang bis zum Weichenende darf keine Ausrundung angeordnet werden. Ausrundungen sollen in der Regel auch nicht mit Überhöhungsrampen zusammenfallen, wobei es hier Ausnahmen für große Ausrundungsradien gibt. Weiters darf es keine Ausrundungen in jenem Bereich des Bahnsteigs geben, in dem sich die Räder des haltenden Zuges befinden. [13]

2.4.5 Bahnsteige

Ein Bahnsteig ist im Regelfall 115 m lang und horizontal ausgerichtet. Eine maximale Längsneigung von 1,4 Promille ist aber zulässig. [13]

Bahnsteige sind prinzipiell in die Gerade zu legen. Bei beengten Verhältnissen ist es zulässig, dass ein Bogen bzw. Übergangsbogen soweit in den Bahnsteigbereich hineinreicht, dass der Bahnsteig bzw. das Bahnsteigende von der gedachten Verlängerung der geraden Bahnsteigkante max. 50 cm bei Bogeninnenseite bzw. max. 30 cm bei Bogenaußenseite abweicht. Dabei müssen die Mindestradien von 900 m für Bahnsteige an der Bogeninnenseite und 1.360 m für Bahnsteige an der Bogenaußenseite eingehalten werden. [13]

Die maximale Überhöhung im Bahnsteigbereich ist übrigens in der Trassierungsvorschrift der Wiener U-Bahn nicht explizit geregelt. Aus der zuvor angeführten Passage zur Vermeidung von negativen freien Seitenbeschleunigungen lässt sich jedoch ableiten, dass im Bahnsteigbereich keine Überhöhung angeordnet werden soll.

3 Trassierung mit optimaler Überhöhung

3.1 Optimale Überhöhung bei konstanten Fahrgeschwindigkeiten

3.1.1 Überhöhung bei Mischverkehr

Bei der Vollbahn befahren in der Regel Züge mit unterschiedlich großen planmäßigen Geschwindigkeiten dieselben Gleisanlagen, was als Mischverkehr bezeichnet wird. Nachdem die ausgleichende Überhöhung im Kreisbogen geschwindigkeitsabhängig ist, liegt die eingebaute Überhöhung im Idealfall zwischen der ausgleichenden Überhöhung für schnelle Züge und jener für langsame Züge. Somit entsteht für schnelle Züge bei der Bogenfahrt eine freie Seitenbeschleunigung zur Bogenaußenseite, was zu einer stärkeren Abnutzung der Außenschiene führt. Im Gegensatz dazu erfahren langsame Züge bei der Bogenfahrt einen Überhöhungsüberschuss, also eine in Richtung der Bogeninnenseite wirkende Seitenbeschleunigung, wodurch sich die Innenschiene stärker abnutzt.

Sind die Anzahl der verkehrenden Züge, ihre Geschwindigkeit und ihre Masse bekannt, gibt es genau einen Wert der Überhöhung, bei dem die Summe der auf die Innenschiene wirkenden Belastungen gleich groß wird wie die Summe der auf die Außenschiene wirkenden Belastungen. Hinsichtlich des Verschleißes der Schienen ist diese Überhöhung der optimale Wert, vorausgesetzt, sie liegt unter der gemäß den gültigen Regelwerken maximal zulässigen Überhöhung und der Überhöhungsfehlbetrag für die schnellen Züge bleibt im Rahmen der zulässigen Grenzwerte. Eine derartige exakte Rechnung wird bei der Trassierung jedoch nicht angestellt, da die Infrastruktur üblicherweise langlebiger ist als das Betriebsprogramm und sich die beschriebene optimale Überhöhung somit von Zeit zu Zeit verändert. [10]

Tatsächlich eingebaut wird vielfach die sogenannte Regelüberhöhung, die üblicherweise mit der folgenden Formel ermittelt wird:

$$D_{reg} = 6,5 \cdot \frac{V^2}{R} \quad (3.01) [10]$$

D_{reg} [mm] Regelüberhöhung

Wie aus dem Vergleich zwischen der ausgleichenden Überhöhung gemäß (2.19) und der Regelüberhöhung gemäß (3.01) ersichtlich wird, ist die Regelüberhöhung proportional zur ausgleichenden Überhöhung. Sie beträgt in etwa 55 % der ausgleichenden Überhöhung, stellt ebenfalls einen Kompromiss zwischen der Überhöhung für schnelle und langsame Züge dar und liegt oft nicht weit entfernt von der optimalen Überhöhung im Sinn einer gleichmäßigen Belastung von Innen- und Außenschiene. Üblicherweise ist die Anwendung der Regelüberhöhung aber nicht zwingend erforderlich, sodass dem Planer ein gewisser Ermessensspielraum für die Wahl der tatsächlich eingebauten Überhöhung eingeräumt wird. [10]

3.1.2 Überhöhung für einheitliche Fahrgeschwindigkeiten

Die Betrachtungen in diesem Kapitel beziehen sich auf Streckenabschnitte, die von allen Zügen mit einer einheitlichen, konstanten Fahrgeschwindigkeit durchfahren werden. Das entspricht dem Bereich 4 des Fahrschaubildes der Abb. 2.05.

Im Gegensatz zur Situation bei der Vollbahn ist es bei einem unabhängigen ÖPNV-Netz wie jenem der Wiener U-Bahn in der Regel so, dass alle Züge ein gleichartiges Geschwindigkeitsprofil haben. Somit gibt es für jeden Kreisbogen, der mit konstanter Geschwindigkeit durchfahren wird, eine ausgleichende Überhöhung, die für alle Züge gilt. Ob es nun unter Berücksichtigung des Verschleißes und des damit verbundenen Instandhaltungsaufwandes sowie im Hinblick auf den Fahrkomfort tatsächlich die beste Lösung ist, die ausgleichende Überhöhung einzubauen, ist aber fraglich.

Während in der Fachliteratur das Thema der Überhöhung meistens anhand der Regelüberhöhung für die Vollbahn abgehandelt wird, gibt es für den Fall einer Eisenbahnlinie mit einheitlichen Fahrgeschwindigkeiten in der Literatur unterschiedliche Empfehlungen über die einzubauende Überhöhung.

Während in FREYSTEIN et al. für eine S-Bahn-Linie die Wahl einer Überhöhung zwischen der Regelüberhöhung und der ausgleichenden Überhöhung vorgeschlagen wird [02], schreibt WITTMANN, dass jener Anteil der theoretischen Überhöhung, der durch die Regelüberhöhung bei einer angenommenen Entwurfsgeschwindigkeit kompensiert werden muss, bei der Vollbahn bei ca. 67 %, bei Schnellbahnverkehr jedoch bei 100 % liegen soll. [19] Demzufolge wäre bei Strecken mit einheitlichen Fahrgeschwindigkeiten die ausgleichende Überhöhung einzubauen.

Andere Autoren raten dazu, die ausgleichende Überhöhung nicht anzuwenden. So schreiben MARX und MOSSMANN, die Überhöhung soll auch in Streckenabschnitten, in denen die Züge mit annähernd gleicher Geschwindigkeit unterwegs sind, zwar größer als die Regelüberhöhung,

aber stets kleiner als die ausgleichende Überhöhung gewählt werden. [20] Auch in der Richtlinie „Linienführung von Gleisen“ (RVE 05.00.01) der österreichischen Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr wird für die Situation einer einheitlichen Geschwindigkeit aller Züge empfohlen, einen Regelüberhöhungsfehlbetrag von 20 mm vorzusehen, wodurch eine gute Führung der Radsätze an der Außenschiene sichergestellt werden soll. [12] Eine ähnliche planmäßige Fehlüberhöhung ist in der Trassierungsvorschrift der Wiener Straßenbahn festgelegt. Hier ist Fehlüberhöhung mit einer in Richtung der Bogenaußenseite wirkenden Querschleunigung von $0,2 \text{ m/s}^2$ vorgesehen, was einer Fehlüberhöhung von ca. 30 mm entspricht. [16] Auch WEIGEND schreibt, dass der Bogenlauf eines Fahrzeugs im Allgemeinen gleichmäßiger ist, wenn eine gewisse Seitenbeschleunigung zur Bogenaußenseite wirkt. [10]

In der Trassierungsvorschrift der Wiener U-Bahn werden allerdings keine Empfehlungen über die einzubauende Überhöhung bei konstanten Fahrgeschwindigkeiten gegeben, sondern es werden in erster Linie die zulässigen Grenzwerte beschrieben.

Hinsichtlich der gleichmäßigen Belastung und somit auch Abnutzung von Innen- und Außenschiene ist die ausgleichende Überhöhung zweifelsohne gleichzeitig die optimale Überhöhung. Durch das Einbauen einer großen Überhöhung erhöht sich jedoch insbesondere beim Schotteroberbau das Risiko, dass es durch die einwirkenden Kräfte zu Lageveränderungen des Gleises kommt. [07] [10]

Somit kann die ausgleichende Überhöhung hinsichtlich der Belastung und der Abnutzung der Schienen als obere Grenze für die optimale Überhöhung angesehen werden. Tatsächlich gibt es – wenn nicht Zwangspunkte wie zum Beispiel Bogenweichen im Spiel sind – keinen Grund, die eingebaute Überhöhung planmäßig größer als die ausgeglichene Überhöhung auszuführen. [10]

Es ist im praktischen Fahrbetrieb jedenfalls nicht zu erwarten, dass ein Zug mit einer höheren als der planmäßigen Geschwindigkeit unterwegs ist, wohingegen eine geringere Fahrgeschwindigkeit einerseits aufgrund der in Abb. 2.08 und Abb. 2.09 dargestellten energiesparenden Fahrweise gewählt werden oder andererseits im Störfall auftreten kann. Auch aus diesen Gründen stellt die ausgleichende Überhöhung eine obere Grenze der optimalen Überhöhung dar.

Aus der Sicht der Fahrgäste ist eine Überhöhung, die planmäßig zu einem Überhöhungsüberschuss führt, prinzipiell abzulehnen, da eine Seitenbeschleunigung in Richtung der Bogeninnenseite generell als unangenehm empfunden wird. Man kann davon ausgehen, dass es für die Passagiere sogar angenehmer ist, eine geringe freie Seitenbeschleunigung zur Bogenaußenseite zu empfinden als gar keine, vor allem im Hinblick darauf, dass in der aktuellen Wagengeneration der Wiener U-Bahn Bogenfahrten durch den durchgehenden Fahrgastbereich im Zug nun auch

optisch verstärkt wahrgenommen werden können. Durch das Spüren einer Beschleunigung nach außen werden somit widersprüchliche Eindrücke unterschiedlicher Sinneswahrnehmungen vermieden.

Schließlich soll noch erwähnt werden, dass – unter der Voraussetzung gleichbleibender Übergangsbogenlängen – der Einbau einer geringeren als der ausgleichenden Überhöhung zwar zu einer größeren freien Seitenbeschleunigung im Bogen und einem größeren Querruck im Übergangsbogen führt, dass aber die Verwindung, die Wankwinkelbeschleunigung und der Wankwinkelruck im Bereich der Überhöhungsrampe abnehmen.

Die angeführten Überlegungen zum Thema der optimalen Überhöhung zeigen, dass es ohne weiterführende Untersuchungen nicht möglich ist, die exakte Höhe der optimalen Überhöhung anzugeben, wie man auch an den unterschiedlichen Empfehlungen in der Fachliteratur feststellen kann. Diese unterschiedlichen Vorschläge für die Überhöhung auf Streckenabschnitten mit einheitlichen Geschwindigkeiten sowie die vorgeschriebenen Grenzwerte werden in der folgenden Abb. 3.01 dargestellt.

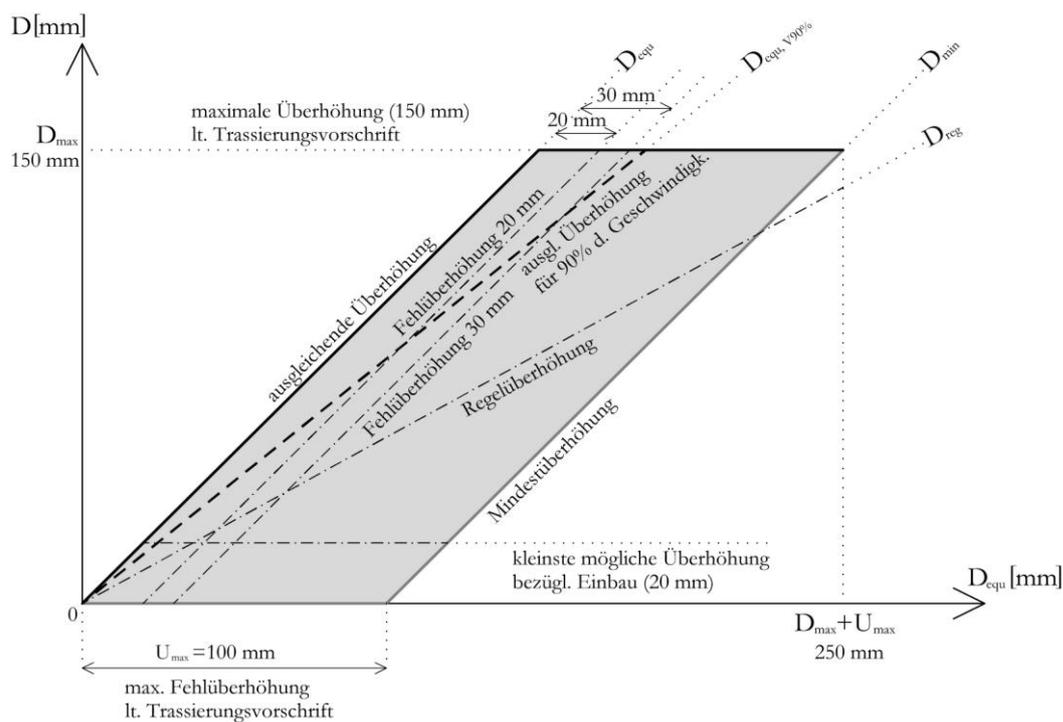


Abbildung 3.01: Ermessensbereich für die Wahl der Überhöhung

Der in der Abb. 3.01 dargestellte, grau hinterlegte Ermessensbereich zeigt die zulässigen Werte der Überhöhung in Abhängigkeit von der ausgleichenden Überhöhung, also von Radius und Geschwindigkeit. Er ist nach unten durch das nicht überhöhte Gleis mit einer Überhöhung von 0 mm und durch die Mindestüberhöhung, die sich aus der Differenz aus der ausgleichenden

Überhöhung und dem maximal zulässigen Überhöhungsfehlbetrag ergibt, begrenzt. Zusätzlich wurde die Überhöhung von 20 mm als horizontale Linie eingetragen, da üblicherweise kleinere Überhöhungen nicht ausgeführt werden, da der Bau- und Instandhaltungsaufwand den Nutzen übersteigt. [10] Diese kleinste mögliche Überhöhung von 20 mm ist allerdings in der Trassierungsvorschrift der Wiener U-Bahn nicht enthalten.

Nach oben ist die sogenannte Ermessensraute durch die ausgleichende Überhöhung und die maximal zulässige Überhöhung von 150 mm gemäß der Trassierungsrichtlinie der Wiener U-Bahn begrenzt. [13]

Darüber hinaus wurden Linien entsprechend einer 20 bzw. 30 mm großen planmäßigen Fehlüberhöhung eingezeichnet, der Verlauf der Regelüberhöhung sowie die Linie einer ausgleichenden Überhöhung für eine um 10 % verringerte Fahrgeschwindigkeit.

Dieser letztgenannte Überhöhungsverlauf wurde willkürlich gewählt, um reduzierte Geschwindigkeiten durch die in Abb. 2.08 und Abb. 2.09 beschriebene energiesparende Fahrweise zu berücksichtigen. Der Geschwindigkeitsverlauf bei der energiesparenden Fahrweise unterscheidet sich in der Regel vor allem bei den höheren Geschwindigkeiten von der planmäßigen Geschwindigkeit. Daher wird vermutet, dass der in Abb. 3.01 dargestellte Verlauf der ausgleichenden Überhöhung für eine verringerte Fahrgeschwindigkeit die Untergrenze der optimalen Überhöhung besser zu beschreiben vermag, als dies durch die Wahl einer konstanten Fehlüberhöhung möglich ist.

Der Bereich der optimalen Überhöhung für eine konstante Fahrgeschwindigkeit in einem Kreisbogen wird in dieser Arbeit durch eine Ober- und eine Untergrenze der optimalen Überhöhung festgelegt, die in der Abb. 3.02 dargestellt sind.

Mathematisch formuliert stellen sich diese Grenzfunktionen der optimalen Überhöhung wie folgt dar:

$$D_{opt,max} = \min \left[\left(11,8 \cdot \frac{V^2}{R} \right); 150 \right] \quad (3.02)$$

$$D_{opt,min} = \min \left[\left(9,56 \cdot \frac{V^2}{R} \right); 150 \right] \quad (3.03)$$

$D_{opt,max}$ [mm] .. Obergrenze der optimalen Überhöhung

$D_{opt,min}$ [mm]... Untergrenze der optimalen Überhöhung

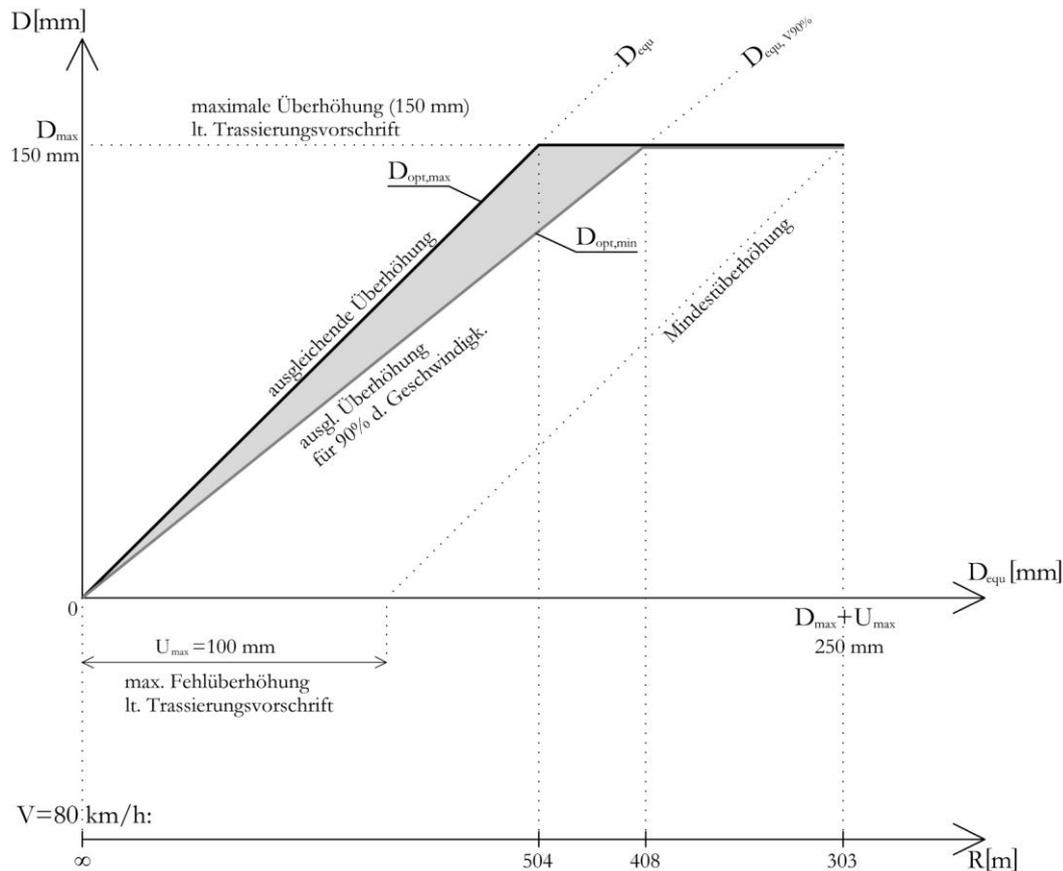


Abbildung 3.02: Bereich der optimalen Überhöhung für eine Kreisbogenfahrt mit konstanter Geschwindigkeit, zugehörige Radien für eine Geschwindigkeit von 80 km/h

3.2 Eliminierung von Seitenbeschleunigungen in Beschleunigungsbereichen

Für die Fahrt auf einer geraden Strecke ist es in Bezug auf seitliche Beschleunigungen unerheblich, ob sich ein Fahrzeug in einer beschleunigten Bewegung befindet. Bei einer Bogenfahrt gibt es abhängig von der Fahrgeschwindigkeit genau einen Wert der Überhöhung, bei dem die seitlichen Beschleunigungen auf Fahrzeuge und Passagiere verschwinden. Dadurch, dass jeder Teil eines beschleunigten Zuges einen konkreten Streckenpunkt mit einer anderen Geschwindigkeit passiert, kann eine fix eingebaute Überhöhung maximal für einen Punkt des Zuges die ausgleichende Überhöhung darstellen.

Die folgenden gedanklichen Ansätze zeigen Methoden auf, wie trotz Berücksichtigung der unterschiedlichen Geschwindigkeiten von Zugspitze und Zugende jegliche seitliche Beschleunigung auf die Fahrgäste vermieden werden könnte. Dabei handelt es sich lediglich um theoretische

Lösungen, die in der Praxis wohl kaum umgesetzt werden können, der Vollständigkeit halber aber trotzdem erwähnt werden.

3.2.1 Längsbeschleunigung ausschließlich auf geraden Gleisen

Wie bereits erwähnt, gibt es für einen festgelegten Radius und eine bestimmte eingebaute Überhöhung genau eine Fahrgeschwindigkeit, bei der die seitliche Beschleunigung auf das Fahrzeug verschwindet.

Die Konsequenz daraus könnte sein, dass sämtliche Bögen einer Strecke mit konstanter Geschwindigkeit durchfahren werden und die Anfahr- und Bremsvorgänge eines Zuges ausschließlich auf geraden Streckenabschnitten erfolgen. In diesem Fall müssten die Stationsgleise und die anschließenden Streckengleise so lange entlang einer Geraden verlaufen, bis die gewünschte Fahrgeschwindigkeit erreicht wäre.

Unter der Annahme einer über den Anfahr- und Bremsvorgang konstanten Beschleunigung von $1,2 \text{ m/s}^2$, einer Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h und einer Zuglänge von ca. 110 m ergäbe sich die erforderliche Länge der geraden Streckenbereiche im Umfeld einer Station gemäß Gleichung (2.13):

$$l_{G,\min} = 2 \cdot \frac{v^2}{2 \cdot a} + l_z = \frac{80^2}{3,6^2 \cdot 1,2} + 110 \approx 520 \text{ m}$$

$l_{G,\min} \text{ [m]}$ Mindestlänge des geraden Gleisabschnittes

$l_z \text{ [m]}$ Länge des Zuges, eigentlich die Länge zwischen den Radaufstandspunkten des ersten und des letzten Radsatzes

Eine Trassierung dieser Art kann nur wenig Rücksicht auf Bestandsobjekte nehmen und könnte bestenfalls bei Neubaustrecken im unverbauten Gebiet zur Anwendung kommen. Die Anlage von Mittelbahnsteigen mit angrenzenden Gleisverzierungen, um die Richtungsgleise zwischen den Stationen nebeneinander führen zu können, ist mit diesem Trassierungsprinzip ebenfalls nicht umzusetzen. Die mangelnde Flexibilität in der Streckenführung spricht eindeutig dagegen, dass sich diese Methode bei einem Nahverkehrsmittel in großem Stil umsetzen lässt.

3.2.2 Veränderliche Überhöhung am Gleis

Eine theoretisch einwandfreie Lösung zur Vermeidung von freien Seitenbeschleunigungen wäre es, die Überhöhung nicht fix am Gleis einzubauen, sondern das Gleis je nach Fahrgeschwindigkeit zu verdrehen bzw. zu verschwenken.

Obgleich man sich die technische Machbarkeit eines derartigen Systems zwar möglicherweise vorstellen kann, so würde es eine komplett neue Konstruktion des Oberbaus und gründliche Überlegungen zu den Themen Sicherheit und Instandhaltung erfordern. Im Gegensatz zur ersten genannten theoretischen Lösung könnte man in diesem Fall bestehende Strecken nachrüsten, sofern das dann ebenfalls geschwindigkeitsabhängige Lichtraumprofil Platz finden würde. Auch könnte man dadurch im Fall von außerplanmäßigen Halten oder Langsamfahrten die ausgleichende Überhöhung bereitstellen.

Dass der Nutzen eines derartigen Systems den Aufwand für Errichtung und Betrieb jemals übersteigen würde, darf allerdings stark bezweifelt werden.

3.2.3 Einsatz von Neigezügen

Bei Fahrzeugen mit Neigetechnik wird der Wagenkasten zusätzlich zur Überhöhung geneigt. Dadurch wird ein Teil der nach außen wirkenden Seitenbeschleunigung durch die Wagenkasteneigung ausgeglichen. Diese gleisbogenabhängige Wagenkastensteuerung kommt bei Eisenbahnfahrzeugen üblicherweise dann zum Einsatz, wenn man Gleisbögen mit einer höheren Geschwindigkeit als konventionell zulässig befahren will, ohne dass die Fahrgäste Komforteinbußen hinnehmen müssen. [07]

Ein Nebeneffekt dieser Technik ist, dass es möglich ist, dass jeder Wagen zu einem konkreten Zeitpunkt oder an einem konkreten Streckenpunkt eine andere Neigung aufweisen kann. Somit kann in jedem Wagen die Neigung an die aktuell auftretende Seitenbeschleunigung angepasst werden.

Zur Realisierung eines derartigen Systems in einem bestehenden U-Bahn-Netz müsste der Fuhrpark komplett erneuert werden, die Trassierungsparameter der bestehenden Strecken könnten jedoch unverändert bleiben. Zudem wäre es möglich, auch bei außerplanmäßigen Halten oder Langsamfahrten die optimale Querneigung der Wagen einzustellen. Aufgrund des unveränderlichen Lichtraumprofils der Bestandsstrecken würde die Kapazität der Fahrzeuge aber möglicherweise sinken. [06]

Durch die Neigezugtechnik ist es zwar möglich, die auf die Fahrgäste wirkende Seitenbeschleunigung zu verringern, die Wirkung der Seitenbeschleunigung auf die Fahrzeuge und somit die Beanspruchung von Fahrzeugen und Oberbau bleibt jedoch bestehen. [06] Insofern kann man davon ausgehen, dass sich der Aufwand der Umrüstung auf die Neigezugtechnik für den Betreiber einer U-Bahn nicht rentieren würde.

3.2.4 Zusammenfassung der theoretischen Lösungen

Alle angeführten Lösungsansätze dienen dazu, die freie Seitenbeschleunigung zufolge der Bogenfahrt für alle Wagen und alle Fahrgäste zur Gänze verschwinden zu lassen. Dennoch würden sich dabei Vertikalbeschleunigungen, Wankwinkelbeschleunigungen, Längsbeschleunigungen und Seitenbeschleunigungen aufgrund von Schwingungen nicht vermeiden lassen.

Insofern muss man die Frage stellen, ob der (finanzielle) Aufwand, den diese Lösungen nach sich ziehen würden, in einer vernünftigen Relation zum erzielbaren Ergebnis steht. Ohne genauere Untersuchungen dazu anzustellen, kann diese Frage mit ziemlicher Sicherheit mit Nein beantwortet werden.

Die in dieser Arbeit verfolgte Optimierung der Trassierungsparameter zielt daher darauf ab, mit einem überschaubaren baulichen Aufwand im bestehenden System die auf die Fahrgäste wirkenden Beschleunigungen und Rucke zu minimieren. Das Ziel ist jedoch nicht, die freie Seitenbeschleunigung um jeden Preis zur Gänze verschwinden zu lassen.

3.3 Überhöhung bei ausschließlicher Beschleunigung

In einem ÖPNV-Netz mit einer hohen Entwurfsgeschwindigkeit und einem in Relation dazu eher kurzen durchschnittlichen Haltestellenabstand, wie das beim Netz der Wiener U-Bahn der Fall ist, überwiegen die Streckenabschnitte, die der Zug in beschleunigter Bewegung passiert, gegenüber jenen, die mit konstanter Geschwindigkeit befahren werden. Zwischen manchen Stationen kann aufgrund des geringen Abstandes die Höchstgeschwindigkeit nicht einmal erreicht werden. Somit ist in einem derartigen Netz die Wahl der Trassierung in den Beschleunigungsbereichen von großer Bedeutung.

Es gibt allerdings in der Fachliteratur und in den relevanten Richtlinien keine Anweisungen für die konkrete Ausbildung der Überhöhung in Beschleunigungsbereichen. Zwar wird oft erwähnt, dass die Geschwindigkeitsspreizung zwischen Zuganfang und Zugende zu berücksichtigen ist, aber in der Regel beschränken sich die Ausführungen auf den Hinweis, dass für Zuganfang und Zugende die zulässigen Grenzwerte bezüglich Fehlüberhöhung und Überhöhungsüberschuss eingehalten werden müssen. Somit obliegt es dem Planer, dafür zu sorgen, einen sinnvollen Überhöhungsverlauf in den Bereichen mit veränderlicher Fahrgeschwindigkeit vorzusehen.

Wie in Abb. 2.05 dargestellt ist, gibt es Streckenpunkte, die ein Zug teilweise in beschleunigter und teilweise in konstanter Fahrt passiert. In diesem Kapitel wird vorerst nur auf den Bereich 2

der Abb. 2.05 eingegangen, also jenen Bereich, der vom gesamten Zug in einer beschleunigten Bewegung durchfahren wird.

Dabei wird zur Vereinfachung angenommen, dass das Anfahren bzw. das Bremsen jeweils mit einer konstanten Beschleunigung erfolgen.

3.3.1 Obergrenze der optimalen Überhöhung

Die in Kapitel 3.1.2 ermittelte Obergrenze der optimalen Überhöhung entspricht der ausgleichenden Überhöhung, sofern diese die maximal zulässige Überhöhung nicht überschreitet. Demnach wird auch im Beschleunigungsbereich jener Überhöhungsverlauf gesucht, der der ausgleichenden Überhöhung bei konstanter Fahrt entspricht. Dieser Überhöhungsverlauf bildet analog zur Vorgangsweise bei konstanter Fahrt die obere Grenze für den Bereich der optimalen Überhöhung.

Wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, stellt die ausgleichende Überhöhung jene Überhöhung dar, bei der die Außen- und Innenschiene bei einer Kreisbogenfahrt mit konstanter Geschwindigkeit durch gleich große Kräfte belastet werden. Analog dazu wird im Folgenden jener Überhöhungsverlauf ermittelt, der bei einer beschleunigten Fahrt im Kreisbogen zu einer gleich großen Verteilung der Kräfte auf beide Schienen führt.

Eine symmetrische Gesamtbelastung des Gleises entsteht dadurch, dass die Summe der Seitenführungskräfte aller Radsätze eines Zuges am betrachteten Streckenpunkt unter Berücksichtigung der Wirkungsrichtung zu null wird. Unter der Voraussetzung gleicher Achslasten auf allen Radsätzen ist diese Forderung gleichbedeutend mit jener, dass die Summe der Überhöhungsfehlbeträge und Überhöhungsüberschüsse aller Radsätze null sein soll.

$$\sum_i^r (D_{equ,i} - D_{opt,max}) = 0 \quad (3.04)$$

r [-] Anzahl der Radsätze

$D_{equ,i}$ [mm] jeweilige ausgleichende Überhöhung für einen Radsatz

Nachdem es sich um die Betrachtung eines konkreten Streckenpunktes handelt, ist die eingebaute Überhöhung, die in der Gleichung (3.04) der Obergrenze der optimalen Überhöhung entspricht, eine Konstante. Sie lässt sich somit durch das Umformen der Gleichung (3.04) wie folgt anschreiben:

$$D_{opt,max} = \frac{1}{r} \cdot \sum_i^r D_{equ,i} \quad (3.05)$$

Um die Formel (3.05) zu verallgemeinern und von den exakten Seitenführungskräften der Radsätze eines Zuges loszulösen, werden in der Folge nicht mehr die einzelnen Werte der jeweiligen ausgleichenden Überhöhungen aller Radsätze aufsummiert, sondern die ausgleichenden Überhöhungen über die Länge des Zuges aufintegriert. Unter Berücksichtigung von (2.19) ergibt sich dadurch die folgende Gleichung:

$$D_{opt,max} = \frac{1}{l_Z} \cdot \int_{s_{ZA}}^{s_{ZA}+l_Z} 11,8 \cdot \frac{3,6^2 \cdot v(s)^2}{R} \cdot ds \quad (3.06)$$

s_{ZA} [m] Entfernung des Streckenpunktes vom Ursprung der beschleunigten Bewegung des Zuganfangs

Das Einsetzen der Funktion der Geschwindigkeit nach der Wegstrecke einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung nach (2.13) in die Funktion der Obergrenze der optimalen Überhöhung nach (3.06) liefert die folgenden Gleichungen. Aufgrund dieses Einsetzens der Funktion der gleichmäßig beschleunigten Bewegung gelten diese Formeln für die optimale Überhöhung wiederum nur in jenen Bereichen, die der ganze Zug in einer beschleunigten Bewegung passiert.

$$D_{opt,max} = \frac{11,8 \cdot 3,6^2}{l_Z \cdot R} \cdot \int_{s_{ZA}}^{s_{ZA}+l_Z} 2 \cdot a \cdot s \cdot ds$$

$$D_{opt,max} = \frac{11,8 \cdot 3,6^2 \cdot a}{l_Z \cdot R} \cdot s^2 \Big|_{s_{ZA}}^{s_{ZA}+l_Z}$$

$$D_{opt,max} = 11,8 \cdot 3,6^2 \cdot \frac{a}{R} \cdot (2 \cdot s_{ZA} + l_Z) \quad (3.07)$$

Durch das Auflösen des bestimmten Integrals erhält man die Formel (3.07) zur Beschreibung der Obergrenze der optimalen Überhöhung für eine beschleunigte Bewegung eines Zuges in einem Kreisbogen. Dieser Ausdruck entspricht exakt der ausgleichenden Überhöhung für die Zugmitte, wie durch die folgenden Umformungen der Gleichung (3.07) gezeigt wird.

$$D_{opt,max} = 11,8 \cdot 3,6^2 \cdot \frac{2 \cdot a \cdot \left(s_A + \frac{l_Z}{2} \right)}{R}$$

$$= 11,8 \cdot 3,6^2 \cdot \frac{2 \cdot a \cdot s_{ZM}}{R}$$

$$= 11,8 \cdot 3,6^2 \cdot \frac{v_{ZM}^2}{R} = D_{equ,ZM} \quad (3.08)$$

s_{ZM} [m]Entfernung des Streckenpunktes vom Ursprung der beschleunigten Bewegung der Zugmitte

v_{ZM} [m/s²]..... Geschwindigkeit der Zugmitte an einem bestimmten Streckenpunkt

$D_{equ,ZM}$ [mm] ..ausgleichende Überhöhung an einem bestimmten Streckenpunkt für die Zugmitte

Die maximale Fehlüberhöhung und der maximale Überhöhungsüberschuss treten an einer bestimmten Stelle der Strecke bei jenen Bereichen des Zuges auf, die diesen Streckenpunkt mit der minimalen bzw. maximalen Geschwindigkeit passieren. Das sind bei einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung die Zugspitze und das Zugende.

Beim Anfahren hat die Zugspitze die geringste Geschwindigkeit. Der zugehörige Überhöhungsüberschuss ergibt sich aus der Differenz der eingebauten Überhöhung, die in diesem Fall der Obergrenze der optimalen Überhöhung und somit gemäß (3.08) der ausgleichenden Überhöhung für die Zugmitte entspricht, und der ausgleichenden Überhöhung für den Zuganfang.

$$E_{\max} = D_{equ,ZM} - D_{equ,ZA} = 11,8 \cdot 3,6^2 \cdot \frac{2 \cdot a}{R} \cdot \left[\left(s_{ZA} + \frac{l_Z}{2} \right) - (s_{ZA}) \right] = 152,9 \cdot \frac{l_Z \cdot a}{R}$$

E_{\max} [mm] maximal auftretender Überhöhungsüberschuss

$D_{equ,ZA}$ [mm]....ausgleichende Überhöhung an einem bestimmten Streckenpunkt für den Zuganfang

Analog dazu ergibt sich der maximale Überhöhungsfehlbetrag für das Zugende durch die Differenz der ausgleichenden Überhöhung für das Zugende und der ausgleichenden Überhöhung für die Zugmitte.

$$\begin{aligned} U_{\max} &= D_{equ,ZE} - D_{equ,ZM} \\ &= 11,8 \cdot 3,6^2 \cdot \frac{2 \cdot a}{R} \cdot \left[(s_{ZA} + l_Z) - \left(s_{ZA} + \frac{l_Z}{2} \right) \right] = 152,9 \cdot \frac{l_Z \cdot a}{R} = E_{\max} \end{aligned}$$

$D_{equ,ZE}$ [mm] ...ausgleichende Überhöhung an einem bestimmten Streckenpunkt für das Zugende

Dabei zeigt sich, dass die maximal auftretende Fehlüberhöhung vom Betrag her gleich groß ist wie der maximal auftretende Überhöhungsüberschuss. Weiters lässt sich ablesen, dass die Mindesthöhe des Betrags der unausgeglichenen Seitenbeschleunigung bei einer beschleunigten

Kreisbogenfahrt von der Zuglänge, der Längsbeschleunigung und der Krümmung des Kreisbogens abhängt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der gewählte Verlauf der Überhöhung gleichzeitig die Forderungen erfüllt, beide Schienen in gleichem Ausmaß zu beanspruchen, und den maximalen Überhöhungsüberschuss und die maximale Fehlüberhöhung gleich groß werden zu lassen. Dieser Überhöhungsverlauf ist identisch mit dem Verlauf der ausgleichenden Überhöhung für die Zugmitte. Die Obergrenze der optimalen Überhöhung ist jedoch durch die in der Trassierungsvorschrift festgelegte maximal zulässige Überhöhung von 150 mm begrenzt. Somit ergibt sich die Obergrenze der optimalen Überhöhung für den Bereich, den der komplette Zug in einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung passiert wie folgt:

$$D_{opt,max} = \min \left(\begin{array}{c} D_{equ,ZM} \\ 150 \end{array} \right) \quad (3.09)$$

Diese Gleichung (3.09) ist äquivalent zur Gleichung (3.02), somit werden die Bereiche 2 und 4 der Abb. 2.05 damit beschrieben.

3.3.2 Untergrenze der optimalen Überhöhung

Erfolgt die Wahl der Untergrenze der optimalen Überhöhung für Beschleunigungsbereiche analog zur Wahl der Untergrenze der optimalen Überhöhung für Bereiche mit konstanter Fahrgeschwindigkeit gemäß Kapitel 3.1.2, so wird die Formel (3.08) für eine um 10 % verringerte Fahrgeschwindigkeit adaptiert. Daraus ergibt sich die folgende Gleichung:

$$D_{opt,min} = 11,8 \cdot 3,6^2 \cdot 0,9^2 \cdot \frac{v_{ZM}^2}{R} = 0,81 \cdot D_{equ,ZM} \quad (3.10)$$

In der Literatur wird für Stadtschnellbahnen empfohlen, dass sich die eingebaute Überhöhung nach der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit richten soll. Dabei soll darauf geachtet werden, dass der Überhöhungsüberschuss für den langsameren Zugteil nicht allzu groß wird. [10] Die Trassierungsvorschrift der Wiener U-Bahn geht hier aber noch weiter, indem sie eine negative freie Seitenbeschleunigung nur dann zulässt, wenn sie aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten von Zugspitze und Zugende auch bei Ausnutzung der Mindestüberhöhung nicht vermieden werden kann. [13]

Die Untergrenze für die optimale Überhöhung gemäß der Funktion (3.10) ist in den meisten Situationen zu hoch angesetzt, um die angeführten Bestimmungen der Trassierungsvorschrift erfüllen zu können.

Einerseits darf es zu keiner negativen freien Seitenbeschleunigung, also zu keinem Überhöhungsüberschuss kommen. Das resultiert in der Forderung, dass die Untergrenze der optimalen Überhöhung maximal so groß sein kann wie die ausgleichende Überhöhung für den langsamsten Teil des Zuges.

$$D_{opt,min} = \min \begin{pmatrix} D_{equ,ZA} \\ D_{equ,ZE} \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

Andererseits ist die Mindestüberhöhung einzuhalten, die sich aus der ausgleichenden Überhöhung für den schnellsten Teil des Zuges abzüglich des maximal zulässigen Überhöhungsfehlsbetrages ergibt.

$$D_{opt,min} = \max \begin{pmatrix} D_{equ,ZA} \\ D_{equ,ZE} \end{pmatrix} - U_{max} \quad (3.12)$$

Diese in Gleichung (3.12) angeführte Mindestüberhöhung muss für jene in Abb. 2.06 eingezeichneten Bereiche mit gleichzeitigem Beschleunigen und Bremsen dahingehend abgewandelt werden, dass die ausgleichende Überhöhung der über den gesamten Zug auftretenden maximalen Geschwindigkeit anstelle des Maximums aus Überhöhung am Zuganfang und Zugende einzusetzen ist.

Eigentlich gilt auf den Tourenleisen der Wiener U-Bahn generell eine Entwurfsgeschwindigkeit von 80 km/h. [13] Somit müsste die Mindestüberhöhung stets unter Berücksichtigung dieser Entwurfsgeschwindigkeit berechnet werden, um der Trassierungsvorschrift gerecht zu werden. Von dieser Konvention wird in dieser Arbeit aber bewusst abgewichen, da für planmäßig verkehrende und in den Stationen haltende Züge die Maximalgeschwindigkeit für außerplanmäßig durchfahrende Züge nicht von Belang ist. Die Notwendigkeit, stets die Möglichkeit eines mit der Entwurfsgeschwindigkeit fahrenden Zuges beim Festlegen der Überhöhung berücksichtigen zu müssen, könnte die Wahl einer optimalen Überhöhung für die planmäßig verkehrenden Züge verhindern. Die bessere Lösung im Hinblick auf die Optimierung der Trassierung für die planmäßigen Züge ist die, dass sich die Höchstgeschwindigkeit für durchfahrende Züge nach der tatsächlichen Trassierung orientiert.

Je nach Größe der Beschleunigung und des Bogenradius können alle drei der in den Gleichungen (3.10), (3.11) und (3.12) beschriebenen Bedingungen für die Untergrenze der optimalen Überhöhung maßgeblich werden. Zusätzlich ist die maximal zulässige Überhöhung von 150 mm zu beachten. Die für Anfahren und Bremsen gleichermaßen gültige mathematische Formulierung für die Untergrenze der optimalen Überhöhung lautet wie folgt:

$$D_{opt,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} \min \left[\begin{array}{l} 0,81 \cdot D_{equ,ZM} \\ \min \left(\begin{array}{l} D_{equ,ZA} \\ D_{equ,ZE} \end{array} \right) \\ 150 \end{array} \right] \\ \max \left[\begin{array}{l} D_{equ,ZA} \\ D_{equ,ZE} \end{array} \right] - U_{max} \end{array} \right\} \quad (3.13)$$

Diese Gleichung (3.13) stellt eine Erweiterung der Gleichung (3.03) dar und gilt somit für den Bereich 2 und den Bereich 4 der Abb. 2.05.

Dieser Verlauf der Untergrenze der optimalen Überhöhung bei einer konstant beschleunigten Fahrt in einem Kreisbogen gemäß (3.12) ist in der folgenden Abb. 3.03 gemeinsam mit der Obergrenze gemäß (3.09) und der jeweiligen ausgleichenden Überhöhung für Zuganfang und Zugende dargestellt.

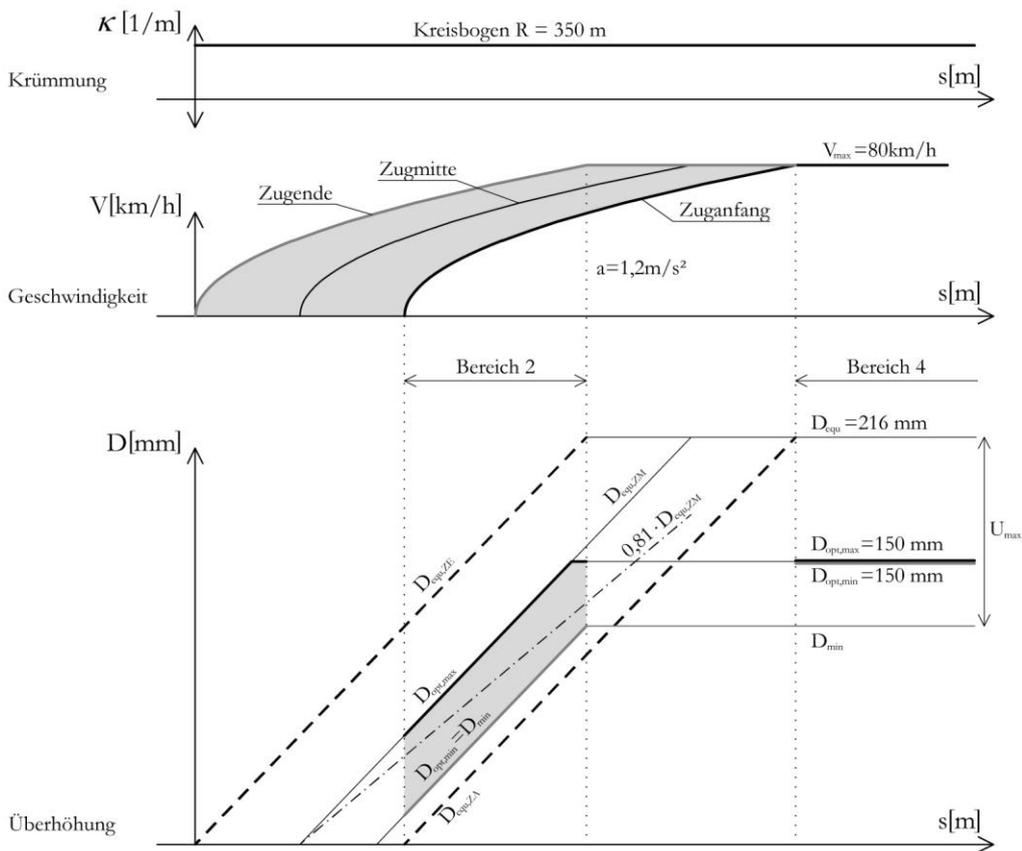


Abbildung 3.03: Ober- und Untergrenzen der optimalen Überhöhung in den Bereichen der gleichmäßig beschleunigten Fahrt und der Beharrungsfahrt, R = 350 m

Der in der Abb. 3.03 dargestellte exemplarische Beschleunigungsverlauf eines Zuges findet in einem Kreisbogen mit einem Radius von 350 m statt. Bei einem derart engen Radius ist die Mindestüberhöhung, die im Beschleunigungsbereich (Bereich 2) einzubauen ist, um die Fehlüber-

höhung für das Zugende nicht zu groß werden zu lassen, größer als die ausgleichende Überhöhung für den Zuganfang. Am Zuganfang kommt es daher bei üblichen Beschleunigungswerten und engen Gleisbögen zwangsläufig zu einem Überhöhungsüberschuss.

Weiters ist bedingt durch den engen Radius die ausgleichende Überhöhung im Bereich der konstanten Fahrgeschwindigkeit (Bereich 4) in der Abb. 3.03 größer als der Maximalwert der Überhöhung lt. Trassierungsvorschrift. Da diese auch für infolge der energiesparenden Fahrweise geringfügig langsamere Züge größer als die maximal einzubauende Überhöhung ist, entspricht dieser maximal mögliche Wert der Überhöhung der optimalen Überhöhung für diesen Kreisbogen.

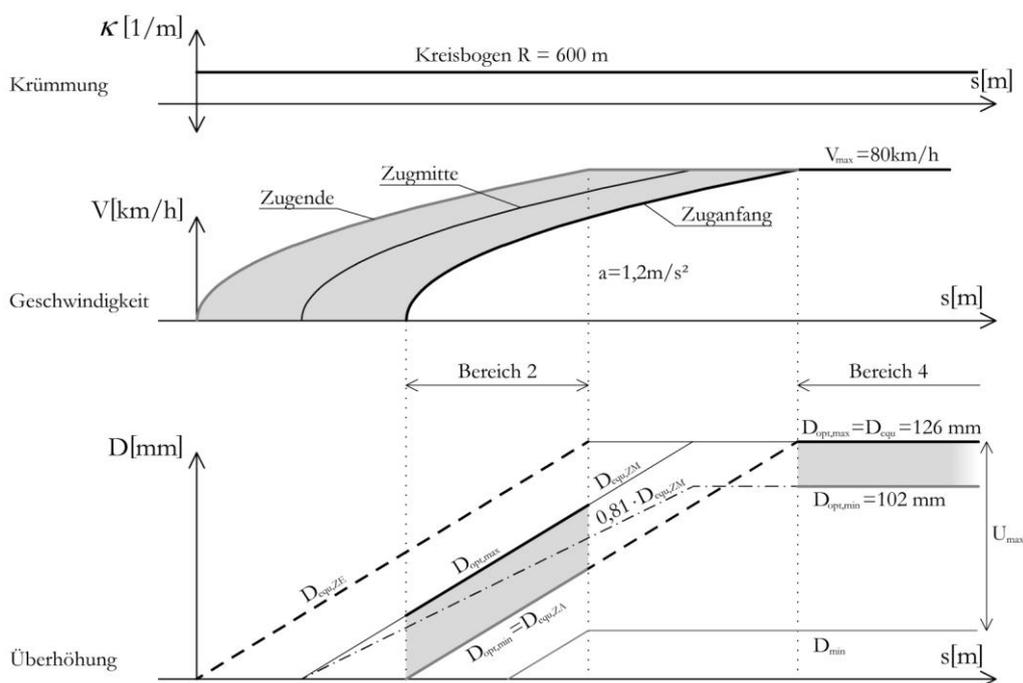


Abb. 3.04: Ober- und Untergrenzen der optimalen Überhöhung in den Bereichen der gleichmäßig beschleunigten Fahrt und der Beharrungsfahrt, $R = 600$ m

Abb. 3.04 zeigt ebenfalls wie Abb. 3.03 den Beschleunigungsverlauf eines Zuges und die anzuwendenden Ober- und Untergrenzen der optimalen Überhöhung. Im Gegensatz zur Abb. 3.03 wurde in diesem Fall ein größerer Radius gewählt

3.4 Überhöhung bei teilweiser Beschleunigung

3.4.1 Obergrenze der optimalen Überhöhung

Wie bereits im Kapitel 3.3.1 beschrieben, ist der Verlauf der ausgleichenden Überhöhung für die Zugmitte im Bereich der gleichmäßigen Beschleunigung gleichzeitig jener Verlauf, bei dem die

Maximalbeträge von Überhöhungsfehlbetrag und Überhöhungsüberschuss gleich groß sind, sowie jener Verlauf, bei dem die Innen- und Außenschiene über den ganzen Zug betrachtet gleichmäßig belastet werden.

Im Bereich 3 gemäß Abb. 2.05 passiert nur mehr ein Teil des Zuges einen Streckenpunkt in einer beschleunigten Bewegung, der restliche Teil befindet sich bereits in einer Beharrungsfahrt. In diesem Bereich der teilweisen Beschleunigung gibt es drei unterschiedliche Varianten für den Verlauf der Obergrenze der optimalen Überhöhung, stets vorausgesetzt, dass die damit ermittelten Überhöhungswerte die maximal zulässige Überhöhung nicht übersteigen.

Variante 1 basiert auf der Forderung nach einer gleichmäßigen Belastung von Innen- und Außenschiene. Um den entsprechenden Überhöhungsverlauf zu erhalten, wird jener Teil des Zuges, der sich in einer beschleunigten Bewegung befindet, gemäß Gleichung (3.07) erfasst und der Einfluss des restlichen Zuges wird ergänzt.

$$D_{opt,max} = 11,8 \cdot 3,6^2 \cdot \frac{a}{R} \cdot (2 \cdot s_{ZA} + l_1) \cdot \frac{l_1}{l_Z} + 11,8 \cdot \frac{V_{max}^2}{R} \cdot \frac{l_Z - l_1}{l_Z} \quad (3.14)$$

l_1 [m] Länge des Zugteiles, der den Streckenpunkt in beschleunigter Bewegung passiert

Der Verlauf dieser Funktion (3.14) stellt eine parabelförmige Verbindung zwischen der Obergrenze der optimalen Überhöhung in Bereich 2 und Bereich 4 in der Abb. 3.04 dar.

Variante 2 erfüllt die Bedingung, dass der Betrag des maximal auftretenden Überhöhungsüberschusses und des maximal auftretenden Überhöhungsfehlbetrages gleich groß sind.

$$|U_{max}| = |E_{max}|$$

$$D_{equ,ZE} - D_{opt,max} = D_{opt,max} - D_{equ,ZA}$$

$$D_{opt,max} = \frac{D_{equ}(V_{max}) + D_{equ,ZA}}{2} = \frac{11,8}{2 \cdot R} \cdot (V_{max}^2 + 3,6^2 \cdot 2 \cdot a \cdot s_{ZA}) \quad (3.15)$$

Diese Bedingung führt zu einem linearen Verlauf der Obergrenze der optimalen Überhöhung zwischen den Werten der angrenzenden Bereiche 2 und 4 in der Abb. 3.04.

Variante 3 legt die Obergrenze der optimalen Überhöhung anhand des Verlaufs der ausgleichenden Überhöhung für die Zugmitte fest.

$$D_{opt,max} = D_{equ,ZM} \quad (3.16)$$

Diese Variante führt zu einem linearen Verlauf der Obergrenze der optimalen Überhöhung in Verlängerung des Überhöhungsverlaufes in Bereich 2 der Abb. 3.04 bis zum Erreichen der ausgleichenden Überhöhung für die Maximalgeschwindigkeit. Danach bleibt die Obergrenze der optimalen Überhöhung konstant auf diesem Wert.

Der Vergleich der drei Varianten für den Verlauf der Obergrenze der optimalen Überhöhung zeigt, dass die Variante 3 einerseits einen rechnerisch sehr einfach zu ermittelnden Verlauf darstellt und andererseits jene Variante ist, die die größten Überhöhungswerte ergibt. Somit eignet sich der Verlauf gemäß Variante 3 als Obergrenze für die optimale Überhöhung in Bereichen mit teilweise beschleunigter Bewegung.

3.4.2 Untergrenze der optimalen Überhöhung

Die Untergrenze der optimalen Überhöhung wird im Bereich der teilweise beschleunigten Bewegung des Zuges als lineare Verbindung zwischen den angrenzenden Werten der Untergrenze der optimalen Überhöhung in Bereich 2 und Bereich 4 gemäß Abb. 3.04 angenommen.

In der folgenden, auf der Abb. 3.04 basierenden Darstellung sind die Grenzfunktionen zur Ermittlung der optimalen Überhöhung auch im Bereich der teilweise beschleunigten Bewegung eingetragen.

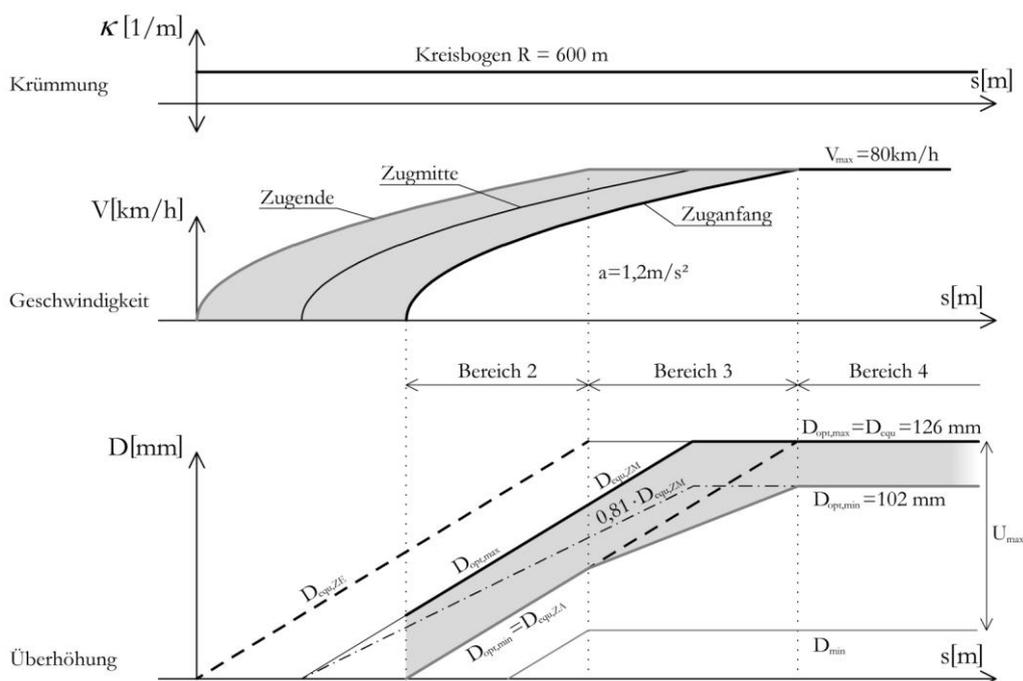


Abbildung 3.05: Ober- und Untergrenzen der optimalen Überhöhung mit Ausnahme der Haltestellenbereiche, $R = 600 \text{ m}$

3.5 Überhöhung im Haltestellenbereich

Die Trassierungsvorschrift der Wiener Linien gibt vor, dass ein Bahnsteig grundsätzlich in die Gerade zu legen ist, wodurch die Überhöhung im Bereich des planmäßigen Stillstandes eines Zuges automatisch null wäre. [13] In beengten Situationen ist es jedoch auch zulässig, den Bahnsteig entlang eines Bogens mit großem Radius zu führen. Für diesen Fall ist in der Trassierungsvorschrift jedoch kein Maximalwert für die Überhöhung angegeben.

Für jenen Fall, dass ein Kreisbogen nach der Haltestelle angeordnet ist und der zugehörige Übergangsbogen in den Bahnsteigbereich hineinreicht, ist die größte zulässige Überhöhung der Überhöhungsrampe beim Bahnsteigende mit 10 mm begrenzt. [13]

Es gibt gute Gründe, die Überhöhung in der Haltestelle zu begrenzen. Eine große Überhöhung führt zu einer Querneigung des stehenden Zuges, was im Hinblick auf die Barrierefreiheit Probleme beim Ein- und Aussteigen bereitet. Außerdem wäre es bei einem stark überhöhten Gleis im Bahnsteigbereich schwieriger, den Spalt zwischen Bahnsteig und Wagenboden klein zu halten.

Prinzipiell könnte man zur Ermittlung einer Überhöhung, die eine gleichmäßige Belastung von Innen- und Außenschiene bewirkt, eine ähnliche Überlegung anstellen, wie dies für den Bereich 3 gemäß Abb. 3.05 mit Hilfe der Gleichung (3.14) durchgeführt wurde. Dabei müsste man jedoch zusätzliche Annahmen über die Verweildauer des Zuges in der Station einfließen lassen. Die ausgleichende Überhöhung eines stehenden Zuges ist die Nullüberhöhung. Somit würde sich aufgrund der Stehzeit die optimale Überhöhung in der Haltestelle gegenüber jenen Bereichen, in denen es keinen planmäßigen Halt gibt, verringern.

Daher wird in dieser Arbeit zur Vereinfachung der aus der Trassierungsvorschrift stammende Wert von 10 mm als generelle Obergrenze für die Überhöhung im Bahnsteigbereich herangezogen. Würde man diesen Wert als Obergrenze der optimalen Überhöhung in den Haltestellenbereich in der Abb. 3.05 einzeichnen, würde sich beim Übergang zum Bereich 2 ein Sprung in der Obergrenze der Überhöhung ergeben. Das liegt jedoch vor allem daran, dass der in der Abb. 3.05 dargestellte Radius von 600 m eigentlich zu klein für den Einbau im Bahnsteigbereich ist. [13]

3.6 Überhöhung in Übergangsbögen

Zur Ermittlung der Grenzwerte der optimalen Überhöhung in Übergangsbögen werden ebenso wie in Kreisbögen die Gleichung (3.09) zur Berechnung der Obergrenze und die Gleichung (3.13)

zur Berechnung der Untergrenze der optimalen Überhöhung herangezogen. Beide Gleichungen leiten den Wert der Überhöhung ausschließlich aus Werten ab, die an einem bestimmten Streckenpunkt mit einem bestimmten Radius gelten. Somit ist es unerheblich, ob die Strecke an diesem Punkt in Form eines Kreisbogens oder eines Übergangsbogens vorliegt.

Dieses Verfahren zur Ermittlung der optimalen Überhöhung ist daher aber auch nicht imstande, den optimalen Verlauf einer Überhöhungsrampe abzubilden. Es werden lediglich jene Bereiche für die Höhe der Überhöhung ermittelt, die optimal im Hinblick auf die punktuell auftretenden Seitenbeschleunigungen sind.

4 Die Wiener U-Bahn

Wien hat als Hauptstadt Österreichs eine Einwohnerzahl von rund 1,76 Millionen auf einer Fläche von ca. 414,9 km². Die letzten Jahre waren gekennzeichnet durch eine ständige Zunahme des Anteils des ÖPNVs am Modal Split auf zuletzt 39 % im Jahr 2012. [33]

Der größte Anteil des öffentlichen Verkehrs in Wien wird durch das Unternehmen „Wiener Linien GmbH & Co KG“ abgewickelt, das eine 100-prozentige Tochter der „Wiener Stadtwerke Holding AG“ ist, die sich wiederum zur Gänze im Eigentum der Stadt Wien befindet. [34]

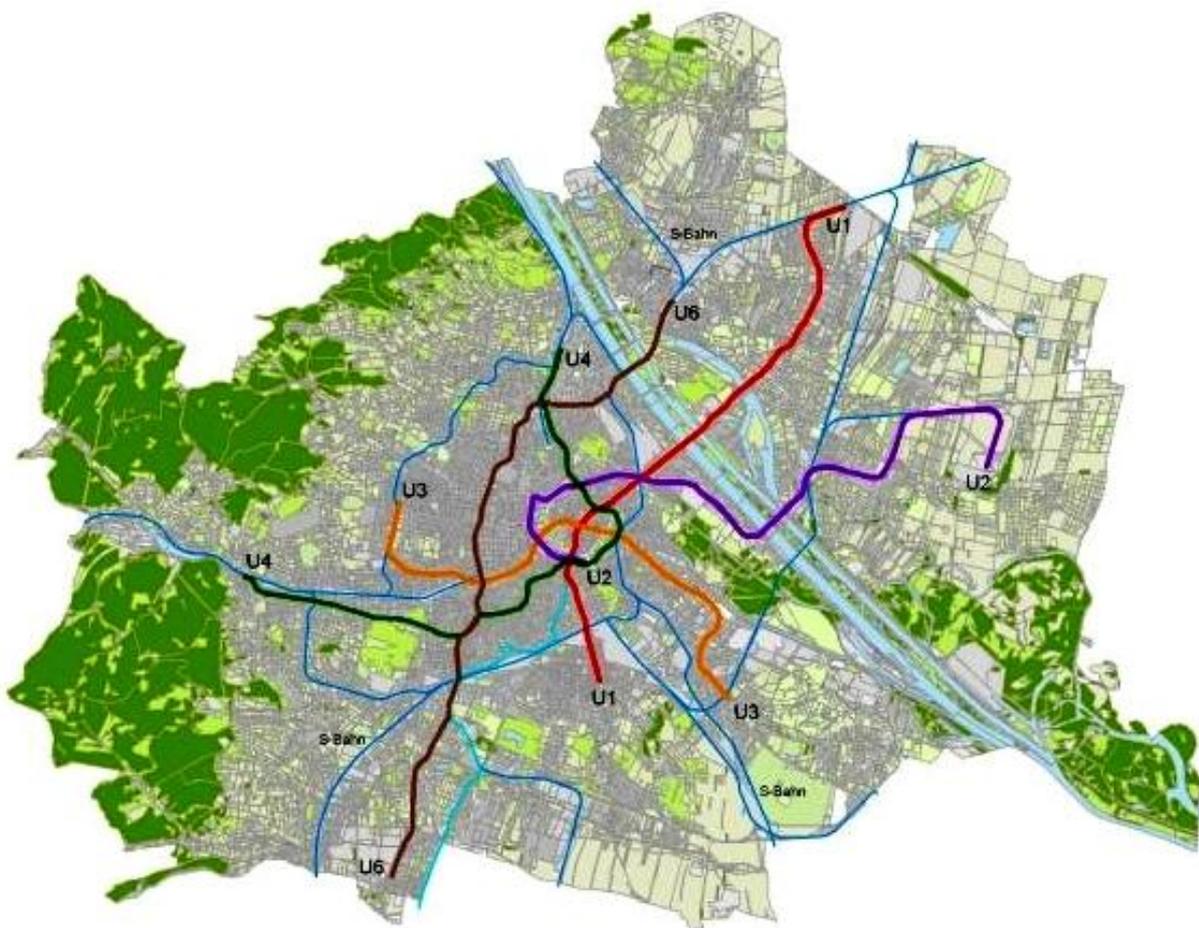


Abbildung 4.01: U-Bahn-Netzplan und Schnellbahnliesen (blau) in Wien, aktueller Ausbaustand (Jänner 2014)

Von den knapp 907 Millionen Fahrgästen, die im Jahr 2012 mit den öffentlichen Verkehrsmitteln der Wiener Linien unterwegs waren, wurde fast die Hälfte (ca. 444 Mio. Personen) mit der U-Bahn befördert. Der Rest entfällt auf Straßenbahnen (295 Mio.) und Busse (167 Mio.). [33] Ein weiteres wichtiges Wiener Verkehrsmittel ist die Schnellbahn, die von den ÖBB betrieben wird. Diese ist jedoch kein rein innerstädtisches Verkehrsmittel, sondern stellt in erster Linie die Verbindung Wiens mit dem Umland her, wie in der Abb. 4.01 dargestellt ist.

Vergleicht man die gefahrenen Platzkilometer im Jahr 2012 in Wien, so ist die U-Bahn mit ca. 11,8 Milliarden gefahrenen Platzkilometern das leistungsfähigste Verkehrsmittel der Wiener Linien, gefolgt von der Straßenbahn mit ca. 4,1 Mrd. und dem Autobus mit ca. 2,4 Mrd. [33]

Gegenwärtig (Stand Jänner 2014) umfasst das U-Bahn-Netz fünf Linien mit den Bezeichnungen U1, U2, U3, U4 und U6 mit einer Linienlänge von ca. 78,4 km und insgesamt 104 Haltestellen und drei Betriebsbahnhöfen. [33] [58] Dabei sind Haltestellen, die Umsteigebahnhöfe zwischen zwei (bzw. drei) Linien darstellen, doppelt (bzw. dreifach) gezählt. Das aktuelle Liniennetz der Wiener U-Bahn ist in der Abb. 4.01 eingezeichnet.

Der durchschnittliche Haltestellenabstand liegt bei ca. 790 m und die mittlere Reisegeschwindigkeit beträgt ca. 32 km/h. [33]

Abgesehen von den im regulären Fahrgastbetrieb befahrenen Tourengleisen gibt es zahlreiche Betriebsgleise in Form von Verbindungsgleisen, Abstellgleisen und Überleitstellen, sodass die Gesamtgleislänge im Netz der Wiener U-Bahn aktuell (Stand Jänner 2014) mehr als 230 km beträgt. [33] [58]

4.1 Geschichte der Wiener U-Bahn

Die erste – damals noch dampfbetriebene – U-Bahn der Welt ging am 10.01.1863 in London in Betrieb. Erst knapp 30 Jahre später, im Jahr 1892, eröffnete die weltweit zweite U-Bahn in Chicago. Dann ging es jedoch Schlag auf Schlag und um die Jahrhundertwende nahmen in zahlreichen europäischen und amerikanischen Städten U-Bahn-Linien ihren Betrieb auf. [01] Obwohl Wien im Jahr 1910 mit 2,1 Mio. Einwohnern immerhin die fünftgrößte Stadt der Welt war, sollte es noch einige Zeit dauern, bis auch hier ein U-Bahn-Netz gebaut werden konnte. [01] Bereits seit der Mitte des 19. Jahrhunderts war die Errichtung eines übergeordneten Schnellverkehrsmittels in Wien immer wieder Thema der öffentlichen Diskussion, aber alle Projekte, die das Stadtzentrum mittels unterirdischer Durchmesserlinien mit den Außenbezirken zu verbinden versuchten, scheiterten an der Finanzierung. [05]

Die dampfbetriebene Stadtbahn wurde in den Jahren 1898 bis 1901 mit einer Streckenlänge von 38,8 km auf vier Linien in Betrieb genommen und verband in erster Linie die nach Wien führenden Eisenbahnstrecken untereinander. [01] Ab dem 03.06.1925 erfolgte die schrittweise Elektrifizierung des Bahnnetzes zur „Wiener elektrischen Stadtbahn“. Mit dieser stand nun ein leistungsfähiges, auf einer unabhängigen Trasse geführtes, öffentliches Verkehrsmittel zur Verfügung, das

jedoch die Innenstadt Wiens nur tangierte, da wegen der dichten Bebauung keine Bahnlinien an der Oberfläche durch das Stadtzentrum geführt werden konnten. [05]

Aufgrund der zunehmenden Behinderung von Straßenbahnen und Bussen durch den ansteigenden PKW-Verkehr beschäftigten sich die Stadtplaner ab Mitte der 1950er Jahre mit der Verlegung von Straßenbahnstrecken in den Untergrund. In diesem Zusammenhang gab es auch Pläne für die Errichtung von USTRAB-Linien („Unterpfasterstraßenbahn“) durch das Stadtzentrum Wiens, während die Errichtung eines U-Bahn-Netzes immer noch als zu teuer erachtet wurde. [05]

Tatsächlich realisiert wurden USTRAB-Strecken in der Folge jedoch nur an einigen neuralgischen Plätzen und Straßenzügen. Am 07.05.1959 wurde mit dem „Verkehrsbauwerk Südtiroler Platz“ die erste unterirdische Straßenbahn-Station eröffnet, zwei Jahre später folgte das „Verkehrsbauwerk Schottentor“. Die erste längere unterirdische Straßenbahntrasse wurde mit der 1,9 km langen Strecke der Zweierlinien-USTRAB entlang der westlichen Bezirksgrenze der Inneren Stadt am 08.10.1966 in Betrieb genommen. Schließlich wurde am 11.01.1969 nach knapp fünfjähriger Bauzeit auch die Gürtel-USTRAB im Bereich des Margaretenürtels mit insgesamt ca. 3,4 km unterirdischer Streckenlänge eröffnet. [05]

Die im Zuge des Baus der USTRAB errichteten Tunnelstrecken wurden bereits im Hinblick auf die etwaige spätere Verwendung für U-Bahn-Betrieb dimensioniert. „Tatsächlich gab es Mitte der 1960er-Jahre ein Umdenken in dieser Sache und noch während der Bauarbeiten an den USTRAB-Strecken fiel im Rathaus die Entscheidung für den Bau einer U-Bahn.“ [05]

4.1.1 Die 1. Ausbaustufe (1969-1982)

Am 15.09.1966 wurde durch den damaligen Wiener Bürgermeister Bruno Marek ein Konzept für ein aus vier Linien bestehendes „U-Bahn-Grundnetz“ für die Stadt Wien präsentiert. Der endgültige Beschluss durch den Gemeinderat für den Bau erfolgte am 26.01.1968, allerdings für ein reduziertes Netz bestehend aus den Linien U1, U2 und U4. Die Linie U2 verlief dabei großteils auf der Trasse der „Zweierlinien-USTRAB“ und die Linie U4 stellte die Modernisierung der Wiental- und Donaukanallinie der Wiener Stadtbahn dar. Nur die U1 wurde tatsächlich als komplett neue Durchmesserlinie errichtet. [05]

Der Beginn der Bauarbeiten für die U-Bahn erfolgte am 03.11.1969 am Karlsplatz, dem gemeinsamen Kreuzungspunkt der drei vorerst geplanten Linien. [05]

Obwohl es bereits seit dem 08.05.1976 entlang eines Streckenabschnittes der U4 zwischen den Stationen Friedensbrücke und Heiligenstadt einen sogenannten „erweiterten Probebetrieb“ gab,

wurde das offizielle Datum der Eröffnung der Wiener U-Bahn mit der Inbetriebnahme eines Teilstücks der Linie U1 am 25.02.1978 gefeiert. [05]

Die Fertigstellung der U-Bahn-Strecken der ersten Bauphase erfolgte in insgesamt 12 Etappen und war am 03.09.1982 abgeschlossen. [03] Dabei wurde die Linie U1 mit 14 Stationen und einer Linienlänge von 10,0 km vom Reumannplatz bis nach Kagran errichtet, die Linie U2 führte vom Karlsplatz mit insgesamt 7 Stationen auf einer Linienlänge von 3,6 km bis zum Schottenring und die Linie U4 hatte auf einer Linienlänge von 16,4 km insgesamt 20 Stationen von Hütteldorf bis nach Heiligenstadt, was bereits dem heutigen Verlauf der Linie U4 entspricht. [08] Außerdem wurde an der Linie U4 der damals einzige Betriebsbahnhof Wasserleitungswiese für alle drei Linien errichtet. [05]

Obwohl die Linie U3 kein Bestandteil der ersten Ausbaustufe war, wurden bereits Vorarbeiten für die spätere Errichtung der U3 geleistet. So wurde der Rohbau für das Stationsbauwerk Stephansplatz der U3 im Zuge der Arbeiten für die U1 mit errichtet [05] und das Betriebsgleis 7 zur Verbindung der Linie U3 mit der Linie U4 gebaut. [05]

4.1.2 Die 2. Ausbaustufe (1984-2000)

Noch vor Abschluss der 1. Ausbaustufe wurde am 29.04.1980 im Wiener Gemeinderat die Umsetzung der 2. Ausbaustufe der Wiener U-Bahn beschlossen, die den Bau der Linien U3 und U6 beinhaltete. [05] Dabei wurde die Linie U3 zur Gänze als neue Durchmesserlinie errichtet, Teile der Linie U6 verlaufen hingegen auf der ehemaligen Gürtellinie der Stadtbahn. [05]

1984 wurde mit dem Bau der U3 begonnen, die ursprünglich nur vom Westbahnhof bis nach Erdberg führen sollte. Dieser Streckenabschnitt wurde in zwei Etappen 1991 und 1993 eröffnet. Die Ende der 1980er Jahre beschlossene Verlängerung der U3 in beide Richtungen wird ebenfalls zur zweiten Ausbauphase gezählt. Somit wurde das letzte Teilstück der U3 am 02.12.2000 in Betrieb genommen. [05]

Die Linie U6 stellt eine Besonderheit im Wiener U-Bahn-Netz dar, da diese Linie über ein abweichendes Lichtraumprofil, niedrigere Bahnsteighöhen, eine andere Fahrstromversorgung und Zugsicherung und somit auch über eigene Fahrzeugtypen verfügt. Der Grund dafür waren finanzielle und denkmalpflegerische Überlegungen bei der Adaptierung der Stadtbahn-Gürtellinie. Die Eröffnung der Linie U6 erfolgte ebenfalls in Etappen in den Jahren 1989 bis 1996. [05]

Nach Abschluss der 2. Ausbauphase hat die Linie U3 auf einer Linienlänge von 13,5 km 21 Stationen und führt von Simmering bis nach Ottakring, die Linie U6 wurde von Siebenhirten bis Floridsdorf mit einer Linienlänge von 17,5 km und insgesamt 24 Stationen errichtet, was bei

beiden Linien dem heutigen Verlauf entspricht. [08] Außerdem wurde der Betriebsbahnhof Erdberg an der Linie U3 errichtet, da der bisher einzige Betriebsbahnhof des U-Bahn-Netzes (Wasserleitungswiese) die Kapazitätsgrenze erreicht hatte. [05] Die Linie U6 verwendet den Betriebsbahnhof Michelbeuern, der bereits im Jahr 1927 für die Stadtbahn eröffnet worden war. [56]

4.1.3 Die 3. Ausbaustufe (2001-2010)

Im Rahmen der dritten Ausbaustufe wurden keine neuen Linien errichtet, sondern die bestehenden Linien U1 und U2 verlängert. Als Vorbereitung darauf wurden in den Jahren 2000 bis 2002 die Bahnsteige der U2, die aus historischen Gründen eine Länge von nur 80 m hatten und somit nur von Kurzzügen befahren werden konnten, auf die Stationslänge der anderen Linien von 115 m ausgebaut. [05] [08]

Die Verlängerung der U1 um 4,6 km und 5 Stationen nach Norden wurde in den Jahren 2001 bis 2006 errichtet. [05] [08] Seit der Eröffnung am 2. September 2006 verkehrt die U1 somit auf einer Linienlänge von 14,6 km zwischen den Endstationen Reumannplatz und Leopoldau. Entlang der Linie befinden sich insgesamt 19 Stationen. [03]

Ursprünglich war die Verlängerung der U2 über die Donau in den 22. Bezirk im Anschluss an die Endstation Karlsplatz geplant. Schlussendlich fiel die Entscheidung für eine Verlängerung dieser bis zum damaligen Zeitpunkt kürzesten Linie des U-Bahn-Netzes über die Endstation Schottenring hinaus nach Osten. [03] Das erste Teilstück wurde 2008 eröffnet, 2010 wurde auch der zweite Abschnitt in Betrieb genommen. [33] Somit wurde die Linie U2 im Zuge der dritten Ausbauphase um 9,2 km und 11 Stationen auf insgesamt 12,8 km und 17 Stationen zwischen den Endstationen Karlsplatz und Aspernstraße verlängert. [08]

4.1.4 Die 4. Ausbaustufe (seit 2010)

Derzeit ist die vierte Ausbaustufe des U-Bahn-Netzes im Gange. Dazu zählen – wie schon in der vorangegangenen Ausbauphase – Verlängerungen der Bestandslinien U1 und U2. [03]

Die Verlängerung der U2 nach Osten um ein weiteres Teilstück von 4,2 km und die Errichtung von drei bzw. in späterer Folge vier Stationen ist bereits erledigt. Mit der Eröffnung dieses Streckenabschnittes am 05.10.2013 ist die U2 nun auf einer Länge von knapp 17 km zwischen den Endstationen Karlsplatz und Seestadt unterwegs. [35] Sie verfügt somit aktuell über insgesamt 20 in Betrieb befindliche Stationen.

Die Linie U1 wird im Rahmen der vierten Ausbaustufe um 5 Stationen in den Süden verlängert. In Abänderung der ursprünglichen Planung einer südlichen Verlängerung der U1 bis nach Rotheneusiedl gelangt nun eine Streckenführung mit der Endstation Oberlaa zur Ausführung. Die Bauarbeiten für diese Verlängerung um 4,6 km wurden im Jahr 2012 aufgenommen. Man rechnet derzeit mit einer Fertigstellung des Streckenabschnittes im Jahr 2017. [36]

Im Rahmen der Finanzierungsvereinbarung zwischen dem Bund und der Stadt Wien für die vierte Ausbauphase ist auch die Verlängerung der U2 in den Süden über den 3. Bezirk bis zur Gudrunstraße enthalten. [03] Die Realisierung dieses Projekts wurde bisher noch nicht in Angriff genommen, da die Möglichkeit im Raum steht, diese Budgetmittel zugunsten der Errichtung einer neuen Linie U5 umzuschichten. Diese Linie soll allerdings nach den aktuellen Überlegungen nicht komplett neu errichtet werden, sondern durch Teilung und getrennte Weiterführung der Linie U2 im Bereich der Station Rathaus erfolgen. Die endgültige Entscheidung darüber soll voraussichtlich Mitte 2014 getroffen werden. [51]

4.1.5 Die Zukunft des U-Bahn-Netzes

Schon seit dem Bau der ersten Wiener U-Bahn-Strecken gibt es zahlreiche, immer wieder adaptierte Planungen für zukünftige Erweiterungen des U-Bahn-Netzes. Diese Konzepte werden hier aber nicht ausführlicher diskutiert, da meistens politische Entscheidungen den Ausschlag geben, welche Projekte letztendlich realisiert werden und wie die Finanzierung dafür erfolgt. Jedenfalls wird vor allem in Zeiten geringer werdender Spielräume im Budget der öffentlichen Hand der mit hohen Investitionen verbundene U-Bahn-Ausbau oft in Frage gestellt.

Aufgrund der hohen Leistungsfähigkeit eines U-Bahn-Netzes, des starken Bevölkerungsanstiegs in Wien und des aktuellen politischen Ziels einer weiteren Verringerung des Anteils des motorisierten Individualverkehrs am Modal Split von 27 % im Jahr 2012 auf nur noch 20 % im Jahr 2025 ist aber mit großer Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass die vierte Ausbauphase des Wiener U-Bahn-Netzes nicht die letzte sein wird. [33] [52]

4.2 Spurführung, Oberbau

Die Züge der Wiener U-Bahn fahren auf Stahlrädern über Vignolschienen aus Stahl, die mit einer Regelspurweite von 1.435 mm verlegt wurden. [33]

Das in den Gleisen der Wiener U-Bahn eingebaute Schienenprofil trägt die Bezeichnung S 48-U. Es basiert auf einer Schiene des Typs S 49 der ÖBB, deren Schienenfuß in einer um 10 mm

verminderten Breite ausgeführt ist, um eine Regulierung der Spurweite durch Austauschen der Klemmplatten zu ermöglichen. Dadurch könnte die Regelspurweite auch im Fall einer starken seitlichen Abnutzung einer Schiene wieder hergestellt werden. [14]

In Gleisbögen mit einem Radius von 300 m oder kleiner ist es gemäß dem geltenden Regelwerk notwendig, eine zusätzliche Leitschiene im Bereich des Innenstranges des Gleises anzubringen, um die Außenschiene zu entlasten. [48]

Das Oberbausystem der U-Bahn muss im Vergleich zu einem herkömmlichen Schotteroberbau einen wesentlich niedrigeren Körperschallpegel aufweisen, damit in den an die U-Bahn-Tunnel angrenzenden Gebäuden keine unzumutbaren Schwingungen auftreten. [25] Daher wurde ein schotterloses Masse-Feder-System entwickelt, bei dem die Schienen über Rippenplatten auf in U-Profile aus Stahl gefasste Polyurethan-Kunststoffschwellen mit Holzkern befestigt sind. [49] Diese sind durch eine Rippengummiumhüllung von den Gleistragplatten aus Beton getrennt. Damit es an keiner Stelle zu einer Berührung der Tragplatten mit der Tunnelwand kommt, sind die Gleistragplatten mit Glasfasmatten umhüllt. Die Gleistragplatten weisen eine Länge von 5 m auf und sind nicht miteinander verbunden. [01]

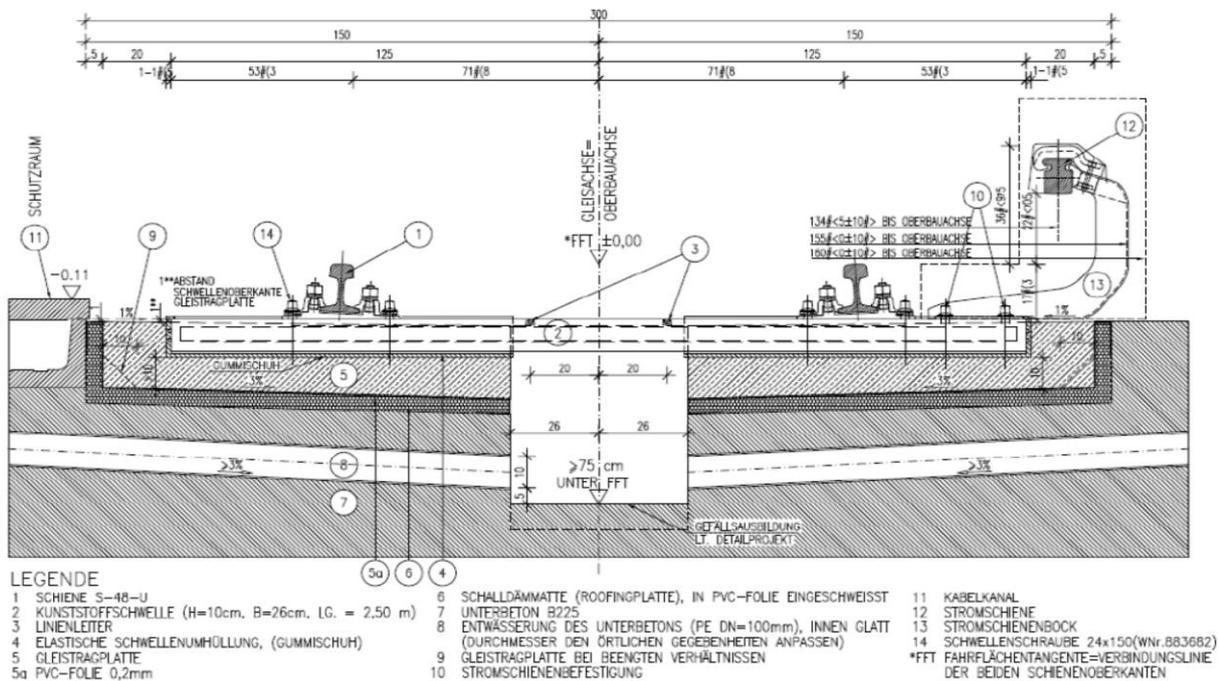


Abbildung 4.02: Schotterloser Regeloberbau mit Kunststoffschwellen

Der beschriebene Oberbau gemäß Abb. 4.02 ist wegen der guten Körperschalldämmung und des geringen Wartungsaufwandes vorwiegend im Tunnel eingebaut. [25] Diese Regelbauweise eines schotterlosen Oberbaus wurde mit der U2-Verlängerung der 3. Ausbauphase vom sogenannten „Neuen Wiener Oberbau“ abgelöst. [47]

Der in der Abb. 4.03 dargestellte Neue Wiener Oberbau ist ebenfalls ein Masse-Feder-System. Die Schiene lagert dabei mit einer Rippenplattenbefestigung auf elastisch ummantelten Bi-Block-Schwellen. Die Querverbindung wird über die auf einem elastischen Flächenlager aus Sylomer gelagerte Gleistragplatte hergestellt, in der die Bi-Block-Schwellen einbetoniert sind. [48]

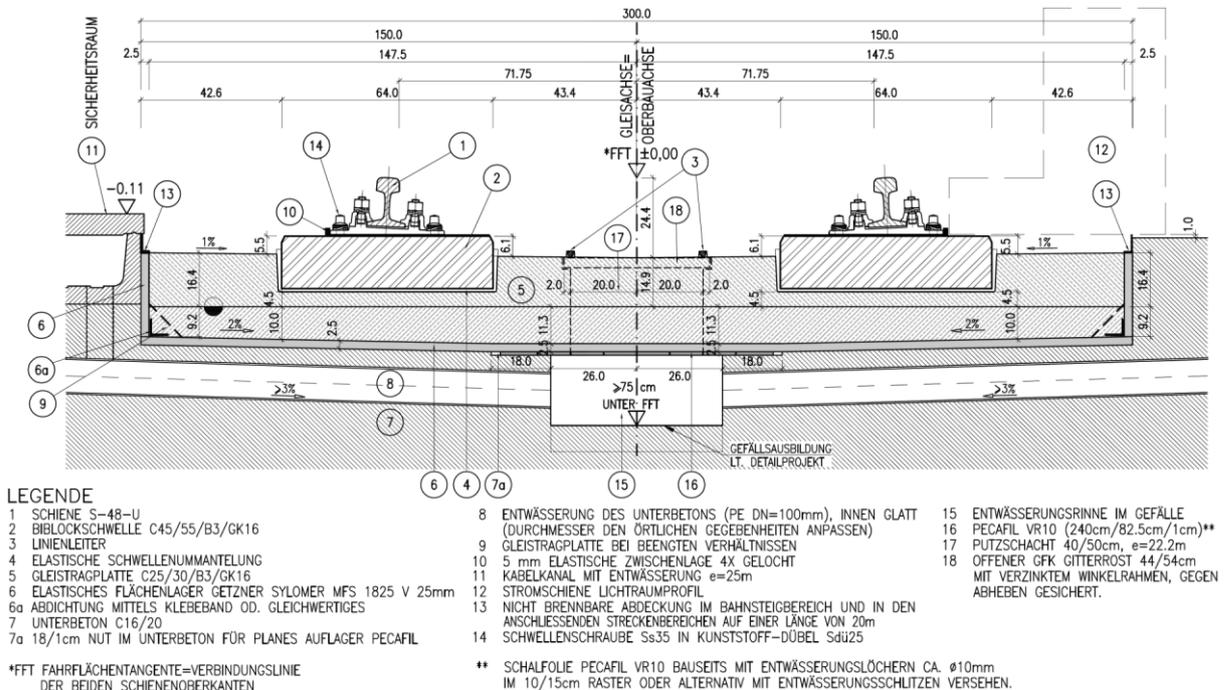


Abbildung 4.03: Neuer Wiener Oberbau mit Bi-Block-Schwellen und Sylomer-Lager

Auf Streckenbereichen im Freien kommt der Schotteroberbau – fallweise unter der Verwendung von Unterschottermatten – zum Einsatz, der einen guten Luftschallschutz bietet. Früher wurden beim Schotteroberbau Holzschwellen verlegt, die jedoch durch Stahlbetonschwellen abgelöst wurden. [25]

In manchen Streckenabschnitten des Wiener U-Bahn-Netzes, wie zum Beispiel bei Betriebsgleisen mit Putzgruben, kommt ein geklebter Oberbau zur Ausführung, bei dem auf zwischen den Schienen durchlaufende Schwellen verzichtet werden kann. [25] Sonderformen des Oberbaus wurden außerdem im Bereich von Brücken eingebaut. [14]

4.3 Zugsteuerung und Zugsicherung

Die Zugsicherung bei der Wiener U-Bahn erfolgt durch ein System der Linienzugsbeeinflussung (LZB). Im Gegensatz zu einem klassischen Blocksystem mit Streckensignalen ist bei einem LZB-System auch eine fahrzeugseitige Ausrüstung nötig. Die Datenübertragung der Signalinforma-

tionen zwischen den ortsfesten Stellwerken und dem Zug erfolgt induktiv über die im Gleis verlegten Linienleiterschleifen. [01] [06]

Das bei der Wiener U-Bahn eingesetzte Zweileitersystem besteht aus zwei parallel im Gleis verlegten Leitungen, die in regelmäßigen Abständen gekreuzt werden, wodurch markante elektrische Punkte entstehen. Diese werden vom Zug während der Fahrt registriert und zur Verortung sowie zur Bestimmung des Abstandes zum Vorderzug herangezogen. [48]

Die durch die Linienleiterschleifen übertragenen Daten stammen von sogenannten LZB-Streckengeräten, die mit dem Linienleiter sowie untereinander verkabelt sind und vom jeweiligen Stellwerk mit Signaleingaben versorgt werden. [48] Die dezentral angeordneten Stellwerke werden im Regelfall von der Leitstelle in Erdberg aus ferngesteuert betrieben. [01]

Zugseitig sorgt das Fahrzeuggerät der LZB für die Verarbeitung der Informationen, die in erster Linie die Grenzgeschwindigkeit, die aktuelle Schleifenlänge und die Erlaubnis für Automatikfahrt beinhalten. Aus diesen Daten ermittelt das Fahrzeuggerät die zulässige Höchstgeschwindigkeit, die am Fahrerstand angezeigt wird. [24] Dem Fahrer ist es nicht möglich, über die von der Strecke auf den Zug signalisierten Geschwindigkeitswerte hinaus zu beschleunigen. [26]

Bei automatischem Fahrbetrieb, der den Regelfall darstellt, werden vom Fahrzeuggerät außerdem die notwendigen Befehle an das Antriebs- und Bremssteuergerät weitergegeben. [01] [48] Der Fahrer übernimmt in diesem Fall nur die Abfertigung des Zuges in den Stationen und die Aufsicht über die Anzeigeräte während der Fahrt. Er kann jedoch jederzeit in die Automatikfahrt eingreifen und den Zug bremsen. [05] [26] Bei der automatischen Bremsung wurde vom ursprünglich in der Wiener U-Bahn installierten LZB-System 503 eine Haltepunktgenauigkeit von $\pm 1,5$ m erreicht. Das aktuell eingesetzte LZB-System 513 ermöglicht eine Zielbremsung mit einer Haltepunktgenauigkeit von $\pm 0,35$ m. [26]

Durch die kontinuierliche Zugbeeinflussung beim LZB-System, das automatische Fahren und das zielgenaue Bremsen der Züge in den Stationen kann die Zugfolgezeit minimiert und die Leistungsfähigkeit der U-Bahn-Linien maximiert werden. [26]

4.4 Die Linie U3

Die Linie U3 quert als zweite Durchmesserlinie neben der U1 das Stadtzentrum Wiens mit einer Station am Stephansplatz. Sie führt von der Endstation Ottakring im Westen bis nach Simmering im Südosten der Stadt. Der Abstand der Stationsmittelpunkte der Endstationen beträgt 13.395 m. [28] Vier von den insgesamt 21 Stationen sind Umsteigestationen zu anderen U-Bahn-Linien,

ebenfalls vier Stationen bieten die Umsteigemöglichkeit zur S-Bahn. Im Bereich der Station Erdberg befindet sich mit dem gleichnamigen Betriebsbahnhof der größte Bahnhof der Wiener U-Bahn mit vielen zentralen Revisionseinrichtungen. Die Linie U2 ist von der Station Stadion durch ein Betriebsgleis direkt mit dem Bahnhof Erdberg verbunden. Am Areal dieses Betriebsbahnhofes wurde im Jahr 2005 die neue zentrale Leitstelle des Wiener U-Bahn-Netzes in Betrieb genommen. [01] [56]

Mit dem Bau der Linie U3 wurde 1984 im Bereich der Landstraßer Brücke begonnen. [05] Am 06.04.1991 wurde das erste Teilstück der Linie U3 zwischen den Stationen Volkstheater und Erdberg als zum damaligen Zeitpunkt fünfte U-Bahn-Linie Wiens eröffnet. [03] Die weiteren Abschnitte wurden – wie in der Abb. 4.06 dargestellt – sukzessive eröffnet. Das letzte Teilstück wurde am 02.12.2000 in Betrieb genommen. [03]

Während die Innenstadtquerung aufgrund der Bebauungsdichte in geschlossener Bauweise durchgeführt wurde, konnte im Abschnitt zwischen Landstraße und Erdberg sowie im Bereich der Mariahilfer Straße (Stationen Neubaugasse bis Westbahnhof) größtenteils eine offene Bauweise angewendet werden. Als Besonderheit im Wiener U-Bahn-Netz gelten die Bereiche um die Stationen Stephansplatz und Stubentor und um die Stationen Neubaugasse und Zieglergasse, wo die beiden Streckenröhren übereinander geführt werden und somit die beiden Bahnsteige jeweils in unterschiedlichen Geschoßen liegen. Man spricht in diesem Zusammenhang von einer „Doppelstocklage“ der Stationsröhren. [05]

Abgesehen von den Stationen in Doppelstocklage und der Station Gasometer sowie der Endstation Ottakring besitzen alle Stationen einen Mittelbahnsteig. (siehe Abb. 4.06) Die Längen der Bahnsteige liegen bei den im Netz der Wiener U-Bahn üblichen 115 m. Die Endstation Ottakring sowie die daran anschließende Wendeanlage befinden sich in Hochlage. Im Bereich der Station Erdberg verläuft die Trasse in Niveaulage. In allen übrigen Bereichen befinden sich die Gleisanlagen der U3 im Untergrund. (siehe Abb. 4.06)

Durchschnittlich beträgt der Stationsabstand auf der Linie U3 ca. 670 m, was unter dem durchschnittlichen Stationsabstand des Gesamtnetzes liegt. Der kürzeste Streckenabschnitt zwischen zwei Stationen befindet sich zwischen den Stationen Stubentor und Landstraße und beträgt ca. 503 m. Darüber hinaus ist dieser Streckenabschnitt der tiefste der Linie U3. Gleis 2 liegt hier ca. 11,6 m unter dem Niveau an der Endstation Simmering, welche ca. 71 m tiefer liegt als die Endstation in Ottakring. [28] Somit ergibt sich unter Berücksichtigung des zuvor angeführten Abstandes der Endstationen eine durchschnittliche Steigung von 5,3 ‰ in Richtung Ottakring. Die

maximale Längsneigung der Tourengleise der Linie U3 liegt bei 40 ‰, was dem festgelegten Grenzwert in der Trassierungsvorschrift der Wiener U-Bahn entspricht. [13] [24] [28]

In der Abb. 4.04 sind die prinzipiellen Anlageverhältnisse der Linie U3 dargestellt, ohne die Trassierungselemente in Auf- und Grundriss zu berücksichtigen. Trotzdem lässt sich daraus schon erkennen, dass aufgrund der abwechselnden Bereiche von Stationen mit Mittelbahnsteig und Stationen in Doppelstocklage die Trassierung von Gleis 1 und Gleis 2 entscheidende Unterschiede aufweisen muss, sodass die beiden Gleise jedenfalls getrennt zu untersuchen sind.

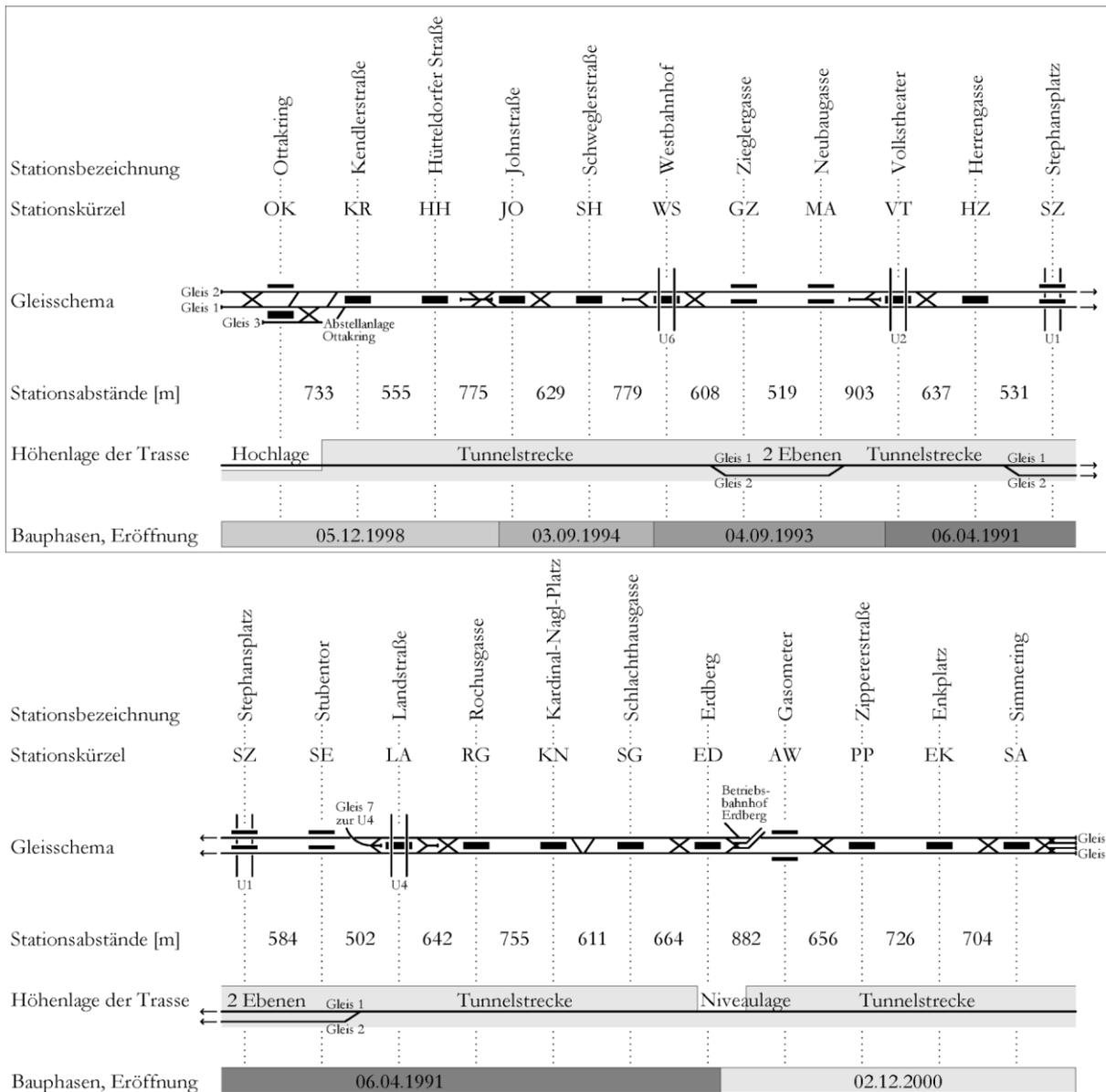


Abbildung 4.04: Anlageverhältnisse und Stationen der Linie U3

Die tatsächliche Grundrisstrassierung der Tourengleise der Linie U3 ist im Anhang B in Form eines Übersichtsplans im Maßstab 1 : 10.000 dargestellt.

Die in der Abb. 4.04 ersichtlichen Verbindungsgleise, Abstellgleise und Überleitstellen führen dazu, dass auf den Tourengleisen zahlreiche Weichen eingebaut sind. Das Stammgleis der Weichen ist immer entlang des Tourengleises angeordnet, damit es für regulär verkehrende Züge keine Geschwindigkeitsbeschränkungen aufgrund der Weichen gibt. In der Trassierungsvorschrift wird für im Fall eines Gleiswechselbetriebs mit Fahrgästen befahrenen Gleisverbindungen eine Entwurfsgeschwindigkeit von mindestens 40 km/h gefordert. Somit muss der Zweiggleisradius der Weiche einer derartigen Gleisverbindung mindestens 190 m betragen, um den Grenzwert der zulässigen Fehlüberhöhung einhalten zu können. [13]

Im Sinne der in Kapitel 2.3 beschriebenen Problematik, wonach Weichen Zwangspunkte für die Überhöhung darstellen, ist es nötig, die exakte Lage der Weichen zu kennen. Die exakte Stationierung der Weichenspitzen ist in den Trassierungsdateien der Linie U3 enthalten. Aus den Koordinaten und Stationierungsdaten lässt sich in einigen Fällen geometrisch ableiten, dass die eingebauten Weichen vom Typ EW 190 – 1:9 sind. [28] Auch für die Gleisverbindungen zwischen den Stationen Kardinal-Nagl-Platz und Schlachthausgasse kamen Weichen des Typs EW 190 – 1:9 zum Einsatz. [23] Diese Weichen besitzen eine Länge von 27,138 m im geradlinig verlaufenden Stammgleis. [14] Das Zweiggleis ist mit einem Radius von 190 m gekrümmt, was unter Einhaltung des maximal zulässigen Überhöhungsfehlbetrages zu einer notwendigen Geschwindigkeitsbeschränkung im Zweiggleis von 40 km/h führt. Diese Zweiggleise werden aber im regulären Betrieb nicht befahren.

Zwischen den Stationen Kendlerstraße und Ottakring gibt es eine Gleisverbindung, die es einem Zug erlaubt, vom Gleis 2 auf das Gleis 1 und in weiterer Folge auf das Gleis 3 zu wechseln. Die dafür eingesetzten Weichen sind vom Typ EW 500 – 1:12 mit einem Zweiggleisradius von 500 m. Dadurch ist es möglich, dass die Abzweigung mit einer Geschwindigkeit von 60 km/h befahren werden kann.

4.5 Fahrzeuge

Aufgrund der baulichen Unterschiede zwischen der Linie U6, die größtenteils entlang einer adaptierten, ehemaligen Stadtbahnstrecke verläuft, und dem restlichen Netz der Wiener U-Bahn entstanden zwei verschiedene, nicht miteinander kompatible Bahnsysteme. In diesen beiden Teilbereichen des Wiener U-Bahn-Netzes kommen daher auch unterschiedliche Wagentypen zum Einsatz.

4.5.1 Fahrzeuge der Linien U1 – U4

Die Fahrzeuge der Linien U1, U2, U3 und U4 wurden eigens für das Wiener U-Bahn-Netz neu konzipiert. Um der technischen Weiterentwicklung und den Ansprüchen der Fahrgäste gerecht zu werden, wurden im Lauf der Zeit neue Modellgenerationen der U-Bahn-Züge in Betrieb genommen. Es sind jedoch derzeit immer noch einige Fahrzeuge der ersten Generation im Einsatz.

Alle Bautypen besitzen eine durchgehende, auf die Bahnsteighöhe von 95 cm über Schienenoberkante abgestimmte Fußbodenhöhe. [29] Charakteristisch ist außerdem die Stromzufuhr über eine seitlich angebrachte Stromschiene mit 750 V Gleichstrom. [05]

Die Maximalgeschwindigkeit von 80 km/h wird von allen Fahrzeugen der unterschiedlichen Modellgenerationen erreicht.

4.5.1.1 Type U

Der Auftrag zum Bau der ersten Züge für das Wiener U-Bahn-Netz wurde 1969 an SGP (Simmering-Graz-Pauker) vergeben. [03] Für die elektrische Ausrüstung der Züge war das Konsortium ELIN/BBC/AEG/Siemens verantwortlich. [05] Am 18.08.1973 wurde der erste der als „Silberpfeil“ bezeichneten Doppeltriebwagen per Kran in die Tunnelröhren der zu dieser Zeit noch in Bau befindlichen U-Bahn-Linie U1 abgesenkt, um Testfahrten durchzuführen. [03] In der Folge wurden bis zum Jahr 1982 insgesamt 136 Doppeltriebwagen beschafft, die auf den Linien U1 bis U4 eingesetzt werden können. [05] Diese wurden in Form von Vier- und Sechswagenzügen zusammengestellt, wobei heute auf den Linien U1-U4 der Wiener U-Bahn ausschließlich Sechswagenzüge verkehren. 74 Doppeltriebwagen dieses Typs wurden in den Jahren 2000 bis 2010 technisch umgerüstet und in der Folge als Type U₂ bezeichnet. [56] Manche Triebwagen der Type U wurden in den letzten Jahren bereits ausgemustert, einige Wagen dieses Typs sind aber nach wie vor im Wiener U-Bahn-Netz im Einsatz.

4.5.1.1.1 Technische Daten

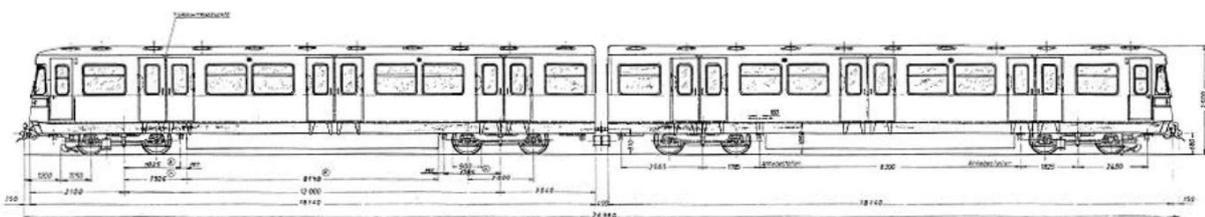


Abbildung 4.05: Aufrißdarstellung eines Doppeltriebwagens der Type U, U₁₁ bzw. U₂

Ein Halbwagen des in Abb. 4.05 dargestellten Doppeltriebwagens der Type U ruht auf zwei Drehgestellen mit je zwei starren Radsätzen. [11] Jedes Drehgestell verfügt über einen Gleichstrommotor mit je 200 kW Leistung, was eine Gesamtleistung von 2.400 kW für einen Sechswagenzug ergibt. [01] [56]

Die Betriebsbremsen eines Doppeltriebwagens der Type U sind eine elektronische Widerstandsbremse und eine elektropneumatisch bediente Druckluftbremse, die auf die Bremsscheiben aller Achsen wirkt. Als Sicherheitsbremse ist eine indirekte Druckluftbremse eingebaut, die ebenfalls auf alle Achsen wirkt. Zusätzlich gibt es eine Achse je Drehgestell, die mit einer Abstellbremse in Form einer Federspeicherbremse versehen ist. [22] [37]

Ein Doppeltriebwagen hat eine Breite von 2,8 m und eine Länge von 36,8 m. [01] Für einen Sechswagenzug ergibt sich somit eine Länge von 110,4 m. Der Drehzapfenabstand zwischen den Drehgestellen beträgt 12,0 m, der Abstand der Radsätze im Drehgestell liegt bei 2,1 m. Der für Überlegungen hinsichtlich der Trassierung relevante Abstand von der ersten bis zur letzten Achse eines Sechswagenzuges wurde grafisch aus der Abb. 4.05 mit ca. 106,1 m bestimmt.

Das Leergewicht eines Doppeltriebwagens beträgt 53,6 t bzw. 160,8 t für einen Langzug. [01] Dieser bietet unter der Annahme von 4 Stehplätzen je m² der dafür vorgesehenen Fläche 840 Personen Platz. [24] Somit ergibt sich unter der Annahme eines Durchschnittsgewichts von 80 kg pro Person ein maximales Gesamtgewicht von ca. 228 t.

4.5.1.2 Type U₁₁/U₁

Um den Mehrbedarf an Fahrzeugen zu decken, der durch die Realisierung der zweiten Ausbauphase des U-Bahn-Netzes entstand, wurde die Beschaffung zusätzlicher Triebwagen erforderlich. Aufgrund der großen Zufriedenheit mit dem Vorgängermodell wurde das grundsätzliche Konzept beibehalten und auch optisch nahezu nichts verändert. Allerdings wurden die Antriebs- und Bremstechnik sowie das Fahrwerk weiterentwickelt. [01] Anfänglich wurden neun Prototypzüge mit teilweise unterschiedlichen Drehgestellen gebaut, die als Type U₁ bezeichnet wurden. Da man Verwechslungen mit der Linienbezeichnung U1 befürchtete, wurde bei der anschließenden Bestellung der Serienfahrzeuge, die bis zum Jahr 1997 gebaut wurden, die Typenbezeichnung U₁₁ verwendet. [05] [56] Im Vergleich zu den Vorgängerwagen wurden außerdem Verbesserungen des Lüftungs- und Heizungssystems durchgeführt. [05]

4.5.1.2.1 Technische Daten

Aufgrund der Erfahrungen mit den Fahrzeugen der ersten Generation in engen Gleisbögen wurden anstelle der Drehgestelle mit starren Radsätzen Kreuzanker-Drehgestelle mit radial ein-

stellbaren Radsätzen verwendet. [01] Die in der Vorgängerreihe eingebauten Gleichstrommotoren wurden durch wassergekühlte Einzelachsmotoren in Drehstromtechnik mit einer Leistung von 125 kW je Achse ersetzt, was einer Gesamtleistung von 3.000 kW in einem Sechswagenzug entspricht. [01] Durch die installierte elektrische Ausrüstung sind die elektrischen Bremsen der Fahrzeuge rekuperationsfähig. Das bedeutet, dass durch die Rückspeisung der Bremsenergie in die Stromschiene bis zu 30 % der Traktionsenergie eingespart werden können. [01] [22] [56] Auch die Wagen der Type U₂ und V sind mit dieser energiesparenden Technik ausgerüstet. [39] Die übrigen Bremssysteme entsprechen jenen der Fahrzeuge der Type U. [37]

Bei gleicher Breite haben die Wagen der Type U₁₁ eine um 18 cm größere Länge von nunmehr 36,98 m pro Doppeltriebwagen. Der Drehzapfenabstand ist unverändert bei 12,0 m, der Radstand im Drehgestell beträgt 2,0 m. Der trassierungstechnisch relevante Abstand von der ersten bis zur letzten Achse eines Langzuges wurde unter Berücksichtigung des für den Wagentyp U ermittelten Wertes auf ca. 106,5 m geschätzt.

Das Leergewicht eines Doppeltriebwagens ist gegenüber dem Vorgängermodell auf 56 t bzw. 168 t für einen Langzug gestiegen. Das Fassungsvermögen von 840 Personen ist gleich geblieben. Das maximale Gesamtgewicht liegt somit bei 235,2 t. [01] [56]

4.5.1.3 Type U₂

In den Jahren 2000 bis 2010 wurden Wagen der Type U im Hinblick auf die Antriebstechnik und die Bordelektronik modernisiert. Die geometrischen Abmessungen des Zuges und der Drehgestelle blieben gleich, auch die starren Radsätzen im Drehgestell wurden beibehalten. [11] [56]

4.5.1.3.1 Technische Daten

Die eingebauten Gleichstrommotoren wurden durch Drehstrommotoren mit einer der Wagentype U₁₁ entsprechenden Antriebsleistung von 1.000 kW pro Doppeltriebwagen ersetzt. [31]

Bei gleichbleibenden geometrischen Abmessungen und gleichbleibendem Fassungsvermögen wurde das Fahrzeuggewicht eines Doppeltriebwagens durch die Umbaumaßnahmen auf 56,2 t erhöht. [55]

4.5.1.4 Type V/v

Schon im Jahr 1996 gab es eine Ausschreibung mit dem Ziel, einen neuartigen Wagentyp für das Wiener U-Bahn-Netz zu entwickeln. [01] Der erste Prototyp dieses sogenannten V-Wagens wurde im Jahr 2001 in Betrieb genommen und getestet, die weiteren Züge dieses Typs wurden ab dem Jahr 2005 geliefert. [38]

Der V-Wagen ist eine völlige Neuentwicklung. Im Gegensatz zu den Vorgängermodellen, die als unabhängige Doppeltriebwagen konzipiert waren, handelt es sich hierbei um einen sechsteiligen Zug aus vier Triebwagen des Typs V und zwei Steuerwagen des Typs v, die an den Zugenden angeordnet sind. Die sechs Wagen eines Zuges bilden durch die freien Übergänge zwischen den Wagen einen komplett durchgängigen Fahrgastraum, der klimatisiert ist. [01] [05] Wie bei den Vorgängermodellen verfügt jeder Wagen über drei Fahrgasttüren auf jeder Seite und ist auf zwei Drehgestellen gelagert, die mit lenkbaren Radsätzen ausgestattet sind. [01] [11]

4.5.1.4.1 Technische Daten

Die beiden Steuerwagen eines V-Wagen-Zugs sind nicht angetrieben. Die vier in der Mitte des Zuges angeordneten Motorwagen verfügen je Drehgestell über zwei wassergekühlte Drehstromasynchronmotoren mit einer Leistung von je 160 kW. [38] Somit ergibt sich die Gesamtantriebsleistung eines Zuges zu 2.560 kW.

Die Fahrzeugbreite beträgt 2,85 m, die Länge eines Steuerwagens beträgt 19,11 m, die Länge eines Triebwagens liegt bei 18,25 m. Somit ergibt sich für einen Sechswagenzug eine Gesamtlänge von 111,22 m. Der Drehzapfenabstand der Drehgestelle beträgt 12,185 m beim Steuerwagen und 12,0 m bei den Motorwagen. Der Abstand zwischen dem ersten und dem letzten Radsatz eines Zuges gemäß Abb. 4.06 beträgt 105,62 m. [38]

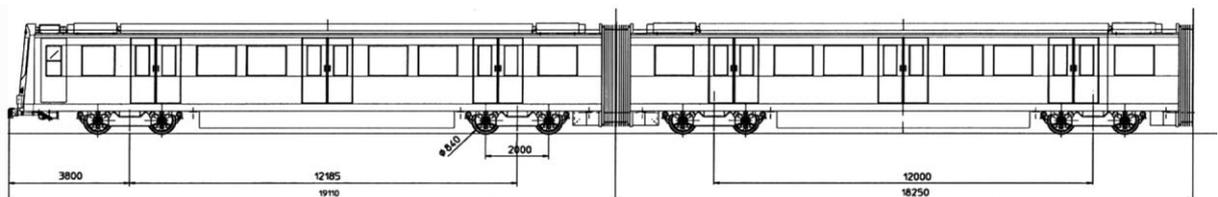


Abbildung 4.06: Aufrissdarstellung eines Steuer- und eines Motorwagens der Type V/v

Ein Sechswagenzug bietet 260 Sitzplätze und unter der Annahme einer Dichte von 6 Personen/m² ein rechnerisches Fassungsvermögen von insgesamt 1.187 Personen pro Zug. [38] Umgerechnet auf jene 4 Personen/m², die dem Fassungsvermögen eines U-Wagen-Zuges zugrunde liegen, ergibt das ein gesamtes Fassungsvermögen von 878 Personen pro Zug. Das Leergewicht eines Zuges beträgt 162,6 t, das rechnerische Gesamtgewicht unter der Annahme von 80 kg pro Person liegt daher bei ca. 232,8 t. Aufgrund der fehlenden Antriebe sind die Steuerwagen etwas leichter als die Motorwagen, womit das für die Anfahrzugkraft relevante Reibgewicht eines ganzen Zuges einen Wert von ca. 70 % des Gesamtgewichts hat. [11]

4.5.1.5 Übersicht der technischen Daten

Tabelle 4.01: Zusammenstellung der technischen Kenndaten der Fahrzeuge der Linien U1-U4

Type	U	U ₁ /U ₁₁	U ₂	V/v
Hersteller	SGP	SGP	SGP	Siemens
Baujahr	1972-1982	U ₁ 1986 U ₁₁ : 1989-1997	Umbau 2000-2010	Prototyp: 2000 Serie ab 2006
Anzahl der Einzelwagen im Betrieb (Stand Jan. 2014)	58	234	148	288
Einsatzbereich (Linien)	U1,U4	U1,U2,U3,U4	U2,U3	U1,U2,U3,U4
Wagenbreite	2,80 m	2,80 m	2,80 m	2,85 m ⁽²⁾
Gesamtlänge eines Sechswagenzuges	110,40 m	110,94 m	110,40 m	111,22 m
Abstand zwischen der ersten und der letzten Achse	ca. 106,1 m ⁽¹⁾	ca. 106,5 m ⁽¹⁾	ca. 106,1 m ⁽¹⁾	105,62 m
Leergewicht eines Zuges	160,8 t ⁽²⁾	168,0 t ⁽²⁾	168,6 t ⁽²⁾	162,6 t ⁽²⁾
Fassungsvermögen (Sitzplätze + Stehplätze, 4 Personen/m ²)	294+546= 840 Plätze	294+546= 840 Plätze	294+546= 840 Plätze	260+618= 878 Plätze ⁽²⁾
Maximalgewicht	228,0 t ⁽³⁾	235,2 t ⁽³⁾	235,8 t ⁽³⁾	232,8 t ⁽³⁾
Antriebsart	Gleichstrom: 1 Motor je Drehgestell à 200 kW	Drehstrom: 1 Motor je Achse à 125 kW	Drehstrom: 1 Motor je Achse à 125 kW ⁽²⁾	Drehstrom: 1 Motor je Achse der 4 Motorwagen à 160 kW
Gesamtantriebsleistung eines Zuges	2.400 kW	3.000 kW	3.000 kW ⁽²⁾	2.560 kW
Anteil des Reibgewichts am Gesamtgewicht	100 %	100 %	100 %	ca. 70 % ⁽⁴⁾
<p>⁽¹⁾ Werte wurden grafisch aus einer Aufrissdarstellung des Zuges ermittelt. ⁽²⁾ Für diese Daten werden in der verwendeten Literatur unterschiedliche Werte angegeben. ⁽³⁾ Werte wurden unter Annahme eines Durchschnittsgewichts von 80 kg pro Person berechnet. ⁽⁴⁾ Leergewicht 2 Steuerwagen: 47 t, Leergewicht 4 Motorwagen: 115,6 t (entspricht 71,1 %)</p>				

4.5.2 Fahrzeuge der Linie U6

Die Linie U6 unterscheidet sich in erster Linie durch das Lichtraumprofil, die Bahnsteighöhen und die Stromzufuhr über eine Oberleitung von den restlichen Linien des Wiener U-Bahn-Netzes. [05] Die zum Einsatz kommenden Fahrzeuge des Typs T bzw. T₁ sind auf diese Besonderheiten abgestimmt und werden daher ausschließlich auf der Linie U6 verwendet.

Derzeit sind die Wiener Linien im Besitz von 78 T-Wagen, die in den Jahren 1992-2000 hergestellt wurden, und 46 T₁-Wagen, die in den Jahren 2006-2009 produziert wurden. [50] [55] Es handelt sich dabei um 2,65 m breite und ca. 27 m lange Niederflurwagen mit 2 Gelenken [55], die von der Firma Bombardier (Typ T) bzw. vom Herstellerkonsortium Bombardier Vossloh Kiepe (Typ T₁) gebaut wurden. [50] Im Regelbetrieb werden jeweils vier Wagen gekoppelt [55], somit stehen maximal 31 Züge für den Betrieb auf der U6 zur Verfügung. [33]

Das Fassungsvermögen eines Zuges liegt bei 232 Sitzplätzen und 544 Stehplätzen, die Höchstgeschwindigkeit beträgt 80 km/h. [33] [50] Die Antriebsleistung beträgt 4 x 100 kW für einen Gelenkswagen des Typs T und 4 x 110 kW für einen Wagen des Typs T₁. [55]

Die Wagen des Vorgängertyps E6/c6 wurden am 23.12.2008 das letzte Mal eingesetzt. [55]

4.6 Gleismessung

Die Gleismessung dient dazu, Parameter zu erfassen, die den Ist-Zustand des Gleises beschreiben. Dabei können geometrische Größen gemessen werden, die die Lage des Gleises bzw. die Lage der Schienen beschreiben, aber auch solche, die den Verschleiß am Schienenkopf charakterisieren. Die Kenntnis dieser Informationen ist notwendig, um die Instandhaltung der Gleisanlagen planen zu können.

Während früher die Messungen ausschließlich händisch und somit punktuell durchgeführt wurden, sind heute in erster Linie Gleismesswagen in Verwendung, die bei relativ hohen Fahrgeschwindigkeiten die Messparameter kontinuierlich in Form von Gleismessschriften erfassen können. Die Messung selbst erfolgt je nach Messgröße entweder durch eine berührende Abtastung oder durch eine kontaktlose Messung mit optischen Verfahren. Auch Ultraschall- und Wirbelstromprüfsysteme können zur Prüfung von Schienenfehlern zum Einsatz kommen. [04] [20]

Essentiell ist die Verortung der gemessenen Daten, was auf der freien Strecke durch GPS-Messungen unterstützt werden kann. Bei Tunnelstrecken ist man entweder darauf angewiesen, Festpunkte als Referenz zu verwenden, oder man verwendet ein krümmungsbasiertes Verfahren

zur Verortung. Die für diese Arbeit verwendeten Messdaten wurden mit dem System CUBAL verortet. Dabei wird das vom Messwagen aufgezeichnete Krümmungsbild mit der Krümmungscharakteristik des Schienennetzes verglichen, die in Form der Solldaten der Gleistrassierung als Datenfile vorliegt. Durch diesen Vergleich kann die gemessene Strecke im Netz zugeordnet und somit verortet werden. [45]

4.6.1 Der Gleismesswagen der Wiener U-Bahn

Der Gleismesswagen der Wiener U-Bahn wurde im Jahr 2003 angeschafft und ist seit Anfang 2004 im Einsatz. [01] Es handelt sich um ein Zweirichtungsfahrzeug mit Führerständen, einem Motorraum und einem Messraum. Die Typenbezeichnung ist UGM₁, die Wagennummer ist 6942.

Die am Fahrzeug eingebaute Messeinrichtung ist das System „Laserail“, bei dem mehrere Kamera-Laser-Einheiten auf einem Messbalken an der Fahrzeugunterseite befestigt sind und das Schienenprofil vermessen. [56]

Folgende Parameter können mit Hilfe des Gleismesswagens der Wiener Linien erfasst werden:

- Seitenverschleiß links und rechts, Höhenverschleiß links und rechts, Höhen-/Seitenverschleiß links und rechts, Schienenflankenradius Fahrkante links und rechts
- Spurweite, Schienenneigung links und rechts
- Krümmung, horizontale Pfeilhöhenabweichung links und rechts (10 m Sehne),
- Überhöhung, Verwindung (2,5 m Sehne, 3,5 m Sehne, 5 m Sehne), vertikale Pfeilhöhe links und rechts (10 m Sehne) [32]

4.6.2 Daten der Gleismessungen

Um Auswertungen der Daten aus den Gleismessungen vornehmen zu können, werden diese auf einem Server abgespeichert, zu dem berechtigte Nutzer Zugang haben. Dieser Server wurde ursprünglich mit dem Projekt „TrackOptimizer“ im Jahr 2005 ins Leben gerufen. Die Idee dahinter war es, das Instandhaltungsmanagement für die Gleisanlagen der Wiener Linien standardisiert auf der Basis der aktuellen Messdaten sowie der Beobachtung von Trends zu organisieren. [30] Auch wenn die Software für dieses Projekt nicht im vorgesehenen Umfang realisiert wurde, so wird der Server nach wie vor dazu verwendet, die Gleismessdaten zu dokumentieren.

Durch eine in Zusammenarbeit mit dem AIT (Austrian Institute of Technology) entwickelte Software namens „mmecat“ können diese Daten grafisch ausgewertet werden. Dabei ermögli-

chen Filter die Eliminierung von unerwünschten Schwingungen, die den für die Betrachtungen relevanten Anteil des Messsignals überlagern. Der angezeigte Datenbereich kann beliebig begrenzt und skaliert werden, die Messkurven selbst können in Abhängigkeit von Zeit, Weg oder Geschwindigkeit dargestellt werden.

Zur Verortung der Messdaten verwendet die Software ein Datenfile je Gleis, das den planmäßigen Trassierungsverlauf und die Stationierung der Haltestellen beinhaltet. Diese Dateien für die beiden Tourengleise der Linie U3 stellen die Basis für die in dieser Arbeit dargestellten Übersichtsgrundrisse der Linie U3 sowie für die Berechnungen zur Ermittlung der Sollüberhöhung dar. Ein Ausschnitt des Datenfiles der Solltrassierung von Gleis 1 ist im Anhang C abgedruckt und erläutert.

Die für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Daten des Gleismesswagens stammen für das Gleis 1 der Linie U3 von einer Fahrt am 04.05.2012 und für das Gleis 2 von einer Befahrung am 27.01.2012.

Neben den beschriebenen Daten zur Geometrie des Gleises, die mit dem Gleismesswagen der Wiener Linien erfasst wurden, stehen außerdem Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsmessdaten zur Verfügung, die in einem nahezu leeren U-Bahn-Zug vom Typ V, der als Sonderzug zu den regulären Betriebszeiten der U-Bahn geführt wurde, aufgezeichnet wurden.

Die für die Auswertungen herangezogene Messfahrt auf Gleis 1 der Linie U3 wurde am 03.11.2010 durchgeführt, die Messfahrt auf Gleis 2 der Linie U3 erfolgte am 11.07.2013. Dabei wurden unter anderem die auftretenden Beschleunigungen durch am Wagenboden angebrachte Sensoren gemessen. Davon unabhängig wurde die Fahrgeschwindigkeit aufgezeichnet, indem auf das fahrzeugeigene Geschwindigkeitssignal zugegriffen wurde. Für diese Messungen wurde das Messsystem MEDA der Firma Wölfel eingesetzt. [42] Aus den Daten lässt sich das Geschwindigkeitsprofil des Zuges entlang der Tourengleise der U3 erstellen.

5 Auswertung der Gleismessungen

5.1 Methodik

Für die Bewertung des Ist-Zustandes der eingebauten Überhöhung im Verlauf der Gleise der Linie U3 werden Soll-Daten der optimalen Überhöhung mit den Messdaten der tatsächlichen Überhöhung verglichen.

Diese Soll-Daten basieren auf den Soll-Daten des Krümmungsverlaufs der Strecke, der die Trassierung im Grundriss widerspiegelt. Unter Berücksichtigung von realitätsnahen Beschleunigungs- und Bremsverläufen wird ein theoretisches Geschwindigkeitsprofil eines Zuges auf der Strecke rechnerisch modelliert, das stets auf eine Maximalgeschwindigkeit von 80 km/h ausgelegt ist. Für dieses Geschwindigkeitsprofil – das die Geschwindigkeitsunterschiede von Zugspitze und Zugende berücksichtigt – werden ausgehend vom Krümmungsverlauf minimale und maximale Werte für die optimale Überhöhung berechnet.

Durch eine grafische Überlagerung der Soll-Überhöhung mit den Daten der tatsächlich eingebauten Überhöhung aus dem Gleismessschrieb können jene Streckenabschnitte ausfindig gemacht werden, in denen sich die vorhandene Überhöhung nicht im optimalen Bereich befindet. Wenn sich diese Abweichungen der eingebauten Überhöhung von der optimalen Überhöhung nicht durch Besonderheiten der Trassierung begründen lassen, wird angeregt, die vorhandene Überhöhung im Zuge etwaiger Instandsetzungsarbeiten anzupassen.

Die detaillierte Vorgangsweise zur Erstellung der Diagramme mit der Gegenüberstellung von Messergebnissen und Soll-Werten ist in Kapitel 5.5.1 beschrieben.

5.2 Streckendaten

In den im Kapitel 4.6.2 erwähnten und im Anhang C beschriebenen Datenfiles der Tourengleise der U3 sind die Trassierungselemente im Grundriss mit der jeweiligen Elementlänge und den Radien sowie die Stationierung, der Richtungswinkel, die Höhenlage und die Längsneigung der wichtigsten Streckenpunkte (Anfangs- und Endpunkte der Trassierungselemente, Stationsmittelpunkte, Weichenanfangspunkte, Neigungswechsel) enthalten. Aus diesen Informationen wird in Kapitel 5.5 der Krümmungsverlauf für jeden Streckenabschnitt zwischen zwei Stationen ermittelt, der die Basis für den optimalen Überhöhungsverlauf darstellt.

In den folgenden Tabellen 5.01 und 5.02 sind einige Zahlenwerte zusammengefasst, die die Linie U3 charakterisieren. Tabelle 5.01 beinhaltet die Stationierung der Stationsmittelpunkte, die relative Höhenlage dieser Punkte sowie die Längsneigung entlang des Bahnsteigs. Diese Werte wurden aus den Trassierungsfiles zur Linie U3 entnommen.

Tabelle 5.01: Stationierung und Höhenkote der Stationsmittelpunkte sowie Längsneigung entlang des Bahnsteigs, Linie U3, Gleis 1 und 2

LINIE U3 Stationen	GLEIS 1 (OK-SA)			GLEIS 2 (SA-OK)		
	Stationierg. Mittelp.[m]	Höhe Mittelp.[m]	Längsng. [‰] ⁽¹⁾	Stationierg. Mittelp.[m]	Höhe Mittelp.[m]	Längsng. [‰] ⁽¹⁾
OK (Ottakring)	10.887,389	71,000	0,00	10.874,838	71,000	0,00
KR (Kendlerstraße)	11.621,058	70,500	0,00	11.608,157	70,500	0,00
HH (Hütteldorfer Str.)	12.183,550	60,050	0,00	12.156,259	60,050	0,00
JO (Johnstraße)	12.966,000	58,542	-1,40	12.924,298	58,541	1,40
SH (Schweglerstraße)	13.595,000	44,542	-1,40	13.552,934	44,542	1,40
WS (Westbahnhof)	14.359,498	24,850	-1,40	14.346,215	24,850	1,40
GZ (Zieglergasse)	14.968,909	27,950	0,00	14.952,624	21,850	0,00
NB (Neubaugasse)	15.487,582	28,730	-1,40	15.471,300	22,630	1,40
VT (Volkstheater)	16.396,015	8,900	0,00	16.368,389	8,900	0,00
HZ (Herrengasse)	17.026,601	-1,450	0,00	17.011,862	-1,450	0,00
SZ (Stephansplatz)	17.549,409	2,700	0,00	17.550,169	-3,150	0,00
SE (Stubentor)	18.134,818	-6,500	-1,40	18.132,364	-10,304	1,40
LA (Landstraße)	18.636,000	-7,920	1,40	18.635,691	-7,920	-1,40
RG (Rochusgasse)	19.277,005	-0,834	1,40	19.278,850	-0,833	-1,40
KN (Kardinal-Nagl-Pl.)	20.032,158	2,972	-1,40	20.034,396	2,974	1,40
SG (Schlachthausgasse)	20.644,057	-3,592	-1,40	20.644,851	-3,592	1,40
ED (Erdberg)	21.307,557	2,554	1,40	21.308,690	2,554	-1,40
AW (Gasometer)	22.186,000	-6,700	0,00	22.194,035	-6,700	0,00
PP (Zippererstraße)	22.847,597	-2,950	0,00	22.844,825	-2,950	0,00
EK (Enkplatz)	23.601,928	-1,550	0,00	23.542,700	-1,550	0,00
SA (Simmering)	24.305,613	0,050	0,00	24.246,816	0,050	0,00

⁽¹⁾ Die Längsneigung ist vorzeichenrichtig in Bezug auf die jeweilige Fahrtrichtung angegeben.

Tabelle 5.02 beinhaltet Daten zu den Streckenabschnitten zwischen den Stationen, wie zum Beispiel die Distanz zwischen zwei Stationen. Dieser Abstand wurde aus der Stationierung der Haltestellenmittelpunkte in Tab. 5.01 berechnet. Aus dem Abstand und der Differenz der Höhenkoten wurde außerdem die jeweilige durchschnittliche Längsneigung zwischen zwei Haltestellenmittelpunkten ermittelt. Der Mindestradius im jeweiligen Streckenabschnitt wurde aus den Trassierungsdaten ermittelt und ist in der Tab. 5.02 ebenfalls angeführt.

Tabelle 5.02: Stationsabstände, Mindestradien und Durchschnittsneigungen entlang der Tourengleise der Linie U3

LINIE U3 Streckenabschnitt	GLEIS 1 (OK-SA)			GLEIS 2 (SA-OK)		
	Distanz [m]	R _{min} [m]	Ø Ng. [‰] ⁽¹⁾	Distanz [m]	R _{min} [m]	Ø Ng. [‰] ⁽¹⁾
OK-KR (Ottakring – Kendlerstraße)	733,669	760	-0,7	733,319	1.125	0,7
KR-HH (Kendlerstr. – Hütteldorfer Str.)	562,492	303	-18,6	548,102	303	19,1
HH-JO (Hütteldorfer Str. – Johnstraße)	782,450	330	-1,9	768,039	350	2,0
JO-SH (Johnstraße. – Schweglerstraße)	629,000	500	-22,3	628,636	400	22,3
SH-WS (Schweglerstr. – Westbahnhof)	764,498	425	-25,8	793,281	303	24,8
WS-GZ (Westbahnhof – Zieglergasse)	609,411	760	5,1	606,409	760	4,9
GZ-NB (Zieglergasse – Neubaugasse)	518,673	1.000	1,5	518,676	1.000	-1,5
NB-VT (Neubaugasse – Volkstheater)	908,433	303	-21,8	897,089	303	15,3
VT-HZ (Volkstheater – Herrengasse)	630,586	303	-16,4	643,473	303	16,1
HZ-SZ (Herrengasse – Stephansplatz)	522,808	275	7,9	538,307	266	3,2
SZ-SE (Stephansplatz – Stubentor)	585,409	400	-15,7	582,195	500	12,3
SE-LA (Stubentor – Landstraße)	501,182	500	-2,8	503,327	665	-4,7
LA-RG (Landstraße – Rochusgasse)	641,005	300	11,1	643,159	300	-11,0
RG-KN (Rochusg. – Kard.-Nagl-Platz)	755,153	750	5,0	755,546	600	-5,0
KN-SG (Kard.-Nagl-Pl. – Schlachthausg.)	611,899	470	-10,7	610,455	800	10,8
SG-ED (Schlachthausgasse – Erdberg)	663,500	303	9,3	663,839	303	-9,3
ED-AW (Erdberg – Gasometer)	878,443	303	-10,5	885,345	330	10,5
AW-PP (Gasometer – Zippererstraße)	661,597	336	5,7	650,790	336	-5,8
PP-EK (Zippererstraße – Enkplatz)	754,331	303	1,9	697,875	325	-2,0
EK-SA (Enkplatz – Simmering)	703,685	900	2,3	704,116	400	-2,3

⁽¹⁾ Die durchschnittliche Längsneigung ist vorzeichenrichtig in Bezug auf die jeweilige Fahrtrichtung.

5.3 Ermittlung einer realitätsnahen Beschleunigungsfunktion

In der Abb. 2.02 wurde ein theoretisch möglicher Verlauf der Anfahrbeschleunigung in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit dargestellt. Diese idealisierte Funktion verläuft zuerst konstant mit der gewünschten Maximalbeschleunigung bis zum Erreichen jener Geschwindigkeit, ab der die Antriebsleistung des Zuges nicht mehr ausreicht, um die maximale Beschleunigung zu erzielen. Danach stellt sich ein Verlauf gemäß der Leistungshyperbel der Motoren ein, also eine mit steigender Geschwindigkeit abnehmende Beschleunigung.

Dass im Bereich der höheren Geschwindigkeiten die Antriebsleistung des Zuges für den Beschleunigungsverlauf maßgeblich ist, gilt auch für die Züge der Wiener U-Bahn, wie im Folgenden exemplarisch anhand der Kennwerte eines V-Wagens erläutert wird.

Die maximale Anfahrbeschleunigung bei der Wiener U-Bahn ist auf ca. $1,2 \text{ m/s}^2$ begrenzt. Um diese Beschleunigung zu erreichen, ergibt sich unter der Berücksichtigung des Leergewichts eines Sechswagenzugs vom Typ V/v von $162,6 \text{ t}$ gemäß Tab. 4.01 aus der Gleichung (2.04) eine notwendige wirksame Kraft von

$$F = 162,6 \cdot 1,2 = 195,1 \text{ kN.}$$

Im Folgenden wird angenommen, dass diese Kraft unter Vernachlässigung der Widerstandskräfte gemäß Gleichung (2.05) der Leistungszugkraft in (2.07) entspricht. Laut Tab. 4.01 beträgt die gesamte Antriebsleistung eines V-Wagen-Zugs 2.560 kW . Gemäß Gleichung (2.07) lässt sich jene Geschwindigkeit, bei der die Leistungszugkraft exakt jener Zugkraft entspricht, die nötig ist, um die maximal zulässige Beschleunigung zu erreichen, wie folgt ermitteln:

$$V = 3,6 \cdot \frac{2.560}{195,1} = 47,2 \text{ km/h} \quad (5.01)$$

Bis zu dieser Geschwindigkeit ist es einem V-Wagen-Zug theoretisch möglich, die maximale Längsbeschleunigung zu erreichen. Diese Geschwindigkeit befindet sich jedoch deutlich unter der Entwurfsgeschwindigkeit im Wiener U-Bahn-Netz von 80 km/h . Deshalb ist davon auszugehen, dass der reale Beschleunigungsverlauf im Prinzip jenem Verlauf ähnlich ist, der in der Abb. 2.02 dargestellt ist. In der Praxis ist zu erwarten, dass die Grenzggeschwindigkeit für den konstanten Beschleunigungsverlauf eines V-Wagens (abhängig von der Längsneigung der Strecke) eher unter dem in der Gleichung (5.01) ermittelten Wert liegt. Das liegt an den der Zug-

kraft entgegengesetzt wirkenden Widerstandskräften und dem um die Nutzlast erhöhten Gesamtgewicht des Zuges.

5.3.1 Messdaten zur Anfahrbeschleunigung

Um einen typischen Beschleunigungsverlauf vom Stillstand bis zur Höchstgeschwindigkeit zu ermitteln, werden die gemessenen Beschleunigungskurven der Anfahrvorgänge nach dem jeweiligen Stationsaufenthalt überlagert.

Damit der Zug tatsächlich bis zur Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h beschleunigen und auch ein kurzes Stück mit dieser Geschwindigkeit fahren kann, ist ein Stationsabstand von ca. 700 m notwendig. [21] Im Folgenden werden jene Streckenabschnitte untersucht, die einen Stationsabstand gemäß Tab. 5.02 von mehr als 700 m aufweisen. Der Stationsabstand des Streckenabschnitts EK-PP (Enkplatz-Zippererstraße) auf Gleis 2 liegt mit 697,875 m nur marginal unter diesem Grenzwert. Daher wird dieser Bereich ebenfalls bei den folgenden Untersuchungen berücksichtigt. Außerdem wird darauf geachtet, dass die eingebauten Mindestradien in den untersuchten Bereichen ebenfalls auf eine Entwurfsgeschwindigkeit von 80 km/h ausgelegt sind.

In der Tabelle 5.02 sind die Stationsabstände und die auftretenden Mindestradien der Hauptgleise der Linie U3 aufgelistet. Die genannten Kriterien treffen auf jeweils acht Streckenabschnitte entlang der Tourengleise zu. Es handelt sich dabei um die folgenden Bereiche:

OK-KR | HH-JO | SH-WS | NB-VT | RG-KN | ED-AW | PP-EK | EK-SA

In der folgenden Abb. 5.01 ist das Geschwindigkeitsprofil des Zuges entlang der gesamten Strecke des Gleises 1 dargestellt. Die ausgewählten Streckenabschnitte zur Ermittlung des tatsächlichen Beschleunigungsverlaufs sind grau unterlegt. Es handelt sich dabei um jene Streckenabschnitte, in denen es im Geschwindigkeitsverlauf ein Plateau im Bereich der Maximalgeschwindigkeit gibt.

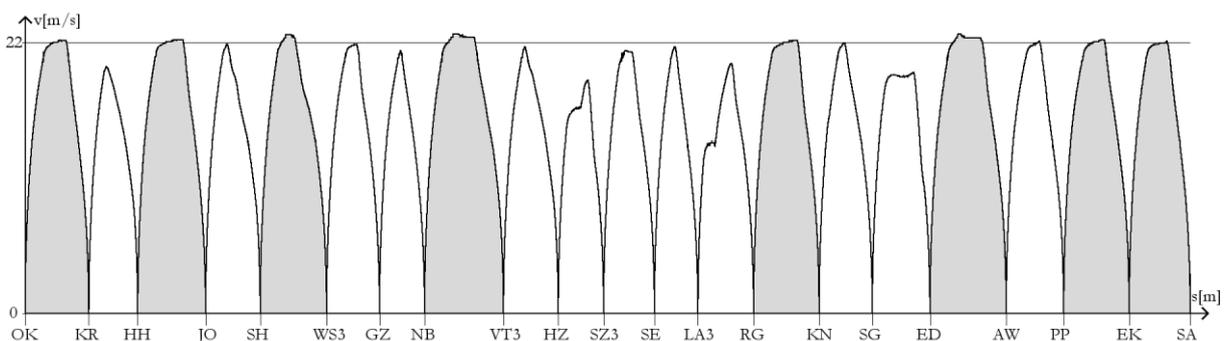


Abbildung 5.01: Geschwindigkeitsprofil für das Gleis 1 der Linie U3, Messfahrt am 03.11.2010 mit einem V-Wagen, grau unterlegte Bereiche wurden für die Ermittlung des idealisierten Beschleunigungsverlaufs herangezogen

Das Geschwindigkeitsprofil einer Fahrt entlang der gesamten Strecke des Gleises 2 der Linie U3 ist in der Abbildung 5.02 dargestellt.

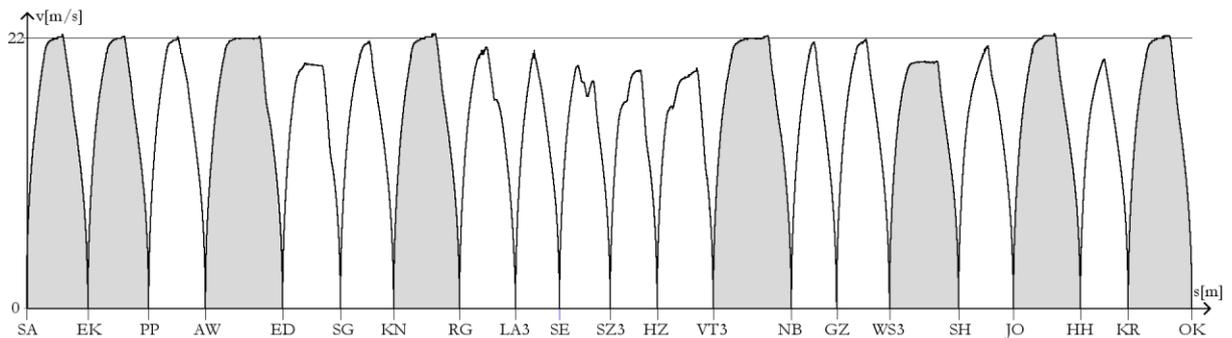


Abbildung 5.02: Geschwindigkeitsprofil für das Gleis 2 der Linie U3, Messfahrt am 11.07.2013 mit einem V-Wagen, grau unterlegte Streckenabschnitte (mit Ausnahme von WS3-SH) wurden für den idealisierten Beschleunigungsverlauf herangezogen

In Abb. 5.02 ist zu erkennen, dass im grau unterlegten Bereich zwischen den Stationen WS3 (Westbahnhof) und SH (Schweglerstraße) die Maximalgeschwindigkeit nicht erreicht wird. Daher wird dieser Streckenabschnitt des Gleises 2 nicht zur Ermittlung des idealisierten Beschleunigungsverlaufs herangezogen.

5.3.2 Kalibrierung der Beschleunigungsdaten

Als erster Schritt in der Auswertung der Messdaten der Längsbeschleunigung erfolgt eine Überprüfung, ob das Messgerät richtig kalibriert ist. Auch könnte beispielsweise eine nicht exakt horizontale Messposition des Beschleunigungssensors dazu führen, dass ein Anteil der Erdbeschleunigung, der proportional zur Neigung des Messgeräts ist, die gemessene Längsbeschleunigung überlagert. Dadurch wird die Messkurve um einen konstanten Wert vergrößert oder verkleinert, also in Ordinateenrichtung versetzt.

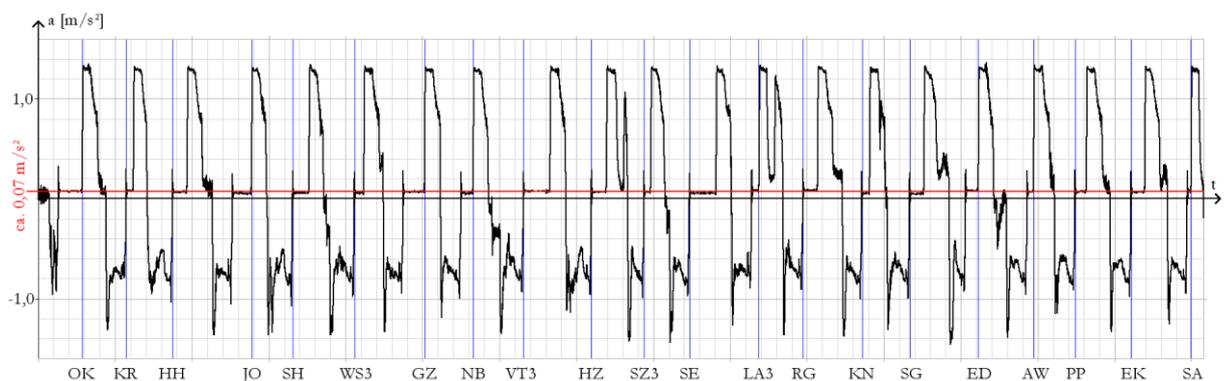


Abbildung 5.03: Beschleunigungsverlauf auf Gleis 1 der Linie U3 in Abhängigkeit von der Zeit, Messfahrt am 03.11.2010 mit einem V-Wagen

Um festzustellen, ob die Messwerte richtig kalibriert sind, wird der Verlauf der Beschleunigung über die Zeit ausgewertet, wie es in Abb. 5.03 für das gesamte Gleis 1 dargestellt ist. Die Haltezeiten in den Stationen führen dazu, dass die reale Längsbeschleunigung bei horizontalen Stationsgleisen für die Zeit des Stationsaufenthalts null sein muss.

Die Messkurve der Beschleunigung in Abb. 5.03 erreicht in Stationen mit horizontaler Gleislage gemäß Tab. 5.01 einen Wert von ca. $0,07 \text{ m/s}^2$. Daher werden die im Folgenden verwendeten Beschleunigungsdaten von Gleis 1 um diesen Betrag verringert.

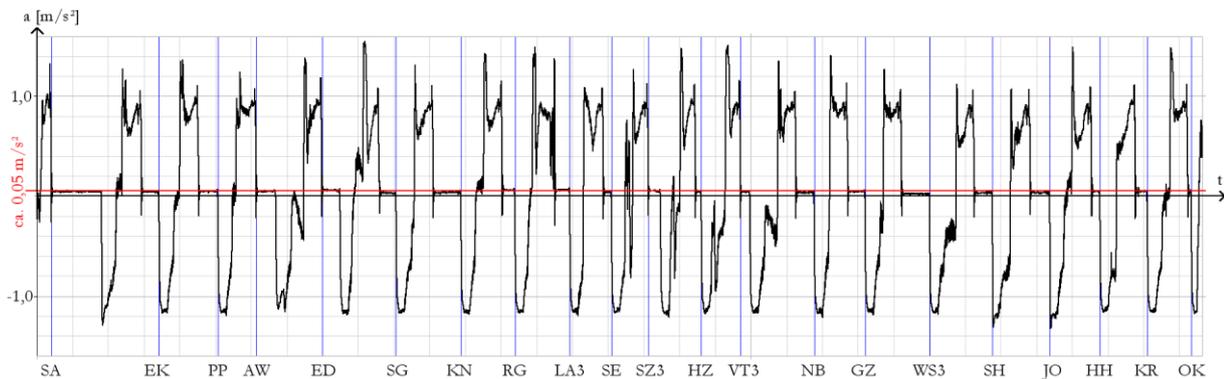


Abbildung 5.04: Beschleunigungsverlauf auf Gleis 2 der Linie U3 in Abhängigkeit von der Zeit, Messfahrt am 11.07.2013 mit einem V-Wagen

Abb. 5.04 zeigt die Darstellung des Beschleunigungsverlaufes in Abhängigkeit von der Zeit für das Gleis 2. Da der Zug an der Endstation Simmering nicht gedreht wird und die Position des Messgerätes nicht verändert wurde, sind die Anfahrbeschleunigungen negativ und die Bremsbeschleunigungen positiv dargestellt. In den Stationen mit horizontaler Gleislage liegt die gemessene Längsbeschleunigung bei ca. $0,05 \text{ m/s}^2$. Um diesen Betrag werden die Messergebnisse für das Gleis 2 im Folgenden verringert. Außerdem werden in den folgenden Darstellungen der Messwerte der Längsbeschleunigung des Gleises 2 diese um die Abszisse gespiegelt, um wie für Gleis 1 die Anfahrbeschleunigungen positiv und die Bremsbeschleunigungen negativ darzustellen.

5.3.3 Modellierung des gemessenen Beschleunigungsverlaufes

Um die Anfahrbeschleunigung eines V-Wagen-Zuges aus den Messwerten modellieren zu können, ist es notwendig, den Einfluss der Längsneigung der Strecke auf den Beschleunigungsverlauf zu berücksichtigen, da dieser möglicherweise auch in den Messdaten enthalten ist. Die tatsächlich erreichte Beschleunigung in Längsrichtung setzt sich gemäß den Gleichungen (2.04) und (2.05) aus einem Anteil zufolge der Motorzugkraft abzüglich einem Anteil zufolge der Widerstandskräfte zusammen. In diesen Widerstandskräften ist der Steigungswiderstand enthal-

Der in Abb. 5.04a abgebildete, vergrößerte und mit einem Tiefpassfilter von 0,2 Hz bearbeitete Ausschnitt aus der Abb. 5.04 zeigt, dass der verwendete Beschleunigungssensor in Bahnsteigen mit Längsneigung einen Beschleunigungswert misst, obwohl sich der Zug im Stillstand befindet. Dieser Wert wirkt in einer Steigung in die Richtung der Anfahrbeschleunigung und im Gefälle entgegen der Anfahrbeschleunigung. Daraus kann man schließen, dass der eingesetzte Beschleunigungssensor Kontaktkräfte misst, die außen am Gehäuse angreifen, wie die „Bremskraft“, die den Zug im Stillstand hält. Feldkräfte wie die Erdbeschleunigung werden hingegen offenbar nicht gemessen. Somit handelt es sich um einen Sensor, der die „spürbaren“ Kräfte misst, also jene Beschleunigungen, die auch von den Fahrgästen wahrgenommen werden. [43] Diese spürbaren Beschleunigungen entsprechen jedoch nicht den tatsächlichen Beschleunigungen im Raum.

Die Konsequenzen daraus sind erstens, dass bei der Modellierung des gemessenen Beschleunigungsverlaufs die jeweilige Längsneigung der Messstrecke nicht berücksichtigt werden muss und zweitens, dass die aus der Längsneigung entstehenden Beschleunigungsanteile bei der Ermittlung des Geschwindigkeitsprofils aus dem Beschleunigungsverlauf zu den Messwerten der Längsbeschleunigung vorzeichenrichtig addiert werden müssen.

5.3.3.1 Gleis 1

Zur Erstellung einer gemittelten Kurve für die Anfahrbeschleunigung wird zunächst ausgehend vom Haltepunkt einer Station die gemessene Längsbeschleunigung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit für die ersten 400 m nach dem Haltepunkt dargestellt. Diese gemessenen Beschleunigungskurven werden für die zuvor ausgewählten Streckenabschnitte von beiden Richtungsgleisen erstellt. Die folgende Abb. 5.05 zeigt die grafische Überlagerung der kalibrierten Messkurven für diese Beschleunigungsabschnitte auf Gleis 1.

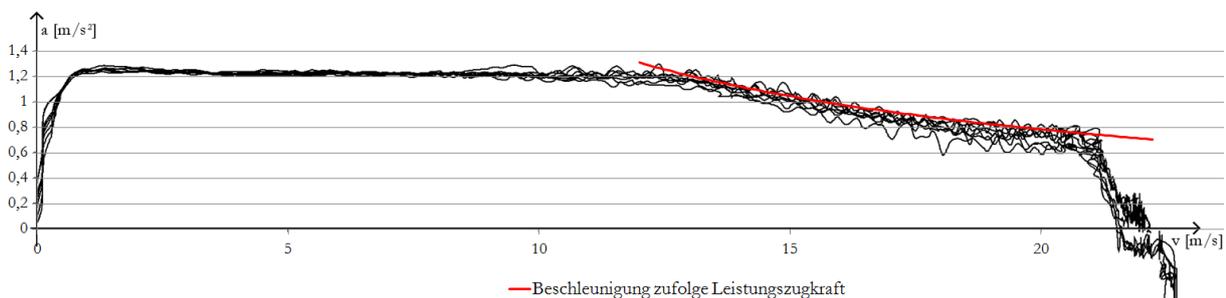


Abbildung 5.05: Vergleich der maximal möglichen Beschleunigung zufolge der Antriebsleistung mit den Messdaten der Beschleunigungskurven in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ausgewählter Streckenabschnitte entlang des Gleises 1 der Linie U3, Messfahrt am 03.11.2010 mit einem V-Wagen

Der in Abb. 5.05 dargestellte, gemessene Beschleunigungsverlauf wird von Schwingungen überlagert, wobei der Großteil der hochfrequenten Schwingungen durch die Anwendung eines Tief-

passfilters mit der Frequenz von 2 Hz in der „mmecat“-Software bereits eliminiert wurde. Die Grundform der Kurve lässt jedoch eindeutig den in der Abb. 2.02 dargestellten theoretischen Beschleunigungsverlauf erkennen. Nach einem raschen Anstieg der Beschleunigung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit verläuft diese über einen größeren Geschwindigkeitsbereich annähernd konstant mit einem Wert von ca. $1,2 \text{ m/s}^2$ und nimmt nach Überschreiten einer bestimmten Geschwindigkeit hyperbelförmig ab.

Der Anstieg der Beschleunigung von null auf den Maximalwert erfolgt bei sehr geringen Geschwindigkeiten, daher wird in diesem Bereich lediglich eine kleine Wegstrecke zurückgelegt. In einem Geschwindigkeits-Weg-Diagramm, welches letztlich zur Ermittlung der einzubauenden Überhöhung herangezogen werden soll, wirkt sich die Größe der Beschleunigung bei sehr kleinen Geschwindigkeiten praktisch nicht aus. Daher wird für die weiteren Überlegungen der tatsächliche Verlauf der Beschleunigung zu Beginn des Anfahrens durch einen konstanten Beschleunigungsverlauf ab einer Geschwindigkeit von 0 m/s ersetzt.

Weiters ist zu erkennen, dass die maximal mögliche Beschleunigung nicht bis zum Erreichen der maximalen Geschwindigkeit wirksam ist, sondern dass ab einer Geschwindigkeit von ca. 1 m/s unter der Höchstgeschwindigkeit die Beschleunigung deutlich gedrosselt wird. Diese Geschwindigkeit ist jedoch höher als die um 10 % verminderte Höchstgeschwindigkeit, die in dieser Arbeit zur Ermittlung der Untergrenze der optimalen Überhöhung herangezogen wird, wie in Kapitel 3.1.2 ausgeführt wurde. Daher wird auch diese Eigenheit der tatsächlichen Beschleunigungskurve für die Modellierung des Beschleunigungsverlaufes nicht berücksichtigt.

In der Abb. 5.05 ist zusätzlich zu den Messwerten eine rote Kurve eingetragen, die den Verlauf der maximal möglichen Anfahrbeschleunigung aufgrund der Antriebsleistung darstellt. Sie wurde ohne Berücksichtigung von Widerstandskräften für einen nahezu leeren Zug des Typs V-Wagen ermittelt. Der Sonderzug zur Durchführung der Messungen ist aufgrund der mitgeführten Personen und der Messausrüstung nur geringfügig schwerer als ein tatsächlich leerer Zug. Das Gewicht eines leeren Zuges von $162,6 \text{ t}$ gemäß Tab. 4.01 wurde um 500 kg auf $163,1 \text{ t}$ erhöht. Die Gesamtantriebsleistung wurde gemäß Tab. 4.01 mit 2.560 kW angesetzt. Unter Berücksichtigung der Gleichungen (2.04), (2.05) und (2.07) entspricht der Verlauf der maximalen Anfahrbeschleunigung somit der folgenden Funktion:

$$a = \frac{P}{v \cdot m} = \frac{2.560}{v \cdot 163,1} \quad (5.04)$$

Es zeigt sich, dass diese Kurve in der Abb. 5.05 etwas über der Mittelkurve der gemessenen Beschleunigungen liegt, was an der Vernachlässigung der Widerstandskräfte liegt.

Die Summe der Widerstandskräfte ist – wie in Kapitel 2.2.1.1 beschrieben – aus einem konstanten, einem zur Geschwindigkeit proportionalen und einem zum Quadrat der Geschwindigkeit proportionalen Anteil zusammengesetzt. Zur Vereinfachung wird im Folgenden lediglich eine konstante Widerstandskraft gewählt, um die theoretische Beschleunigung zufolge der Leistungszugkraft mit den gemessenen Beschleunigungskurven in Übereinstimmung zu bringen.

In der folgenden Abb. 5.06 sind dieselben Messdaten wie in Abb. 5.05 dargestellt. Diesmal wurde jedoch der gesamte gewählte, idealisierte Beschleunigungsverlauf des Messzuges eingetragen, der sich aus einem konstanten Bereich mit einer Beschleunigung von $1,23 \text{ m/s}^2$ und einem hyperbolischen Verlauf zufolge einer Gesamtantriebsleistung von 2.560 kW , eines Gesamtgewichts von $163,1 \text{ t}$ und konstanten Widerständen von 3 ‰ zusammensetzt. Der hyperbolische Teil des Beschleunigungsverlaufs entspricht unter Berücksichtigung der Gleichungen (2.04)-(2.07) der folgenden Funktion:

$$a = \frac{P}{v \cdot m} - \frac{w}{1000} \cdot g = \frac{2.560}{v \cdot 163,1} - \frac{3 \cdot 9,81}{1000} \quad (5.05)$$

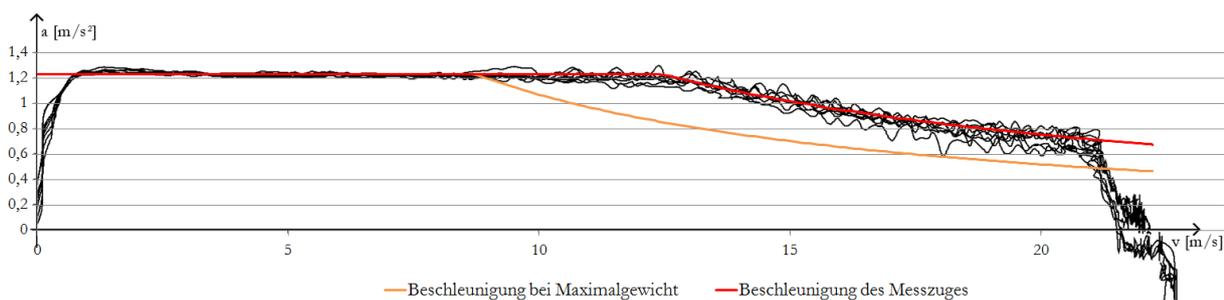


Abbildung 5.06: Überlagerung der Messdaten der Beschleunigungskurven ausgewählter Streckenabschnitte entlang des Gleises 1 der Linie U3 von einer Messfahrt am 03.11.2010 mit einem V-Wagen mit dem idealisierten Beschleunigungsverlauf des Messzuges sowie eines vollbesetzten V-Wagen-Zuges

Zusätzlich wurde in der Abb. 5.06 der theoretische Beschleunigungsverlauf eines voll besetzten Zuges mit einem Gesamtgewicht von $232,8 \text{ t}$ gemäß Tab. 4.01 eingetragen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden allerdings keine Beschleunigungsmessungen in voll besetzten Zügen durchgeführt, um diesen theoretischen Funktionsverlauf zu bestätigen. Auf die Darstellung des Beschleunigungsverlaufs eines leeren Zuges in der Abb. 5.06 wurde verzichtet, da diese Kurve aufgrund der geringen Gewichtsunterschiede nahezu identisch mit jener des Messzuges ist.

Die in der Abb. 5.06 dargestellten Beschleunigungsfunktionen lassen sich mathematisch folgendermaßen darstellen:

$$a = \min \left[\begin{array}{l} a_{\max} \\ \frac{P}{v \cdot m} - \frac{w \cdot g}{1000} \end{array} \right] \quad (5.06)$$

Durch die in der Abb. 5.06 dargestellten Funktionsverläufe ist ersichtlich, dass das Zugsgewicht einen großen Einfluss auf die maximal mögliche Beschleunigung im Bereich höherer Fahrgeschwindigkeiten hat. Für einen voll besetzten Zug ergeben sich gemäß der Gleichung (5.06) in den höheren Geschwindigkeitsbereichen deutlich geringere Beschleunigungen. Das führt zu einem geänderten Geschwindigkeitsprofil und sollte bei der Wahl der optimalen Überhöhung berücksichtigt werden.

5.3.3.2 Gleis 2

Die im vorherigen Kapitel für das Gleis 1 bestimmte Beschleunigungsfunktion ist in der folgenden Abb. 5.07 gemeinsam mit den kalibrierten Messdaten für das Gleis 2 dargestellt. Dabei wurden dieselben Parameter gewählt wie für die Beschleunigungskurve des Messzuges in Abb. 5.06.

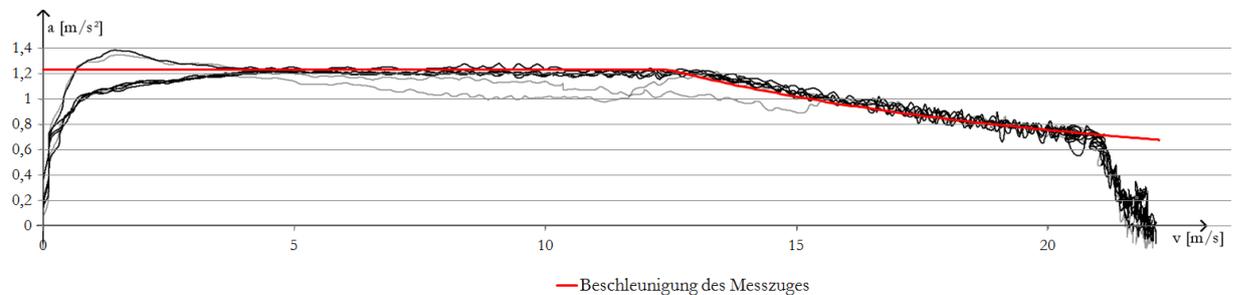


Abbildung 5.07: Überlagerung der Messdaten der Beschleunigungskurven ausgewählter Streckenabschnitte entlang des Gleises 2 der Linie U3 von einer Messfahrt am 11.07.2013 mit einem V-Wagen mit dem idealisierten Beschleunigungsverlauf des Messzuges

Die in Abb. 5.07 vorgenommene Überlagerung der gemessenen Beschleunigungskurven in Abhängigkeit von der Zeit zeigt, dass es unter den untersuchten Streckenabschnitten einzelne Ausreißer vom typischen Beschleunigungsverlauf gibt. Jene beiden Beschleunigungsfunktionen, die im mittleren Geschwindigkeitsbereich unter der maximal möglichen Beschleunigung liegen, sind in den Abb. 5.07 und 5.09 grau eingefärbt. Es handelt sich dabei um die Streckenabschnitte SA-EK und AW-ED. Die Ursache für den abweichenden Beschleunigungsverlauf dieser beiden Messkurven wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit allerdings nicht ermittelt. Auch die im Vergleich zu den Messkurven des Gleises 1 unterschiedlichen Beschleunigungswerte im niedrigen Geschwindigkeitsbereich werden nicht weiter untersucht, da sie keinen nennenswerten Einfluss auf den Geschwindigkeitsverlauf in Abhängigkeit von der Wegstrecke haben. Davon abgesehen deckt sich die idealisierte Beschleunigungsfunktion aber mit den gemessenen Werten.

5.3.4 Modellierung des Geschwindigkeitsverlaufs

5.3.4.1 Gleis 1

Weil aus den am Beginn des Kapitel 5.3.3 ausgeführten Gründen die Messkurve des Beschleunigungsverlaufs um die Beschleunigungen zufolge der Längsneigung der Strecke ergänzt werden muss, wurde der vereinfachte Ansatz gewählt, Durchschnittswerte der Streckenneigungen für die Ermittlung der Geschwindigkeitskurve heranzuziehen.

Die Durchschnittswerte der Bahnsteigeneigung der acht untersuchten Streckenabschnitte auf Gleis 1 beträgt exakt 0,0 ‰. Weil im Bereich der geringeren Fahrgeschwindigkeiten die tatsächliche Längsbeschleunigung des Zuges elektronisch auf einen Maximalwert begrenzt wird, spielt hier die Streckenneigung aber ohnehin keine Rolle.

In jenem Geschwindigkeitsbereich, in dem sich die maximale Beschleunigung zufolge der Antriebsleistung ergibt, ist die Längsneigung der Strecke zu berücksichtigen. Die durchschnittliche mittlere Längsneigung für die untersuchten Streckenbereiche des Gleises 1 kann aus den Daten der Tabelle 5.02 ermittelt werden und beträgt ca. -6,4 ‰. In einem Bereich mit diesem Gefälle müsste also die tatsächliche Beschleunigung des Fahrzeugs um ca. 0,063 m/s² größer sein als die gemessenen Werte.

Somit ergibt sich das Modell der tatsächlichen Beschleunigung des Messzuges in den untersuchten Abschnitten auf Gleis 1 ausgehend von der Gleichung (5.06) wie folgt:

$$a = \min \left[\frac{a_{\max}}{\frac{P}{v \cdot m} - \frac{n + w}{1000} \cdot 9,81} \right] \quad (5.07)$$

Durch das Einsetzen der Zahlenwerte für den idealisierten Geschwindigkeitsverlauf des Gleises 1 ergibt sich aus Gleichung (5.07) die folgende Funktion:

$$a = \min \left[\frac{1,23}{\frac{2,560}{v \cdot 163,1} + \frac{6,3 - 3}{1000} \cdot 9,81} \right] \quad (5.08)$$

Der zugehörige Geschwindigkeitsverlauf in Abhängigkeit von der Wegstrecke wurde im Programm Excel tabellarisch berechnet. Dabei wurde der Untersuchungsbereich in Streckenabschnitte von 1 m Länge unterteilt und in diesen Bereichen die Beschleunigung des Zuges jeweils als konstant angenommen. Ausgehend von der Startgeschwindigkeit von 0 m/s wurde die zugehörige geschwindigkeitsabhängige Beschleunigung mit der Formel (5.08) berechnet. Zur

Ermittlung einer Formel für die Berechnung der Geschwindigkeit am Ende jedes betrachteten Streckenabschnittes wird die Gleichung (2.13) für die gleichförmig beschleunigte Bewegung als Ausgangspunkt herangezogen.

$$v_i = \sqrt{2 \cdot a_i \cdot s_i}$$

$$v_{i+1} = \sqrt{2 \cdot a_i \cdot (s_i + \Delta s_i)} = \sqrt{2 \cdot a_i \cdot s_i + 2 \cdot a_i \cdot \Delta s_i} = \sqrt{v_i^2 + 2 \cdot a_i \cdot \Delta s_i}$$

Demzufolge wird die Geschwindigkeit am Ende des jeweiligen Streckenabschnittes gemäß der folgenden Formel (5.09) berechnet.

$$v_{i+1} = \min \left[\frac{v_{\max}}{\sqrt{v_i^2 + 2 \cdot a_i \cdot \Delta s_i}} \right] \quad (5.09)$$

v_i [m/s]..... Geschwindigkeit am Anfang des betrachteten Streckenabschnittes

a_i [m/s²]..... Beschleunigung am Anfang des Streckenabschnittes

s_i [m]..... Wegstrecke am Anfang des betrachteten Streckenabschnittes

v_{i+1} [m/s]..... Geschwindigkeit am Ende des betrachteten Streckenabschnittes

Δs_i [m]..... Länge des betrachteten Streckenabschnittes

Die Überlagerung der rechnerisch ermittelten Geschwindigkeitskurve mit den Messwerten ist in der Abb. 5.08 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die getroffenen Annahmen zu einem Geschwindigkeitsverlauf führen, der sich gut an die Mittelkurve der Messwerte annähert.

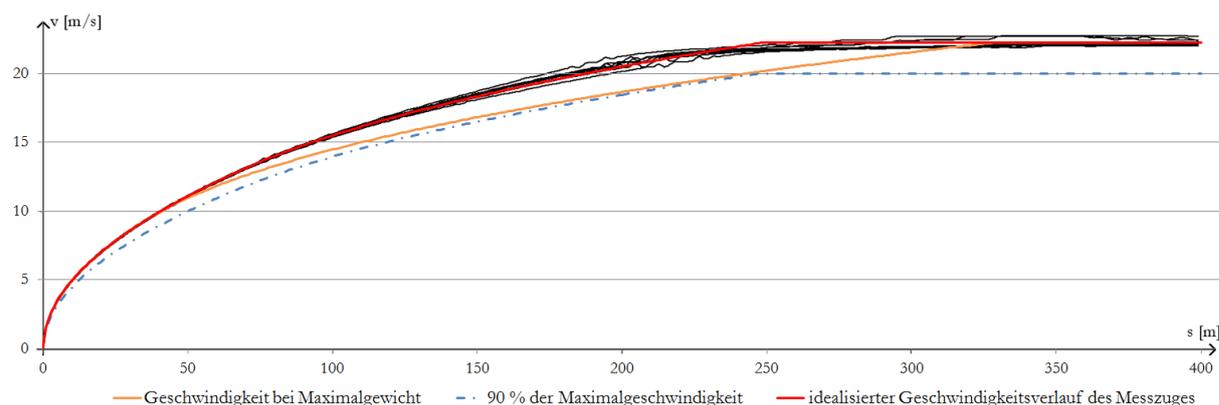


Abbildung 5.08: Überlagerung der Messdaten der Geschwindigkeitskurven ausgewählter Streckenabschnitte entlang des Gleises 1 der Linie U3 von einer Messfahrt am 03.11.2010 mit einem V-Wagen mit dem idealisierten Geschwindigkeitsverlauf des Messzuges der Type V.

In der Abb. 5.08 wurde außerdem der theoretische Geschwindigkeitsverlauf für einen voll besetzten V-Wagen mit einem Gesamtgewicht von 232,8 t gemäß der in Abb. 5.06 dargestellten

Beschleunigungsfunktion eingetragen. Ebenfalls eingetragen ist die Funktion der um 10 % verringerten Maximalgeschwindigkeit. Dabei zeigt sich, dass diese Funktion stets zu einer geringeren Geschwindigkeit führt als die Geschwindigkeitsfunktion des voll besetzten Zuges. Daher ist es ausreichend, für die Ermittlung der optimalen Überhöhung die Maximalgeschwindigkeit eines leeren Zuges und die um 10 % verringerte Geschwindigkeit zu berücksichtigen. Das tatsächliche Zugsgewicht kann dabei ignoriert werden.

5.3.4.2 Gleis 2

Die durchschnittliche Längsneigung der Bahnsteige des Gleises 2, die am Anfang der untersuchten Streckenabschnitte liegen, beträgt 0,4 ‰ gemäß Tab. 5.01, wobei in diesen Bereichen die Beschleunigung wiederum als konstant und unabhängig von der Streckenneigung angenommen wird.

Gemäß Tab. 5.02 liegt der Durchschnittswert der mittleren Längsneigung der sieben untersuchten Streckenabschnitte bei 2,7 ‰. Werden die Daten der Streckenabschnitte SA-EK und AW-ED, die in der Abb. 5.07 vom üblichen Beschleunigungsverlauf deutlich abweichen, nicht berücksichtigt, ergibt sich aus den Werten der restlichen fünf Abschnitte eine durchschnittliche Steigung von 2,2 ‰. Dieser Wert wird für die Erstellung der Geschwindigkeitskurve in der folgenden Abb. 5.09 verwendet.

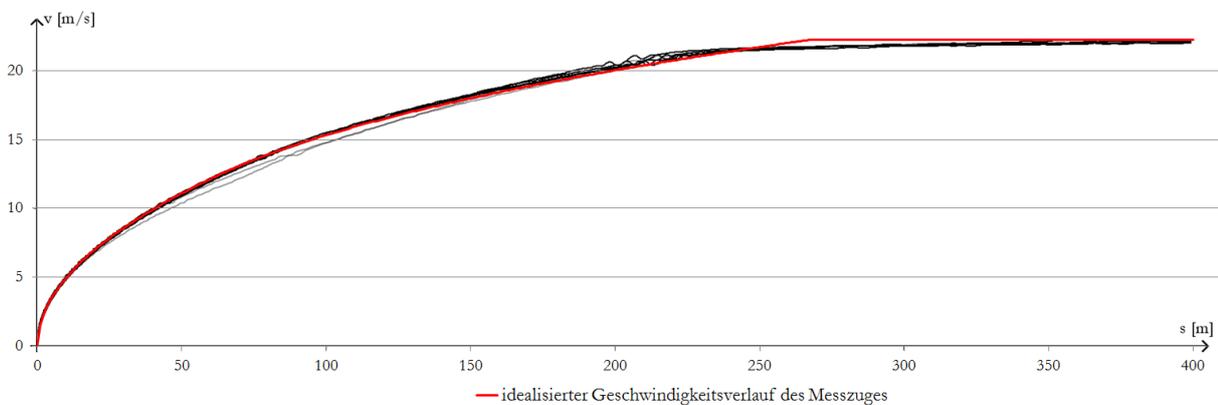


Abbildung 5.09: Überlagerung der Messdaten der Geschwindigkeitskurven ausgewählter Streckenabschnitte entlang des Gleises 2 der Linie U3 von einer Messfahrt am 11.07.2013 mit einem V-Wagen mit dem idealisierten Geschwindigkeitsverlauf des Messzuges der Type V.

In Abb. 5.09 ist ersichtlich, dass die gewählte Funktion zur Beschreibung des Verlaufs der Geschwindigkeit beim Anfahren auch mit den Messwerten des Gleises 2 eine gute Übereinstimmung erzielt. Daher wird diese in (5.07) beschriebene Funktion für die Ermittlung des Verlaufs der Geschwindigkeit zur Auswertung der Daten im Kapitel 5.5 herangezogen. Allerdings werden die modellierten Geschwindigkeitsprofile in Kapitel 5.5 durch das Einrechnen der jeweils

aktuellen Längsneigung der Strecke im Bereich des Zuges (anstelle der durchschnittlichen Streckenneigung) erstellt.

5.4 Ermittlung einer realitätsnahen Bremsfunktion

Die im Kapitel 5.3 untersuchten Messkurven der Anfahrbeschleunigung zeigen bis auf wenige Ausnahmen einen relativ einheitlichen Verlauf, der sich aus der Festlegung auf einen Maximalwert der zulässigen Beschleunigung und den physikalischen Gesetzmäßigkeiten, denen die Antriebe unterworfen sind, erklären lässt. Daher war es im vorhergehenden Kapitel möglich, unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge den Verlauf von Beschleunigung und Geschwindigkeit beim Anfahren mathematisch zu beschreiben und dabei eine gute Annäherung an die Messkurven zu erreichen.

Während es beim Beschleunigen irrelevant ist, ob der Zug ein paar Meter früher oder später die Maximalgeschwindigkeit erreicht, liegt die Toleranz bezüglich des Haltepunktes eines Zuges am Bahnsteig bei $\pm 0,35$ m. [26] Das zuverlässige Erreichen der richtigen Position am Bahnsteig nach dem Ende des Bremsvorganges setzt voraus, dass die tatsächliche Bremsverzögerung unter den technisch maximal erreichbaren Werten bleibt, welche von den Streckenverhältnissen, den Witterungsverhältnissen, dem Besetzungsgrad des Zuges, der Fahrgeschwindigkeit und anderen Parametern abhängig sind. Daher ist der Verlauf der Bremsverzögerung in der Regel nur teilweise durch technische Grenzen, in der Regel aber durch vorgegebene Richtwerte bestimmt.

Anders als beim Anfahren kann es beim Bremsen vorkommen, dass der Komfortgrenzwert der Längsbeschleunigung überschritten wird, da das rechtzeitige Anhalten des Zuges wichtiger ist.

Die Funktion der Bremsverzögerung ist auch keine Konstante, da die Bremsverzögerung während des Bremsvorgangs sowohl bei der Automatikfahrt als auch bei der Bedienung durch den Fahrer mehrmals korrigiert werden muss, um den Geschwindigkeitsverlauf an die Sollkennlinie gemäß Abb. 2.03 anzunähern. Beim Betrieb der Wiener U-Bahn ist die Automatikfahrt die Regel. Die Charakteristik des Beschleunigungsverlaufes beim Bremsen wird somit in erster Linie durch die regeltechnische Funktionsweise der automatischen Bremse bestimmt.

Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit davon Abstand genommen, den Verlauf der Bremsverzögerungen allzu exakt zu modellieren, da die prinzipiellen Aussagen auch nach einer etwaigen Veränderung an der Steuerung der Automatikfahrt ihre Gültigkeit behalten sollen.

5.4.1 Gleis 1

Im Gegensatz zur Modellierung des Verlaufs der Anfahrbeschleunigung, die sich im Wesentlichen aus den physikalischen Gesetzmäßigkeiten, denen die verfügbare Zugkraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit unterworfen ist, ergibt, wird die Bremskurve grafisch aus der Darstellung des gemessenen Geschwindigkeitsverlaufs in Abhängigkeit von der Wegstrecke generiert.

Diese in der Abb. 5.10 dargestellten Messkurven der Geschwindigkeiten beim Bremsvorgang zeigen, dass der Beginn des Bremsvorganges durch einen Knick im Geschwindigkeitsverlauf gekennzeichnet ist. Das bedeutet, dass hier eine relativ rasche Änderung der Längsbeschleunigung auftritt. Anschließend nimmt die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Wegstrecke nahezu linear ab, um schließlich ohne Knick in einen parabelförmigen Verlauf überzugehen.

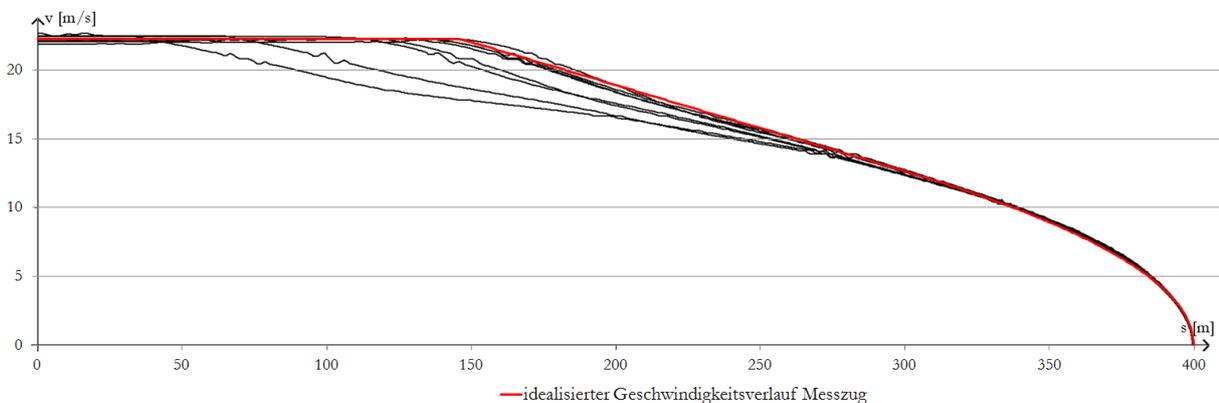


Abbildung 5.10: Vergleich der idealisierten Geschwindigkeitskurve beim Bremsvorgang mit den Messdaten der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Wegstrecke ausgewählter Streckenabschnitte entlang des Gleises 1 der Linie U3 von einer Messfahrt am 03.11.2010 mit einem V-Wagen

Der idealisierte Geschwindigkeitsverlauf orientiert sich an jenen Messkurven, die durch höhere Werte der Bremsverzögerung und kürzere Bremswege gekennzeichnet sind, um die maximalen Fahrgeschwindigkeiten in diesen Streckenabschnitten zu erfassen. Er setzt sich aus einem linearen Verlauf am Beginn des Bremsvorganges und einer anschließenden Parabelform zusammen. Durch die Anpassung des idealisierten Geschwindigkeitsverlaufs an die Messwerte (im Gegensatz zum Beschleunigungsverlauf, mit dem das Anfahren modelliert wurde) sind die Effekte aus der Längsneigung der betrachteten Streckenabschnitte bereits berücksichtigt.

Im Folgenden wird der gewählte Geschwindigkeitsverlauf beim Bremsen mathematisch dargestellt. Maßgeblich ist dabei die Entfernung des Zuges s_B vom Endpunkt des Bremsvorganges, also vom Haltepunkt in der Station.

Für $s_B \geq 102,4$ m gilt:

$$v = \min \left[\begin{array}{l} 0,0625 \cdot s_B + 6,4 \\ v_{\max} \end{array} \right] \quad (5.10)$$

Für $s_B < 102,4$ m gilt:

$$v = \sqrt{1,6 \cdot s_B} \quad (5.11)$$

s_B [m] Wegstrecke bis zum Erreichen des Haltepunkts am Ende des Bremswegs

Für die Berechnung der Geschwindigkeit, wenn der Wert s_B nicht bekannt ist, dienen die folgenden, aus den Gleichungen (5.09), (5.10) und (5.11) abgeleiteten Formeln. Diese kommen bei der tabellarischen Berechnung zum Einsatz, weil damit auch der Bremsverlauf vor einem Bereich mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung modelliert werden kann.

Für $v_i > 12,8$ m/s gilt:

$$v_i = \min \left[\begin{array}{l} v_{i+1} + 0,0625 \cdot \Delta s \\ v_{\max} \end{array} \right] \quad (5.12)$$

Für $v_i \leq 12,8$ m/s gilt:

$$v_i = \min \left[\begin{array}{l} \sqrt{v_{i+1}^2 + 1,6 \cdot \Delta s} \\ v_{\max} \end{array} \right] \quad (5.13)$$

Aus diesen gewählten Funktionen der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Wegstrecke ergibt sich die in der Abb. 5.11 dargestellte Funktion der Bremsverzögerung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Im Sinne des Bremsens von der Maximalgeschwindigkeit auf 0 km/h ist der dargestellte Funktionsverlauf von rechts nach links zu lesen.

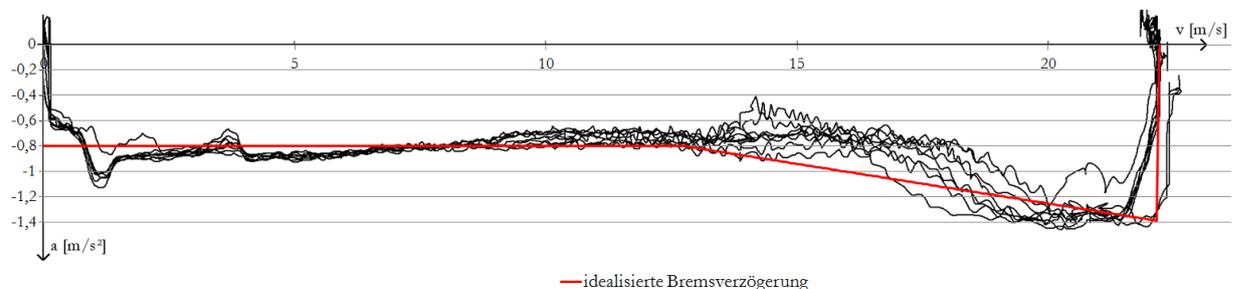


Abbildung 5.11: Vergleich des gewählten idealisierten Beschleunigungsverlaufs mit den Messdaten der Bremsverzögerung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ausgewählter Streckenabschnitte entlang des Gleises 1 der Linie U3 von einer Messfahrt am 03.11.2010 mit einem V-Wagen

Die Messwerte des Bremsverlaufs zeigen die hohe Bremsverzögerung zu Beginn des Bremsvorgangs von ca. $1,4 \text{ m/s}^2$. Diese reduziert sich danach auf einen annähernd konstanten Wert im Bereich zwischen $0,7$ und $0,9 \text{ m/s}^2$. Knapp vor dem Stillstand des Zuges kommt es noch einmal zu einem kurzfristigen spürbaren Anwachsen der Längsbeschleunigung auf bis zu $1,1 \text{ m/s}^2$.

In der Abb. 5.11 ist die idealisierte Bremsverzögerung als rote Linie eingetragen, die der gewählten idealisierten Geschwindigkeitsfunktion aus der Abb. 5.10 entspricht. Sie nimmt offensichtlich nicht alle Eigenheiten der Messkurven auf. Nachdem für die weiteren Untersuchungen aber nur die Geschwindigkeitskurve herangezogen wird, wird über diese Abweichungen hinweggesehen.

5.4.2 Gleis 2

Die Messwerte des Bremsvorganges der ausgewählten Streckenabschnitte auf Gleis 2 sind in den Abbildungen 5.12 und 5.13 dargestellt. In diesen Diagrammen ist auch der für das Gleis 1 gewählte idealisierte Verlauf von Geschwindigkeit und Beschleunigung eingetragen. Nachdem der Vergleich des gewählten Geschwindigkeitsverlaufs mit den Messkurven in Abbildung 5.12 eine ausreichend genaue Übereinstimmung ergibt, wird auch für die weiteren Untersuchungen des Gleises 2 der für das Gleis 1 beschriebene Geschwindigkeitsverlauf angewendet.

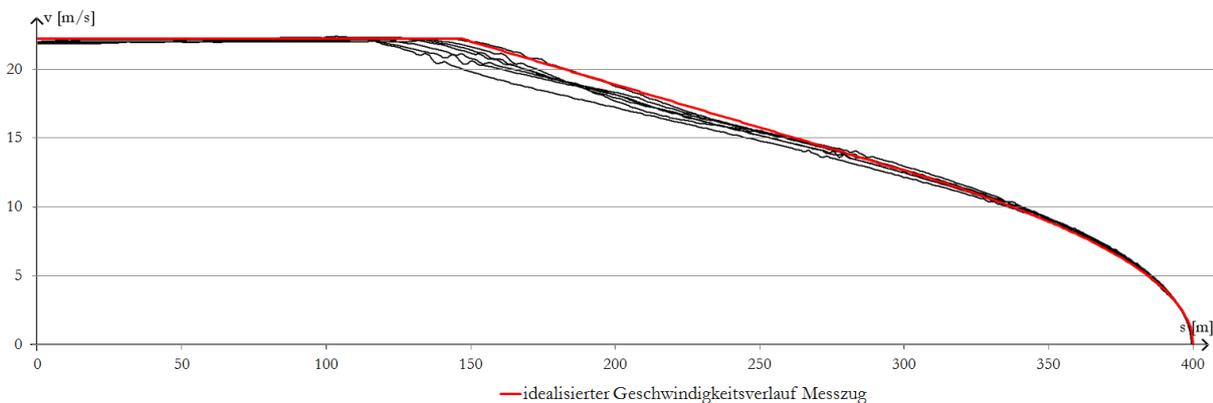


Abbildung 5.12: Vergleich der idealisierten Geschwindigkeitskurve beim Bremsvorgang mit den Messdaten der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Wegstrecke ausgewählter Streckenabschnitte entlang des Gleises 2 der Linie U3 von einer Messfahrt am 11.07.2013 mit einem V-Wagen

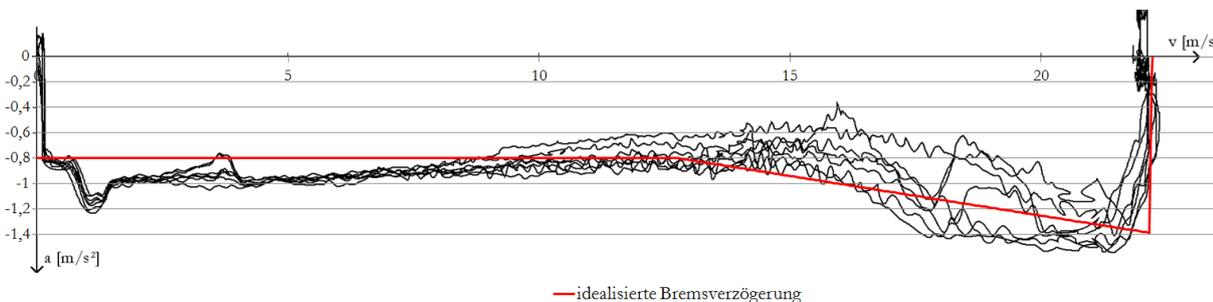


Abbildung 5.13: Vergleich des gewählten idealisierten Beschleunigungsverlaufs mit den Messdaten der Bremsverzögerung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ausgewählter Streckenabschnitte entlang des Gleises 1 der Linie U3 von einer Messfahrt am 11.07.2013 mit einem V-Wagen

5.5 Vergleich von optimaler und realer Überhöhung

5.5.1 Vorgangsweise zur Auswertung der Messergebnisse

Der Vergleich der eingebauten Überhöhung mit den in Kapitel 3 hergeleiteten optimalen Überhöhungswerten wurde für jeden Streckenabschnitt zwischen zwei benachbarten Haltestellen gesondert durchgeführt. Dadurch ergeben sich für Gleis 1 und Gleis 2 jeweils 20 untersuchte Streckenbereiche. Die Auswertung eines Abschnittes erfolgte durch die Abbildung eines Übersichtsgrundrisses (Abbildungen 5.14.a-t bzw. 5.19.a-t), eine Beschreibung der charakteristischen Eigenschaften des betrachteten Bereichs und die Abbildung von vier Diagrammen zur Darstellung der relevanten Parameter (Abbildungen 5.15.a-t bis 5.18.a-t bzw. 5.20.a-t bis 5.23.a-t). Um die Vergleichbarkeit der Messkurven zu gewährleisten, wurden diese Diagramme hinsichtlich der auf der Abszisse dargestellten Wegstrecke jeweils im gleichen Maßstab dargestellt.

Die Abbildungen 5.14.a-t (bzw. 5.19.a-t) zu Beginn der Auswertung jedes Streckenabschnittes stellen jeweils einen Ausschnitt aus dem gesamten Grundrissplan der Linie U3 dar, der im Anhang B abgebildet ist. Sie zeigen die Grundriss-Trassierungselemente und die Bogenradien des betrachteten Gleises und sind im Maßstab 1 : 6.250 gehalten. Die Ausgangsdaten für die Erstellung des Grundrissplans sind die Datenfiles der Soll-Trassierung gemäß Anhang C, die auch die Grundlage für die Ermittlung der in den Diagrammen abgebildeten Soll-Daten darstellen.

Mittels einer Excel-Tabelle wurden in einem ersten Schritt die einzelnen Zahlenwerte aus den Textdaten der Trassierungsfiles extrahiert, um sie für die weiteren Berechnungsschritte verwenden zu können. Es handelt sich dabei um die Kilometrierung, die Koordinaten und die Höhenlage der angeführten Trassierungspunkte, die Abfolge der Trassierungselemente im Grundriss und deren Länge, die Bogenradien sowie die Anfangs- und Endradien der Übergangsbögen und die jeweiligen Richtungswinkel und Längsneigungen des Gleises. Unter den Trassierungspunkten befinden sich auch die Weichenanfangspunkte und die Stationsmittelpunkte.

Um die Berechnung des Geschwindigkeitsverlaufes unter Berücksichtigung von veränderlichen Beschleunigungswerten mit einer ausreichenden Genauigkeit durchführen zu können, wurden in der Excel-Berechnung alle 2 m zusätzliche Streckenpunkte eingefügt. Nachdem entlang der Linie U3 derzeit ausschließlich Klothoiden als Übergangsbögen zur Anwendung kommen, konnte die Krümmung für jeden einzelnen Streckenpunkt durch lineares Interpolieren berechnet werden.

Dieser Krümmungsverlauf wurde mit jenem aus den Messdaten des Gleismesswagens in den Abbildungen 5.15.a-t bzw. 5.20.a-t überlagert, wobei die Stationsmittelpunkte als Fixpunkte zur

Skalierung der Funktionen dienen. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Daten der Gleismessung um ca. 8 m zu den Solldaten aus dem Datenfile versetzt waren. Der Grund dieser Abweichung der Verortung der Messdaten ist nicht bekannt und wurde im Zuge dieser Arbeit auch nicht untersucht. Jedenfalls zeigt sich nach der Korrektur in Form einer Verschiebung der Messdaten um 8 m in Fahrtrichtung auf beiden Gleisen, dass die Ist-Daten und die Soll-Daten der Krümmung entlang des gesamten Untersuchungsbereichs sehr gut übereinstimmen.

Die Abbildungen 5.16.a-t bzw. 5.21.a-t zeigen den aus den Datenfiles der Soll-Trassierung durch lineares Interpolieren zwischen den Trassierungspunkten ermittelten Höhenverlauf des Gleises und somit auch die Längsneigung sowie eine symbolische Darstellung der Länge der Bahnsteige und der Lage der Weichen, wobei diese Darstellungen hinsichtlich der Wegstrecke maßstabsgetreu eingetragen sind.

Für die Ermittlung der optimalen Überhöhung ist es notwendig, das Geschwindigkeitsprofil eines Zuges, der den betrachteten Streckenabschnitt befährt, zu kennen. Diese Geschwindigkeitsverläufe wurden in den Abbildungen 5.17.a-t bzw. 5.22. a-t dargestellt.

Um den Geschwindigkeitsverlauf mit Excel berechnen zu können, wurde zuerst die maximal mögliche Geschwindigkeit in jedem Streckenpunkt zufolge des Radius, der maximalen Überhöhung und des maximal zulässigen Überhöhungsfehlbetrages ermittelt. Dann wurde unter Berücksichtigung der Längsausdehnung eines Zuges die maximal mögliche Geschwindigkeit eines gesamten Zuges, dessen Zugmitte den betrachteten Streckenpunkt passiert, berechnet. Außerdem wurde in jedem Streckenpunkt die durchschnittliche Längsneigung der Strecke im Bereich eines Zuges, dessen Zugmitte den betrachteten Streckenpunkt passiert, als Differenz der Höhenlage von Zuganfang und Zugende ermittelt.

Anschließend wurde ausgehend von den Stationsmittelpunkten bzw. von Streckenbereichen mit verminderter Höchstgeschwindigkeit der Geschwindigkeitsverlauf beim Anfahren schrittweise unter Verwendung der Gleichung (5.09) berechnet. Die zugrundeliegende Beschleunigung wurde gemäß Gleichung (5.07) für einen V-Wagen-Zug ermittelt, wobei für den Neigungswiderstand die ermittelte durchschnittliche Längsneigung eingesetzt wurde. Der Geschwindigkeitsverlauf beim Bremsen wurde schrittweise entgegen der Fahrtrichtung gerechnet. Dazu wurden die Gleichungen (5.12) und (5.13) verwendet.

Das Geschwindigkeitsprofil der Zugmitte über den gesamten Streckenabschnitt ergibt sich nun als Minimum aus dem Geschwindigkeitsverlauf beim Anfahren und jenem beim Bremsen. Diese Geschwindigkeitsfunktion wird anschließend jeweils um die halbe Zuglänge in beide Richtungen versetzt, um den Verlauf der Geschwindigkeit von Zuganfang und Zugende zu erhalten.

Die eigentlichen Ergebnisse der Auswertung sind in den Abbildungen 5.18.a-t bzw. 5.23. a-t dargestellt. Hier wird die Messkurve der Überhöhung, die um denselben Wert wie die Messkurve der Krümmung in Längsrichtung versetzt wurde, mit den Soll-Daten der optimalen Überhöhung, wie sie in Kapitel 3 dieser Arbeit beschrieben wurde, verglichen. Die Obergrenze der optimalen Überhöhung wurde dabei gemäß der Formel (3.09) berechnet. Für die Untergrenze der optimalen Überhöhung wurde die Formel (3.13) herangezogen, was eine Abweichung gegenüber dem eigentlich angestrebten Verlauf der Untergrenze der optimalen Überhöhung, wie sie in Abb. 3.05 eingetragen ist, darstellt. Diese aus rechentechnischen Gründen getroffene Vereinfachung bedeutet, dass in Bereichen mit teilweiser Beschleunigung des Zuges die Untergrenze der optimalen Überhöhung in den Abbildungen 5.18. a-t bzw. 5.23. a-t mitunter etwas zu hoch angesetzt ist.

In den Diagrammen 5.18. a-t bzw. 5.23. a-t mit der Darstellung der optimalen und der gemessenen Überhöhung ist außerdem die Mindestüberhöhung gemäß Trassierungsvorschrift eingetragen. Diese Kurve wurde in jedem Streckenpunkt aufgrund der maximalen auftretenden Geschwindigkeit und der Krümmung ermittelt.

5.5.2 Linie U3, Gleis 1

5.5.2.1 Abschnitt Ottakring – Kenderstraße

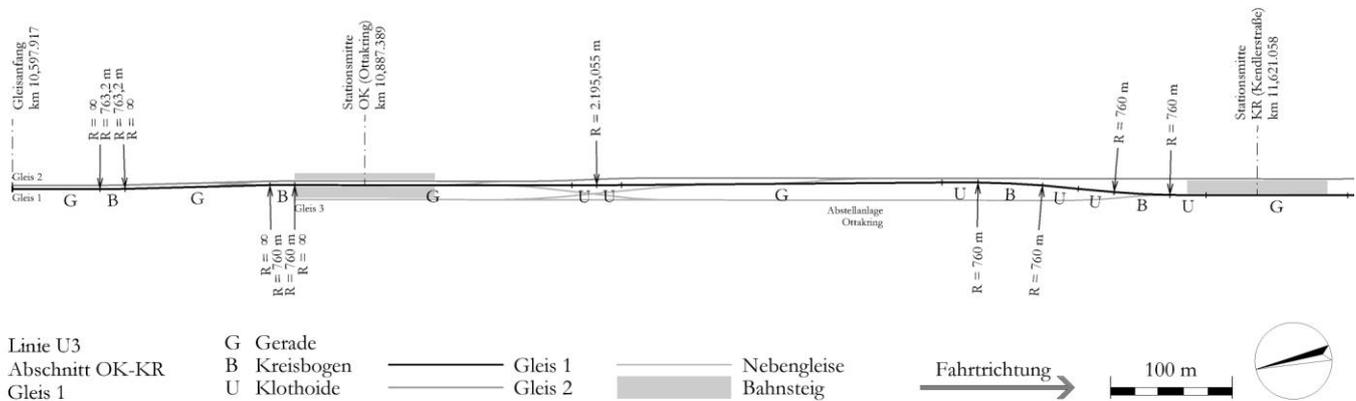


Abbildung 5.14.a: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, Abschnitt OK-KR

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 1 zwischen den Haltestellen Ottakring und Kenderstraße beträgt 733,669 m. Im Bereich der Endstation Ottakring und der dahinter liegenden Wendegleise befindet sich die Trasse in Hochlage, das Stationsbauwerk Kenderstraße liegt hingegen bereits unterirdisch. Die Höhenlage der Strecke verringert sich in diesem Bereich um 0,500 m in Fahrtrichtung. Die größte auftretende Neigung ist ein Gefälle von 1,316 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befinden sich fünf Weichen aufgrund der Überleitstellen zu Gleis 2 und 3 und der Abzweigung zur Abstellanlage Ottakring, deren Lage in Abb. 5.16.a eingetragen ist.

Im Krümmungsverlauf dieses Streckenabschnittes, der in Abb. 5.15.a dargestellt ist, lassen sich neben einer geringfügigen Richtungsänderung mit großem Radius zwei gegenläufige Bögen vor der Station Kenderstraße mit einem Radius von jeweils 700 m erkennen, in deren Verlauf es jedoch keine Überhöhung des Gleises gibt, wie die Messwerte in Abb. 5.18.a zeigen. Beim zweiten Bogen treten bedingt durch den Bremsvorgang und die Nähe zur Station bereits relativ geringe Fahrgeschwindigkeiten auf (siehe Abb. 5.17.a) und die optimale Überhöhung liegt daher bei nur ca. 20 mm. Darüber hinaus befindet sich in diesem Bogen eine Weiche. Somit lässt sich das Fehlen einer Überhöhung in diesem Bereich durchaus begründen. Der erste der beiden Kreisbögen liegt jedoch in einem Bereich mit höheren Fahrgeschwindigkeiten, wodurch die Überhöhung gemäß Abb. 5.18.a einen Wert von ca. 60 mm haben sollte.

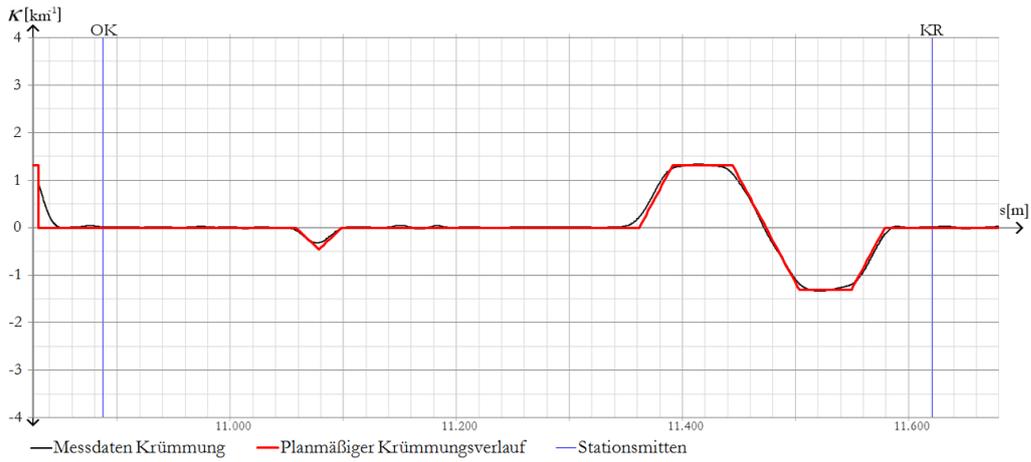


Abbildung 5.15.a: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, OK-KR

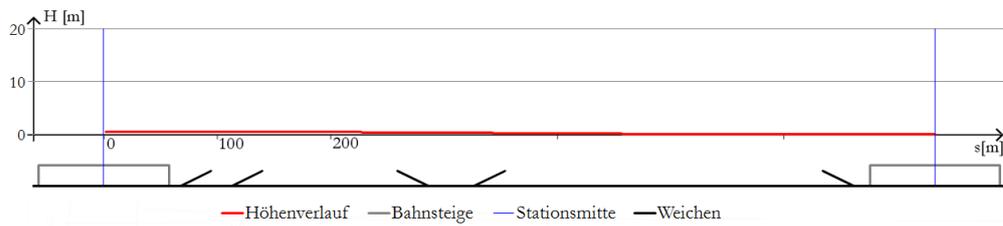


Abbildung 5.16.a: Längsneigung und Lage der Weichen und Bahnsteige, Gleis 1, OK-KR

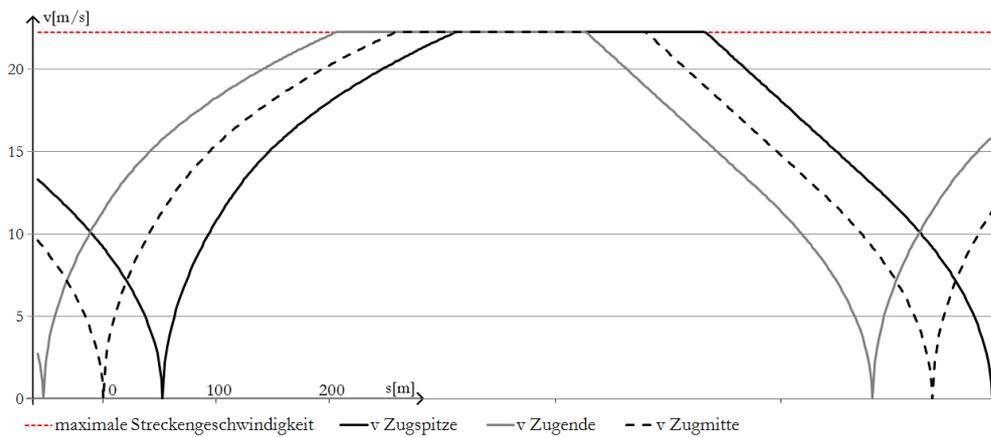


Abbildung 5.17.a: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, OK-KR

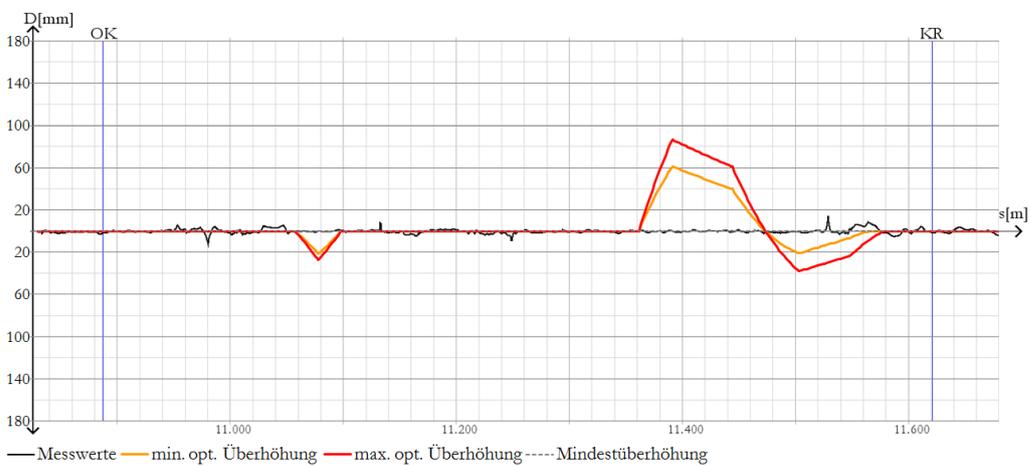


Abbildung 5.18.a: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, OK-KR

5.5.2.2 Abschnitt Kendlerstraße – Hütteldorfer Straße

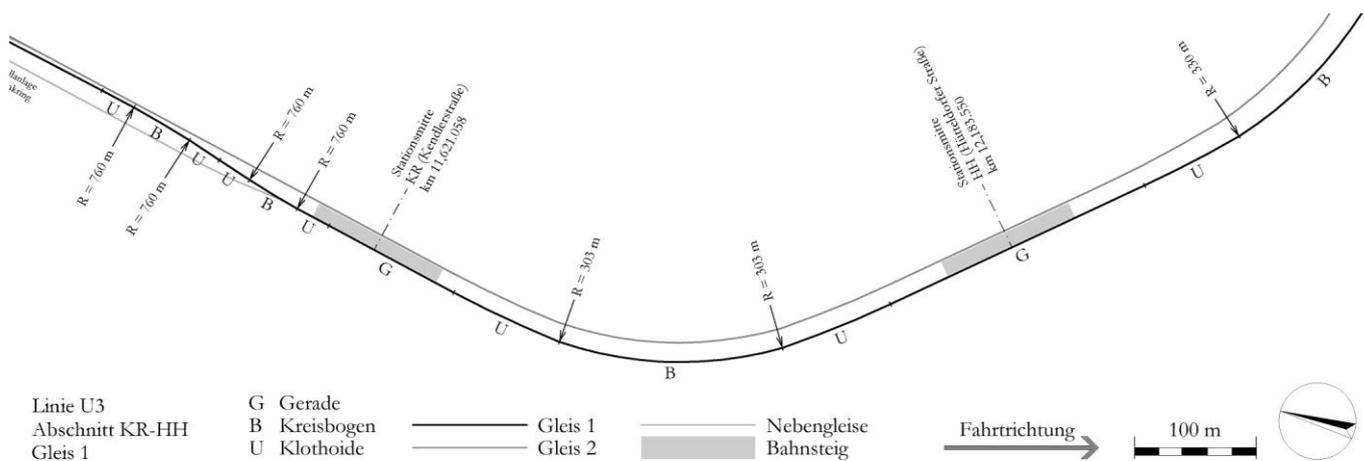


Abbildung 5.14.b: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, Abschnitt KR-HH

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 1 zwischen den Haltestellen Kendlerstraße und Hütteldorfer Straße beträgt 562,492 m. Die Höhenlage der Strecke verringert sich in diesem Bereich um 10,450 m in Fahrtrichtung. Die größte auftretende Neigung ist ein Gefälle von 40,000 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 gibt es keine Weichen. Trotz des Gefälles gibt es aufgrund des kurzen Stationsabstandes keinen Bereich, den der gesamte Zug mit gleichbleibender Höchstgeschwindigkeit passiert.

Der in Abb. 5.15.b dargestellte Krümmungsverlauf dieses Streckenabschnittes besteht aus geraden Bereichen in den Stationen und einem von Übergangsbögen flankierten langgezogenen Bogen mit einem Radius von 303 m. Dies ist bei einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h der Mindestradius, bei dem laut Trassierungsvorschrift die maximal zulässige Überhöhung von 150 mm einzubauen ist.

Die Messwerte der Überhöhung in Abb. 5.18.b zeigen im Bereich des Kreisbogens Werte zwischen 160 und 170 mm. Das muss aber nicht zwangsläufig bedeuten, dass die eingebaute Überhöhung über dem Grenzwert von 150 mm liegt, da auch fahrdynamische Effekte des Messfahrzeugs zu leicht überhöhten Messergebnissen führen könnten.

Die Obergrenze der optimalen Überhöhung, die ja im Kreisbogen der ausgleichenden Überhöhung entspricht, würde unter Vernachlässigung des Grenzwertes bei ca. 250 mm liegen, also weit über der eingebauten Überhöhung. In den Übergangsbögen kehrt sich dieses Verhältnis jedoch um. Hier liegt die nach den klassischen Trassierungsregeln eingebaute Überhöhung teilweise sogar über den Werten der optimalen Überhöhung, weil die geringere Fahrgeschwindigkeit im Anfahr- und Bremsbereich gemäß Abb. 5.17.b nicht berücksichtigt wurde.

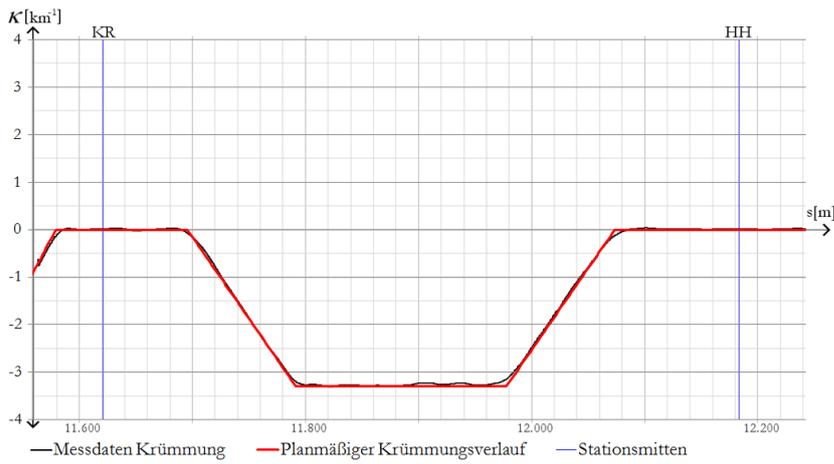


Abbildung 5.15.b: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, KR-HH

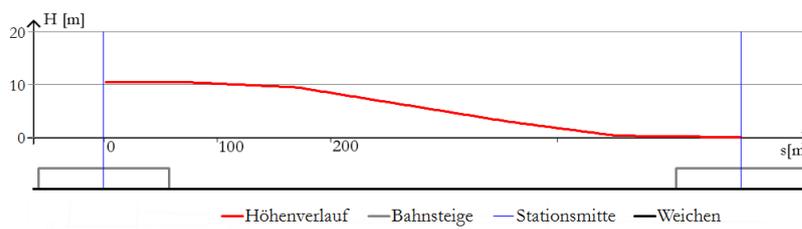


Abbildung 5.16.b: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 1, KR-HH

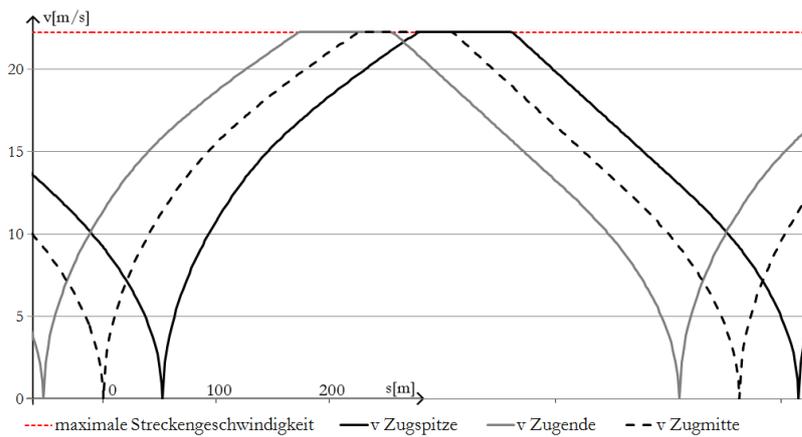


Abbildung 5.17.b: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, KR-HH

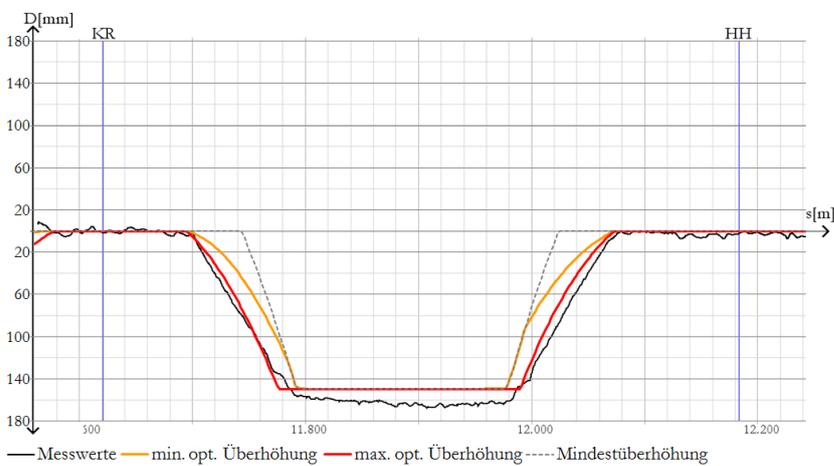


Abbildung 5.18.b: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, KR-HH

5.5.2.3 Abschnitt Hütteldorfer Straße – Johnstraße

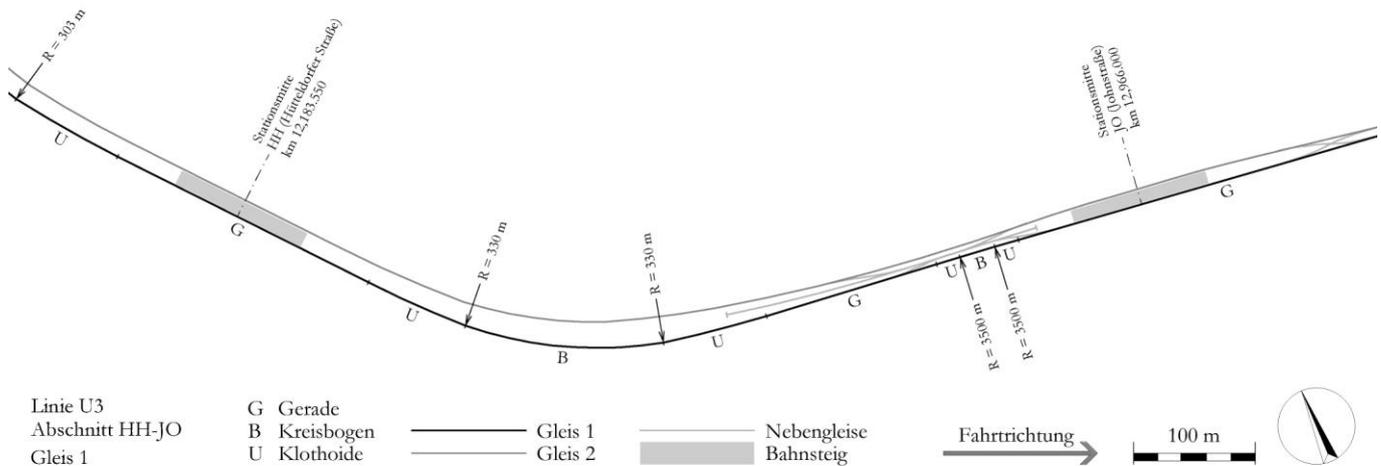


Abbildung 5.14.c: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, Abschnitt HH-JO

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 1 zwischen den Haltestellen Hütteldorfer Straße und Johnstraße beträgt 782,450 m. Die Höhenlage der Strecke verringert sich in diesem Bereich um 1,508 m in Fahrtrichtung. Die größte auftretende Neigung ist ein Gefälle von 13,092 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befinden sich in der Nähe der Station Johnstraße zwei Weichen aufgrund einer Überleitstelle mit Abstellgleis, deren Lage in Abb. 5.16.c eingetragen ist.

Der Krümmungsverlauf dieses Streckenabschnittes, der in Abb. 5.15.c dargestellt ist, ist ähnlich zu jenem im vorhergehenden Streckenabschnitt mit dem prinzipiellen Unterschied, dass der Übergangsbogen nach dem Kreisbogen mit einem Radius von 330 m in den Bereich fällt, den der Zug mit konstanter Höchstgeschwindigkeit durchfährt, wie in Abb. 5.17.c ersichtlich ist. Im Vergleich zum Übergangsbogen vor dem Kreisbogen ist die optimale Überhöhung gemäß Abb. 5.18.c im zweiten Übergangsbogen höher, weil sie von der Fahrgeschwindigkeit abhängig ist. Die eingebaute Überhöhung ist im Übergangsbogen vor und nach dem Kreisbogen gleichermaßen in Form einer linearen Rampe ausgebildet. Während die eingebaute Überhöhung vor dem Kreisbogen im vorgeschlagenen Bereich der optimalen Überhöhung liegt, ist sie im zweiten Übergangsbogen etwas geringer als die optimale Überhöhung.

Der kurze Kreisbogen mit einem Radius von 3.500 m, der ebenfalls in diesem Abschnitt liegt, ruft keine ausreichend großen Seitenbeschleunigungen hervor, um eine Überhöhung des Gleises zu rechtfertigen.

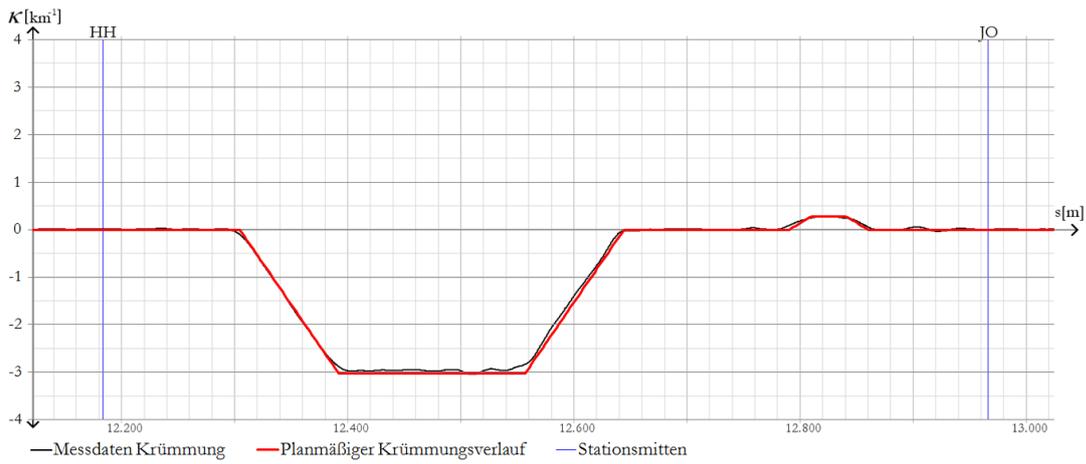


Abbildung 5.15.c: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, HH-JO

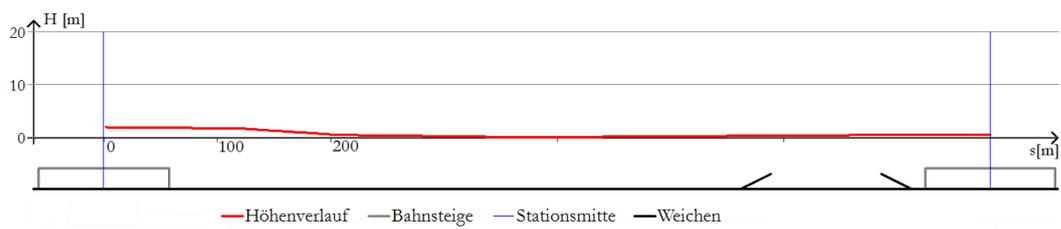


Abbildung 5.16.c: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 1, HH-JO

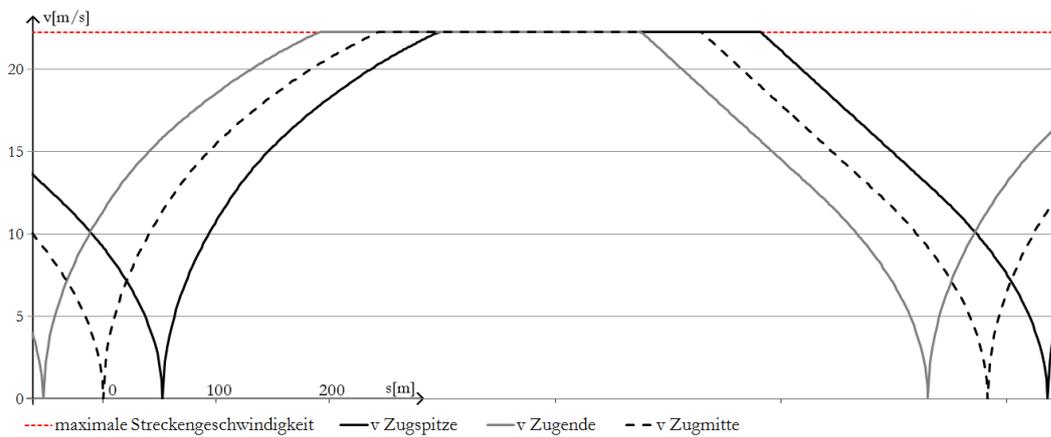


Abbildung 5.17.c: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, HH-JO

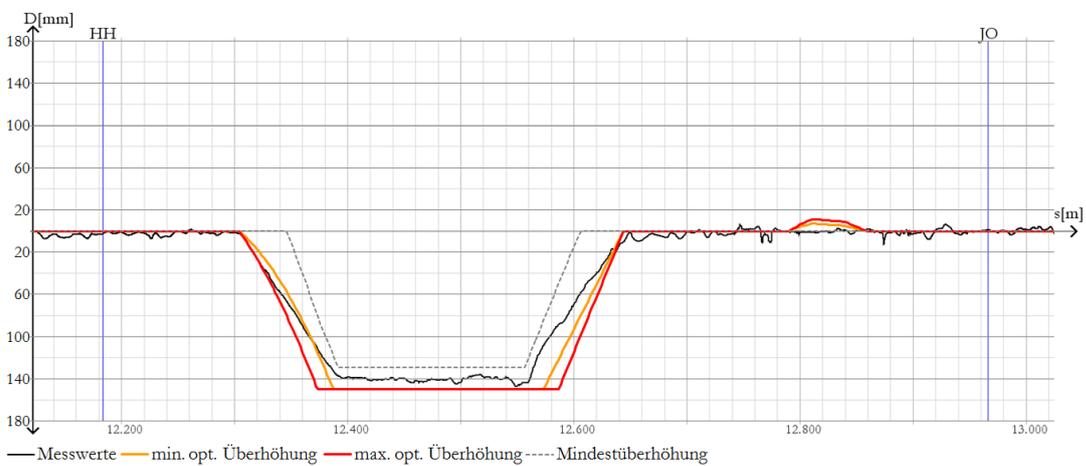


Abbildung 5.18.c: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, HH-JO

5.5.2.4 Abschnitt Johnstraße – Schweglerstraße

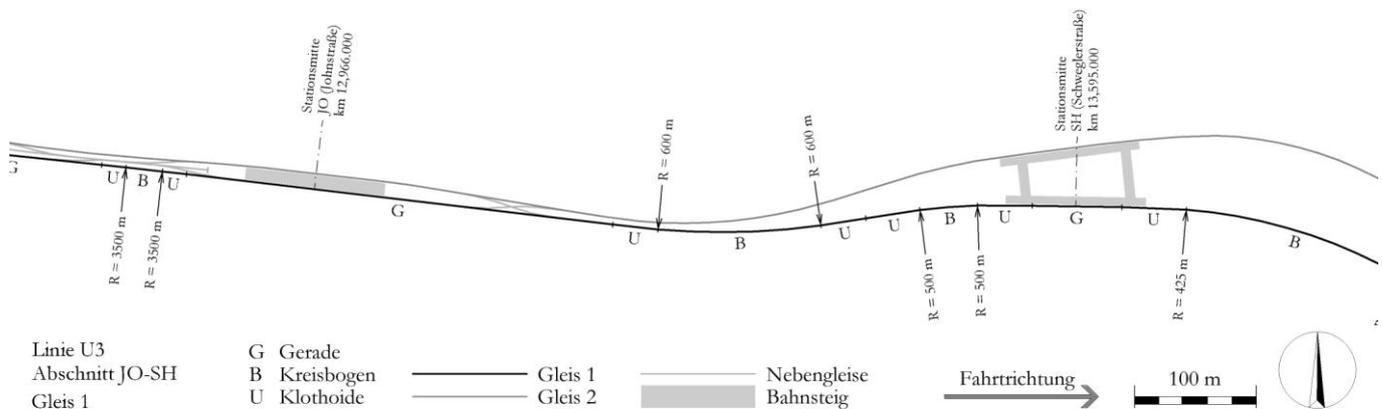


Abbildung 5.14.d: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, Abschnitt JO-SH

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 1 zwischen den Haltestellen Johnstraße und Schweglerstraße beträgt 629,000 m. Die Höhenlage der Strecke verringert sich in diesem Bereich um 14,000 m in Fahrtrichtung. Die größte auftretende Neigung ist ein Gefälle von 40,000 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befinden sich zwei Weichen in der Nähe der Station Johnstraße aufgrund einer Überleitstelle zu Gleis 2, deren Lage in Abb. 5.16.d eingetragen ist.

Der in der Abb. 5.15 d dargestellte Krümmungsverlauf in diesem Streckenabschnitt ist durch eine Bogenfolge eines Links- und eines Rechtsbogens mit den dazugehörigen Übergangsbögen gekennzeichnet, wobei der Linksbogen einen Radius von 600 m hat und der anschließende, kürzere Rechtsbogen einen Radius von 500 m aufweist. Wie in der Abb. 5.17.d ersichtlich ist, sind im ersten Kreisbogen zumindest Teile des Zuges mit der Höchstgeschwindigkeit unterwegs, während der zweite Kreisbogen knapp vor der Station Schweglerstraße liegt und die Fahrgeschwindigkeiten aus diesem Grund wesentlich geringer ausfallen.

Der in der Abb. 5.18.d dargestellte optimale Überhöhungsverlauf berücksichtigt den Einfluss der Geschwindigkeit und sieht im Bereich des ersten Kreisbogens eine Überhöhung von ca. 100 mm und im zweiten Kreisbogen eine Überhöhung von ca. 40 mm vor.

Aus der Messkurve der eingebauten Überhöhung in Abb. 5.18.d lässt sich erkennen, dass der veränderlichen Fahrgeschwindigkeit Rechnung getragen wird, indem die eingebaute Überhöhung im zweiten Kreisbogen geringer ist als im ersten. Trotzdem ist die eingebaute Überhöhung im Bereich des ersten Kreisbogens im Vergleich zur Soll-Überhöhung etwas zu niedrig angesetzt, während die eingebauten Werte für den zweiten Kreisbogen eine gute Übereinstimmung mit dem optimalen Bereich der Überhöhung liefern.

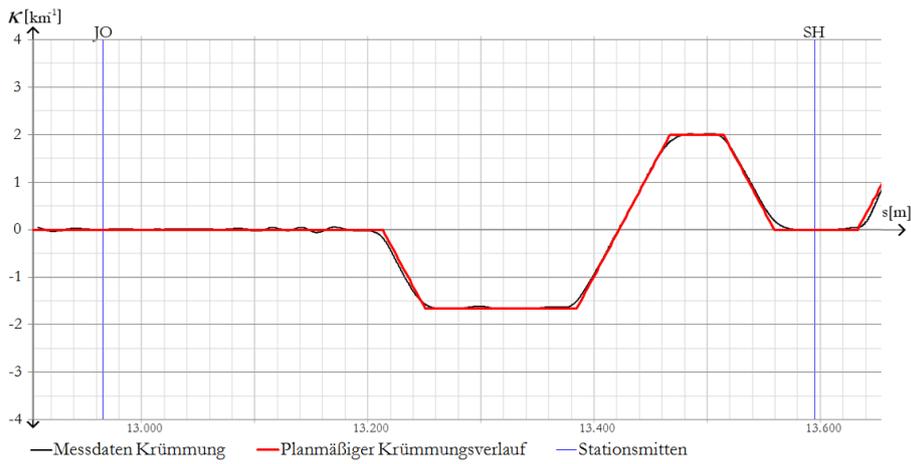


Abbildung 5.15.d: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, JO-SH

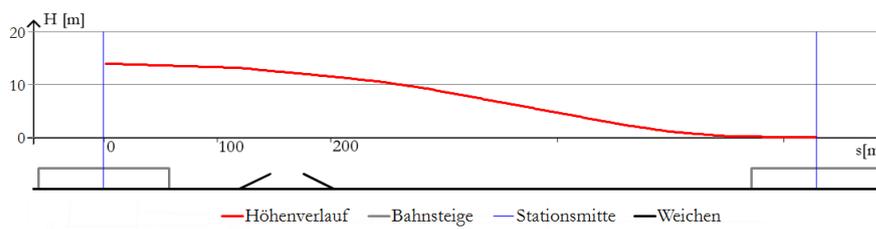


Abbildung 5.16.d: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 1, JO-SH

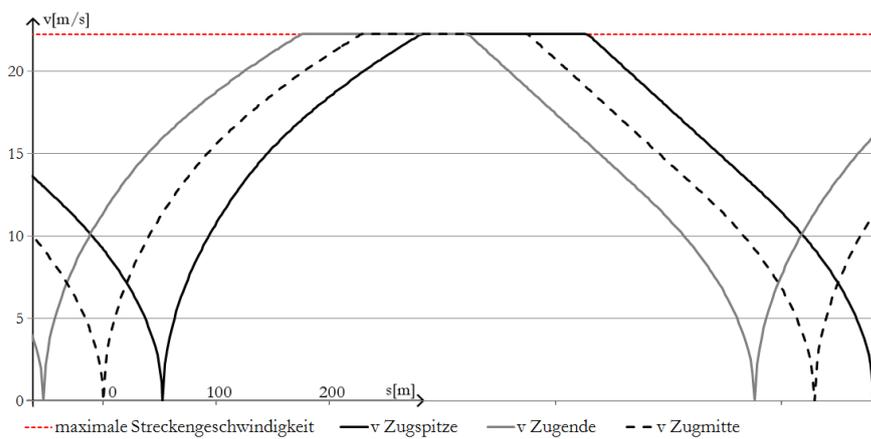


Abbildung 5.17.d: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, JO-SH

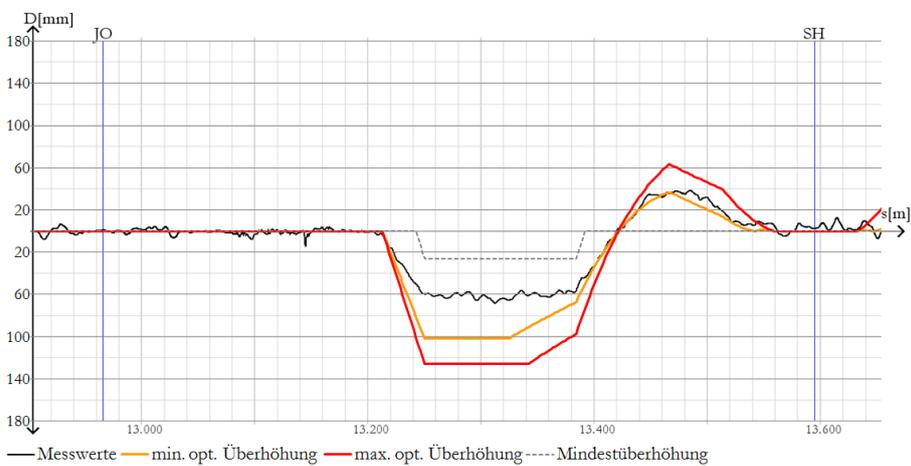


Abbildung 5.18.d: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, JO-SH

5.5.2.5 Abschnitt Schweglerstraße – Westbahnhof

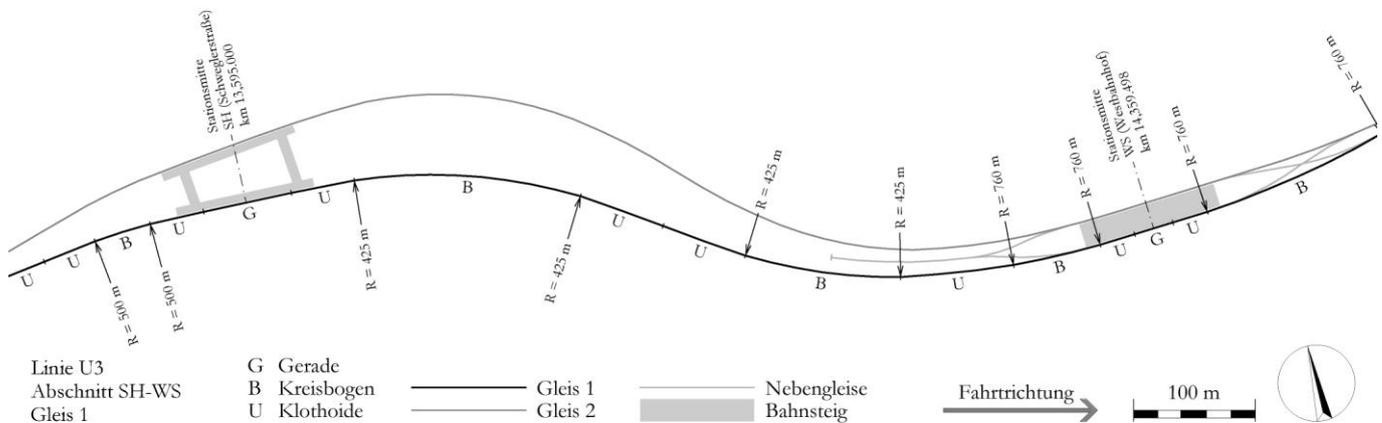


Abbildung 5.14.e: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, Abschnitt SH-WS

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 1 zwischen den Haltestellen Schweglerstraße und Westbahnhof beträgt 764,498 m. Die Höhenlage der Strecke verringert sich in diesem Bereich um 19,692 m in Fahrtrichtung. Die größte auftretende Neigung ist ein Gefälle von 40,000 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befindet sich eine Weiche in der Nähe der Station Westbahnhof, die zu einem Abstell- bzw. Wendegleis führt.

Der in Abb. 5.15.e dargestellte Krümmungsverlauf dieses Streckenabschnittes besteht aus einem Rechtsbogen mit einem Radius von 425 m, der von Übergangsbögen flankiert wird. Unmittelbar daran anschließend führt ein Übergangsbogen zu einem Linksbogen mit demselben Bogenradius, der in Form eines Korbbogens in einen Bogen mit einem Radius von 760 m übergeht, welcher bis in den Bahnsteigbereich reicht, wo ein Übergangsbogen die Bogenfolge abschließt.

Der erste Kreisbogen in diesem Abschnitt beginnt im Beschleunigungsbereich, wie aus der Abb. 5.17.e ersichtlich ist. Daraus ergibt sich für diesen Bogen ein ansteigender Bereich der optimalen Überhöhung bis zum Erreichen der Höchstgeschwindigkeit. Die eingebaute Überhöhung bildet das ab, indem sie am Anfang des Bogens konstant bei 60 mm liegt und gegen Ende des Bogens mit einer linearen Rampe auf 110 mm übergeht, wie in der Abb. 5.18.e dargestellt ist. Sie befindet sich jedoch größtenteils unter der optimalen Überhöhung und auch teilweise unter der Mindestüberhöhung nach der Trassierungsvorschrift, was eine Einschränkung der Geschwindigkeit in diesem Bereich zufolge haben müsste.

Der Überhöhungsverlauf des Korbbogens liegt zum Teil etwas unter den optimalen Werten, was unmittelbar vor dem Bahnsteigbereich an der dort situierten Weiche liegen könnte. Im Wesentlichen sind die Abweichungen zur optimalen Überhöhung jedoch nicht sehr groß.

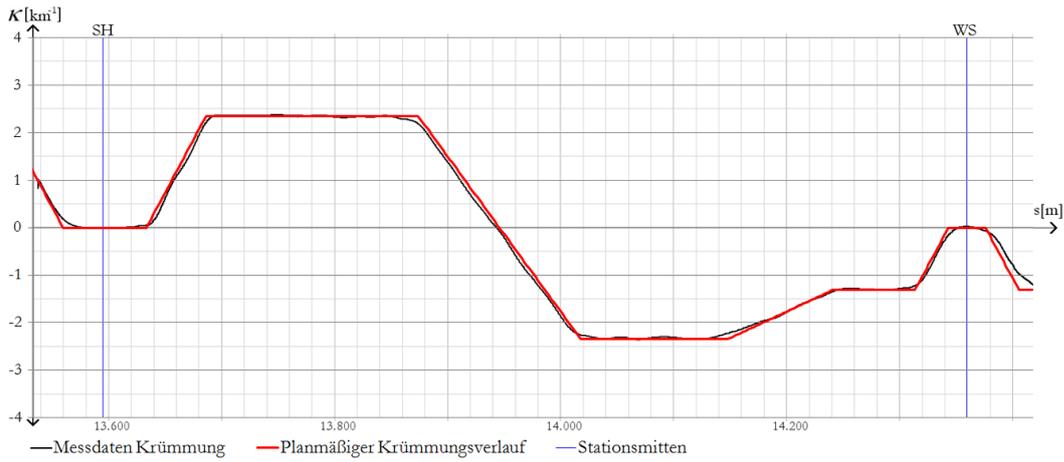


Abbildung 5.15.e: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, SH-WS

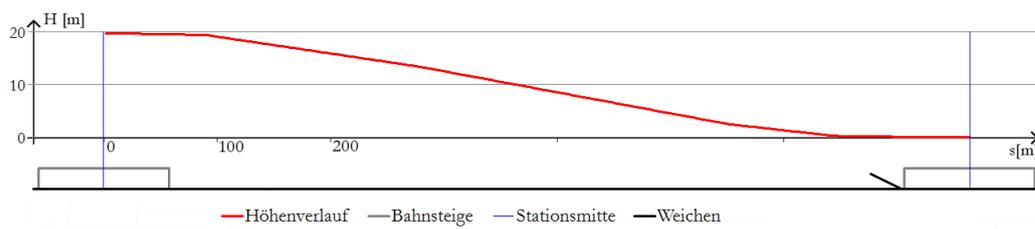


Abbildung 5.16.e: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 1, SH-WS

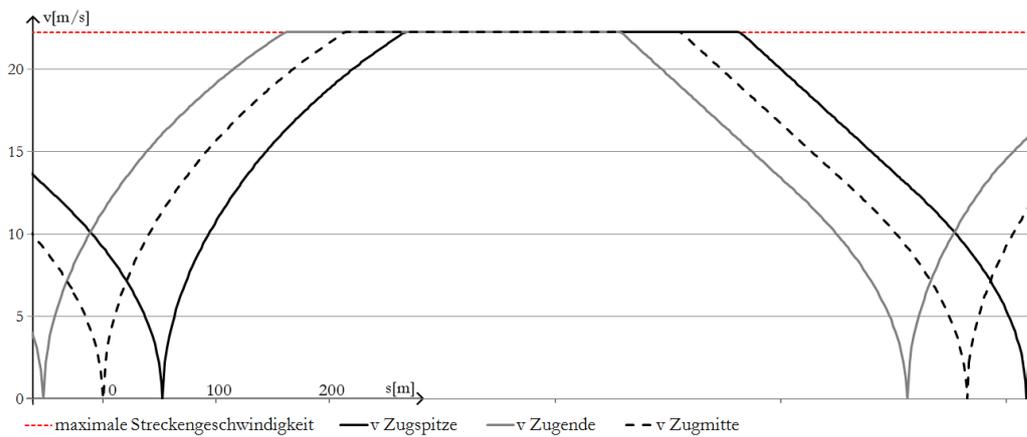


Abbildung 5.17.e: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, SH-WS

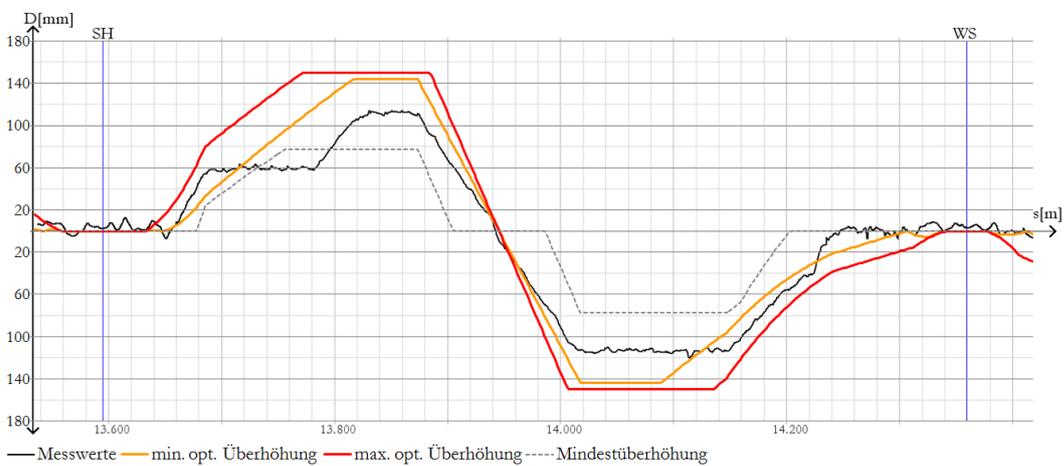


Abbildung 5.18.e: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, SH-WS

5.5.2.6 Abschnitt Westbahnhof – Zieglergasse

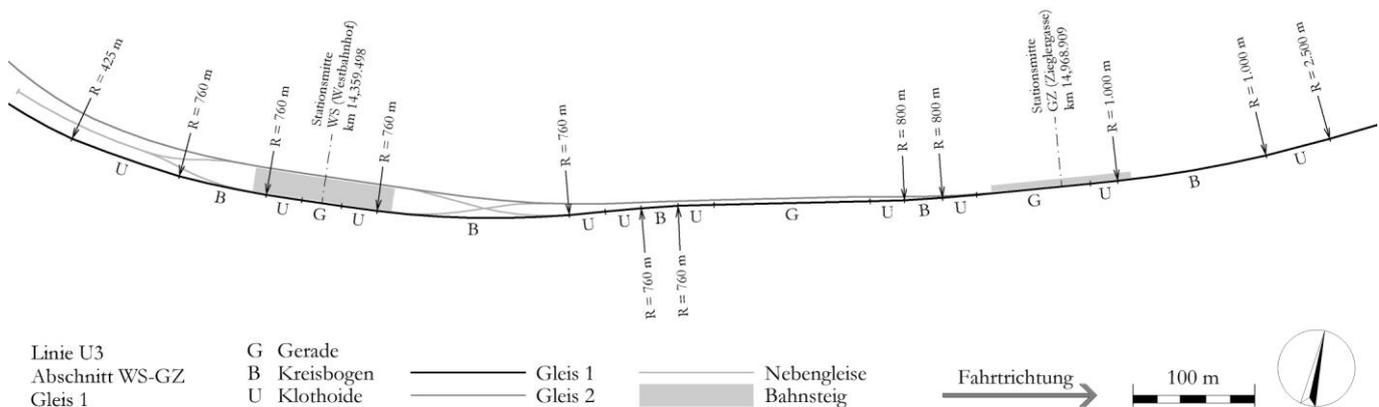


Abbildung 5.14.f: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, Abschnitt WS-GZ

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 1 zwischen den Haltestellen Westbahnhof und Zieglergasse beträgt 609,411 m. Die Höhenlage der Strecke steigt in diesem Bereich um 3,100 m in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 22,385 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befinden sich zwei Weichen in der Nähe der Station Westbahnhof aufgrund einer Überleitstelle zu Gleis 2. Im Anschluss daran weichen die Längsneigungen der beiden Tourengleise deutlich voneinander ab, da sich die Gleise in der Station Zieglergasse bereits in Doppelstocklage befinden.

Die Abb. 5.17.f zeigt, dass es aufgrund des kurzen Stationsabstandes keinen Bereich gibt, den der gesamte Zug mit gleichbleibender Höchstgeschwindigkeit passiert.

Der in Abb. 5.15.f eingetragene Krümmungsverlauf dieses Abschnitts ist gekennzeichnet durch drei Kreisbögen mit den Radien 760 m bzw. 800 m. Obwohl die Radien somit nahezu gleich groß sind, ergeben sich durch die unterschiedlichen vorherrschenden Fahrgeschwindigkeiten für alle drei Kreisbögen unterschiedliche Werte für die optimale Überhöhung, wie in Abb. 5.18.f dargestellt ist.

Während die eingebaute Überhöhung für den zweiten Bogen etwas unter dem optimalen Bereich liegt und der Überhöhungsverlauf des dritten Bogens zur Gänze im optimalen Bereich liegt, ist der erste Kreisbogen dieses Abschnitts gar nicht überhöht, obwohl die Funktionen der optimalen Überhöhung einen ansteigenden Verlauf von bis zu 70 mm ergeben. Aufgrund der in Abb. 5.16.f dargestellten Lage der Überleitstelle kann angenommen werden, dass diese aus vier Bogenweichen und einer Kreuzungsweiche bestehende Gleisverbindung der Grund für den Verzicht auf eine Überhöhung des Gleises ist.

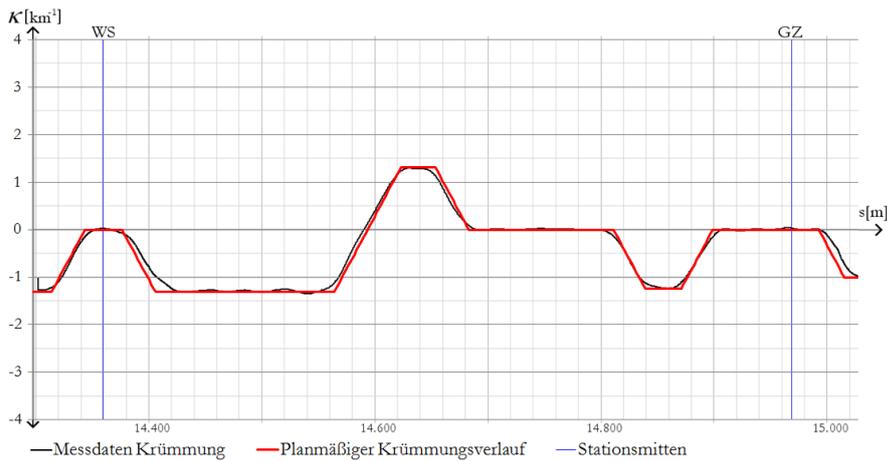


Abbildung 5.15.f: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, WS-GZ

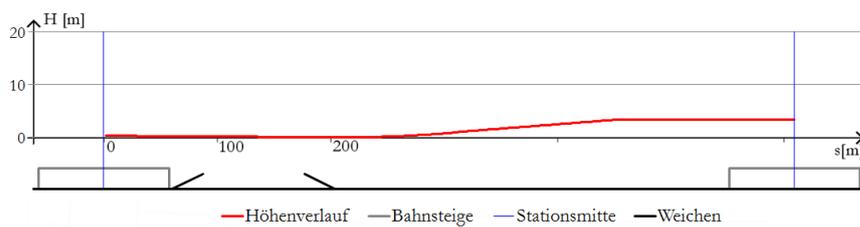


Abbildung 5.16.f: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 1, WS-GZ

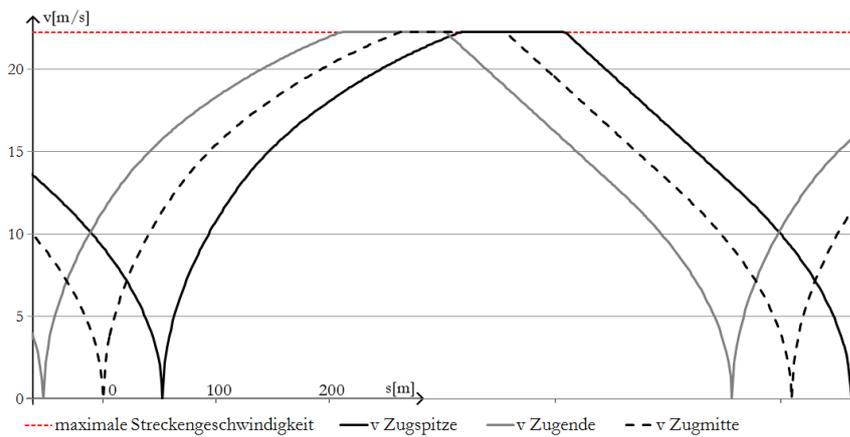


Abbildung 5.17.f: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, WS-GZ

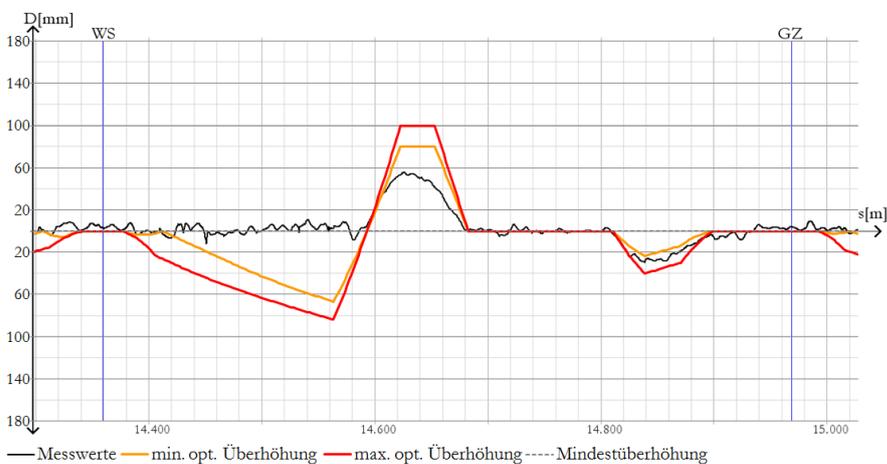


Abbildung 5.18.f: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, WS-GZ

5.5.2.7 Abschnitt Zieglergasse – Neubaugasse

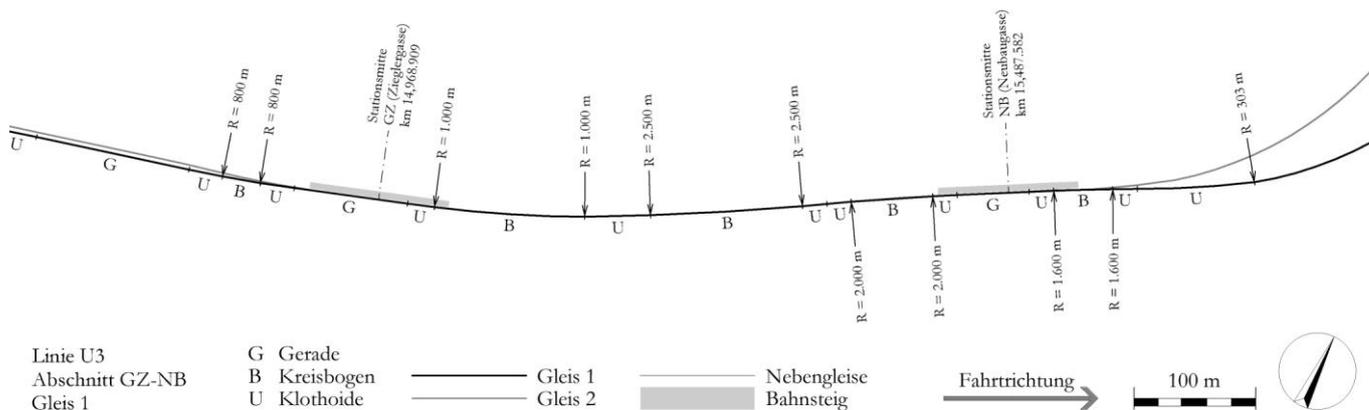


Abbildung 5.14.g: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, Abschnitt GZ-NB

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 1 zwischen den Haltestellen Zieglergasse und Neubaugasse beträgt 518,673 m. Die Höhenlage der Strecke steigt in diesem Bereich um 0,780 m in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 10,412 ‰. Entlang dieses Abschnittes verlaufen die Gleise in Doppelstocklage übereinander. Es gibt in diesem Bereich keine Weichen.

Aufgrund des kurzen Stationsabstandes wird die Höchstgeschwindigkeit nur für eine kurze Zeitspanne erreicht. Wie die Abb. 5.17.g zeigt, gibt es somit keinen Bereich, den der gesamte Zug mit gleichbleibender Höchstgeschwindigkeit passiert.

Der in Abb. 5.15.g dargestellte Krümmungsverlauf dieses Abschnittes zeigt einen noch im Bahnsteigbereich der Station Zieglergasse beginnenden Linksbogen mit einem Radius von 1.000 m, der in Form eines Korbbogens auf einen gleich gerichteten Kreisbogen mit einem Radius von 2.500 m übergeht. Daran anschließend gibt es einen Gegenbogen mit einem Radius von 2.000 m. Bei allen Krümmungswechseln sind Übergangsbögen angeordnet.

Lediglich im Bereich des ersten Kreisbogens gibt es eine eingebaute Überhöhung. Bei den anderen Bögen dieses Abschnittes ist es allerdings aufgrund der großen Bogenradien gar nicht unbedingt erforderlich, das Gleis zu überhöhen. Die Überhöhung des ersten Bogens ist allerdings nicht als konstante Überhöhung über den gesamten Kreisbogen eingebaut, sondern mit einem ansteigenden Verlauf. Offensichtlich wurde hier auf die ansteigende Fahrgeschwindigkeit Rücksicht genommen. Insgesamt gesehen gibt es in diesem Streckenabschnitt keine Abweichungen zwischen eingebauter und optimaler Überhöhung, die größer als 30 mm sind.

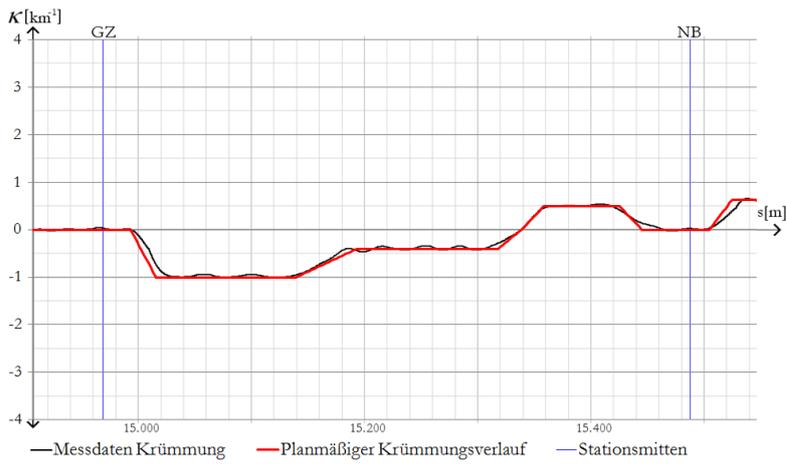


Abbildung 5.15.g: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, GZ-NB

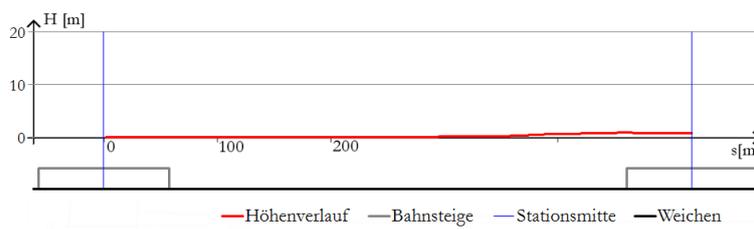


Abbildung 5.16.g: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 1, GZ-NB

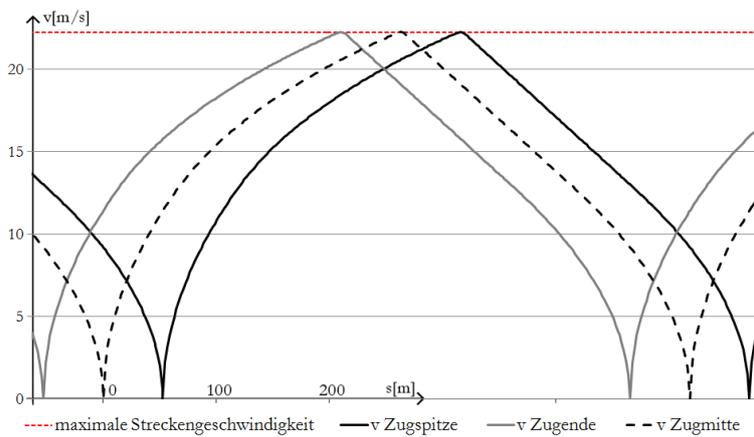


Abbildung 5.17.g: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, GZ-NB

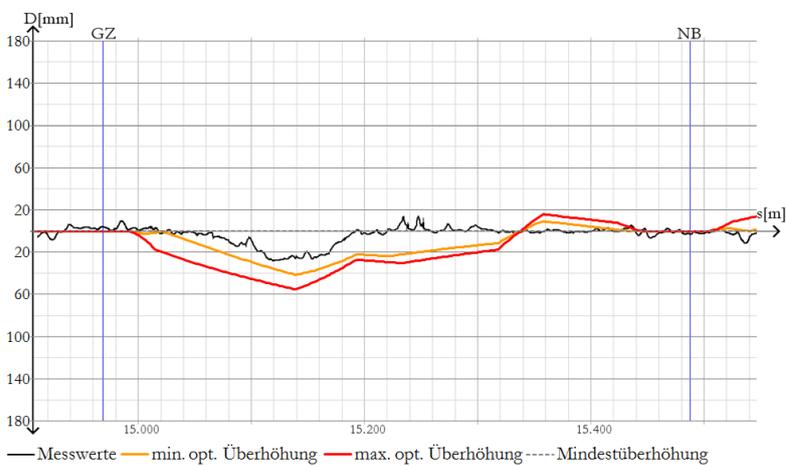


Abbildung 5.18.g: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, GZ-NB

5.5.2.8 Abschnitt Neubaugasse – Volkstheater

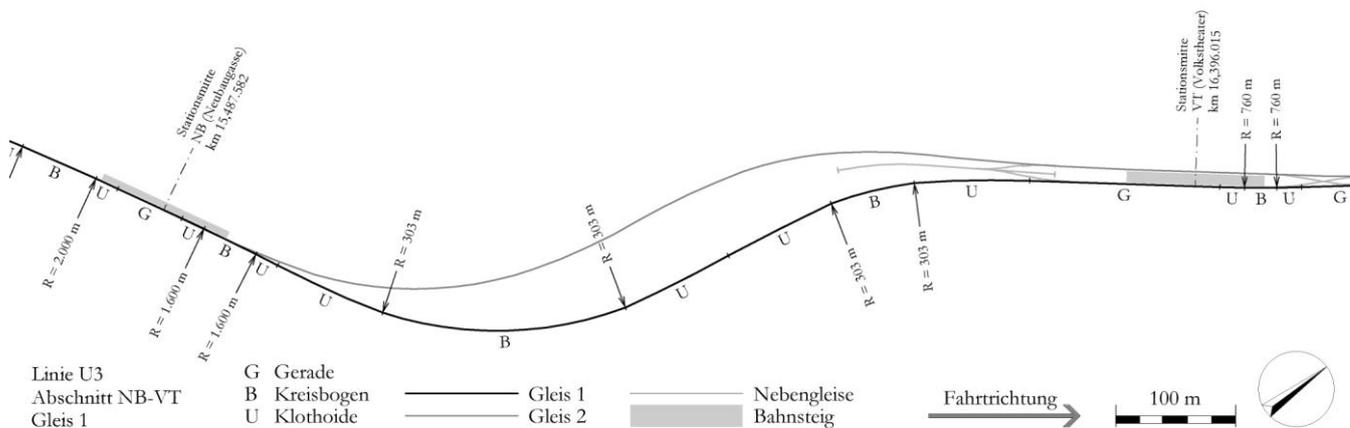


Abbildung 5.14.h: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, Abschnitt NB-VT

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 1 zwischen den Haltestellen Neubaugasse und Volkstheater beträgt 908,433 m. Die Höhenlage der Strecke verringert sich in diesem Bereich um 19,830 m in Fahrtrichtung. Die größte auftretende Neigung ist ein Gefälle von 40,000 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befindet sich eine Weiche in der Nähe der Station Volkstheater, die zu einem Abstell- bzw. Wendegleis führt. Die Doppelstocklage der Hauptgleise wird unmittelbar nach der Station Neubaugasse beendet. In der Haltestelle Volkstheater verlaufen beide Gleise wieder auf demselben Niveau.

Der in Abb. 5.15.h dargestellte Krümmungsverlauf zeigt, dass nach einem kurzen Rechtsbogen mit einem Radius von 1.600 m, der teilweise im Bahnsteigbereich liegt, das Gleis in einem langgezogenen Linksbogen mit dem Mindestradius von 303 m, gefolgt von einem gleich stark gekrümmten Gegenbogen, verläuft. Alle Krümmungswechsel sind in Form von Übergangsbögen ausgebildet. Im Bereich des ersten Rechtsbogens wird, wie in Abb. 5.18.h ersichtlich ist, keine Überhöhung benötigt.

Im Bereich der Kreisbögen mit Mindestradius zeigt sich jedoch wie schon im Abschnitt Kendlerstraße – Hütteldorfer Straße in Kap. 5.5.2.2, dass die Messwerte der eingebauten Überhöhung die maximal zulässige Überhöhung lt. Trassierungsvorschrift überschreiten. Während der Überhöhungsverlauf in den weiteren Übergangsbögen relativ nahe an den optimalen Werten liegt, wurde im Bereich des Übergangsbogens vor dem Linksbogen offensichtlich eine geringere Fahrgeschwindigkeit berücksichtigt. Der Anstieg der Überhöhung ist allerdings flacher, als es aufgrund der durch das Gefälle schnell ansteigenden Fahrgeschwindigkeit notwendig gewesen wäre, und liegt somit unter der Mindestüberhöhung. Daher müsste es aufgrund dieser Trassierung hier zu einer Geschwindigkeitsbeschränkung kommen.

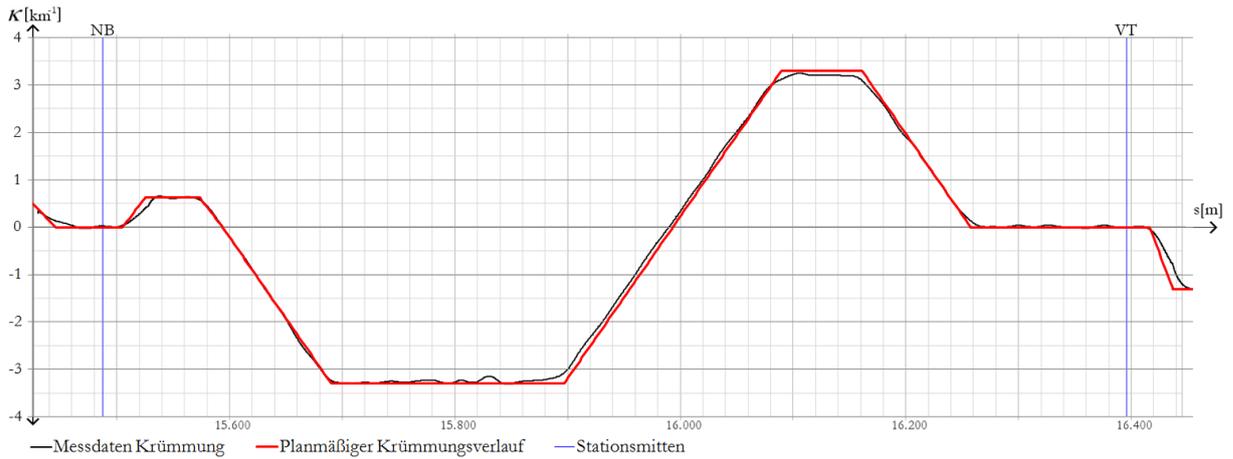


Abbildung 5.15.h: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, NB-VT

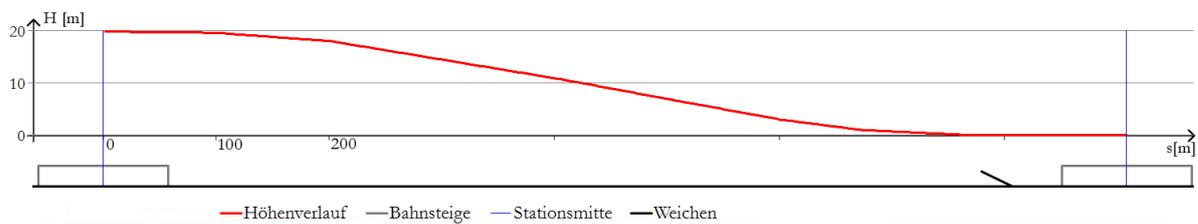


Abbildung 5.16.h: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 1, NB-VT

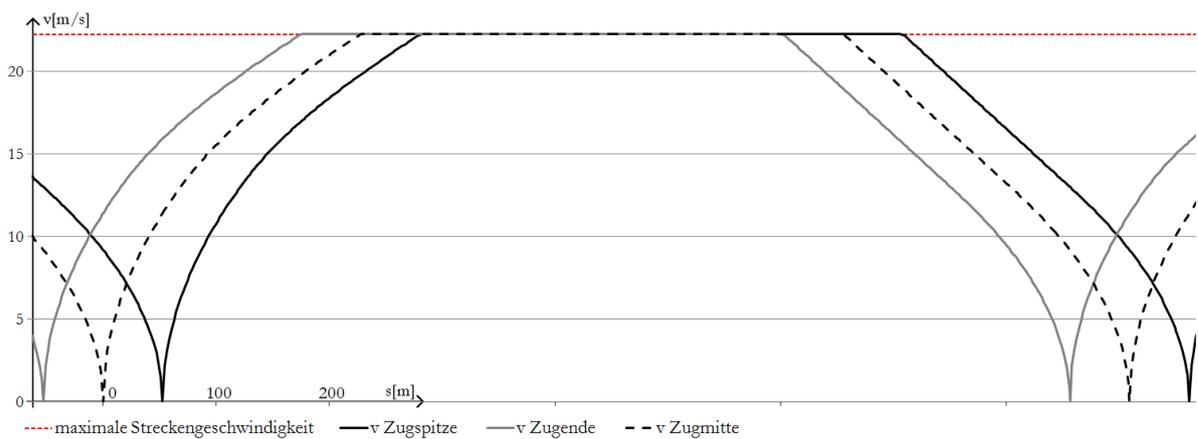


Abbildung 5.17.h: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, NB-VT

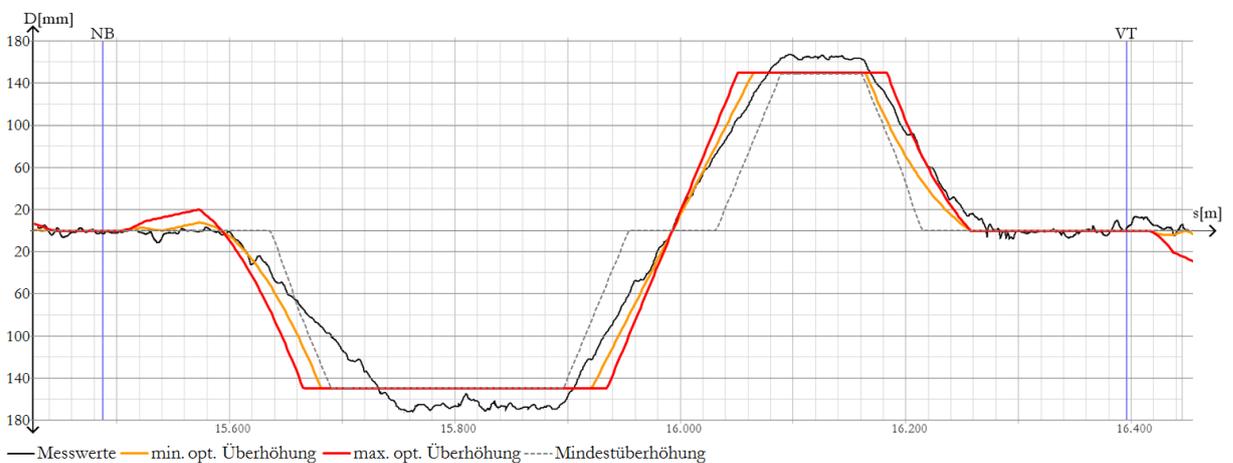


Abbildung 5.18.h: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, NB-VT

5.5.2.9 Abschnitt Volkstheater – Herrengasse

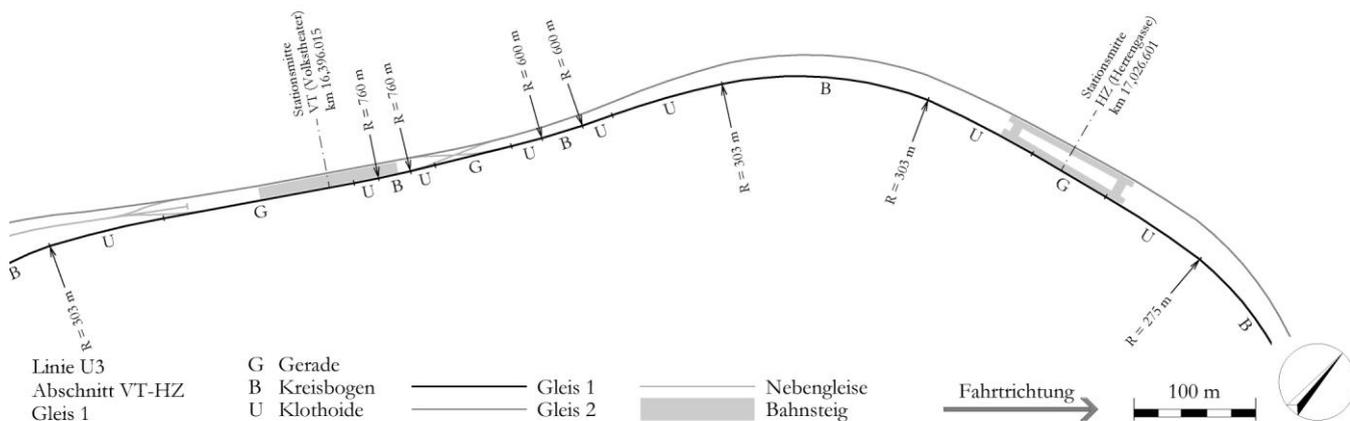


Abbildung 5.14.i: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, Abschnitt VT-HZ

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 1 zwischen den Haltestellen Volkstheater und Herrengasse beträgt 630,586 m. Die Höhenlage der Strecke verringert sich in diesem Bereich um 10,350 m in Fahrtrichtung. Die größte auftretende Neigung ist ein Gefälle von 37,169 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befinden sich in der Nähe der Station Volkstheater zwei Weichen aufgrund der Überleitstelle zu Gleis 2, deren Lage in Abb. 5.16.i ersichtlich ist.

Der in Abb. 5.15.i dargestellte Krümmungsverlauf ist durch zwei durch eine Gerade unterbrochene Linksbögen mit den Radien 760 und 600 m gekennzeichnet, an denen ein langer Rechtsbogen mit dem Mindestradius von 303 m anschließt. Der erste Kreisbogen ist vermutlich aufgrund der in diesem Bereich eingebauten Weichenverbindung ohne Überhöhung ausgeführt, wie in der Abb. 5.18.i zu sehen ist. Aufgrund des großen Radius ist hier allerdings auch keine Überhöhung nötig. Der zweite kurze Rechtsbogen führt aufgrund der vorherrschenden Fahrgeschwindigkeit und des Bogenradius zu optimalen Überhöhungen im Bereich von ca. 90 mm, was jedoch durch die eingebaute Überhöhung von ca. 40 mm nur zum Teil abgedeckt wird.

Beim anschließenden Kreisbogen mit Mindestradius zeigt sich, dass die Überhöhung nach den klassischen Trassierungsregeln eingebaut wurde. Das bedeutet, dass die Überhöhung im Kreisbogen konstant gehalten wurde und beim anschließenden Übergangsbogen linear mit dessen Krümmung abnimmt. Dabei wurde nicht berücksichtigt, dass der Übergangsbogen schon teilweise im Bahnsteig der Haltestelle Herrengasse liegt und die Fahrgeschwindigkeiten hier daher schon deutlich verringert sind. Der eingebaute Überhöhungsverlauf führt somit zu einem großen Überhöhungsüberschuss, der gemäß der Trassierungsvorschrift zu vermeiden wäre.

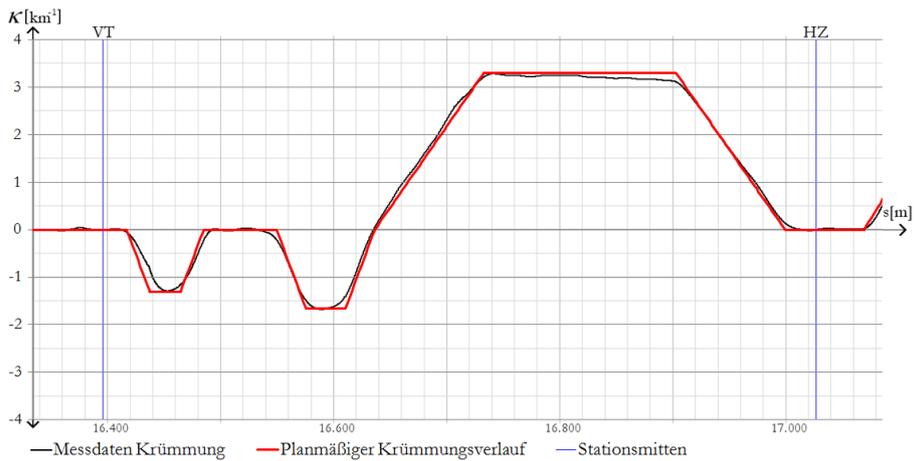


Abbildung 5.15.i: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, VT-HZ

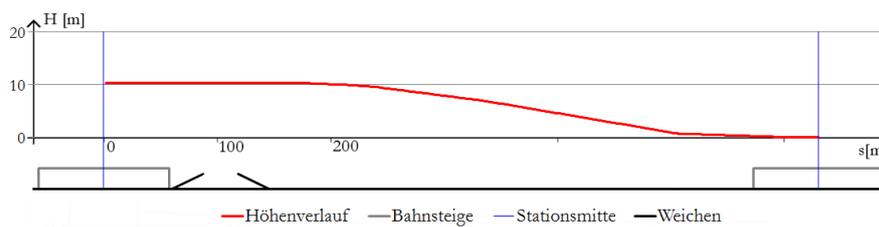


Abbildung 5.16.i: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 1, VT-HZ

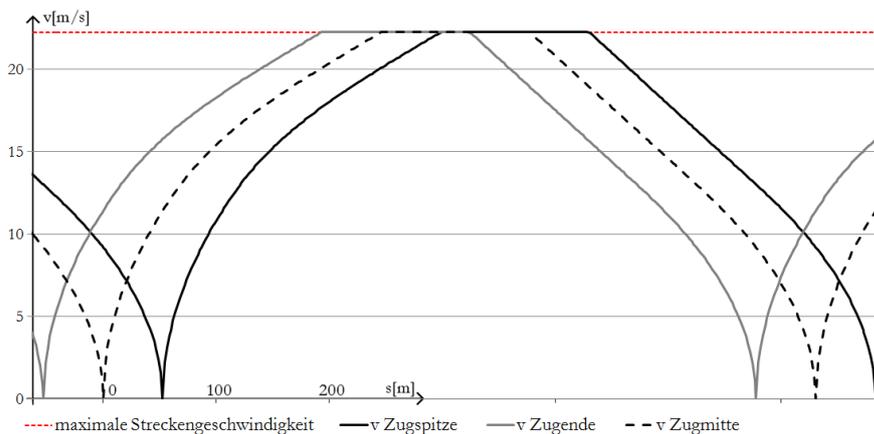


Abbildung 5.17.i: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, VT-HZ

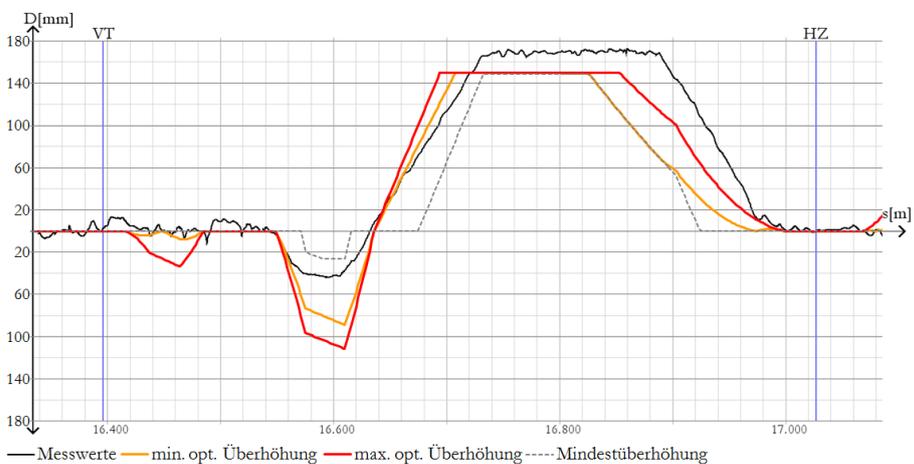


Abbildung 5.18.i: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, VT-HZ

5.5.2.10 Abschnitt Herrengasse – Stephansplatz

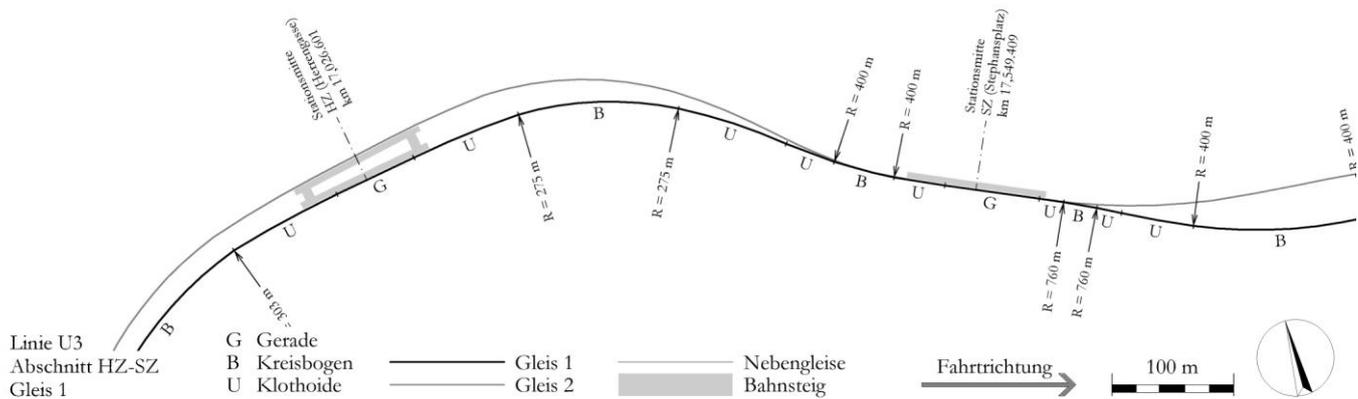


Abbildung 5.14.j: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, Abschnitt HZ-SZ

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 1 zwischen den Haltestellen Herrengasse und Stephansplatz beträgt 522,808 m. Die Höhenlage der Strecke steigt in diesem Bereich um 4,150 m in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 27,172 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befinden sich keine Weichen, da der Höhenverlauf der Hauptgleise im Anschluss an die Station Herrengasse unterschiedlich verläuft. Im Bereich der Station Stephansplatz befinden sich die Gleise schließlich in einer Doppelstocklage übereinander. Aufgrund der vorhandenen Trassierung mit Radien, die kleiner als der auf die Höchstgeschwindigkeit abgestimmte Radius sind, ist der Geschwindigkeitsverlauf zwischen diesen Stationen durch eine Reduktion der Höchstgeschwindigkeit gekennzeichnet.

Aufgrund des kurzen Stationsabstandes gibt es jedoch trotz der durch die Unterschreitung des Mindestradius verminderten Höchstgeschwindigkeit keinen Bereich, den der gesamte Zug mit gleichbleibender Höchstgeschwindigkeit passiert, wie in Abb. 5.17.j zu sehen ist.

Der in Abb. 5.15.j dargestellte Krümmungsverlauf zeigt einen Rechtsbogen mit einem Radius von 275 m, dem ein Linksbogen mit einem Radius von 400 m folgt. Alle Krümmungswechsel sind durch Übergangsbögen ausgebildet.

Eine Trassierung mit dem Mindestradius von 303 m erfordert den Einbau der maximal zulässigen Überhöhung von 150 mm. Insofern ist es interessant, dass im Bereich des Bogens mit dem Radius von 275 m eine geringere Überhöhung gewählt wurde und somit die tatsächliche zulässige Geschwindigkeit aufgrund der eingebauten Überhöhung zusätzlich verringert werden müsste. In Abb. 5.18.j sieht man, dass die Überhöhung im ersten Bogen unter der für das in Abb. 5.17.j dargestellte Geschwindigkeitsprofil erforderlichen Mindestüberhöhung liegt. Die eingebaute Überhöhung im zweiten Bogen liegt jedoch im optimalen Bereich.

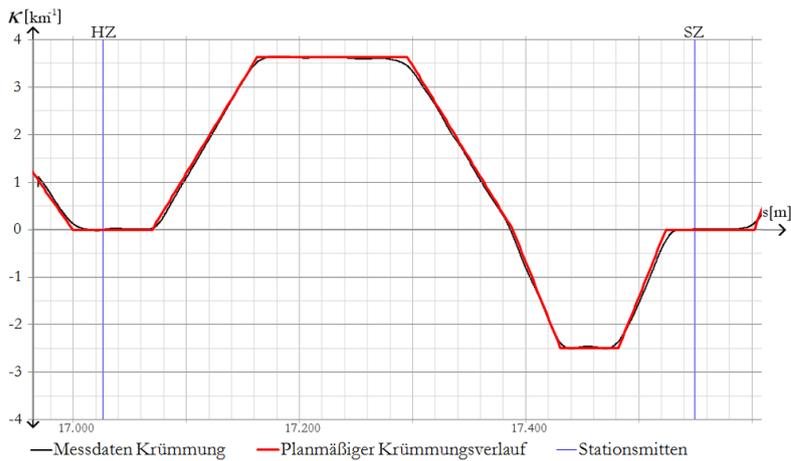


Abbildung 5.15.j: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, HZ-SZ

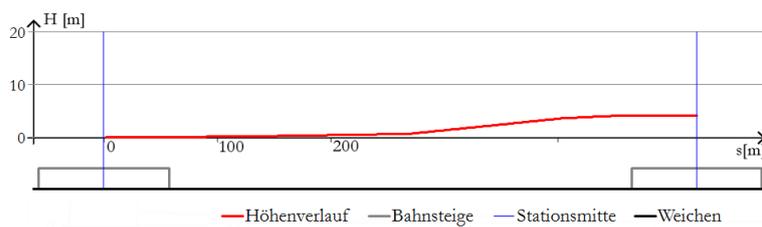


Abbildung 5.16.j: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 1, HZ-SZ

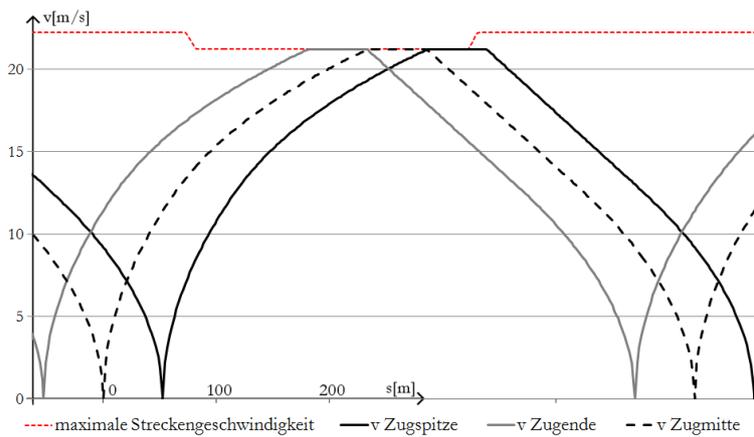


Abbildung 5.17.j: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, HZ-SZ

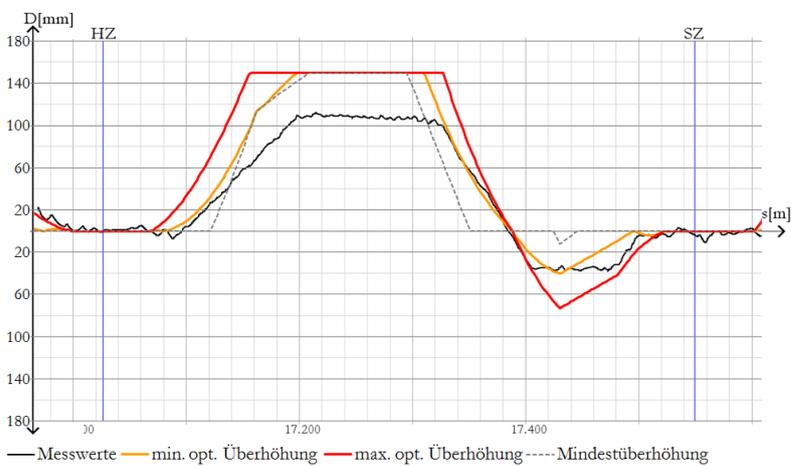


Abbildung 5.18.j: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, HZ-SZ

5.5.2.11 Abschnitt Stephansplatz – Stubentor

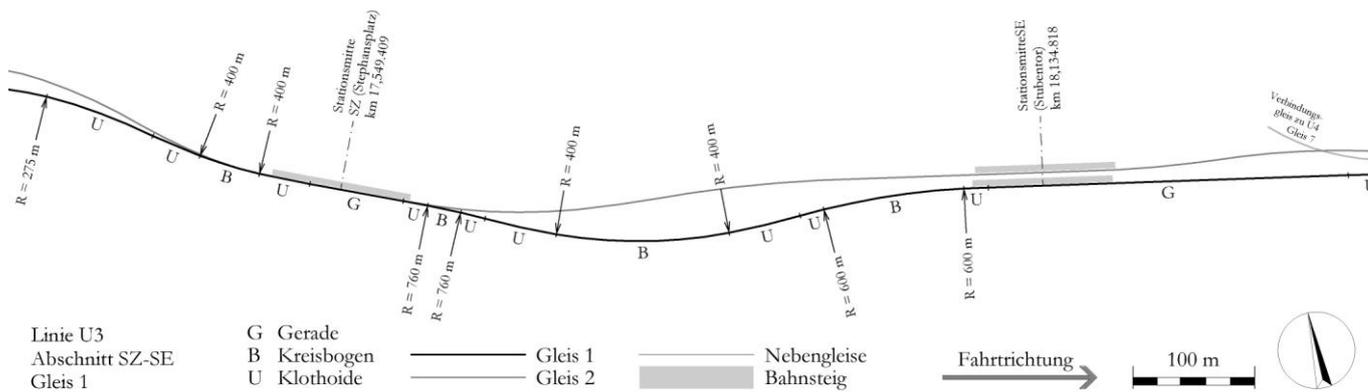


Abbildung 5.14.k: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, Abschnitt SZ-SE

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 1 zwischen den Haltestellen Stephansplatz und Stubentor beträgt 585,409 m. Die Höhenlage der Strecke verringert sich in diesem Bereich um 9,200 m in Fahrtrichtung. Die größte auftretende Neigung ist ein Gefälle von 33,964 ‰. In diesem Bereich verlaufen die beiden Hauptgleise im Anschluss an die Station Stephansplatz nicht unmittelbar übereinander, die unterschiedliche Höhenlage wird jedoch bis nach der Haltestelle Stubentor beibehalten. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befinden sich keine Weichen.

Der Krümmungsverlauf gemäß Abb. 5.15.k zeigt einen kurzen Rechtsbogen mit einem Radius von 760 m unmittelbar nach der Haltestelle Stephansplatz. Anschließend verläuft die Trasse mit einem Linksbogen von 400 m und einem Rechtsbogen von 600 m bis zur Station Stubentor, wobei alle Kreisbögen von Übergangsbögen flankiert sind.

Wie man in der Abb. 5.18.k sehen kann, wurde beim ersten Kreisbogen auf eine Überhöhung verzichtet, was durch die relativ geringen Fahrgeschwindigkeiten begründet werden kann.

Der eingebaute Überhöhungsverlauf für den zweiten Kreisbogen lässt darauf schließen, dass die geringeren Fahrgeschwindigkeiten im Bereich des Bogenanfangs durch eine flachere Überhöhungsrampe berücksichtigt werden sollten. Allerdings ist dieser Anstieg der Überhöhung dadurch deutlich unter dem optimalen Bereich und sie unterschreitet auch den Betrag der für das in Abb. 5.17.k dargestellte Geschwindigkeitsprofil notwendigen Mindestüberhöhung.

Beim dritten Kreisbogen nimmt die optimale Überhöhung gegen Ende des Kreisbogens aufgrund der verringerten Geschwindigkeiten ab. Die eingebaute Überhöhung ist zwar über einen Teil des Bogens konstant, verringert sich jedoch bereits vor dem Bogenende und weicht dadurch insgesamt nicht allzu stark vom optimalen Verlauf ab.

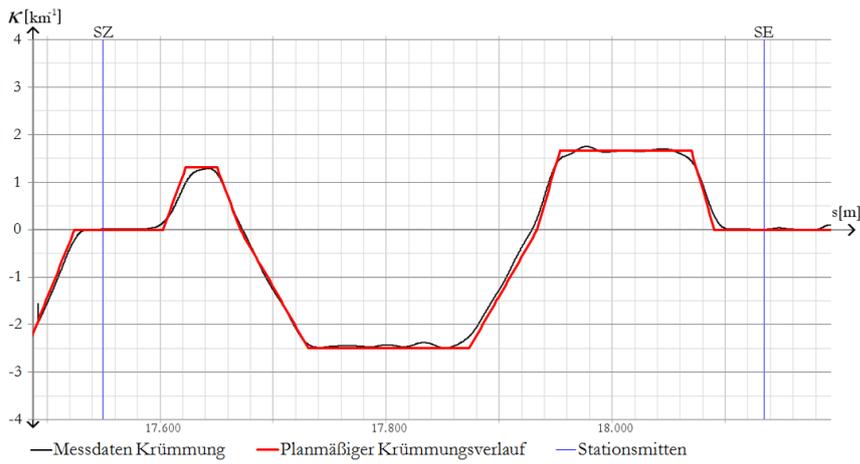


Abbildung 5.15.k: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, SZ-SE

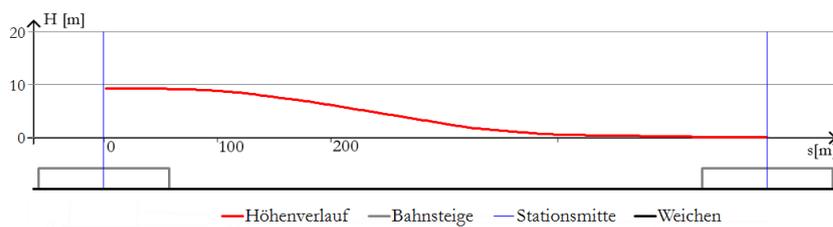


Abbildung 5.16.k: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 1, SZ-SE

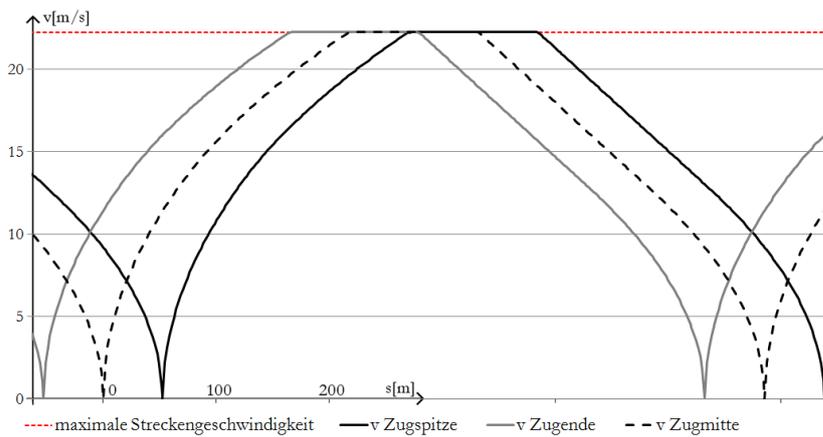


Abbildung 5.17.k: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, SZ-SE

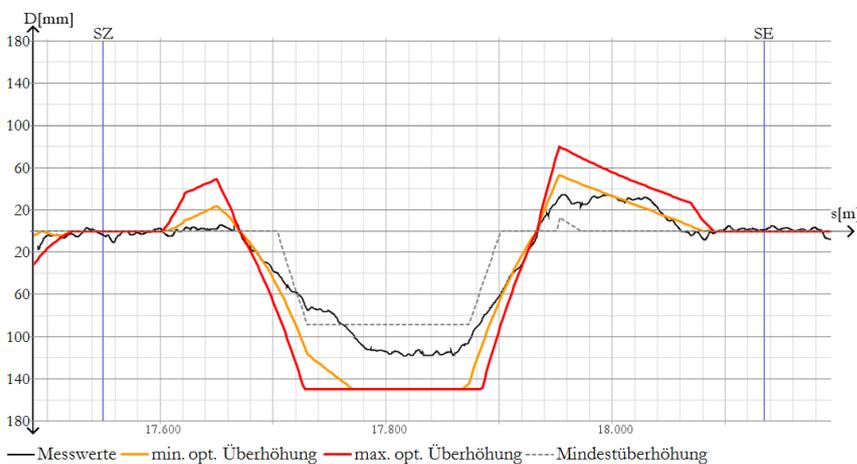


Abbildung 5.18.k: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, SZ-SE

5.5.2.12 Abschnitt Stubentor – Landstraße

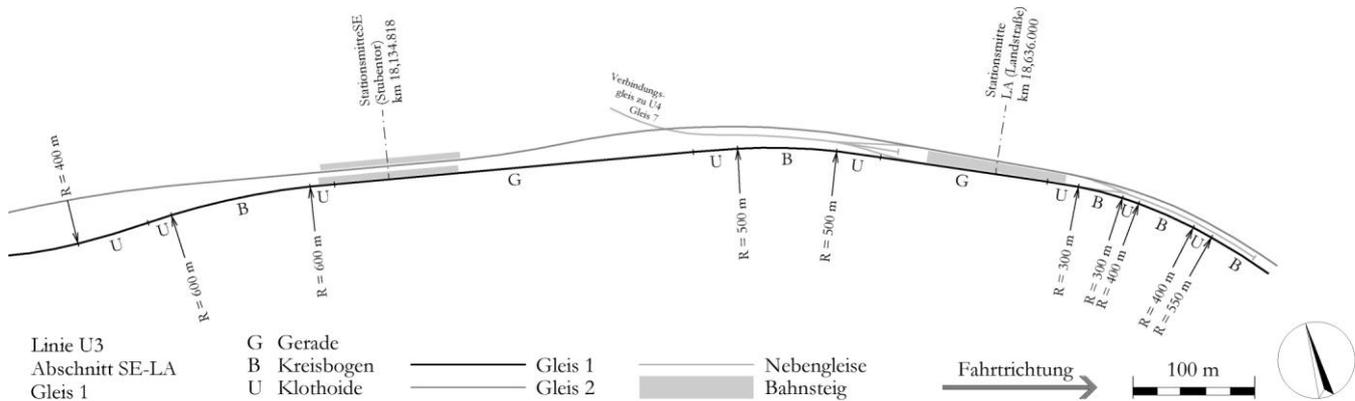


Abbildung. 5.14.l: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, Abschnitt SE-LA

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 1 zwischen den Haltestellen Stubentor und Landstraße beträgt 501,182 m. Die Höhenlage der Strecke verringert sich in diesem Bereich um 1,420 m in Fahrtrichtung. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 8,133 ‰. Während die Bahnsteige der Hauptgleise in der Haltestelle Stubentor noch auf unterschiedlichen Ebenen liegen, gleicht sich das Niveau der beiden Gleise bis zur Station Landstraße, die mit einem Mittelbahnsteig versehen ist, wieder an. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befindet sich eine Weiche, die zu Gleis 7, dem Verbindungsgleis zur U4, führt.

Aufgrund des kurzen Stationsabstandes wird die Höchstgeschwindigkeit nur für eine kurze Zeitspanne erreicht. Somit gibt es keinen Bereich, den der gesamte Zug mit gleichbleibender Höchstgeschwindigkeit passiert.

Der in Abb. 5.15.1 abgebildete Krümmungsverlauf zeigt, dass dieser Streckenabschnitt zum Großteil gerade verläuft. Ein Kreisbogen mit einem Radius von 500 m befindet sich im Bereich der abnehmenden Fahrgeschwindigkeit, wie man aus der Abb. 5.17.1 ersehen kann. Der optimale Überhöhungsverlauf für diesen Kreisbogen wäre daher ebenfalls abnehmend, wie in Abb. 5.18.1 dargestellt ist. Der eingebaute Überhöhungsverlauf wurde über die Länge des Kreisbogens konstant gewählt und liegt am Bogenanfang exakt im Bereich der notwendigen Mindestüberhöhung. Am Bogenanfang gibt es somit eine Abweichung der eingebauten Überhöhung vom optimalen Bereich, am Bogenende jedoch nicht.

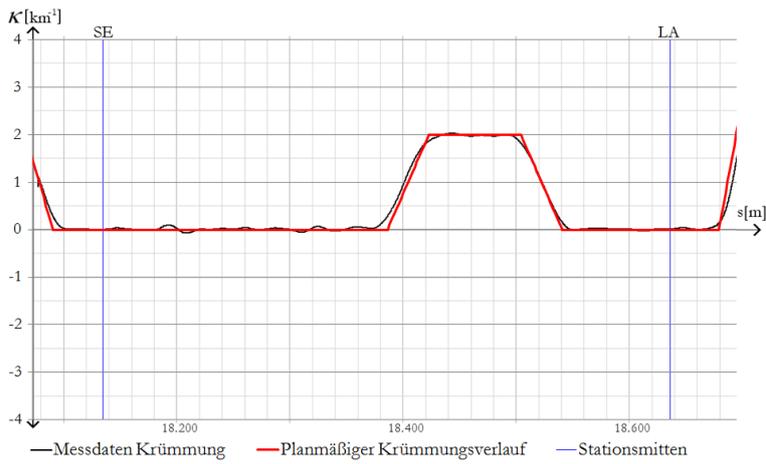


Abbildung 5.15.l: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, SE-LA

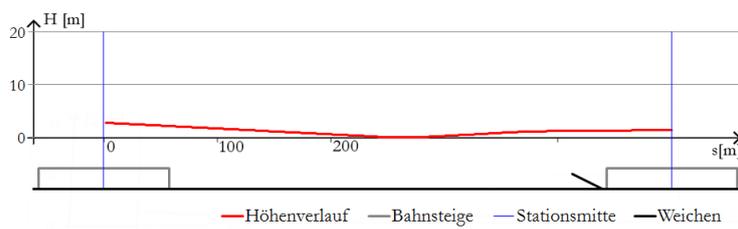


Abbildung 5.16.l: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 1, SE-LA

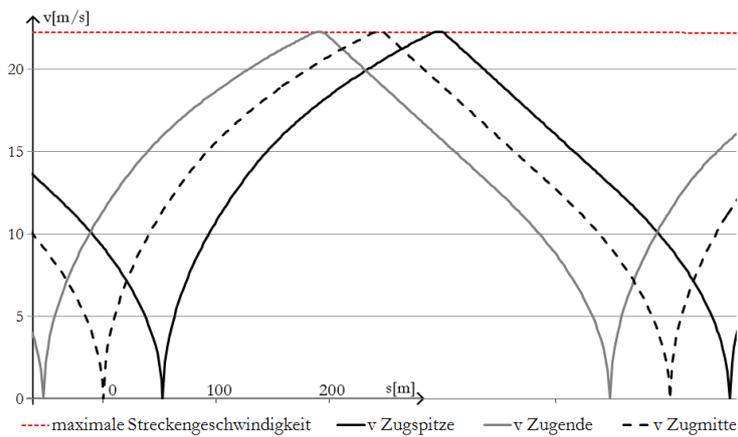


Abbildung 5.17.l: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, SE-LA

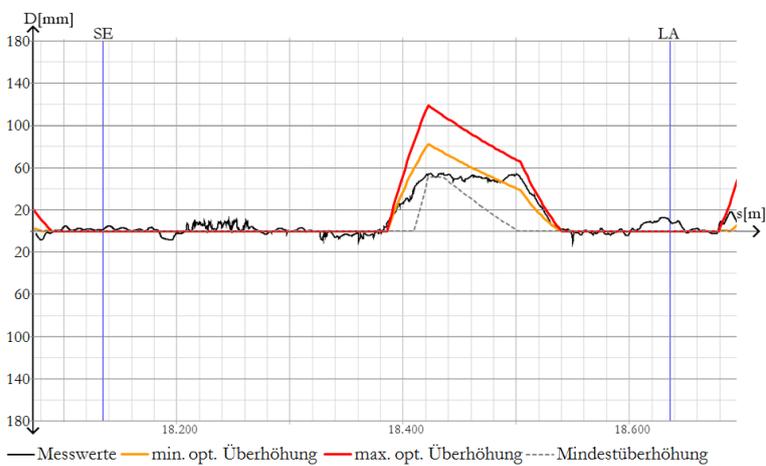


Abbildung 5.18.l: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, SE-LA

5.5.2.13 Abschnitt Landstraße – Rochusgasse

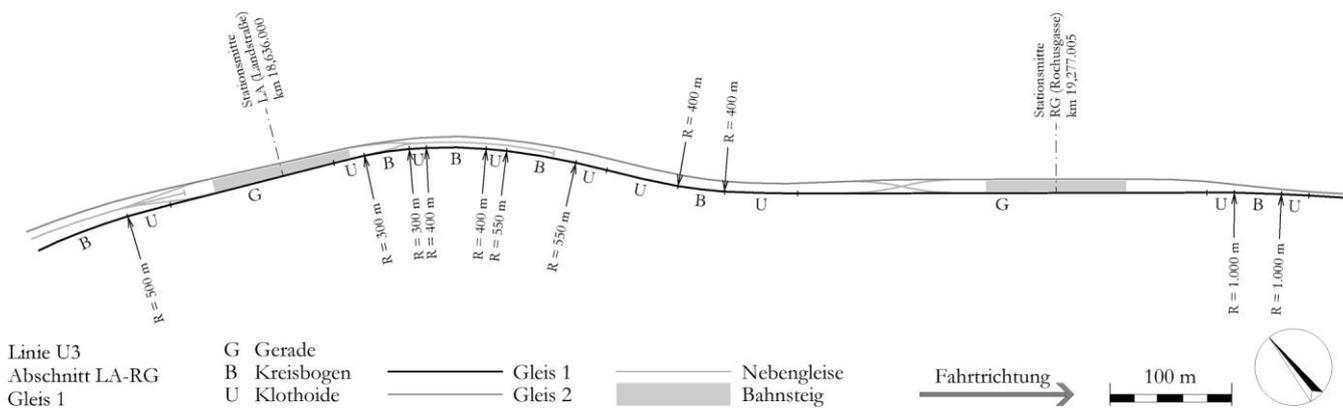


Abbildung 5.14.m: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, Abschnitt LA-RG

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 1 zwischen den Haltestellen Landstraße und Rochusgasse beträgt 641,005 m. Die Höhenlage der Strecke steigt in diesem Bereich um 7,086 m in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 31,303 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befinden sich drei Weichen aufgrund eines Abstell- bzw. Wendegleises in der Nähe der Station Landstraße sowie einer Überleitstelle vor der Station Rochusgasse, deren Lage in der Abb. 5.16 m eingetragen ist.

Aufgrund des kurzen Stationsabstandes und der starken Steigung gibt es keinen Bereich, den der gesamte Zug mit gleichbleibender Höchstgeschwindigkeit passiert.

Der in der Abb. 5.15.m dargestellte Krümmungsverlauf zeigt einen unmittelbar nach dem Haltestellenende beginnenden dreifachen Korbbogen mit den Radien 300, 400 und 550 m. Danach folgt ein Linksbogen mit einem Radius von 400 m. Im Bereich der Krümmungswechsel ist jeweils ein Übergangsbogen angeordnet.

Aufgrund der schrittweisen Abnahme der Radien und der ansteigenden Fahrgeschwindigkeit im Bereich des Korbbogens könnte man mit einer über den Verlauf dieses Bogens konstanten Überhöhung von ca. 100 mm während des gesamten Verlaufs im Bereich der optimalen Überhöhung bleiben, wie in der Abb. 5.18.m zu sehen ist. Die eingebaute Überhöhung ist jedoch vermutlich aufgrund der Weiche am Beginn des Bogens im Bereich des Radius von 300 m null und steigt dann auf knapp 50 mm an. Dadurch ist der tatsächliche Überhöhungsverlauf geringer als die aufgrund des in Abb. 5.17.m dargestellten Geschwindigkeitsprofils notwendige Mindestüberhöhung, was zu einer Geschwindigkeitsbeschränkung führen müsste. Auch der anschließende Linksbogen ist mit einer Überhöhung versehen, die deutlich unter dem optimalen Bereich und ebenfalls unter der Mindestüberhöhung liegt.

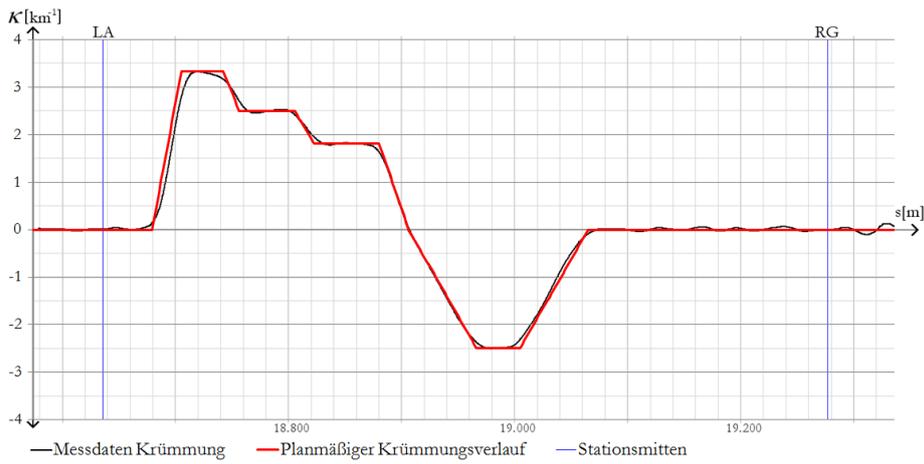


Abbildung 5.15.m: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, LA-RG

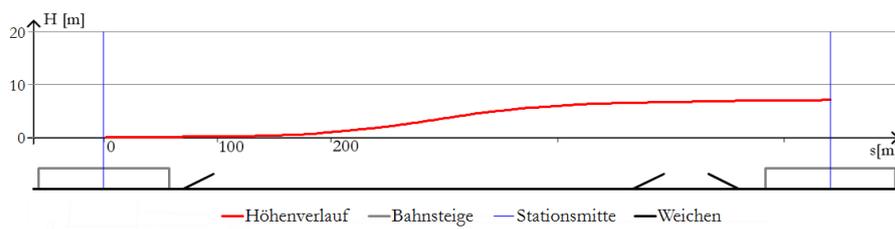


Abbildung 5.16.m: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 1, LA-RG

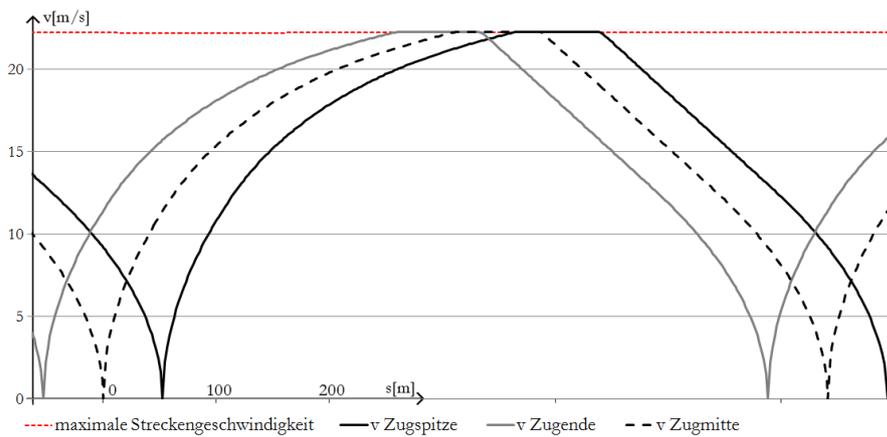


Abbildung 5.17.m: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, LA-RG

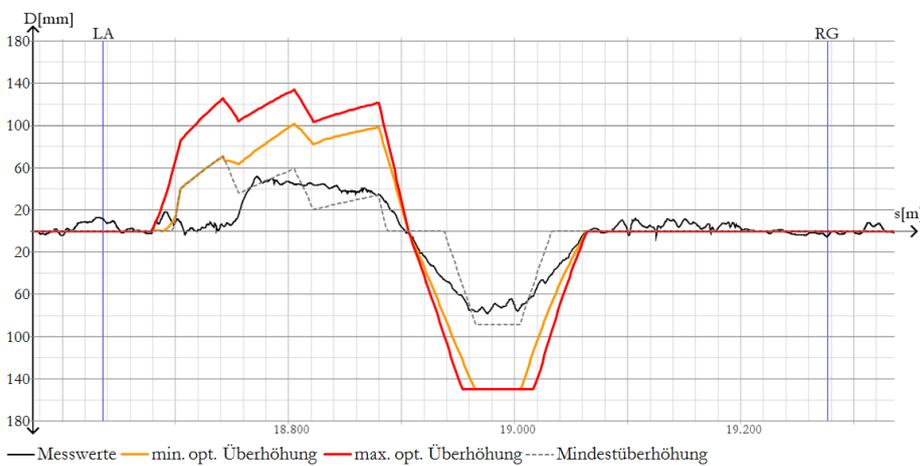


Abbildung 5.18.m: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, LA-RG

5.5.2.14 Abschnitt Rochusgasse – Kardinal-Nagl-Platz

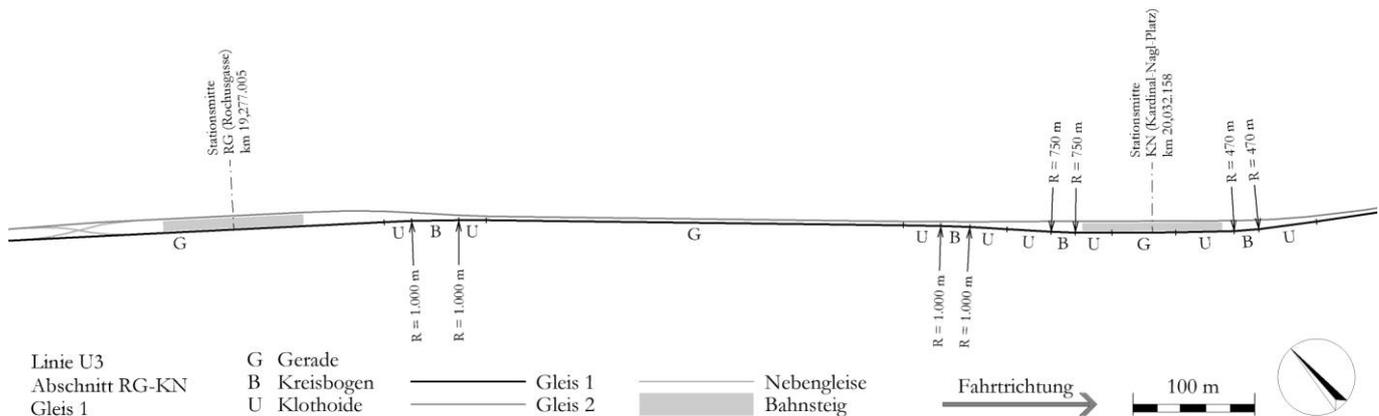


Abbildung 5.14.n: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, Abschnitt RG-KN

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 1 zwischen den Haltestellen Rochusgasse und Kardinal-Nagl-Platz beträgt 755,153 m. Die Höhenlage der Strecke steigt in diesem Bereich um 3,806 m in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 13,000 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befinden sich keine Weichen.

Der annähernd geradlinige Verlauf dieses Streckenabschnittes ist in Abb. 5.15.n zu sehen. Die drei vorhandenen Kreisbögen mit den Radien von 1.000 bzw. 750 m dienen zur Vergrößerung der Gleisabstände für das Anfahren der Mittelbahnsteige und liegen jeweils im Beschleunigungs- bzw. Bremsbereich, wie aus der Abb. 5.17.n ersichtlich ist. Die optimale Überhöhung für diese Bögen liegt bei maximal 60 mm. Zwar ist die tatsächlich eingebaute Überhöhung stets geringer als der Bereich der optimalen Überhöhung, wie in Abb. 5.18.n dargestellt ist, die Abweichung ist mit maximal 20 mm allerdings nicht besonders groß.

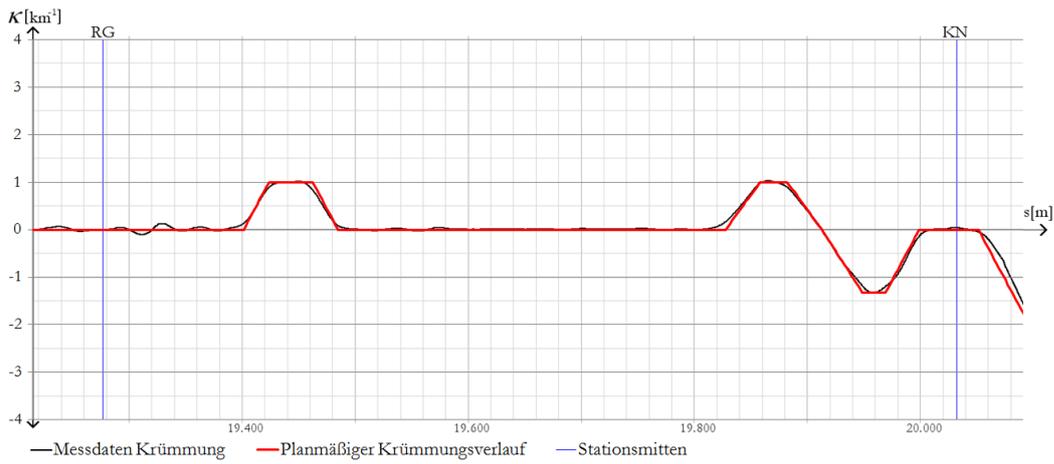


Abbildung 5.15.n: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, RG-KN

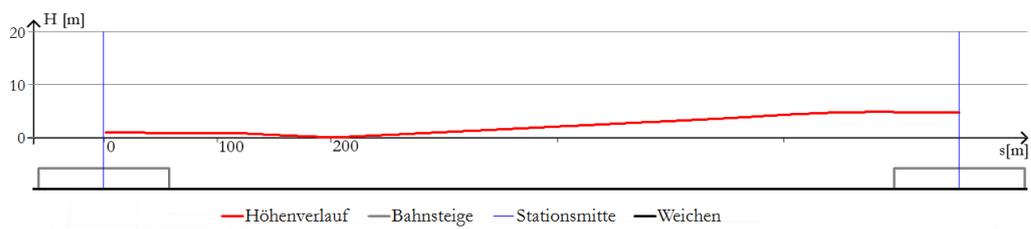


Abbildung 5.16.n: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 1, RG-KN

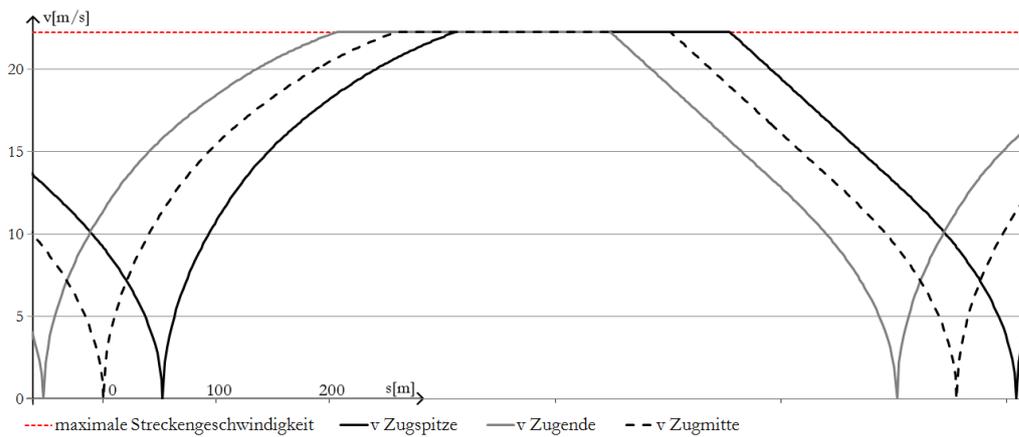


Abbildung 5.17.n: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, RG-KN

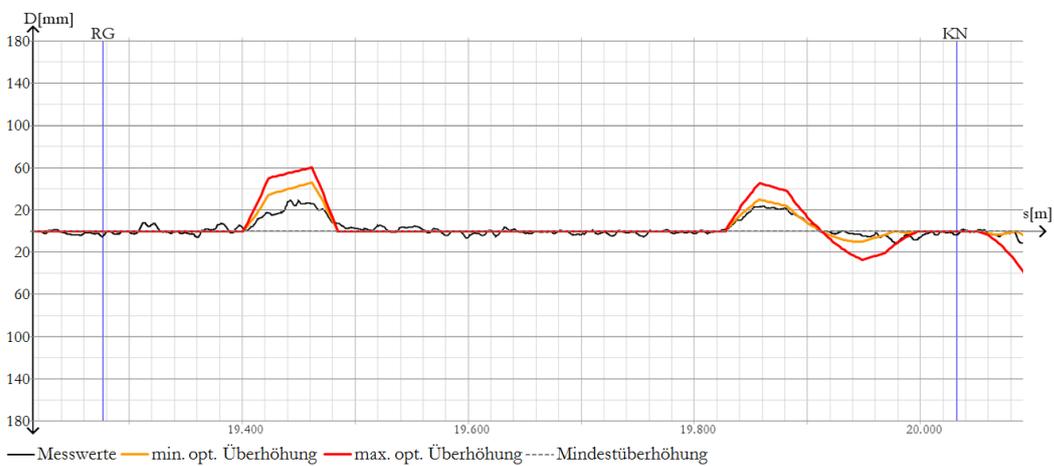


Abbildung 5.18.n: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, RG-KN

5.5.2.15 Abschnitt Kardinal-Nagl-Platz – Schlachthausgasse

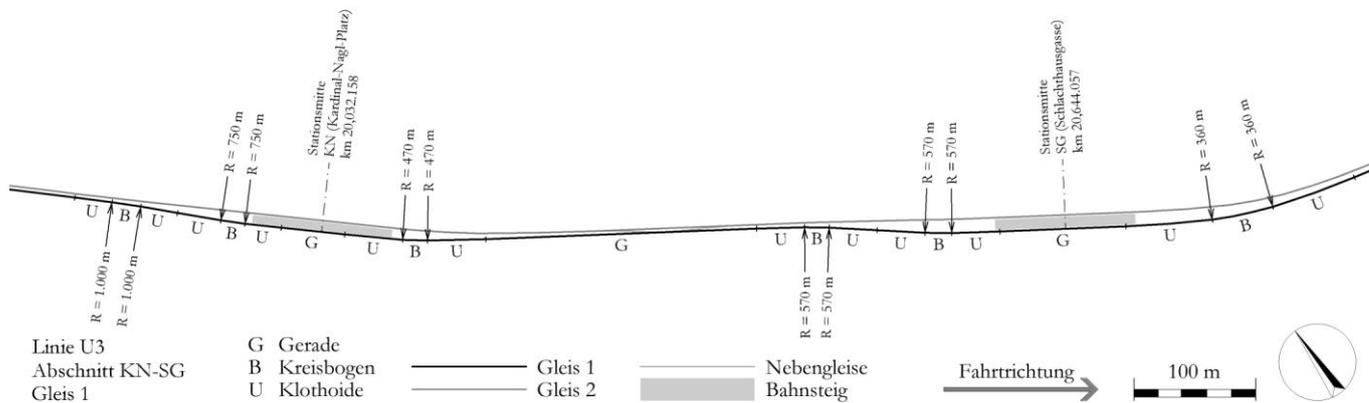


Abbildung 5.14.o: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, Abschnitt KN-SG

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 1 zwischen den Haltestellen Kardinal-Nagl-Platz und Schlachthausgasse beträgt 611,899 m. Die Höhenlage der Strecke verringert sich in diesem Bereich um 6,564 m in Fahrtrichtung. Die größte auftretende Neigung ist ein Gefälle von 20,770 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befinden sich zwei Weichen aufgrund einer Überleitstelle zu Gleis 2, deren Lage in der Abb. 5.16.o dargestellt ist.

Der Krümmungsverlauf dieses Streckenabschnittes ist in Abb. 5.15.o dargestellt. Er zeigt einen kurzen Linksbogen mit einem Radius von 470 m unmittelbar nach der Haltestelle Kardinal-Nagl-Platz und eine Folge von Rechts- und Linksbogen mit einem Radius von jeweils 570 m im Bereich vor der Station Schlachthausgasse.

Während der erste Kreisbogen nicht überhöht ist, wie in Abb. 5.18.o zu sehen ist, bleibt die eingebaute Überhöhung im Bereich des zweiten Kreisbogens etwas unter dem optimalen Bereich. Beim dritten Kreisbogen liegt die ausgeführte Überhöhung jedoch zur Gänze im Bereich der optimalen Überhöhung. Aufgrund des in Abb. 5.16.o abgebildeten Geschwindigkeitsverlaufs liegt der Bereich der optimalen Überhöhung beim ersten Kreisbogen sogar etwas höher als beim dritten. Insofern ist nicht ganz verständlich, warum beim ersten Bogen auf eine Überhöhung gänzlich verzichtet wurde, zumal es hier auch keine Weichen gibt, die eine Begründung dafür darstellen könnten.

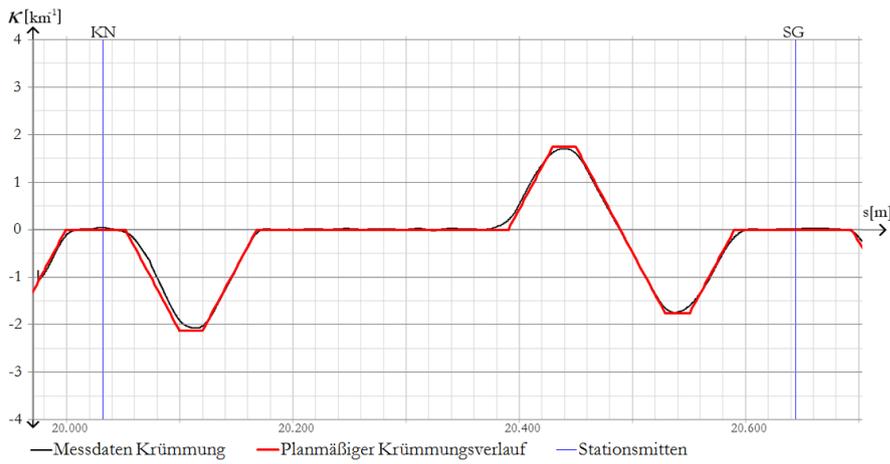


Abbildung 5.15.o: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, KN-SG

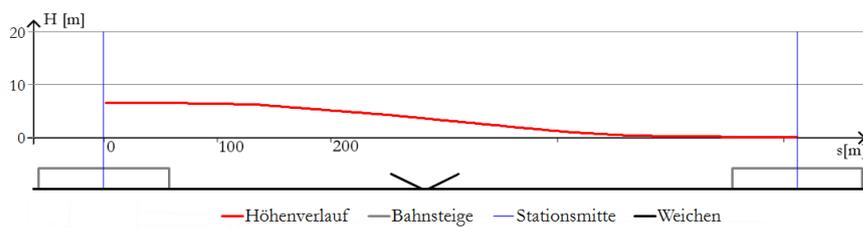


Abbildung 5.16.o: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 1, KN-SG

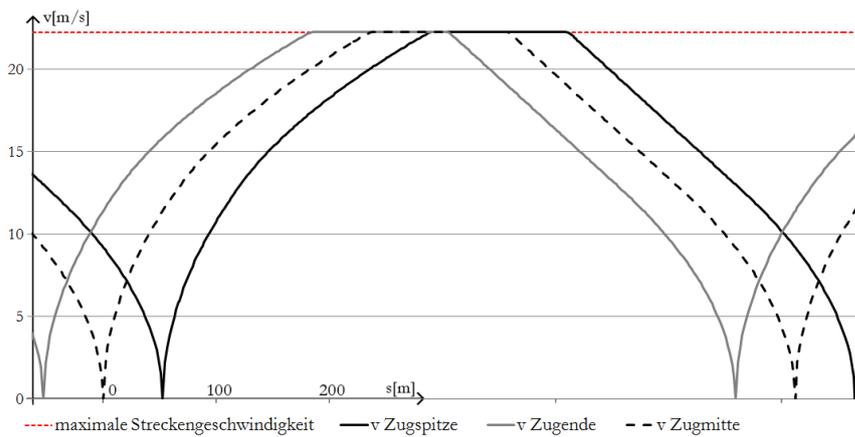


Abbildung 5.17.o: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, KN-SG

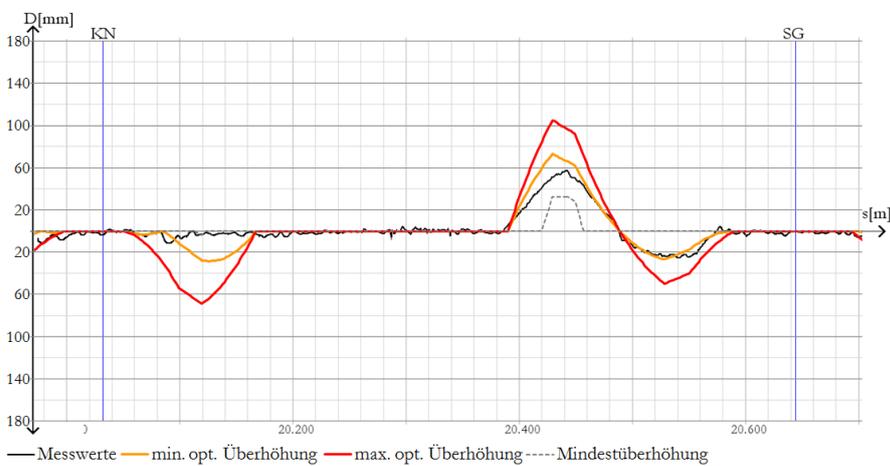


Abbildung 5.18.o: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, KN-SG

5.5.2.16 Abschnitt Schlachthausgasse – Erdberg

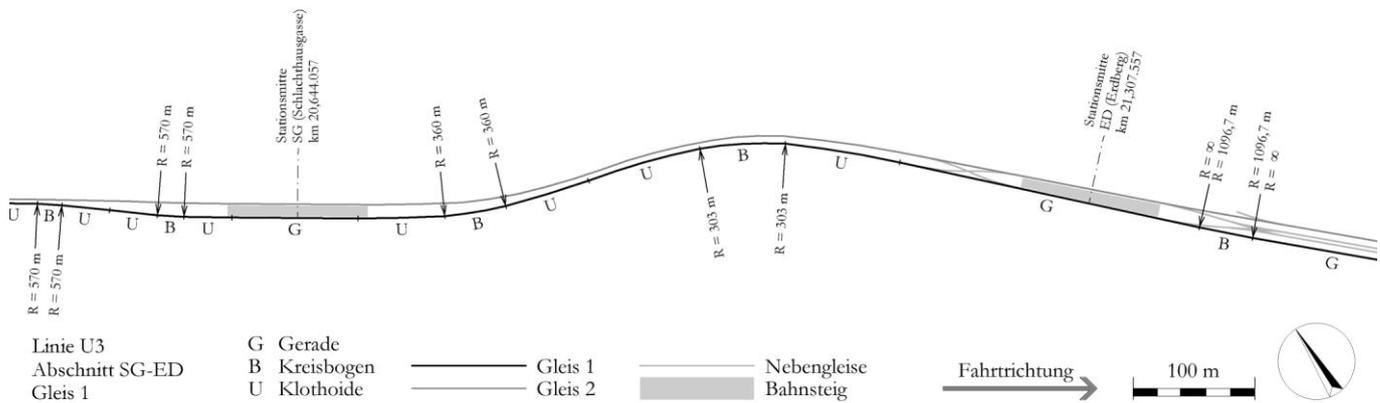


Abbildung 5.14.p: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, Abschnitt SG-ED

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 1 zwischen den Haltestellen Schlachthausgasse und Erdberg beträgt 663,500 m. Im Bereich der Haltestelle Schlachthausgasse verläuft die Trasse noch unterirdisch, erreicht aber bis zur Station Erdberg Niveaulage. Die Höhenlage der Strecke steigt in diesem Bereich um 6,146 m in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 33,435 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befinden sich zwei Weichen im Bereich der Station Erdberg aufgrund einer Überleitstelle zu Gleis 2, deren Lage in der Abb. 5.16.p dargestellt ist.

Der in Abb. 5.15.p dargestellte Krümmungsverlauf dieses Streckenabschnittes zeigt einen Linksbogen mit einem Radius von 360 m gefolgt von einem Gegenbogen mit dem Mindestradius von 303 m. Die Kreisbögen werden jeweils von Übergangsbögen flankiert. Während der zweite Bogen in einem Bereich liegt, wo zumindest Teile des Zuges die Höchstgeschwindigkeit erreichen, ist der erste Bogen im Beschleunigungsbereich angeordnet, wie man durch die Abb. 5.17.p erkennen kann. Die eingebaute Überhöhung ist hier deutlich geringer als beim zweiten Bogen. Dabei bleibt sie jedoch unter dem Bereich der optimalen Überhöhung und liegt teilweise sogar unter der Mindestüberhöhung, die aufgrund des in Abb. 5.17.p dargestellten Geschwindigkeitsverlaufs erforderlich ist. Somit müsste es in diesem Bereich zu einer Geschwindigkeitsreduktion aufgrund der Überhöhung kommen.

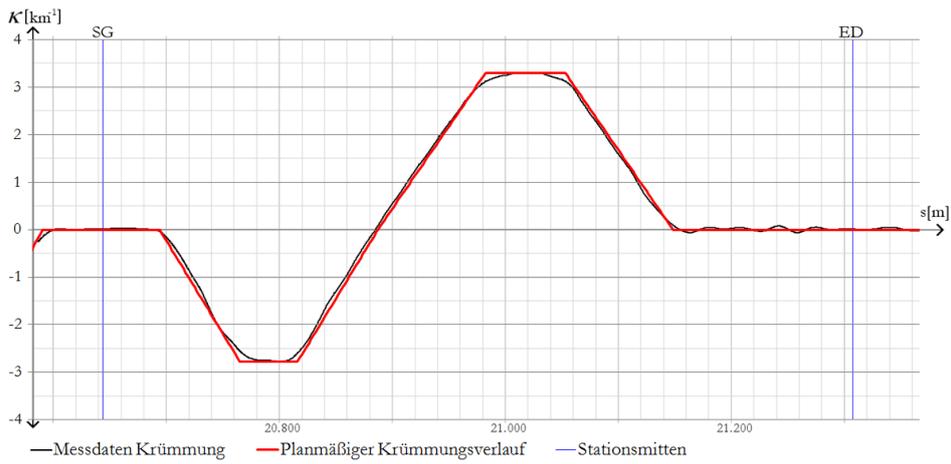


Abbildung 5.15.p: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, SG-ED

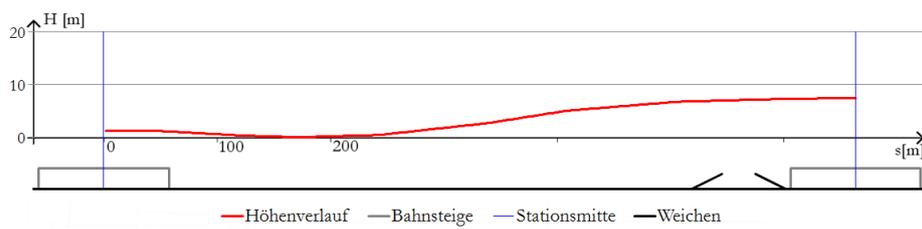


Abbildung 5.16.p: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 1, SG-ED

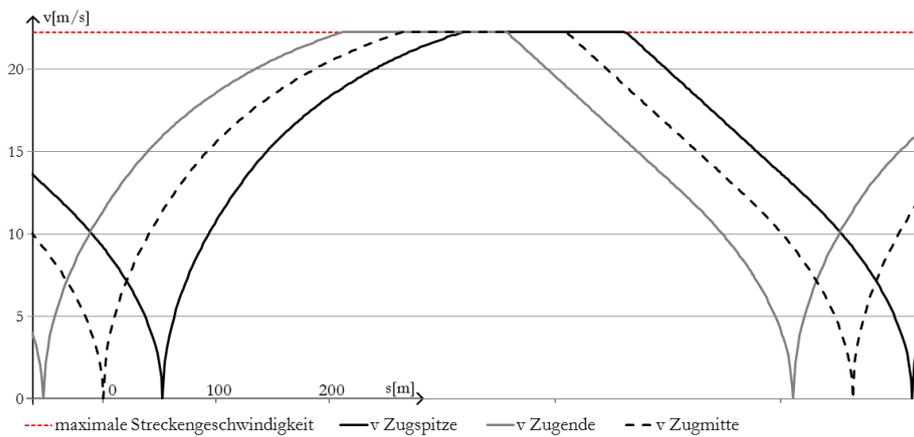


Abbildung 5.17.p: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, SG-ED

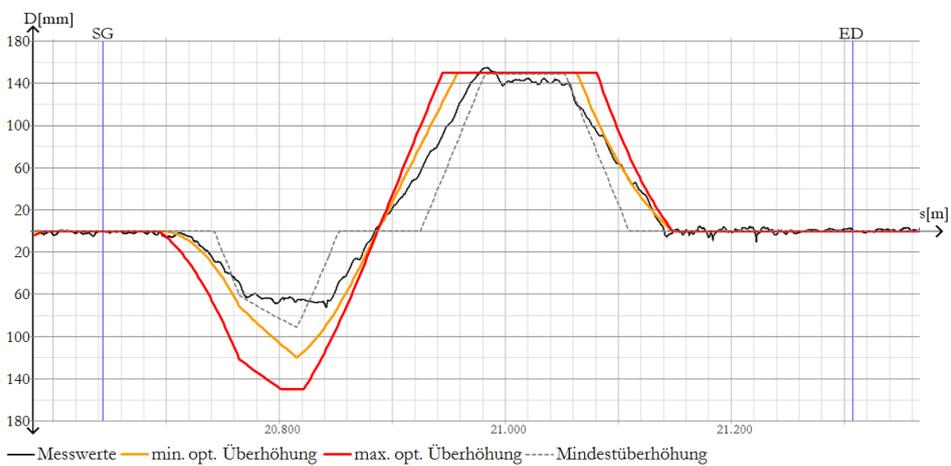


Abbildung 5.18.p: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, SG-ED

5.5.2.17 Abschnitt Erdberg – Gasometer

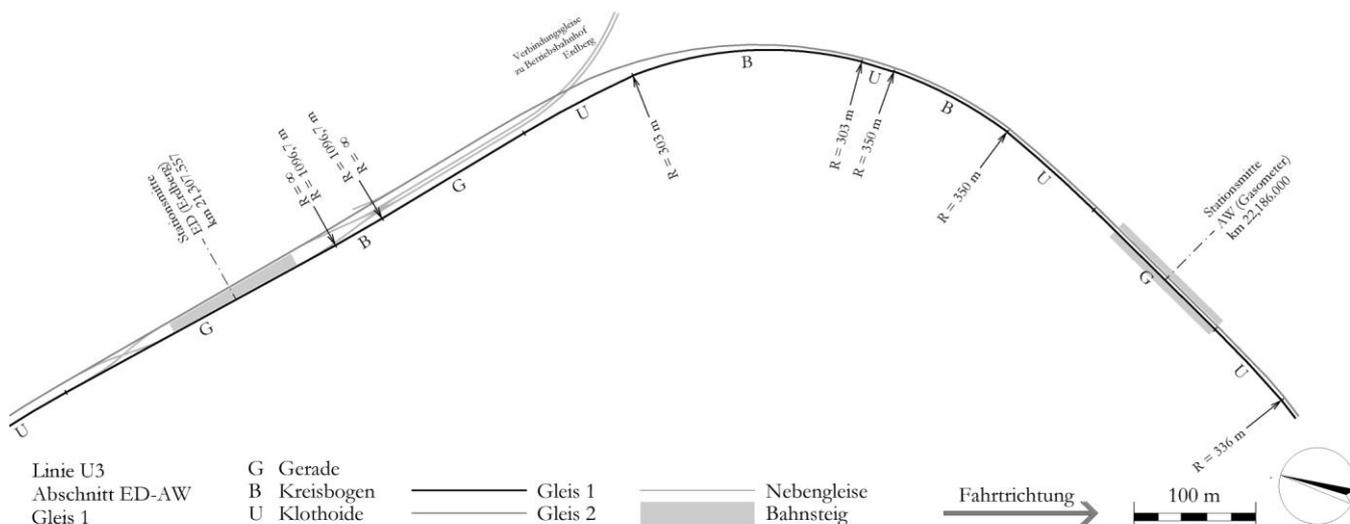


Abbildung 5.14.q: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, Abschnitt ED-AW

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 1 zwischen den Haltestellen Erdberg und Gasometer beträgt 878,443 m. Im Anschluss an die Station Erdberg, wo die Trasse an der Oberfläche verläuft, tauchen die Hauptgleise anschließend wieder ab und verlaufen unterirdisch bis zur Endstation Simmering. Die Höhenlage der Strecke verringert sich in diesem Bereich um 9,254 m in Fahrtrichtung. Die größte auftretende Neigung ist ein Gefälle von 35,437 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befindet sich eine Weiche unmittelbar nach der Station Erdberg aufgrund der Verbindungsgleise zum Betriebsbahnhof Erdberg, deren Lage in Abb. 5.16.q dargestellt ist.

Der Krümmungsverlauf in Abb. 5.15.q zeigt einen kurzen Kreisbogen mit einem Radius von 1.096,7 m, der vermutlich aufgrund der benachbarten Weiche ohne Übergangsbögen und ohne Überhöhung eingebaut wurde. Die in Abb. 5.18.q ersichtliche Abweichung zur optimalen Überhöhung ist nicht allzu groß, allerdings könnte man die Frage aufwerfen, ob die Anordnung zweier Übergangsbögen, wie es im Abschnitt Ottakring-Kendlerstraße gemacht wurde, nicht hinsichtlich des Rucks die bessere Wahl gewesen wäre.

Der anschließende Korbbogen mit den Radien 303 und 350 m wird jedoch wieder von Übergangsbögen flankiert. Hier zeigt sich, dass die klassische Anordnung der Überhöhungsrampe im Bereich der Übergangsbögen dazu führt, dass beim Übergangsbogen nach dem Kreisbogen die eingebaute Überhöhung deutlich über dem optimalen Bereich liegt, da hier die Geschwindigkeiten schon relativ gering sind. Große Teile des Zuges erfahren somit in diesem Bereich einen unnötig großen Überhöhungsüberschuss.

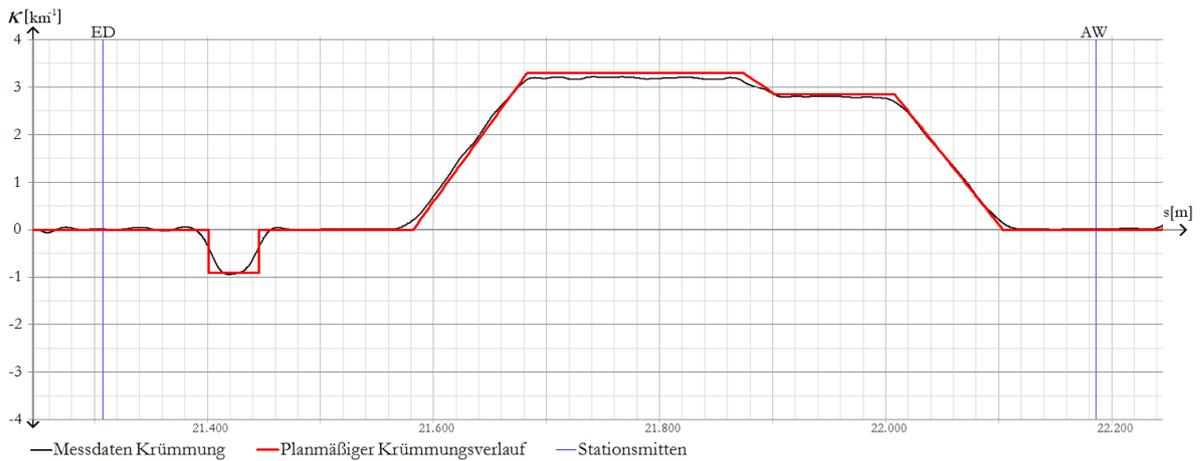


Abbildung 5.15.q: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, ED-AW

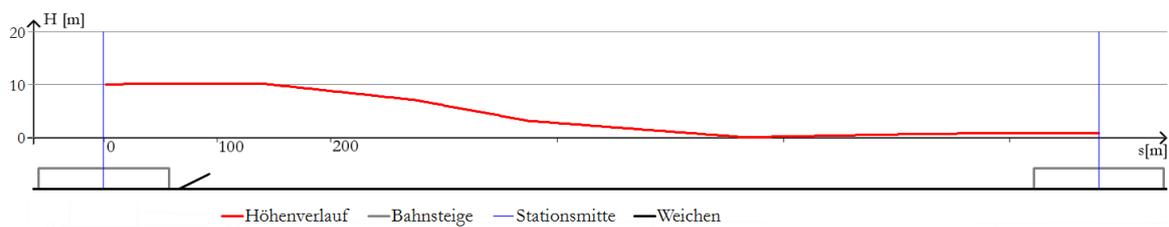


Abbildung 5.16.q: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 1, ED-AW

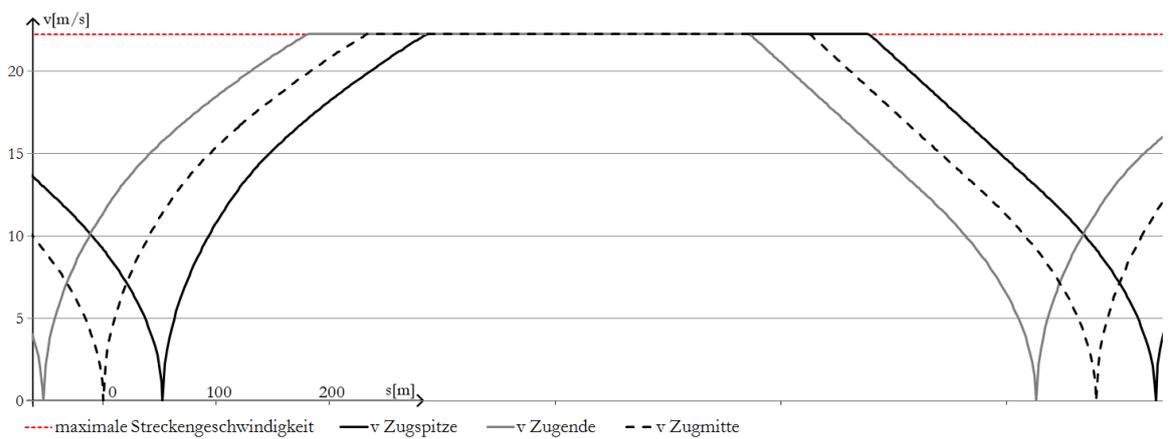


Abbildung 5.17.q: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, ED-AW

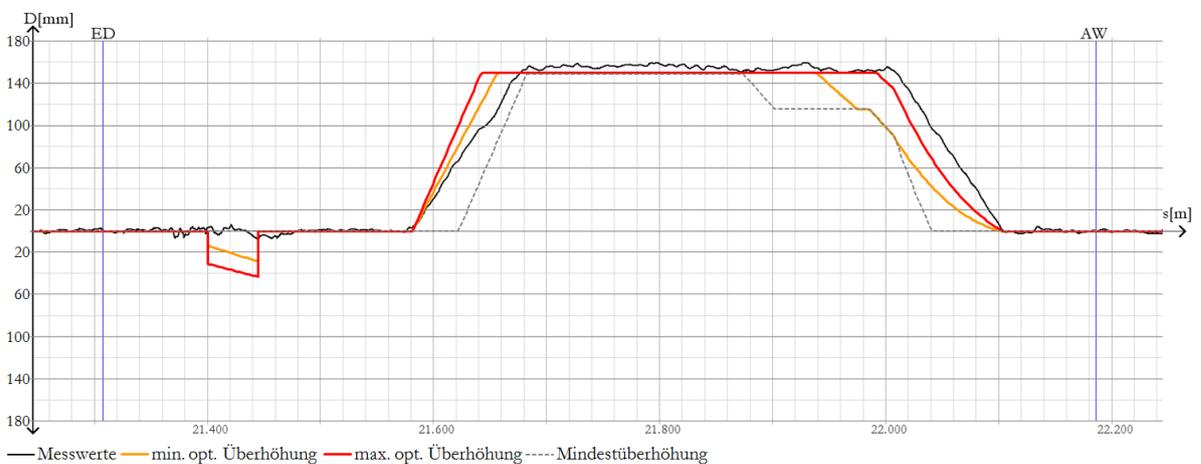


Abbildung 5.18.q: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, ED-AW

5.5.2.18 Abschnitt Gasometer – Zippererstraße

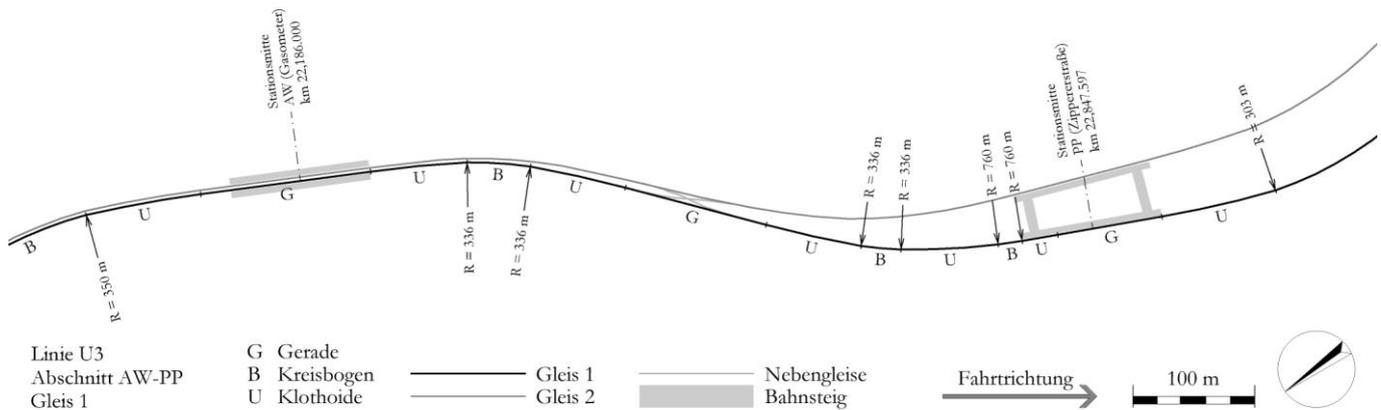


Abbildung 5.14.r: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, Abschnitt AW-PP

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 1 zwischen den Haltestellen Gasometer und Zippererstraße beträgt 661,597 m. Die Höhenlage der Strecke steigt in diesem Bereich um 3,750 m in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 20,990 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befinden sich zwei Weichen aufgrund einer Überleitstelle zu Gleis 2, deren Lage in der Abb. 5.16.r zu sehen ist.

Der in der Abb. 5.15.r dargestellte Krümmungsverlauf zeigt einen Rechtsbogen mit einem Radius von 336 m im Anschluss an die Haltestelle Gasometer. Nach einer Geraden folgt ein Linksbogen in Form eines Korbbogens mit den Radien 336 m und 760 m, der unmittelbar vor der Station Zippererstraße endet. Bei allen Krümmungswechseln ist jeweils ein Übergangsbogen angeordnet.

Die Lage der Bögen in Bereichen mit ansteigenden bzw. abnehmenden Geschwindigkeiten hat zur Folge, dass der Bereich der optimalen Überhöhung auf der dem benachbarten Bahnsteig zugewandten Seite geringer ist, als am anderen Ende des Bogens, wie in der Abb. 5.18.r dargestellt ist. Daher übersteigt die nach den klassischen Trassierungsregeln eingebaute Überhöhung den optimalen Bereich im Übergangsbogen vor dem ersten Kreisbogen und im Übergangsbogen nach dem zweiten Kreisbogen geringfügig, während sie im Übergangsbogen nach dem ersten Kreisbogen etwas unter dem optimalen Bereich liegt. Ganz allgemein gibt es aber in diesem Streckenabschnitt keine allzu großen Abweichungen zwischen der eingebauten Überhöhung und den optimalen Werten.

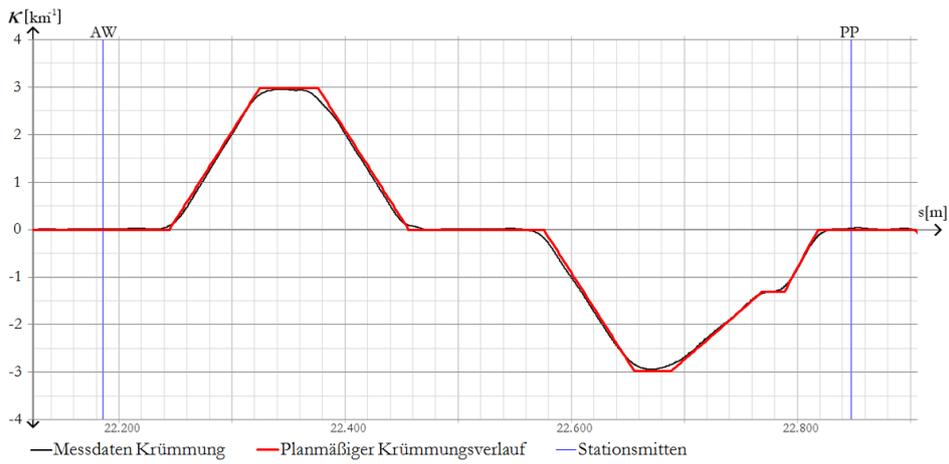


Abbildung 5.15.r: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, AW-PP

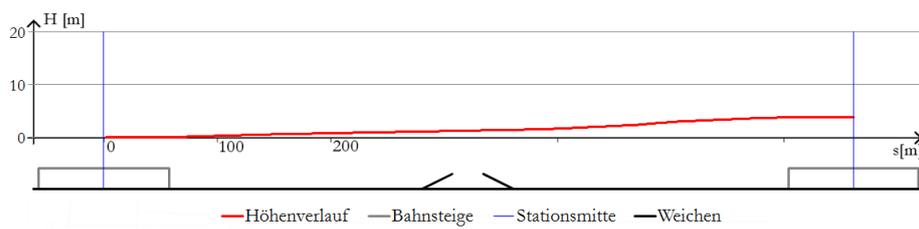


Abbildung 5.16.r: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 1, AW-PP

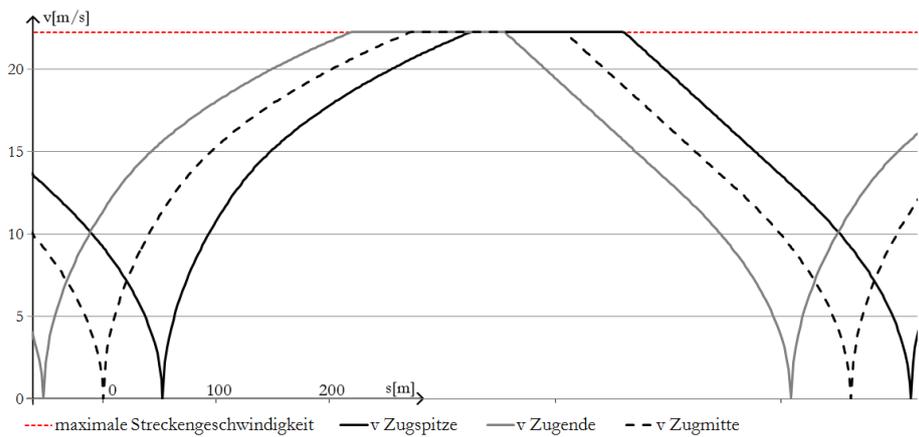


Abbildung 5.17.r: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, AW-PP

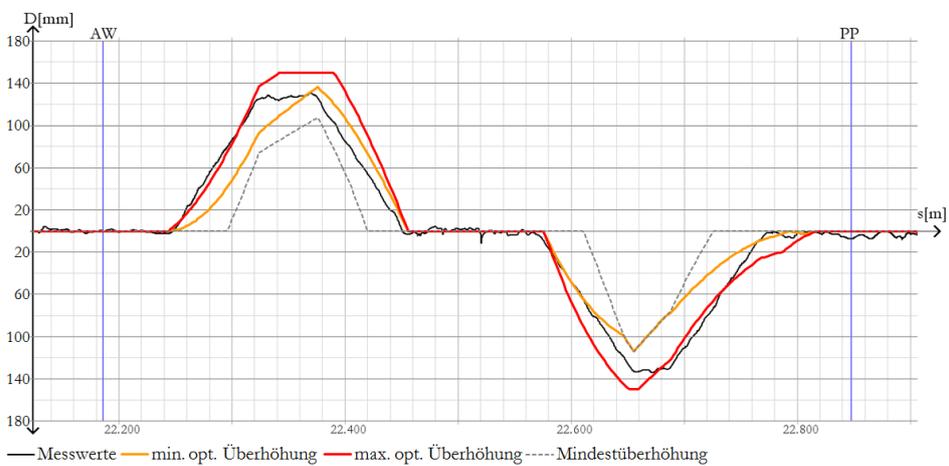


Abbildung 5.18.r: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, AW-PP

5.5.2.19 Abschnitt Zippererstraße – Enkplatz

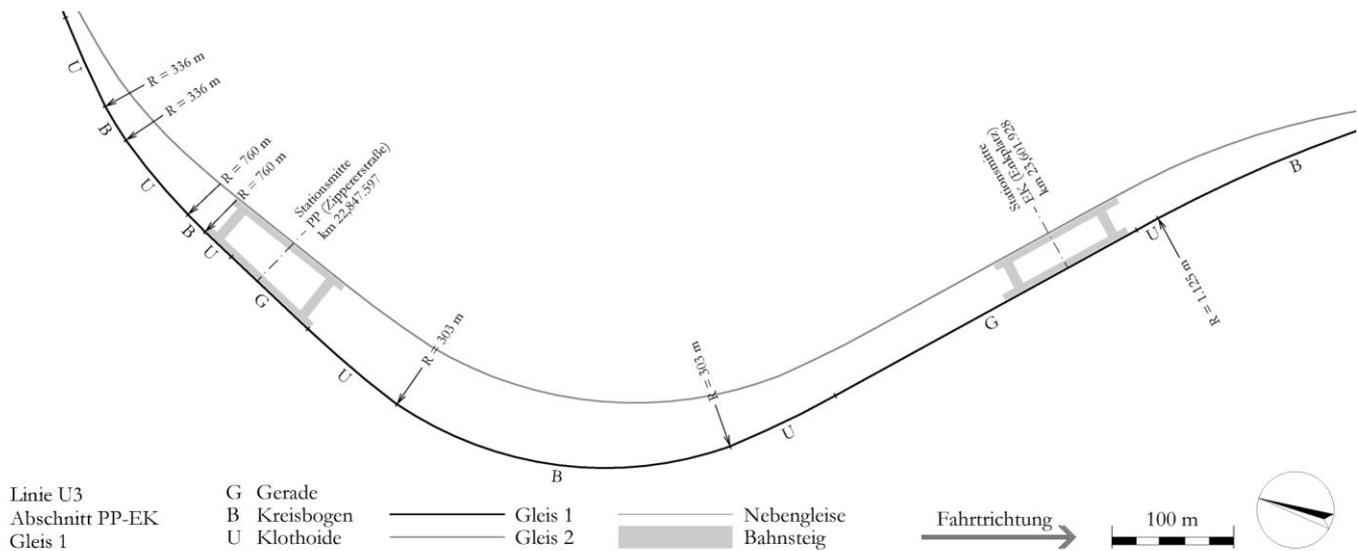


Abbildung 5.14.s: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, Abschnitt PP-EK

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 1 zwischen den Haltestellen Zippererstraße und Enkplatz beträgt 754,331 m. Die Höhenlage der Strecke steigt in diesem Bereich um 1,400 m in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 2,261 %. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befinden sich keine Weichen.

Der in der Abb. 5.15.s dargestellte Krümmungsverlauf zeigt einen langgezogenen Bogen mit einem Radius von 303 m, der von Übergangsbögen flankiert ist. Der Beginn des Bogens liegt im Beschleunigungsbereich des Zuges, wie aus der Abb. 5.17.s ersichtlich ist.

Was den Verlauf der eingebauten Überhöhung betrifft, so wurden die Überhöhungsrampen auch in diesem Fall nach den Regeln der klassischen Trassierung genau in den Übergangsbogen gelegt, wodurch sich im Bereich der niedrigen Fahrgeschwindigkeiten die in der Abb. 5.18.s dargestellte Situation ergibt, dass die eingebaute Überhöhung geringfügig über dem optimalen Bereich liegt, während sie beim Übergangsbogen im Bereich der Höchstgeschwindigkeit unter dem Bereich der optimalen Überhöhung bleibt.

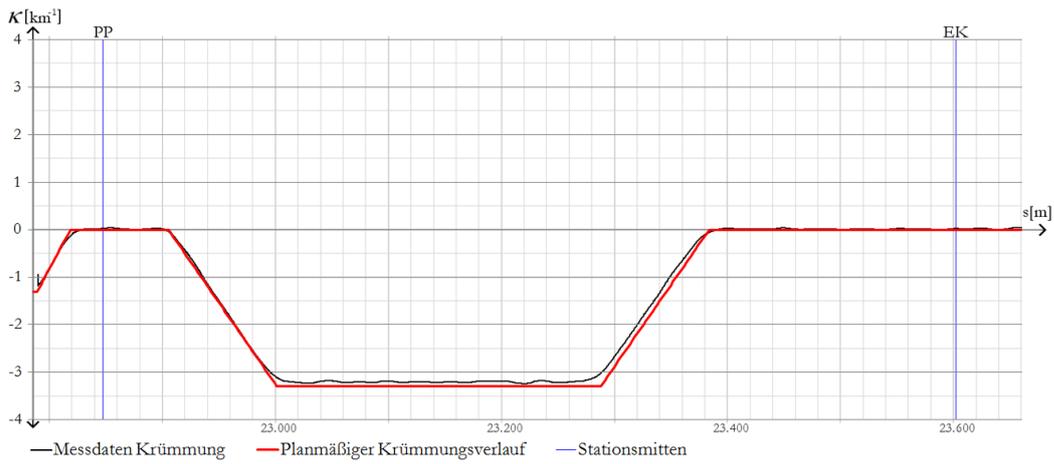


Abbildung 5.15.s: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, PP-EK

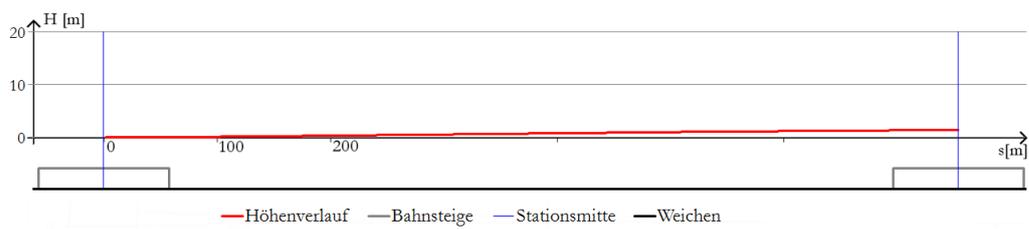


Abbildung 5.16.s: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 1, PP-EK

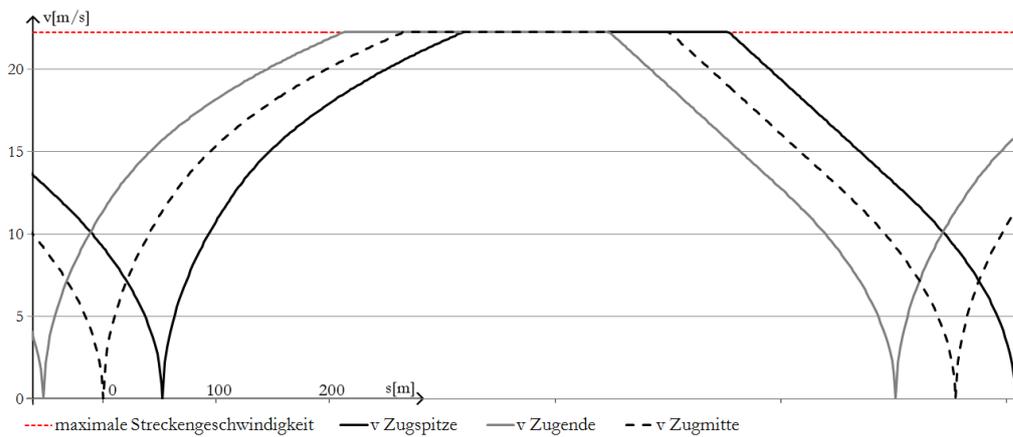


Abbildung 5.17.s: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, PP-EK

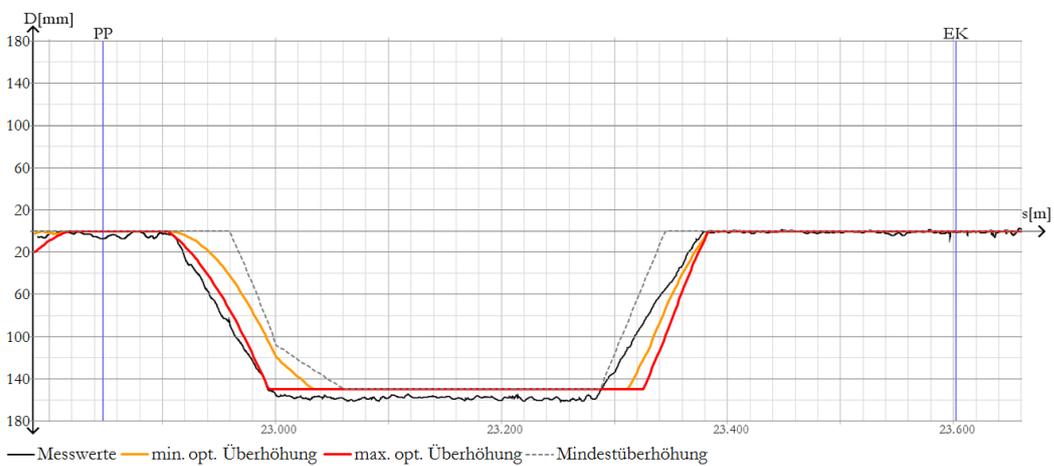


Abbildung 5.18.s: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, PP-EK

5.5.2.20 Abschnitt Enkplatz – Simmering

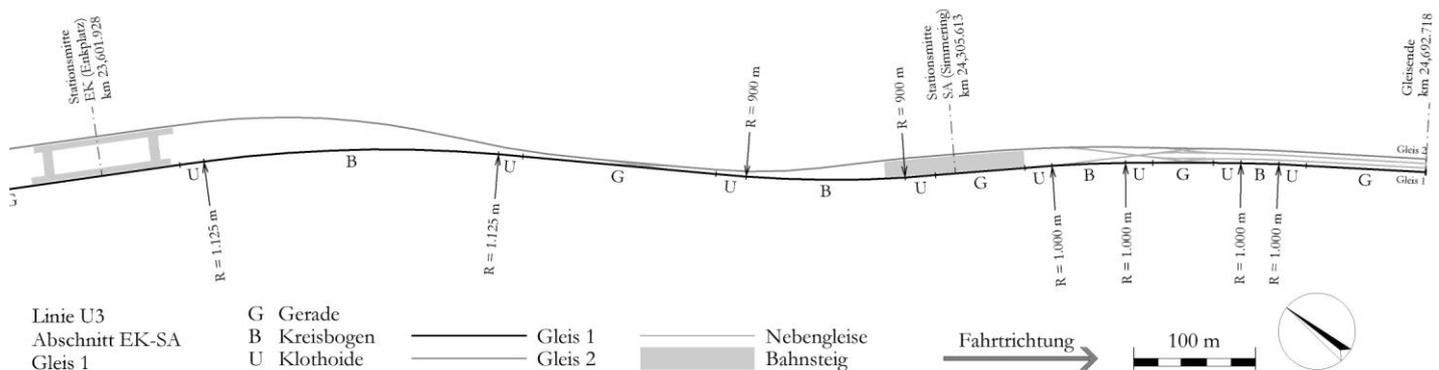


Abbildung 5.14.t: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, Abschnitt EK-SA

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 1 zwischen den Haltestellen Enkplatz und Simmering beträgt 703,685 m. Die Höhenlage der Strecke steigt in diesem Bereich um 1,600 m in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 15,000 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befinden sich zwei Weichen aufgrund einer Überleitstelle zu Gleis 2.

Die verwendeten Daten des Gleismesswagens für das Gleis 1 beinhalten nach der Haltestelle Enkplatz keine auswertbaren Daten mehr bezüglich der Krümmung und der Überhöhung. Nachdem auch bei allen anderen zur Verfügung stehenden Daten aus in den letzten drei Jahren auf Gleis 1 durchgeführten Messfahrten in diesem Streckenabschnitt keine Aufzeichnungen erfolgt sind, kann für diesen Bereich keine Gegenüberstellung zwischen den Soll-Daten und den Ist-Daten der Überhöhung vorgenommen werden. Der Vollständigkeit halber werden in den folgenden Abbildungen 5.15.t bis 5.18.t die ermittelten Soll-Daten trotzdem dargestellt.

Der in Abb. 5.15.t dargestellte Krümmungsverlauf zeigt einen langgezogenen Rechtsbogen mit einem Radius von 1.125 m, eine Gerade und einen Linksbogen mit einem Radius von 900 m. Die Kreisbögen sind jeweils von Übergangsbögen flankiert.

Wie aus der Abb. 5.18.t ersichtlich ist, liegt der Bereich der optimalen Überhöhung im Bereich der Höchstgeschwindigkeit bei ca. 60 mm. Für jene Bereiche der Kreisbögen, die im Beschleunigungs- bzw. Bremsbereich liegen, wird der Bereich der optimalen Überhöhung mit zunehmender Geschwindigkeit größer.



Abbildung 5.15.t: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, EK-SA

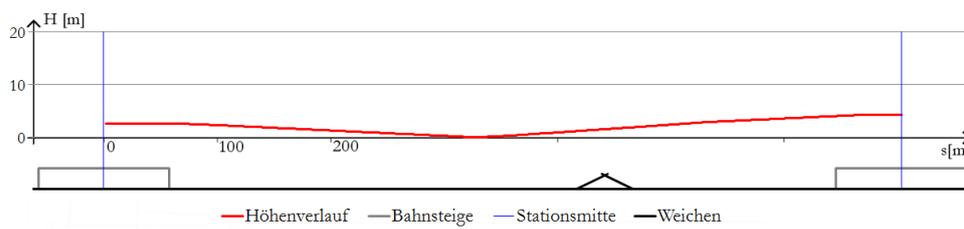


Abbildung 5.16.t: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 1, EK-SA

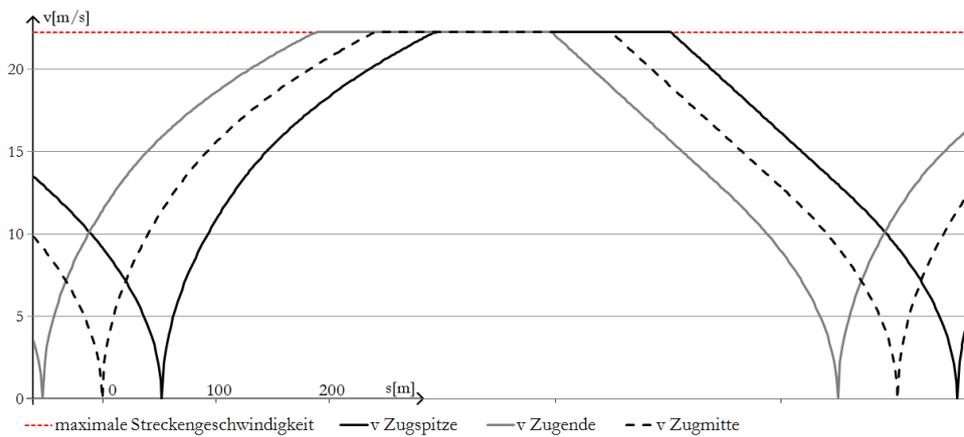


Abbildung 5.17.t: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, EK-SA

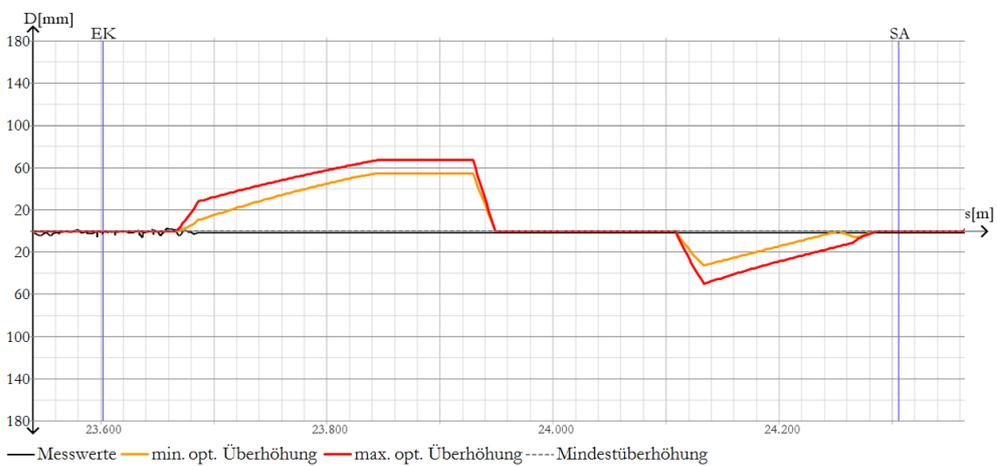


Abbildung 5.18.t: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, EK-SA

5.5.3 Linie U3, Gleis 2

5.5.3.1 Abschnitt Simmering – Enkplatz

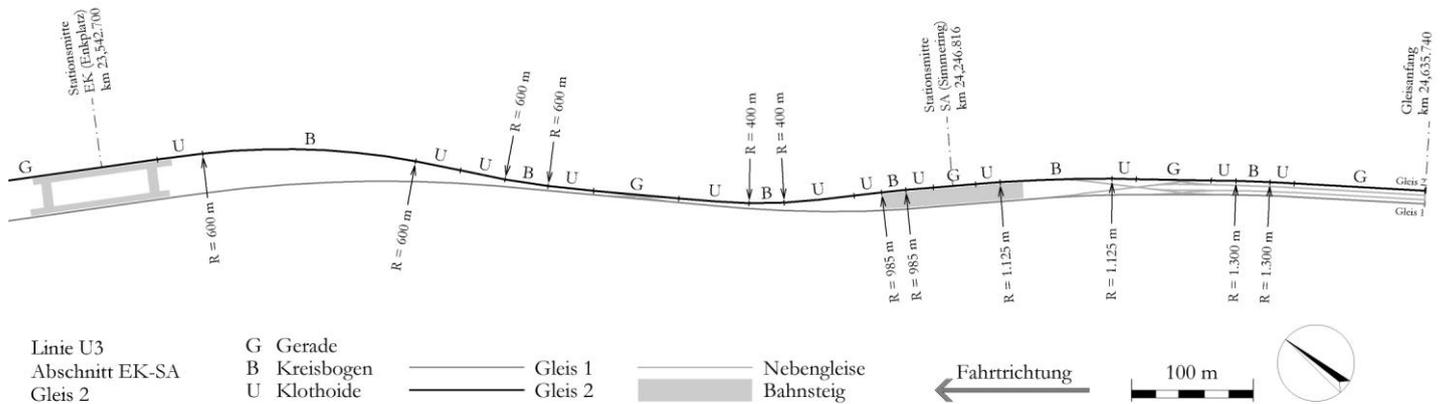


Abbildung 5.19.a: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, Abschnitt SA-EK

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 2 zwischen den Haltestellen Simmering und Enkplatz beträgt 704,116 m. Die Endstation Simmering sowie die dahinter liegende viergleisige Abstell- und Wendeanlage befinden sich in Tieflage. Der weitere Streckenverlauf erfolgt ebenfalls unterirdisch bis zur Station Erdberg. Die Höhenlage der Strecke verringert sich in diesem Bereich um 1,600 m in Fahrtrichtung. Die größte auftretende Neigung ist ein Gefälle von 17,000 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 2 befinden sich zwei Weichen aufgrund einer Überleitstelle zu Gleis 1, deren Lage in der Abb. 5.21.a zu sehen ist.

Der in Abb. 5.20.a dargestellte Krümmungsverlauf zeigt, dass es in diesem Streckenabschnitt insgesamt vier Kreisbögen gibt. Vor und nach den Kreisbögen sind jeweils Übergangsbögen angeordnet. Beginnend mit einem kurzen Linksbogen mit einem Radius von 985 m, der noch im Bahnsteigbereich liegt, verläuft die Strecke dann entlang eines kurzen Rechtsbogens mit einem Radius von 400 m. Es folgt eine Gerade, ein weiterer Rechtsbogen mit einem Radius von 600 m und schließlich ein langgezogener Linksbogen mit demselben Radius bis unmittelbar vor den Bahnsteigbereich der Station Enkplatz.

Der erste Bogen ist nicht überhöht, da er mit relativ geringen Geschwindigkeiten befahren wird, wie aus den Abbildungen 5.22.a und 5.23.a ersichtlich ist. Während der Überhöhungsverlauf des zweiten Bogens im optimalen Bereich liegt, orientiert sich die Überhöhung des dritten und vierten Bogens an der notwendigen Mindestüberhöhung. Somit gibt es hier eine Abweichung von bis zu 70 mm zwischen der eingebauten Überhöhung und dem optimalen Überhöhungsverlauf.

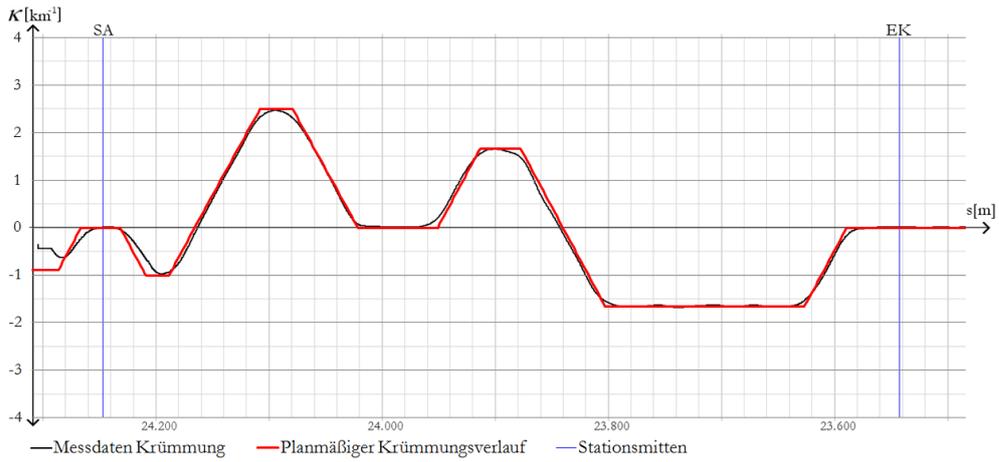


Abbildung 5.20.a: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, SA-EK

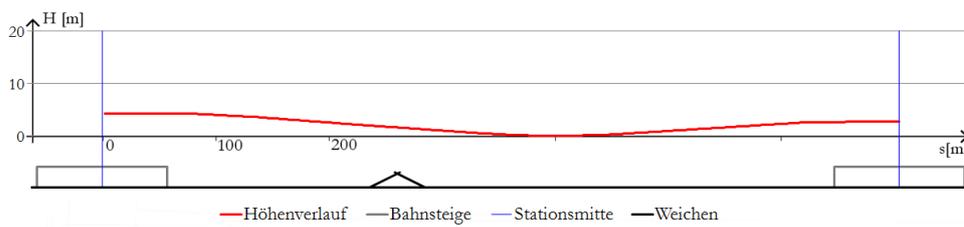


Abbildung 5.21.a: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 2, SA-EK

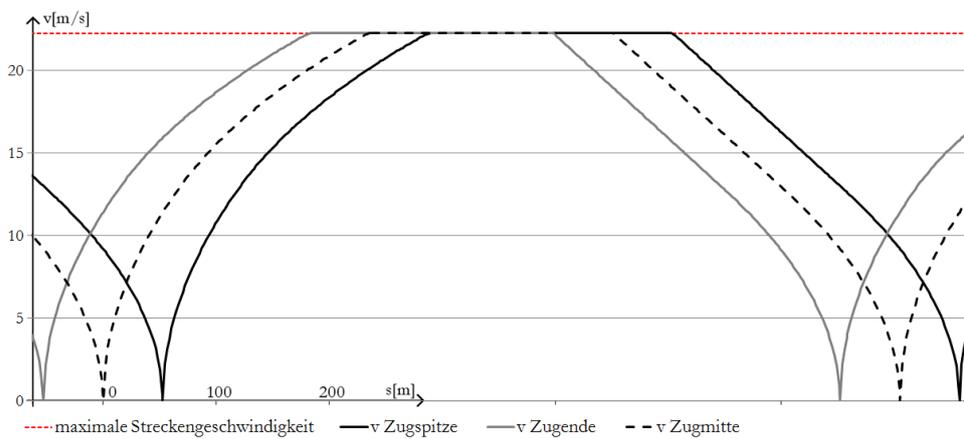


Abbildung 5.22.a: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, SA-EK

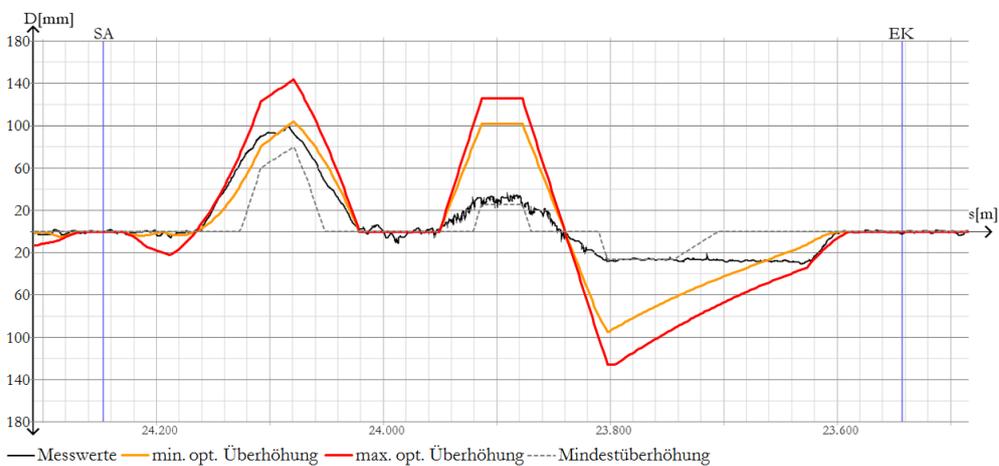


Abbildung 5.23.a: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, SA-EK

5.5.3.2 Abschnitt Enkplatz – Zippererstraße

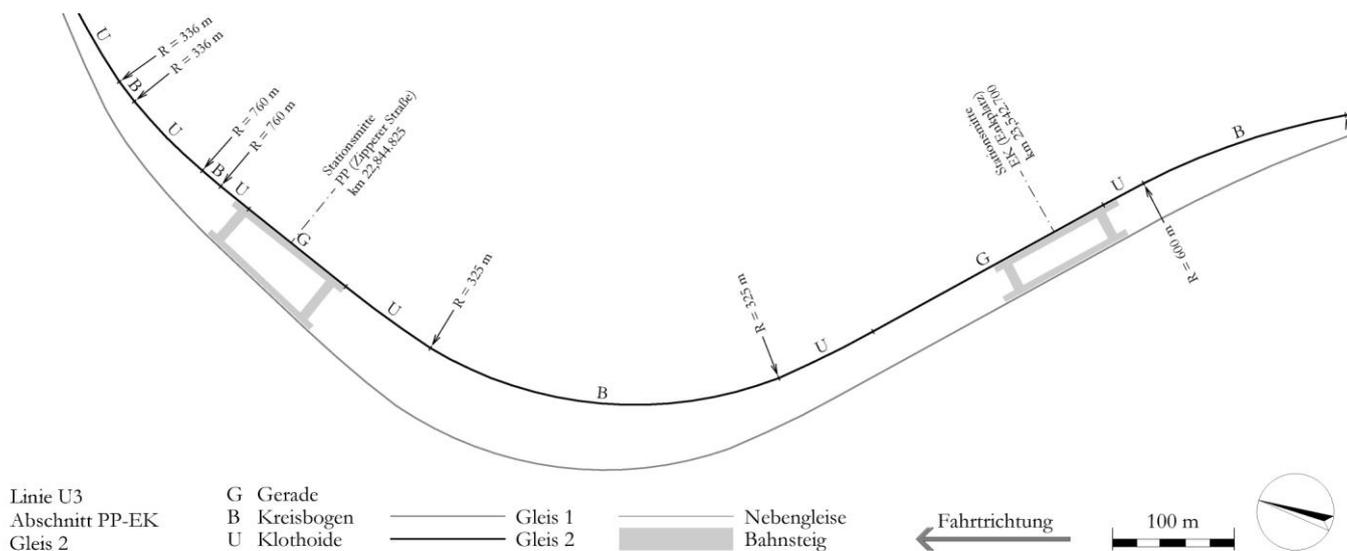


Abb. 5.19.b: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, Abschnitt EK-PP

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 2 zwischen den Haltestellen Enkplatz und Zippererstraße beträgt 697,875 m. Die Höhenlage der Strecke verringert sich in diesem Bereich um 1,400 m in Fahrtrichtung. Die größte auftretende Neigung ist ein Gefälle von 2,520 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 2 befinden sich keine Weichen.

Der in Abb. 5.20.b dargestellte Krümmungsverlauf dieses Streckenabschnittes zeigt einen langgezogenen Rechtsbogen mit einem Radius von 325 m, der vor der Station Zippererstraße endet.

Die geringen Fahrgeschwindigkeiten im Bereich vor der Station Zippererstraße, die in der Abb. 5.22.b zu sehen sind, führen dazu, dass die nach den klassischen Trassierungsregeln eingebaute Überhöhung deutlich über der Obergrenze der optimalen Überhöhung liegt, wie in der Abb. 5.23.b dargestellt ist. Es wirkt dadurch in diesem Bereich ein Überhöhungsüberschuss auf den Großteil des Zuges.

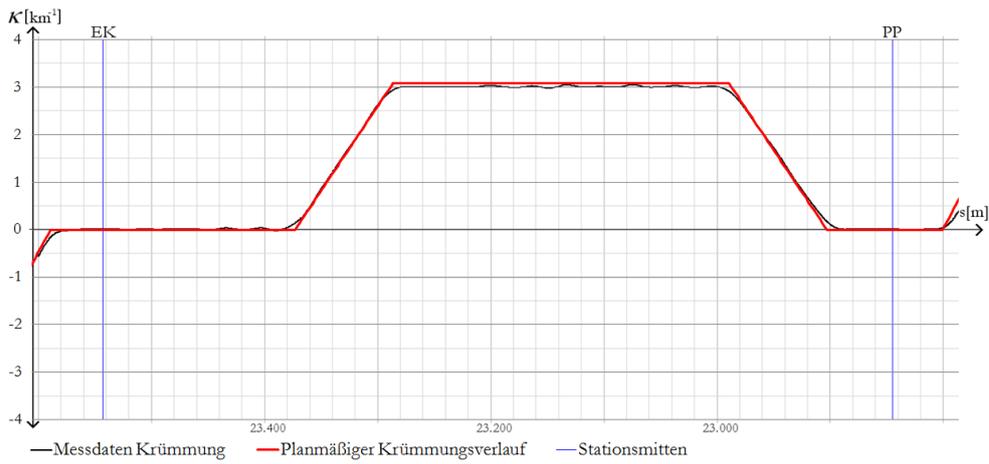


Abbildung 5.20.b: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, EK-PP

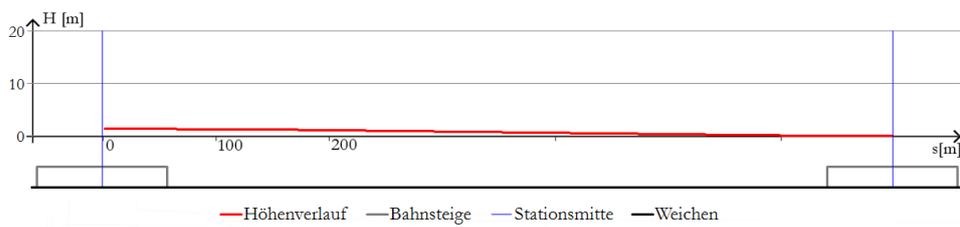


Abbildung 5.21.b: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 2, EK-PP

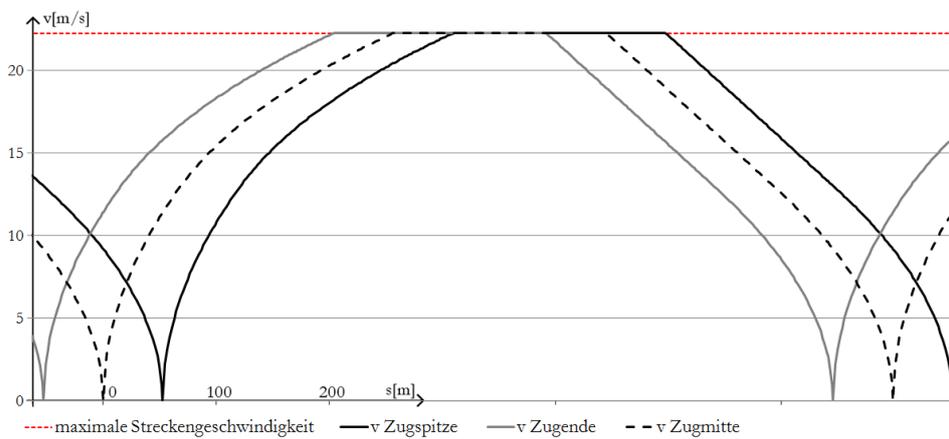


Abbildung 5.22.b: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, EK-PP

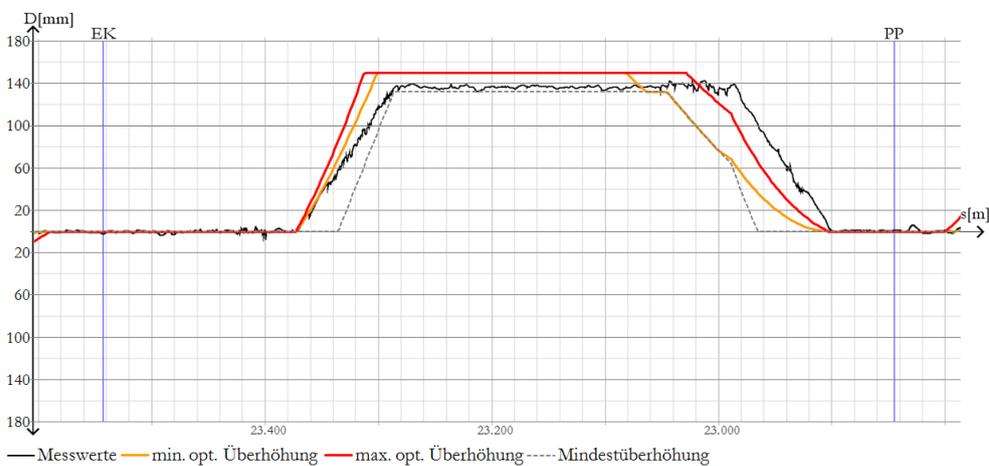


Abbildung 5.23.b: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, EK-PP

5.5.3.3 Abschnitt Zippererstraße – Gasometer

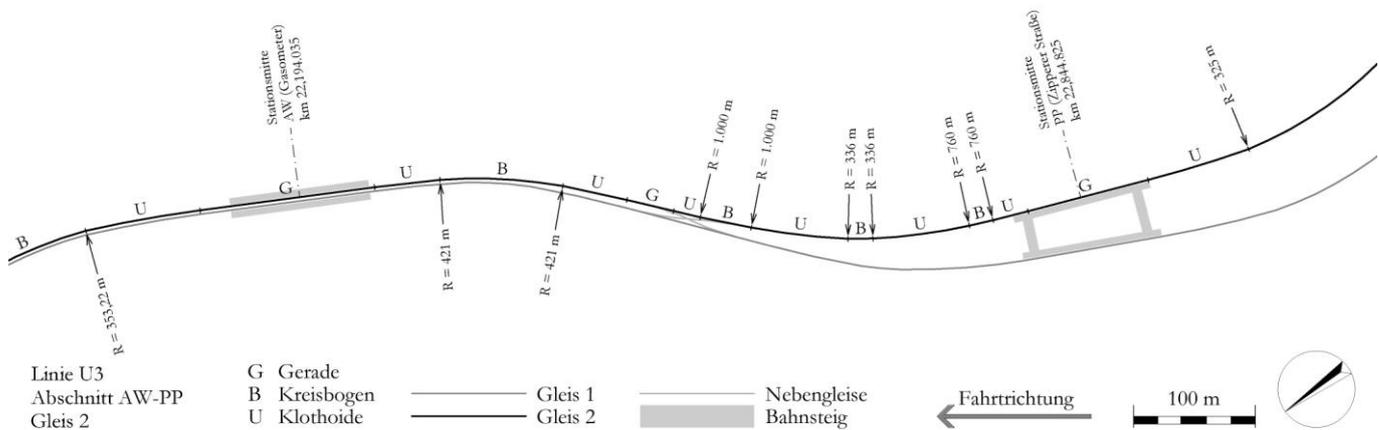


Abb. 5.19.c: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, Abschnitt PP-AW

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 2 zwischen den Haltestellen Zippererstraße und Gasometer beträgt 650,790 m. Die Höhenlage der Strecke verringert sich in diesem Bereich um 3,750 m in Fahrtrichtung. Die größte auftretende Neigung ist ein Gefälle von 21,438 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 2 befinden sich zwei Weichen aufgrund einer Überleitstelle zu Gleis 1, deren Lage in der Abb. 5.21.c zu sehen ist.

Der in Abb. 5.20.c dargestellte Krümmungsverlauf zeigt einen Rechtsbogen, der in Form eines Korbbogens mit den Radien 760 m, 336 m und 1.000 m ausgebildet ist, sowie einen nach einer kurzen Geraden anschließenden Linksbogen mit einem Radius von 421 m. An allen Krümmungswechseln sind Übergangsbögen angeordnet.

In der Abb. 5.23.c sieht man, dass die eingebaute Überhöhung im Rechtsbogen relativ knapp über der Mindestüberhöhung liegt. Am Anfang des Bogens, wo die in Abb. 5.22.c dargestellten Fahrgeschwindigkeiten geringer sind, ist die Abweichung zur optimalen Überhöhung nicht sehr groß. Im weiteren Verlauf des Bogens liegt die eingebaute Überhöhung jedoch bis zu 60 mm unter dem Bereich der optimalen Überhöhung. Zurückzuführen ist dieser Verlauf der eingebauten Überhöhung vermutlich auf die Überleitstelle, deren erste Weiche noch im Bogen liegt.

Der Rechtsbogen wurde nach den klassischen Trassierungsregeln mit einer konstanten Überhöhung ausgebildet, die sich an der Mindestüberhöhung orientiert. Durch den abnehmenden Geschwindigkeitsverlauf des im Bremsbereich liegenden Bogens ist die eingebaute Überhöhung somit am Bogenanfang geringer als die optimale Überhöhung. Am Bogenende und im Übergangsbogen nach dem Kreisbogen ist die eingebaute Überhöhung hingegen zu groß und führt zu einem Überhöhungsüberschuss für einen Großteil des Zuges.

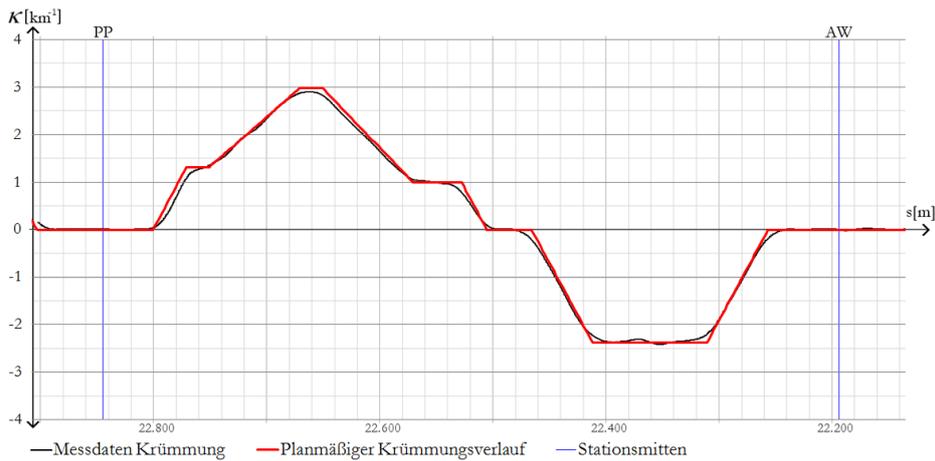


Abbildung 5.20.c: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, PP-AW

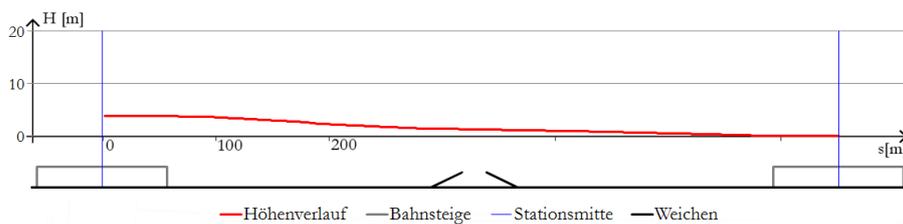


Abbildung 5.21.c: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 2, PP-AW

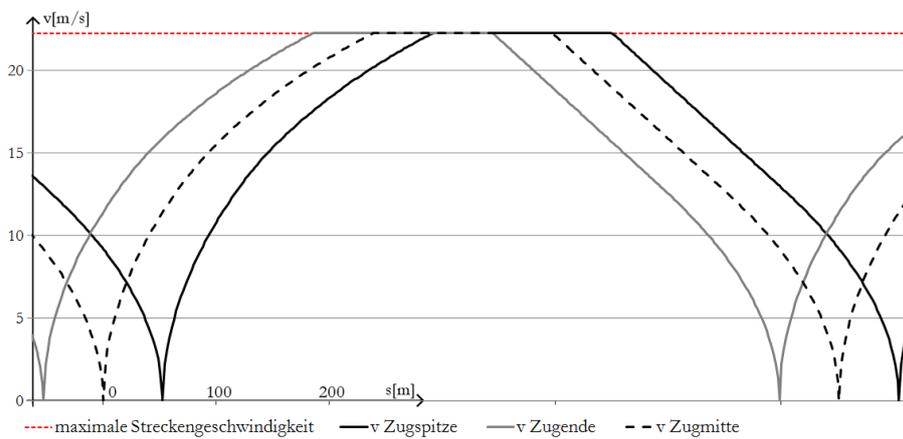


Abbildung 5.22.c: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, PP-AW

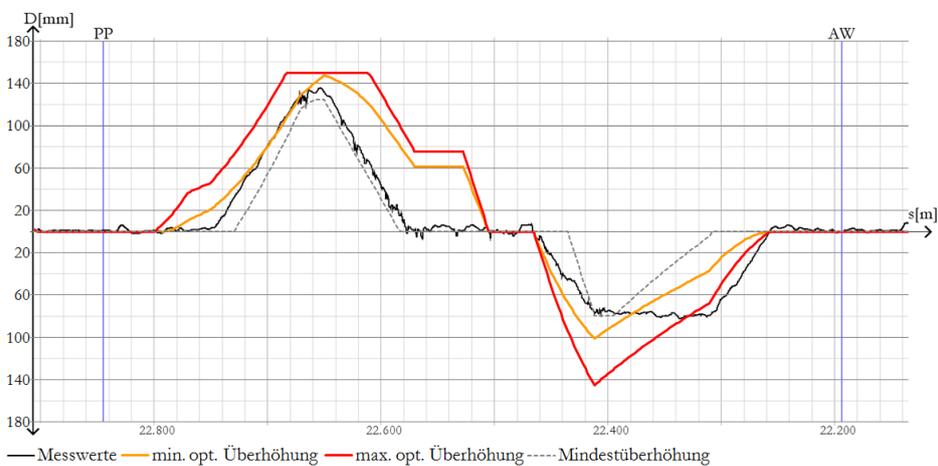


Abbildung 5.23.c: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, PP-AW

5.5.3.4 Abschnitt Gasometer – Erdberg

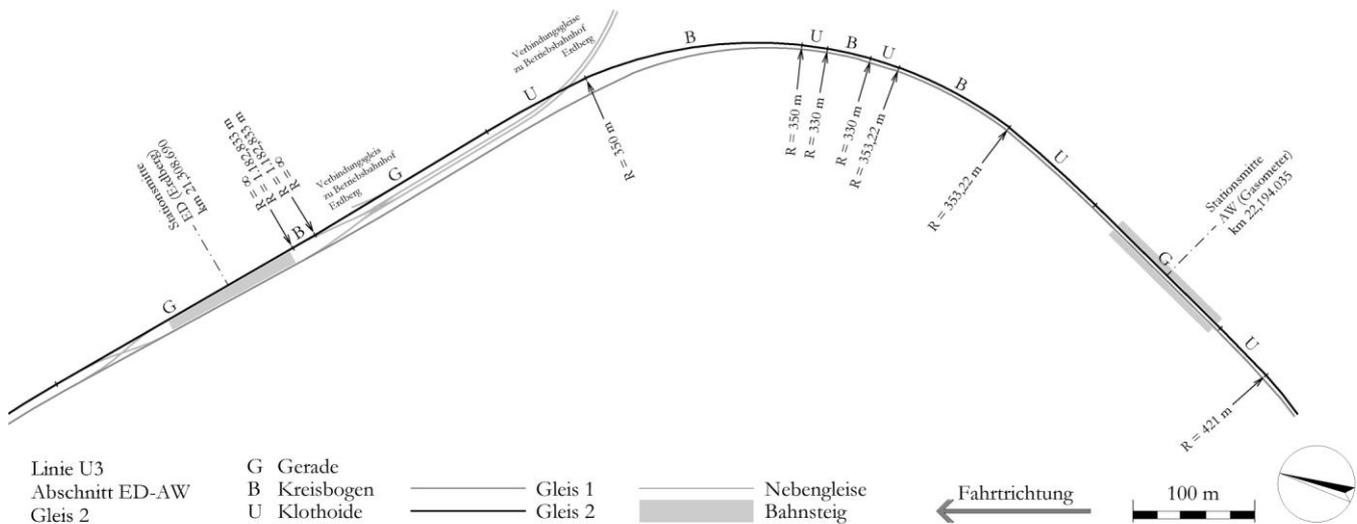


Abb. 5.19.d: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, Abschnitt AW-ED

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 2 zwischen den Haltestellen Gasometer und Erdberg beträgt 885,345 m. Vor der Station Erdberg taucht das Gleis aus dem Untergrund auf und verläuft im Bereich der Haltestelle auf Oberflächenniveau. Die Höhenlage der Strecke steigt in diesem Bereich um 9,254 m in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 40,000 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 2 befinden sich zwei Weichen aufgrund der Gleisverbindungen zum Betriebsbahnhof Erdberg, deren Lage in der Abb. 5.21.d zu sehen ist.

Der in der Abb. 5.20.d dargestellte Krümmungsverlauf zeigt einen langgezogenen Linksbogen, der eigentlich ein Korbbogen mit ähnlich großen Radien von 353,22 m, 330 m und 350 m ist. Bei sämtlichen Krümmungswechseln in diesem Bereich sind Übergangsbögen eingebaut. Im Anschluss verläuft die Trasse entlang einer Geraden bis zu einem kurzen Rechtsbogen mit einem Radius von 1.182,833 m, der ohne Übergangsbögen und ohne Überhöhung eingebaut ist. Auch auf Gleis 1 gibt es an dieser Stelle einen Kreisbogen mit abrupten Krümmungswechseln. (siehe Kap. 5.5.2.17) Beim Gleis 2 sind die Geschwindigkeiten im Bereich dieses Kreisbogens allerdings noch kleiner, sodass weder die Fehlüberhöhung noch der Ruck eine nennenswerte Größe erreichen.

Im Bereich des langgezogenen Linksbogens zeigt die Abb. 5.23.d einmal mehr, dass die übliche Anordnung der Überhöhungsrampe beim ersten Übergangsbogen im Bereich der geringeren Fahrgeschwindigkeiten dazu führt, dass die eingebaute Überhöhung – wenn auch nur geringfügig – über der Obergrenze der optimalen Überhöhung liegt.

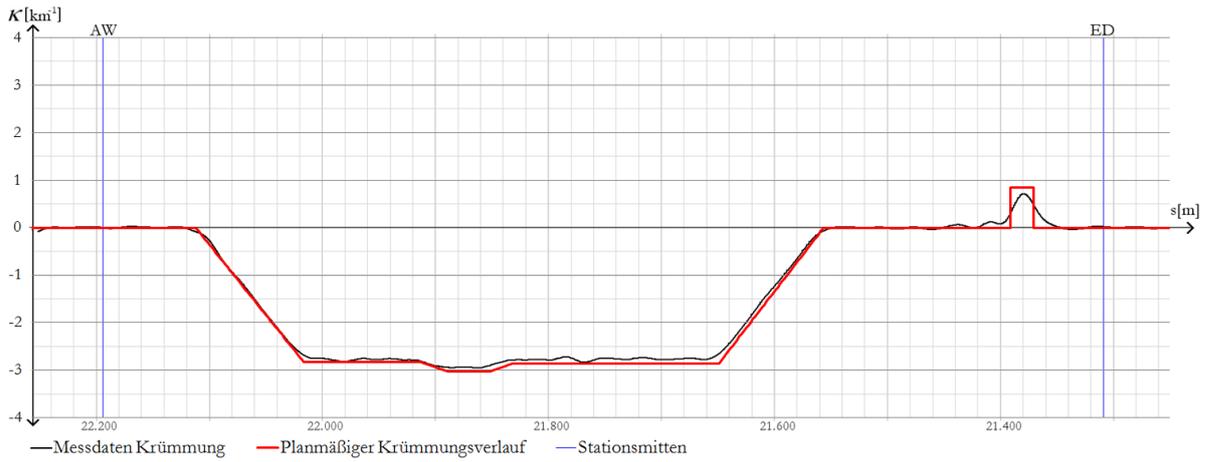


Abbildung 5.20.d: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, AW-ED

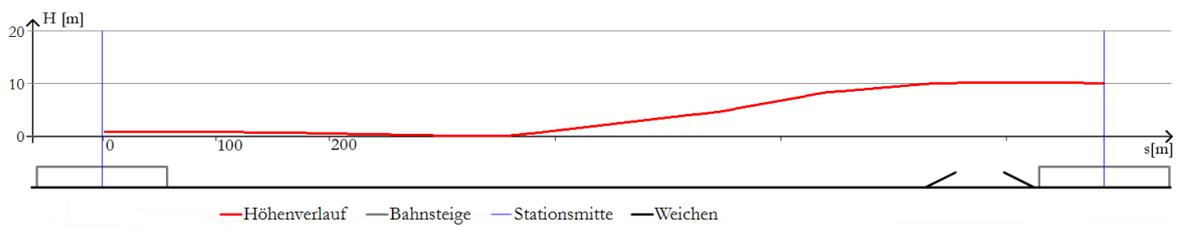


Abbildung 5.21.d: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 2, AW-ED

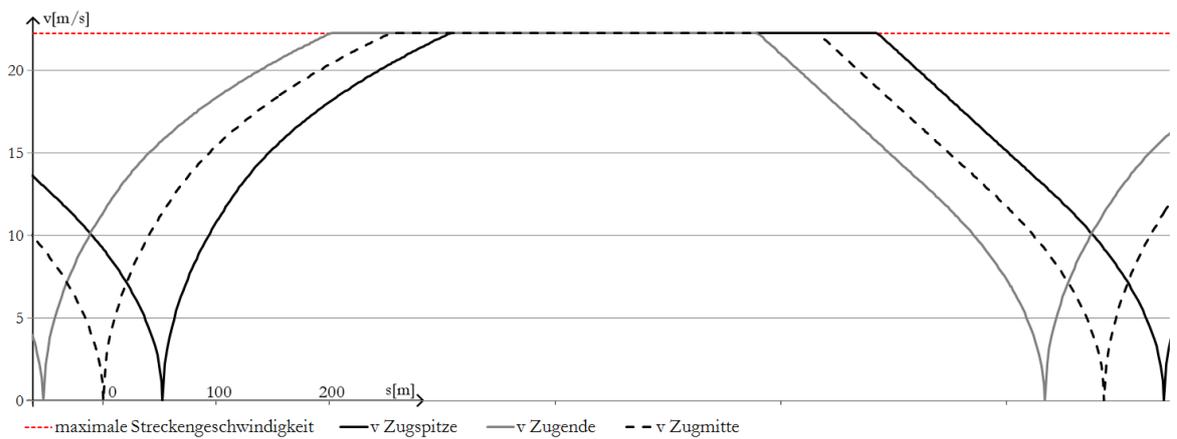


Abbildung 5.22.d: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, AW-ED

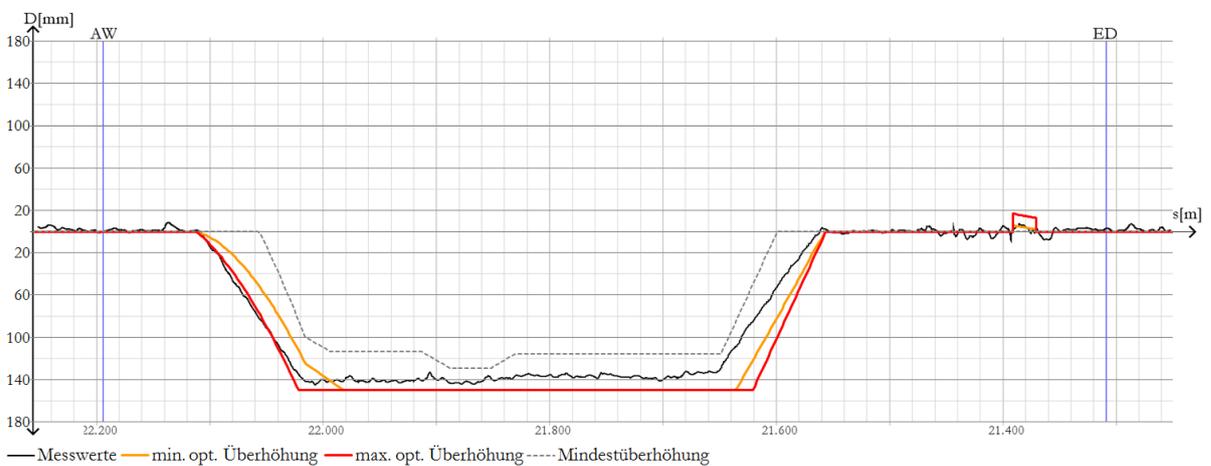


Abbildung 5.23.d: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, AW-ED

5.5.3.5 Abschnitt Erdberg – Schlachthausgasse

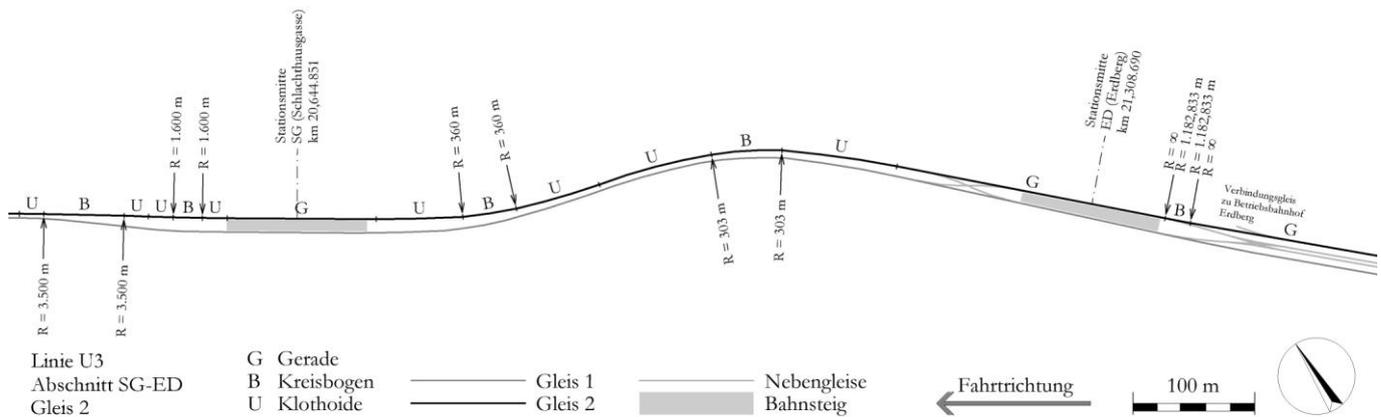


Abb. 5.19.e: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, Abschnitt ED-SG

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 2 zwischen den Haltestellen Erdberg und Schlachthausgasse beträgt 663,839 m. Während sich die Gleise in der Station Erdberg in Niveaulage befinden, erfolgt der weitere Streckenverlauf des Gleises 2 bis zur Endstation Ottakring unterirdisch. Die Höhenlage der Strecke verringert sich in diesem Bereich um 6,146 m in Fahrtrichtung. Die größte auftretende Neigung ist ein Gefälle von 35,252 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 2 befinden sich zwei Weichen aufgrund einer Überleitstelle zu Gleis 1, deren Lage in der Abb. 5.21.e zu sehen ist.

Der in der Abb. 5.20.e dargestellte Krümmungsverlauf zeigt eine Bogenfolge, die mit einem Linksbogen mit einem Mindestradius von 303 m beginnt und anschließend in einen Rechtsbogen mit einem Radius von 360 m übergeht. Die Kreisbögen sind jeweils von Übergangsbögen flankiert.

Der Linksbogen besitzt einen kleinen Radius und liegt im Bereich hoher Fahrgeschwindigkeiten. Im Kreisbogen selbst ist daher die maximal zulässige Überhöhung eingebaut, wie man in der Abb. 5.23.e sehen kann. Der Überhöhungsverlauf in den Übergangsbögen ist nach den Regeln der klassischen Trassierung eingebaut.

Im Rechtsbogen zeigt sich jedoch wieder der Einfluss der abnehmenden Fahrgeschwindigkeiten in der Form, dass die optimale Überhöhung im Bereich des Bogenendes etwas unter der eingebauten Überhöhung liegt. Die tatsächlich vorhandene Überhöhung in diesem Bereich führt daher zu einem überwiegenden Überhöhungsüberschuss für den mit der in Abb. 5.22.e eingetragenen Geschwindigkeit fahrenden Zug.

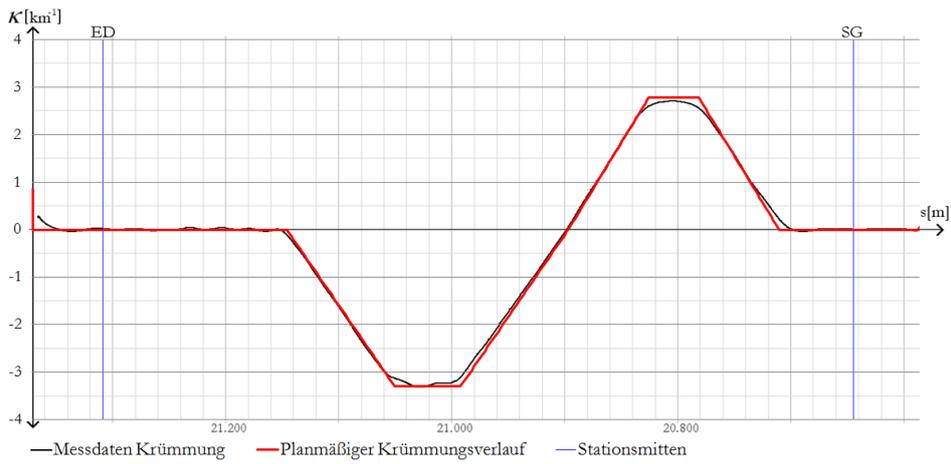


Abbildung 5.20.e: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, ED-SG

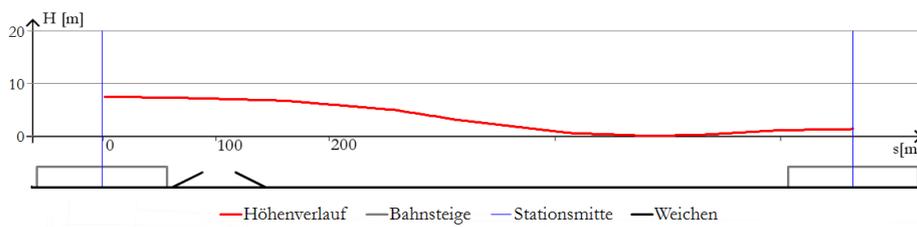


Abbildung 5.21.e: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 2, ED-SG

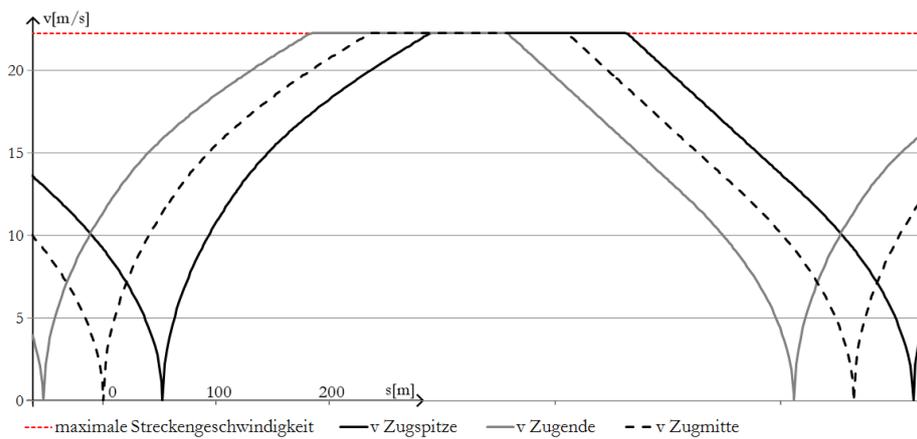


Abbildung 5.22.e: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, ED-SG

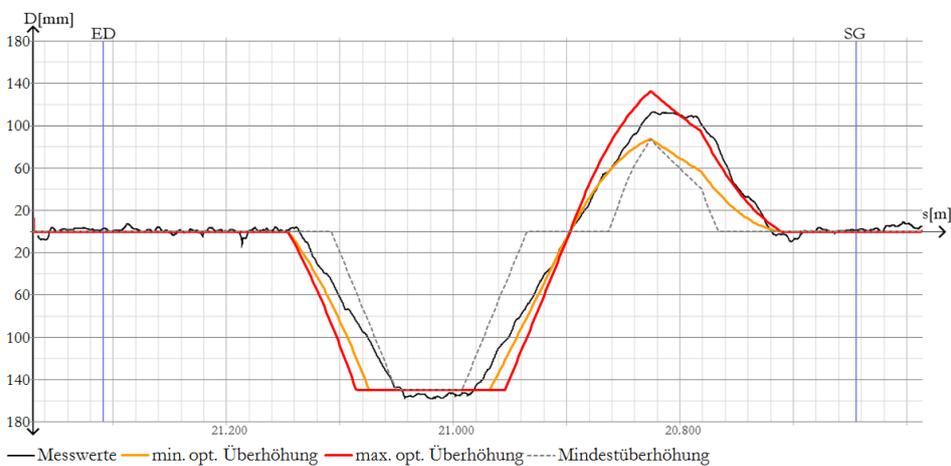


Abbildung 5.23.e: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, ED-SG

5.5.3.6 Abschnitt Schlachthausgasse – Kardinal-Nagl-Platz

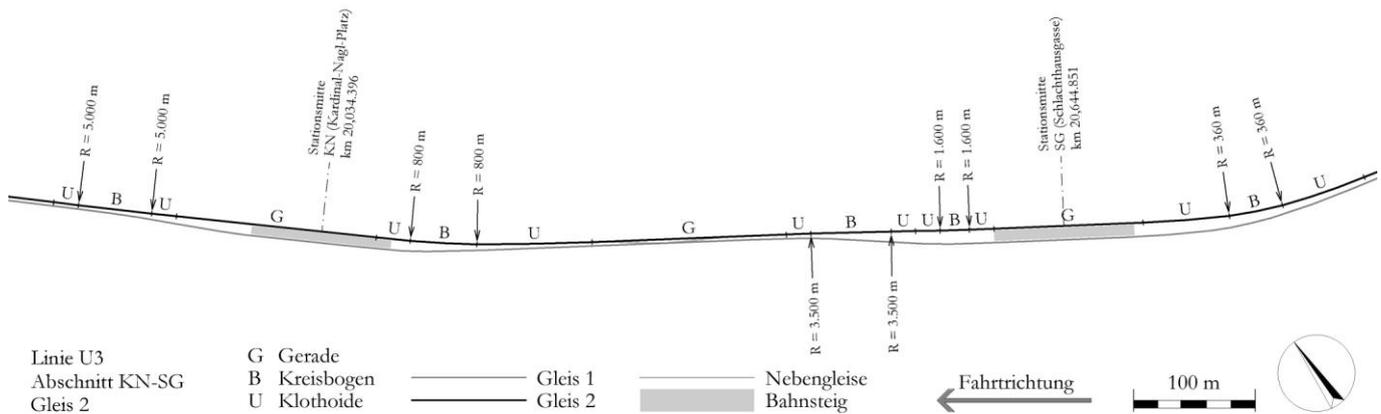


Abb. 5.19.f: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, Abschnitt SG-KN

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 2 zwischen den Haltestellen Schlachthausgasse und Kardinal-Nagl-Platz beträgt 610,455 m. Die Höhenlage der Strecke steigt in diesem Bereich um 6,566 m in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 20,770 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 2 befinden sich zwei Weichen aufgrund einer Überleitstelle zu Gleis 1, deren Lage in der Abb. 5.21.f zu sehen ist.

Aufgrund des kurzen Stationsabstandes und des längeren Beschleunigungsbereichs zufolge der Steigung gibt es keinen Bereich, den der gesamte Zug mit gleichbleibender Höchstgeschwindigkeit passiert, wie in Abb. 5.22.f zu sehen ist.

Der in Abb. 5.20.f dargestellte Krümmungsverlauf zeigt, dass im Anschluss an die Station Schlachthausgasse ein kurzer Rechtsbogen mit einem Radius von 1.600 m liegt, der von einem Linksbogen mit einem Radius von 3.500 m gefolgt wird. Danach verläuft die Trasse entlang einer Geraden, gefolgt von einem Rechtsbogen mit einem Radius von 800 m vor der Station Kardinal-Nagl-Platz, der von einem relativ langen Übergangsbogen eingeleitet wird. Sämtliche Krümmungswechsel sind in Form von Übergangsbögen ausgebildet.

Die Lage der Bögen in den Bereichen mit geringeren Fahrgeschwindigkeiten und die teilweise recht großen Bogenradien führen dazu, dass die optimale Überhöhung entlang der Strecke keine besonders hohen Werte erreicht, wie in der Abb. 5.23.f ersichtlich ist. Lediglich im Bereich des dritten Bogens mit dem Radius von 800 m ergeben sich nennenswerte Größen der optimalen Überhöhung von ca. 30 mm. In diesem Bereich ist aber ohnehin eine Überhöhung von 20 mm eingebaut.

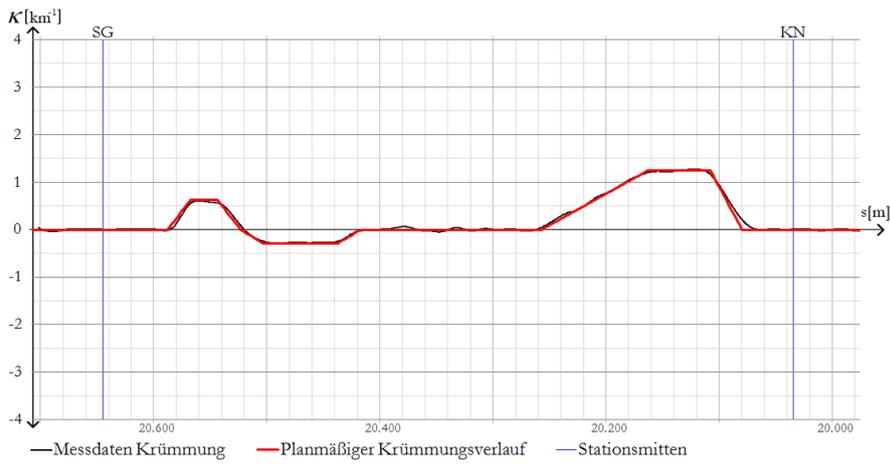


Abbildung 5.20.f: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, SG-KN

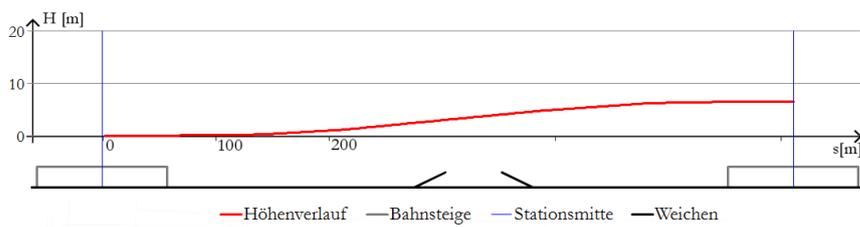


Abbildung 5.21.f: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 2, SG-KN

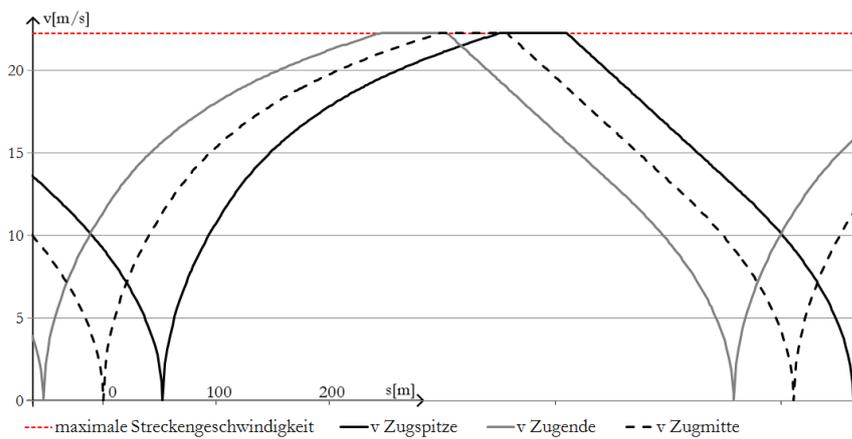


Abbildung 5.22.f: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, SG-KN

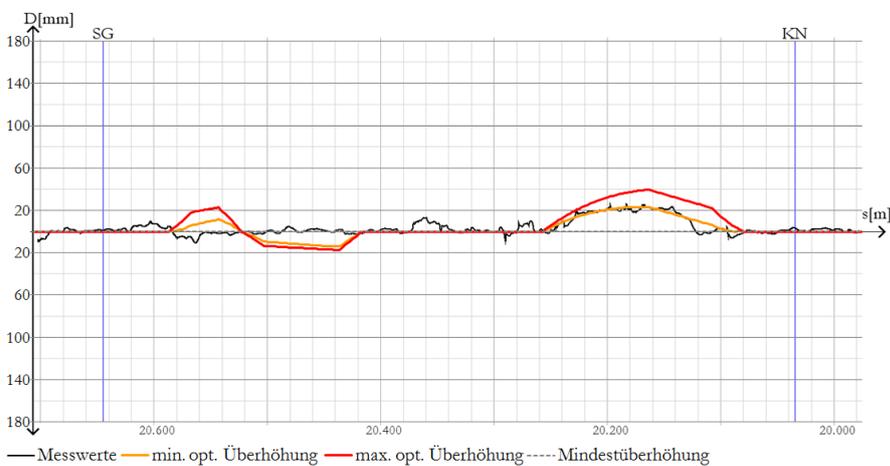


Abbildung 5.23.f: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, SG-KN

5.5.3.7 Abschnitt Kardinal-Nagl-Platz – Rochusgasse

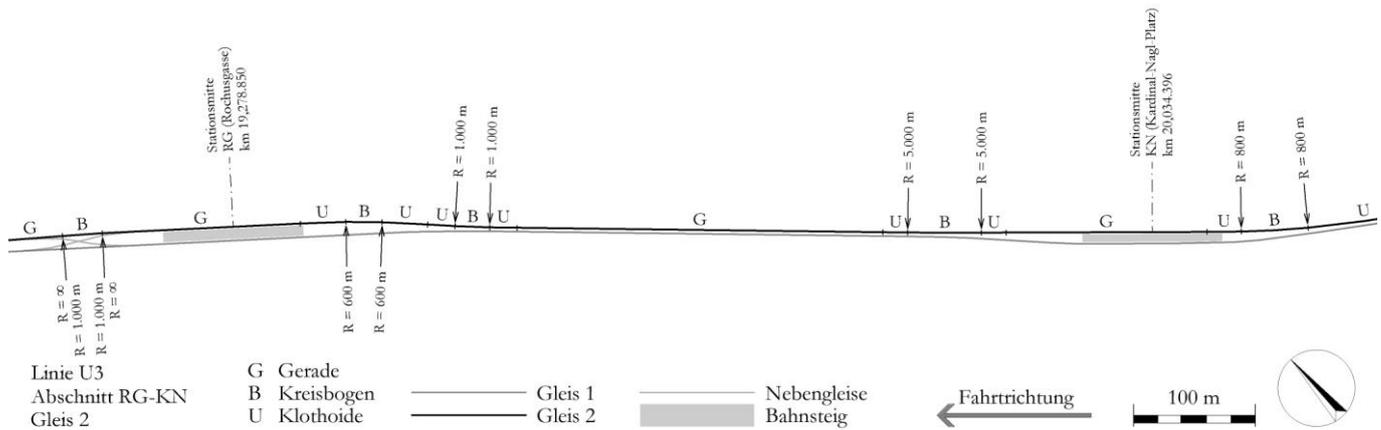


Abb. 5.19.g: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, Abschnitt KN-RG

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 2 zwischen den Haltestellen Kardinal-Nagl-Platz und Rochusgasse beträgt 755,546 m. Die Höhenlage der Strecke verringert sich in diesem Bereich um 3,807 m in Fahrtrichtung. Die größte auftretende Neigung ist ein Gefälle von 13,000 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befinden sich keine Weichen.

Der in Abb. 5.20.g dargestellte Krümmungsverlauf zeigt einen Rechtsbogen mit einem Radius von 5.000 m, dem ein gerader Streckenbereich folgt. Knapp vor der Station Rochusgasse befindet sich schließlich eine Bogenfolge mit einem Rechtsbogen mit einem Radius von 1.000 m und einem darauffolgenden Linksbogen mit einem Radius von 600 m. Alle Kreisbögen sind von Übergangsbögen flankiert.

Wie in der Abb. 5.23.g ersichtlich ist, erfordert der Bogen mit dem Radius von 5.000 m keine nennenswerte Überhöhung. Die beiden stärker gekrümmten Bögen sind mit einer eingebauten Überhöhung versehen, die im Wesentlichen im Bereich der Untergrenze der optimalen Überhöhung verläuft.

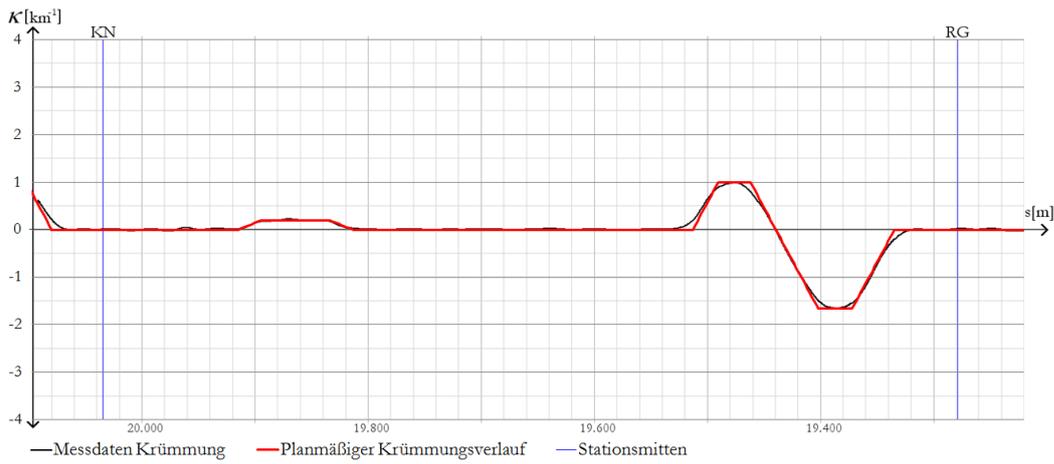


Abbildung 5.20.g: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, KN-RG

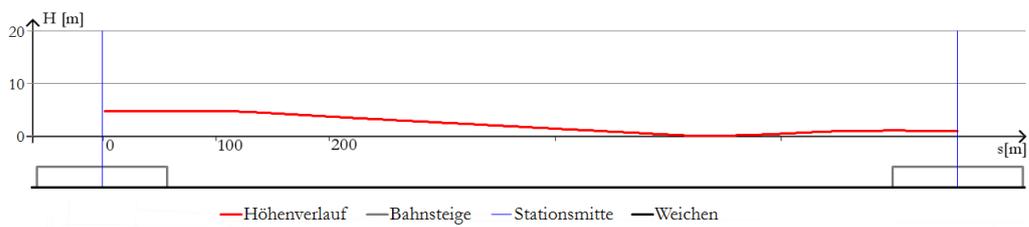


Abbildung 5.21.g: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 2, KN-RG

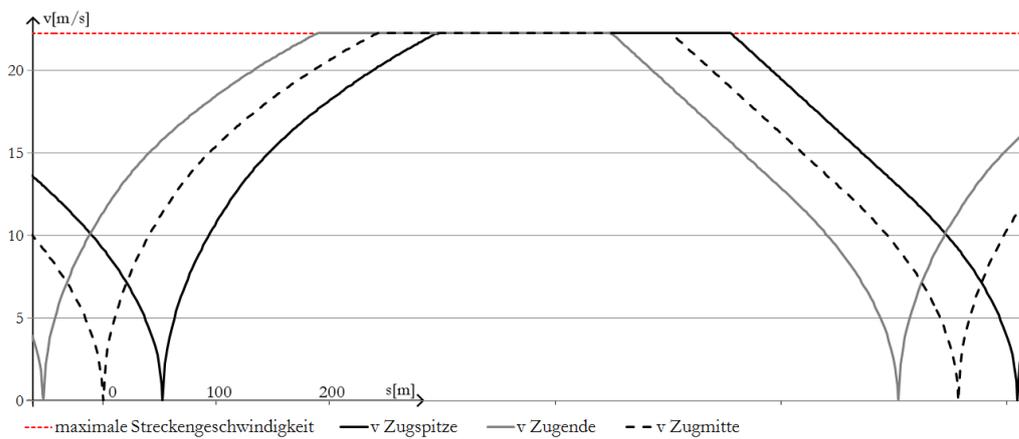


Abbildung 5.22.g: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, KN-RG

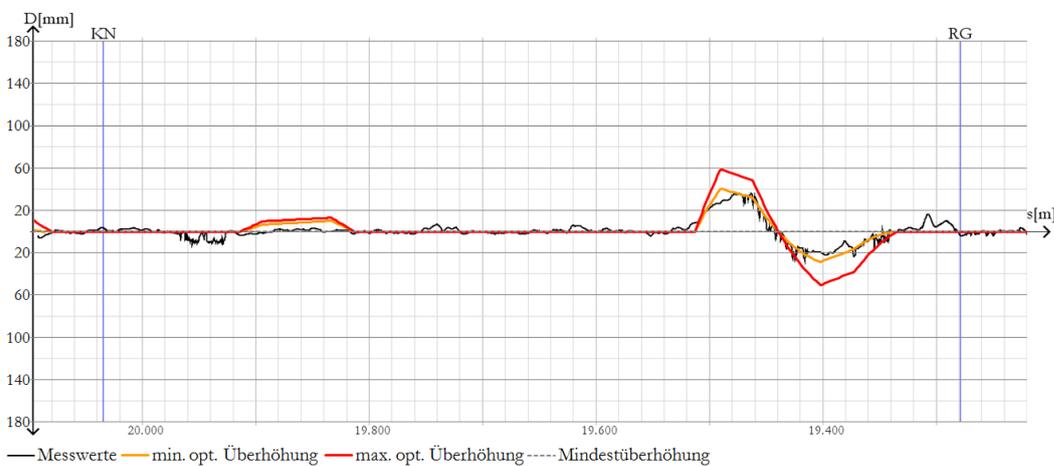


Abbildung 5.23.g: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, KN-RG

5.5.3.8 Abschnitt Rochusgasse – Landstraße

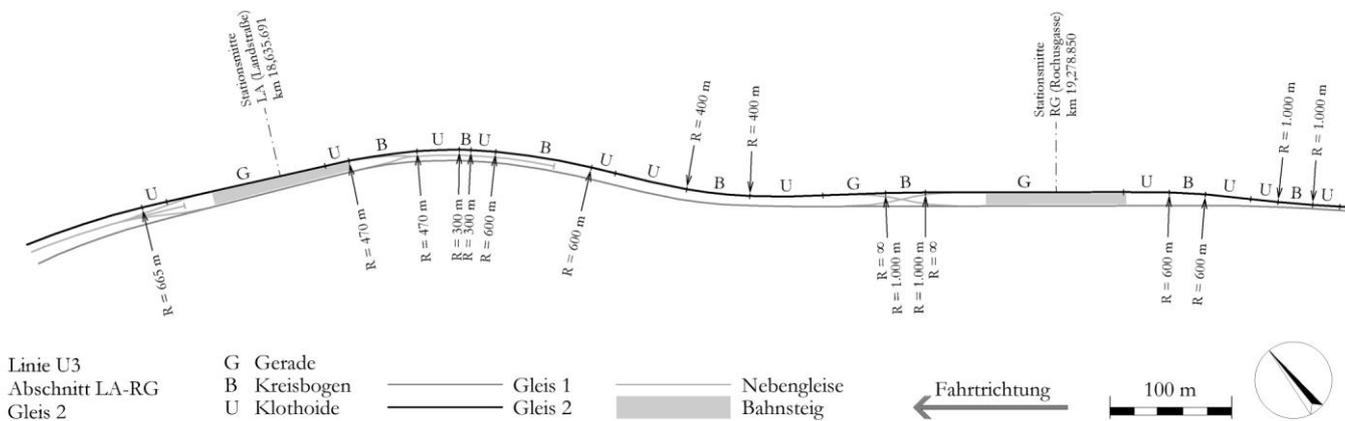


Abb. 5.19.h: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, Abschnitt RG-LA

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 2 zwischen den Haltestellen Rochusgasse und Landstraße beträgt 643,159 m. Die Höhenlage der Strecke verringert sich in diesem Bereich um 7,087 m in Fahrtrichtung. Die größte auftretende Neigung ist ein Gefälle von 32,674 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 2 befinden sich drei Weichen aufgrund einer Überleitstelle zu Gleis 1 sowie aufgrund eines Abstell- bzw. Wendegleises in der Nähe der Station Landstraße, deren Lage in der Abb. 5.21.h zu sehen ist.

Der in der Abb. 5.20.h dargestellte Krümmungsverlauf dieses Streckenabschnittes zeigt, dass es nach der Station Rochusgasse im Bereich der Gleisverbindungen zu Gleis 1 einen Kreisbogen mit einem Radius von 1.000 m gibt, der ohne Übergangsbögen eingebaut wurde. Nach einem kurzen geraden Abschnitt folgen ein Rechtsbogen mit einem Radius von 400 m sowie ein Linksbogen in Form eines Korbbogens mit den Radien 600 m, 300 m und 470 m. An den Stellen der Krümmungswechsel sind jeweils Übergangsbögen angeordnet.

Die Abbildung 5.23.h zeigt, dass der erste Linksbogen aufgrund der fehlenden Übergangsbögen nicht überhöht ist, die optimale Überhöhung für diesen Kreisbogen aber bei ca. 30 mm liegt. Der anschließende Rechtsbogen weist eine eingebaute Überhöhung auf, die sich an der Mindestüberhöhung orientiert, während die optimale Überhöhung um ca. 50 mm höher liegt. Die anschließende Linksbogenfolge liegt im Bremsbereich. Am Anfang des Bogens mit 600 m ist die optimale Überhöhung deshalb um einiges höher als die eingebaute Überhöhung. Im Bereich des Bogens mit dem Radius von 300 m ist die eingebaute Überhöhung im optimalen Bereich, der Kreisbogen mit 470 m ist vermutlich wegen der Weiche nicht überhöht, was aufgrund der geringen Geschwindigkeit in keiner besonders großen Abweichung zur optimalen Überhöhung resultiert.

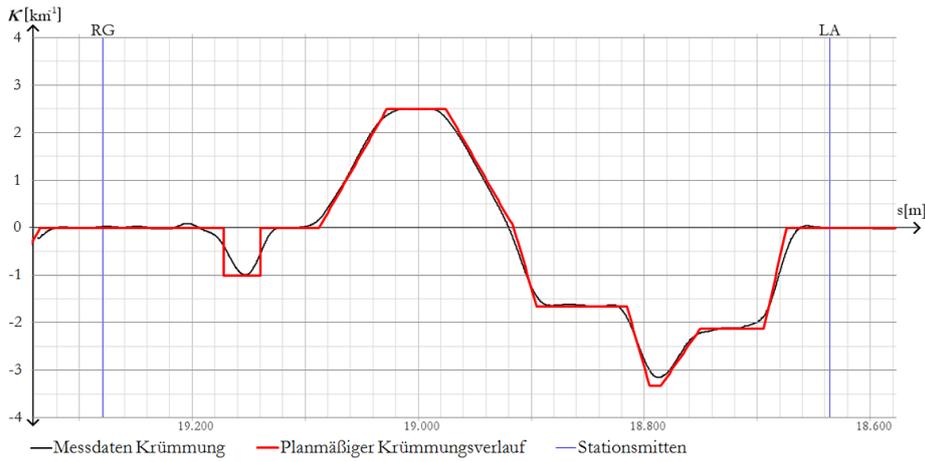


Abbildung 5.20.h: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, RG-LA

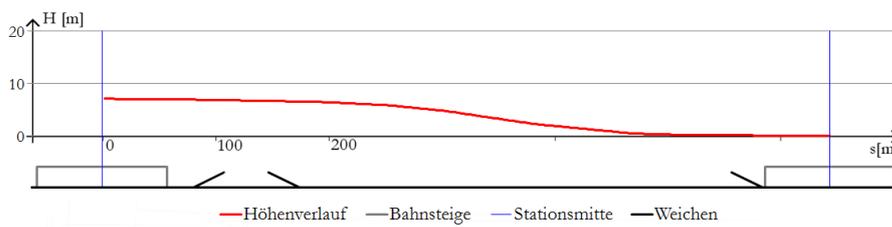


Abbildung 5.21.h: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 2, RG-LA

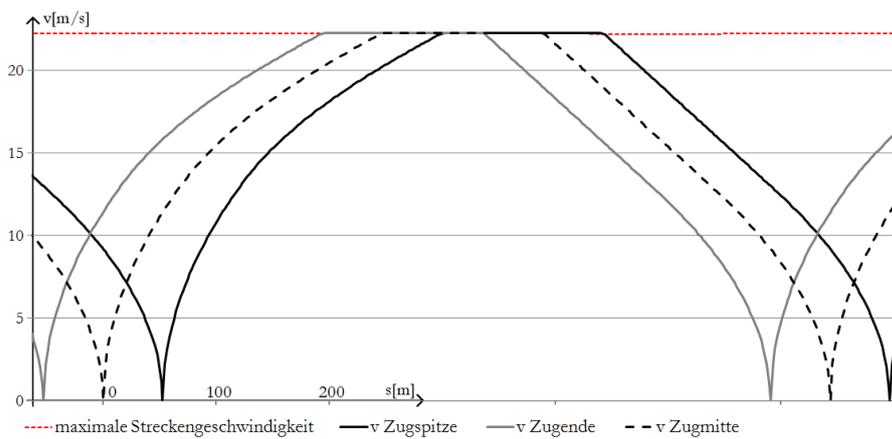


Abbildung 5.22.h: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, RG-LA

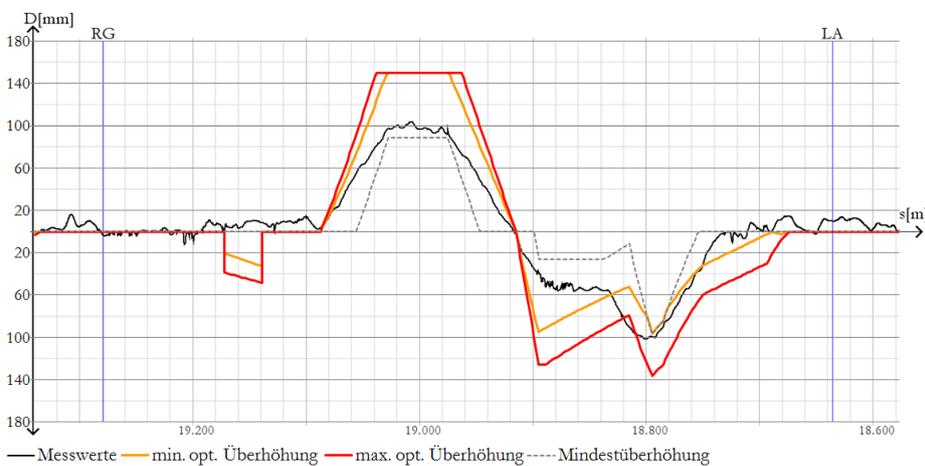


Abbildung 5.23.h: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, RG-LA

5.5.3.9 Abschnitt Landstraße – Stubentor

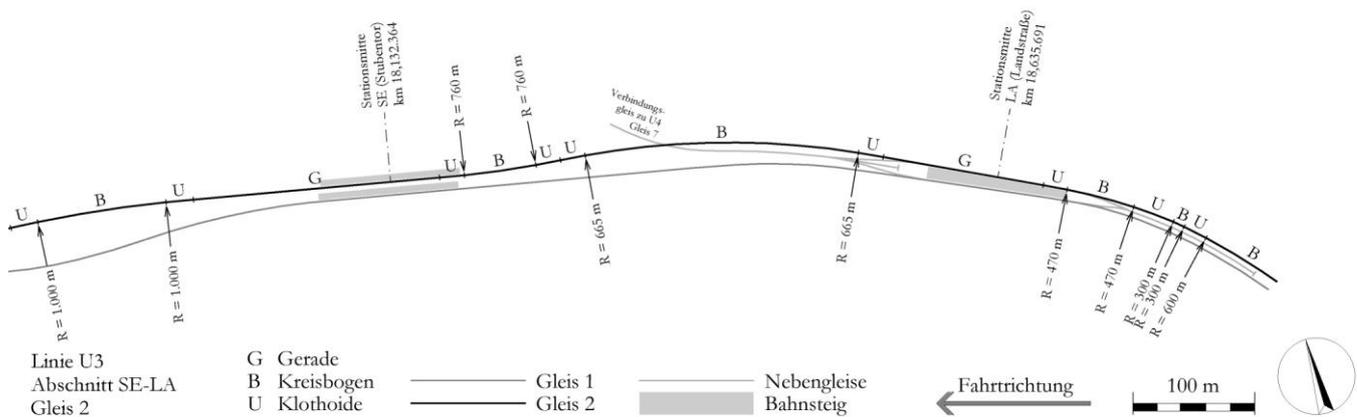


Abb. 5.19.i: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, Abschnitt LA-SE

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 2 zwischen den Haltestellen Landstraße und Stubentor beträgt 503,327 m. Die Höhenlage der Strecke verringert sich in diesem Bereich um 2,384 m in Fahrtrichtung. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 16,324 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 2 befindet sich eine Weiche aufgrund der Abzweigung des Verbindungsgleises zur Linie U4, deren Lage in der Abb. 5.21.i zu sehen ist.

Im Anschluss daran weichen die Längsneigungen der beiden Tourengleise deutlich voneinander ab, da sich die Gleise und die Bahnsteige in der Station Stubentor in unterschiedlichen Ebenen befinden.

Aufgrund des kurzen Stationsabstandes gibt es keinen Bereich, den der gesamte Zug mit gleichbleibender Höchstgeschwindigkeit passiert, wie in Abb. 5.22.i zu sehen ist.

Der in Abb. 5.20.i dargestellte Krümmungsverlauf zeigt einen langgezogenen Linksbogen mit einem Radius von 665 m, der in einen Rechtsbogen mit einem Radius von 760 m übergeht, welcher bis knapp vor die Station Stubentor reicht. Der Linksbogen liegt teilweise im Beschleunigungs- und teilweise im Bremsbereich. Die Werte des Bereichs der optimalen Überhöhung nehmen daher in der ersten Bogenhälfte zu und anschließend wieder ab. Die eingebaute Überhöhung befindet sich konstant im Bereich der Mindestüberhöhung, wodurch sich Abweichungen von bis zu 80 mm zum optimalen Bereich ergeben. Selbst wenn die eingebaute Überhöhung konstant bleiben soll, hätte diese um 40 mm höher eingebaut werden können, ohne den optimalen Bereich zu übersteigen.

Der anschließende Rechtsbogen liegt in einem Bereich geringerer Geschwindigkeiten. Die optimale Überhöhung wäre hier bei ca. 20 mm, es ist jedoch keine Überhöhung ausgeführt.

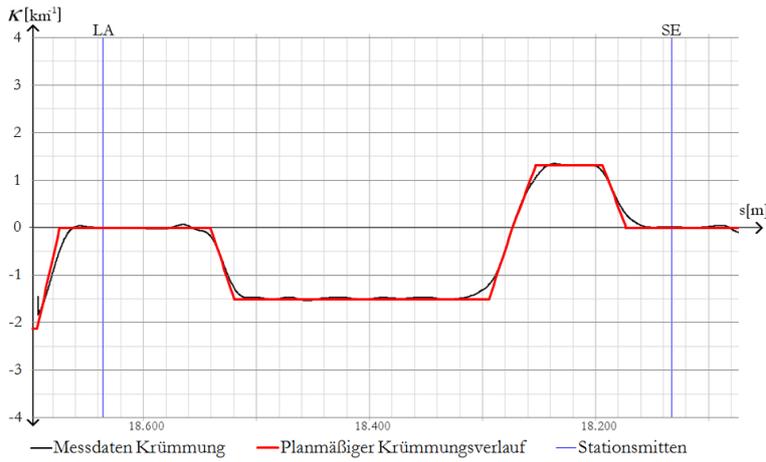


Abbildung 5.20.i: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, LA-SE

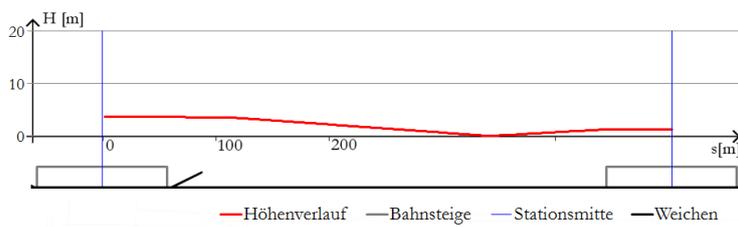


Abbildung 5.21.i: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 2, LA-SE

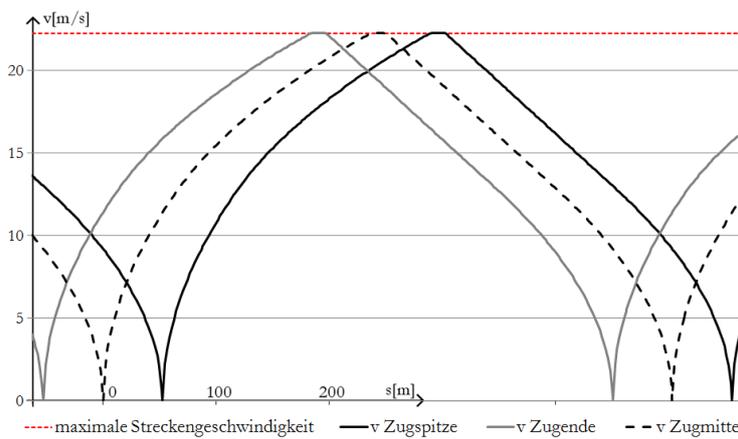


Abbildung 5.22.i: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, LA-SE

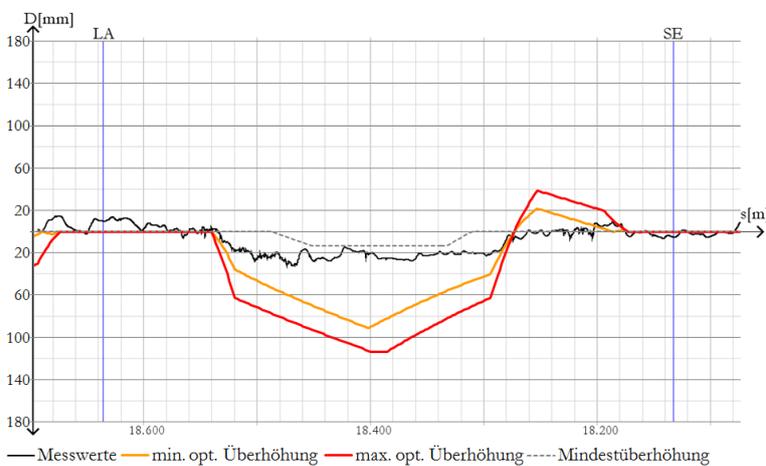


Abbildung 5.23.i: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, LA-SE

5.5.3.10 Abschnitt Stubentor – Stephansplatz

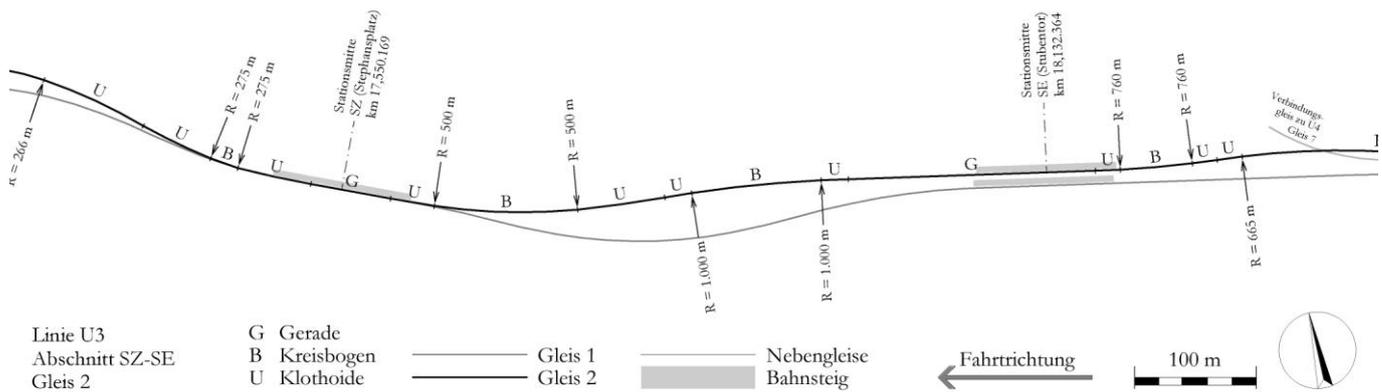


Abb. 5.19.j: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, Abschnitt SE-SZ

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 2 zwischen den Haltestellen Stubentor und Stephansplatz beträgt 582,195 m. Die Höhenlage der Strecke steigt in diesem Bereich um 7,154 m in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 39,446 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befinden sich keine Weichen, da der Höhenverlauf der Hauptgleise unterschiedlich ist.

Aufgrund des kurzen Stationsabstandes gibt es jedoch keinen Bereich, den der gesamte Zug mit gleichbleibender Höchstgeschwindigkeit passiert, wie in [Abb. 5.22.j](#) zu sehen ist.

Der in [Abb. 5.20.j](#) dargestellte Krümmungsverlauf zeigt einen Linksbogen mit einem Radius von 1.000 m und im Anschluss einen Rechtsbogen mit einem Radius von 500 m, die jeweils von Übergangsbögen flankiert sind.

Im Verlauf des optimalen Überhöhungsbereichs lässt sich der Einfluss der veränderlichen Geschwindigkeit wieder gut erkennen. Während die eingebaute Überhöhung im ersten Kreisbogen um ca. 20 – 30 mm unter dem optimalen Bereich liegt, wird im zweiten Kreisbogen der Verlauf des optimalen Bereiches um bis zu 60 mm verfehlt. Darüber hinaus liegt die eingebaute Überhöhung im Bereich des Bogenanfangs unter der erforderlichen Mindestüberhöhung. Die Höchstgeschwindigkeit müsste daher in diesem Bereich verringert werden.

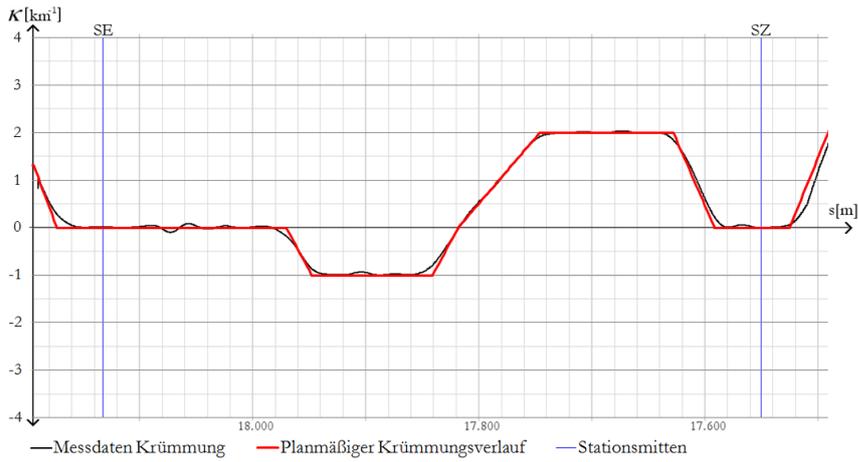


Abbildung 5.20.j: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, SE-SZ

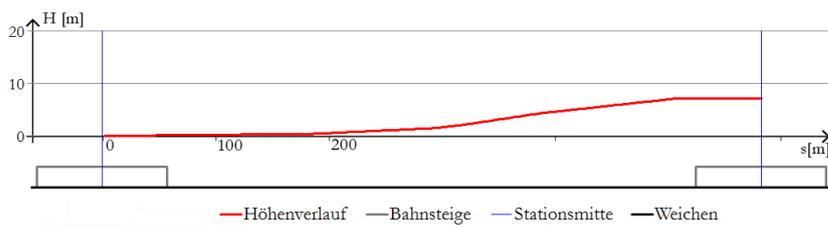


Abbildung 5.21.j: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 2, SE-SZ

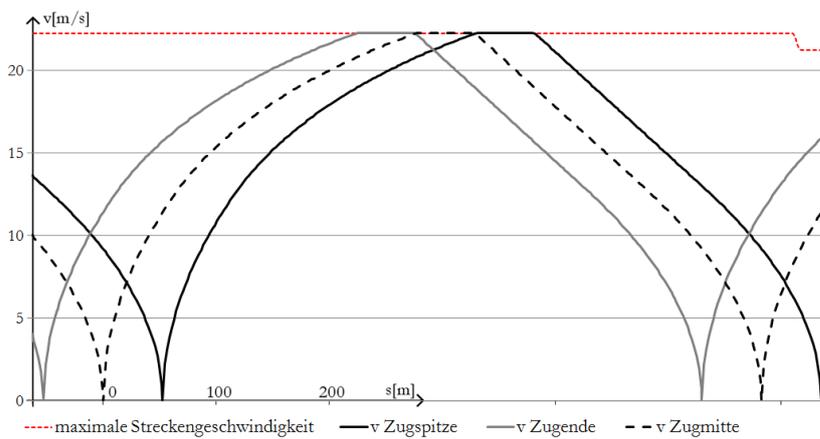


Abbildung 5.22.j: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, SE-SZ

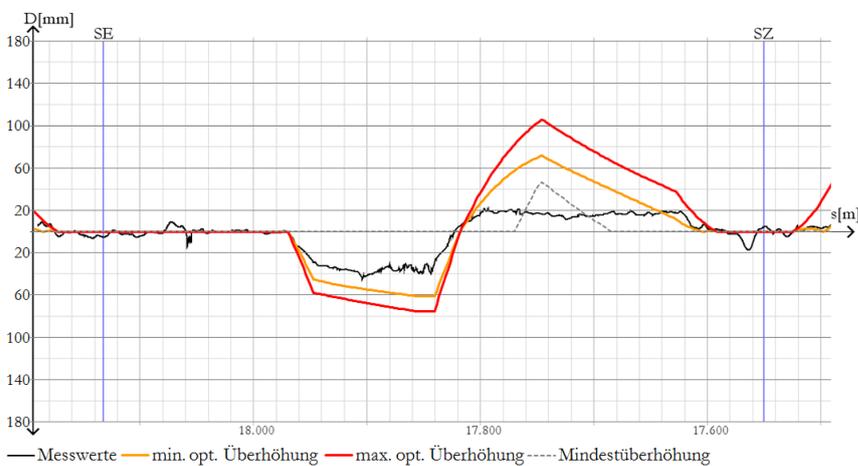


Abbildung 5.23.j: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, SE-SZ

5.5.3.11 Abschnitt Stephansplatz – Herrengasse

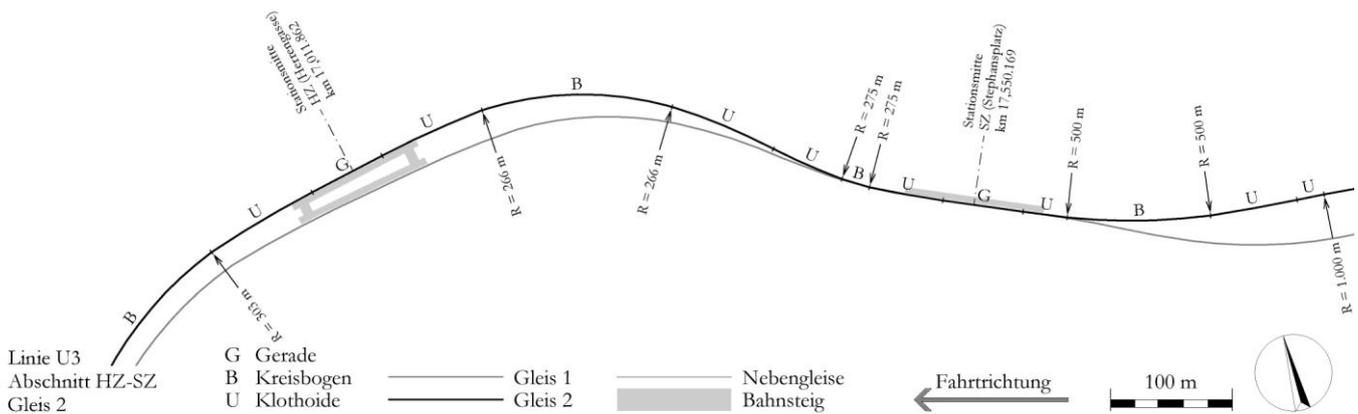


Abb. 5.19.k: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, Abschnitt SZ-HZ

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 2 zwischen den Haltestellen Stephansplatz und Herrengasse beträgt 538,307 m. Die Höhenlage der Strecke steigt in diesem Bereich um 1,700 m in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist ein Gefälle von 12,580 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befinden sich keine Weichen. In der Station Stephansplatz befinden sich die beiden Gleise und die Bahnsteige in Doppelstocklage übereinander. Danach weisen sie einen unterschiedlichen Höhenverlauf auf und liegen in der Station Herrengasse wieder auf demselben Niveau.

Aufgrund des kurzen Stationsabstandes gibt es jedoch trotz der durch die Unterschreitung des Mindestradius verminderten Höchstgeschwindigkeit keinen Bereich, den der gesamte Zug mit gleichbleibender Höchstgeschwindigkeit passiert, wie in Abb. 5.22.k zu sehen ist.

Der in Abb. 5.20.k dargestellte Krümmungsverlauf dieses Streckenabschnittes zeigt einen kurzen Rechtsbogen, dem ein langer Linksbogen folgt. Beide Bögen haben einen geringeren als den Mindestradius und beide Bögen sind von Übergangsbögen flankiert.

Obwohl die Mindestüberhöhung in der Abb. 5.23.k aus dem aufgrund der Bogenradien verringerten Geschwindigkeitsprofil in Abb. 5.22.k errechnet wurde, unterschreitet die eingebaute Überhöhung die Mindestüberhöhung in beiden Kreisbögen. Daher müsste die zulässige Fahrgeschwindigkeit nochmals reduziert werden.

Im Bereich des Übergangsbogens nach dem zweiten Kreisbogen liegt die eingebaute Überhöhung allerdings streckenweise über dem optimalen Überhöhungsbereich. Dadurch kommt es in diesem Bereich zu einem Überhöhungsüberschuss, der auf den Großteil des Zuges wirkt.

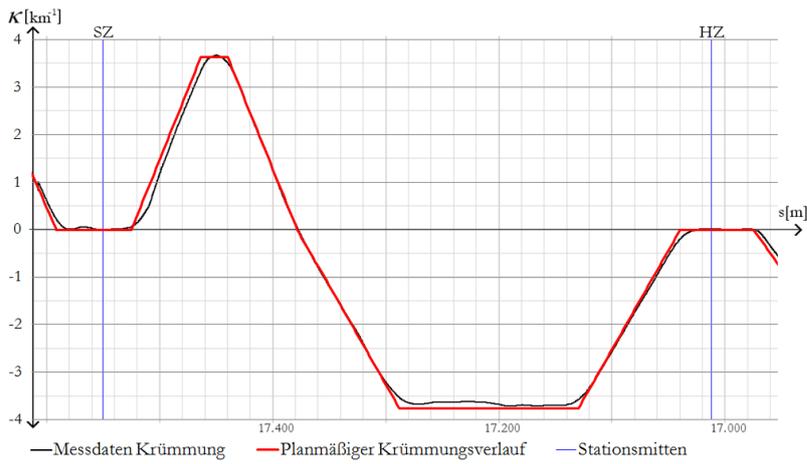


Abbildung 5.20.k: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, SZ-HZ

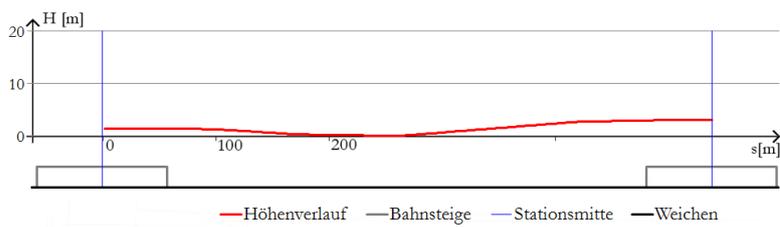


Abbildung 5.21.k: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 2, SZ-HZ

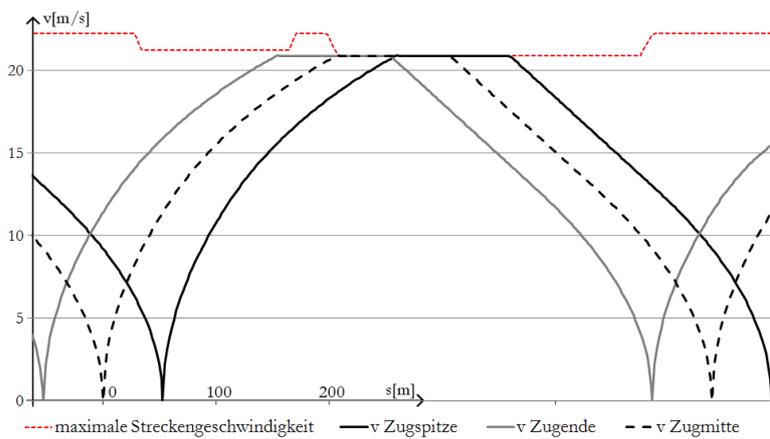


Abbildung 5.22.k: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, SZ-HZ

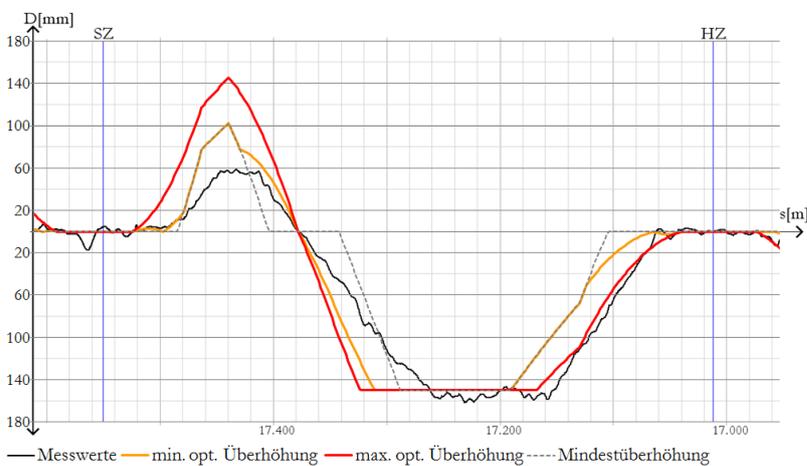


Abbildung 5.23.k: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, SZ-HZ

5.5.3.12 Abschnitt Herrengasse – Volkstheater

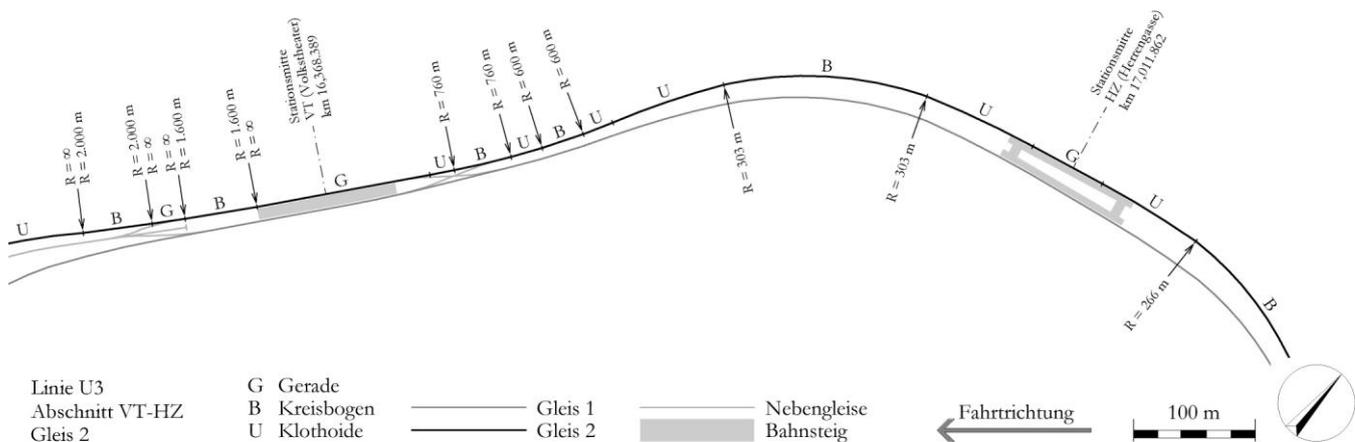


Abb. 5.19.1: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, Abschnitt HZ-VT

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 2 zwischen den Haltestellen Herrengasse und Volkstheater beträgt 643,473 m. Die Höhenlage der Strecke steigt in diesem Bereich um 10,350 m in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 36,496 %. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 2 befinden sich zwei Weichen aufgrund einer Überleitstelle zu Gleis 1, deren Lage in der Abb. 5.21.1 zu sehen ist.

Aufgrund der langen Beschleunigungsphase bedingt durch die große Steigung der Strecke gibt es in diesem Streckenabschnitt keinen Bereich, den der gesamte Zug mit gleichbleibender Höchstgeschwindigkeit passiert, wie in Abb. 5.22.1 zu sehen ist.

Der in der Abb. 5.20.1 dargestellte Krümmungsverlauf zeigt einen langgezogenen Linksbogen mit einem Radius von 303 m, der in einen Rechtsbogen in Form eines Korbbogens mit den Radien von 600 m und 760 m übergeht.

Bedingt durch den engen Kurvenradius ist die Mindestüberhöhung bei den höheren Geschwindigkeiten am Ende des Linksbogens beinahe so groß wie die maximal zulässige Überhöhung von 150 mm. Die eingebaute Überhöhung liegt bei ca. 100 mm und somit im Großteil des Kreisbogens unter dem optimalen Bereich.

Der Rechtsbogen ist gar nicht überhöhrt, was vermutlich auf die im Bogen befindliche Überleitstelle zurückzuführen ist. Jedoch ergibt sich in einem Bereich des Bogens eine Mindestüberhöhung von ca. 20 mm aus dem Geschwindigkeitsverlauf und die optimale Überhöhung am Bogenanfang liegt bei ca. 70 mm.

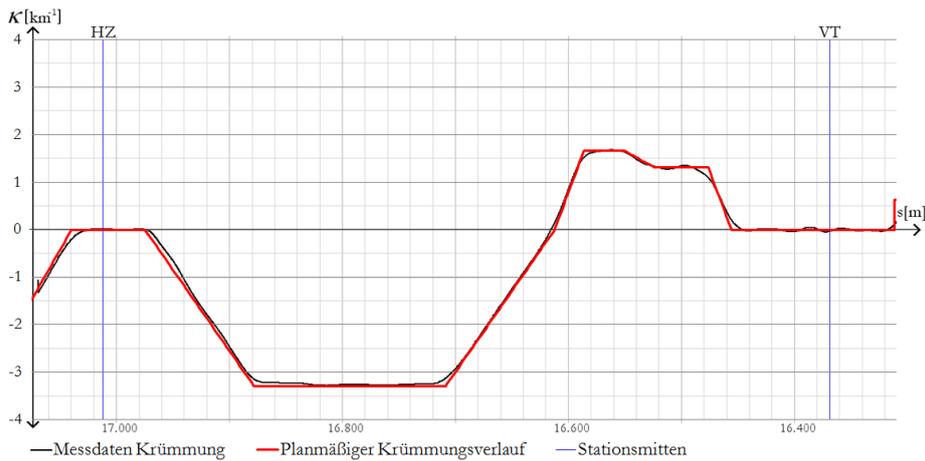


Abbildung 5.20.l: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, HZ-VT

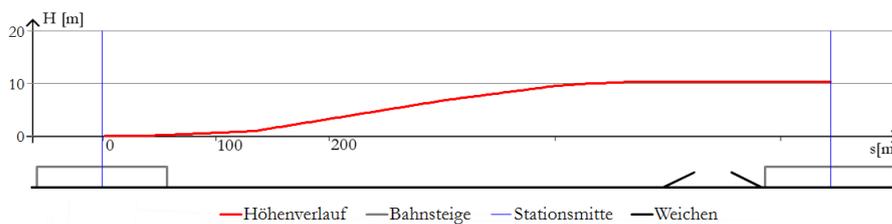


Abbildung 5.21.l: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 2, HZ-VT

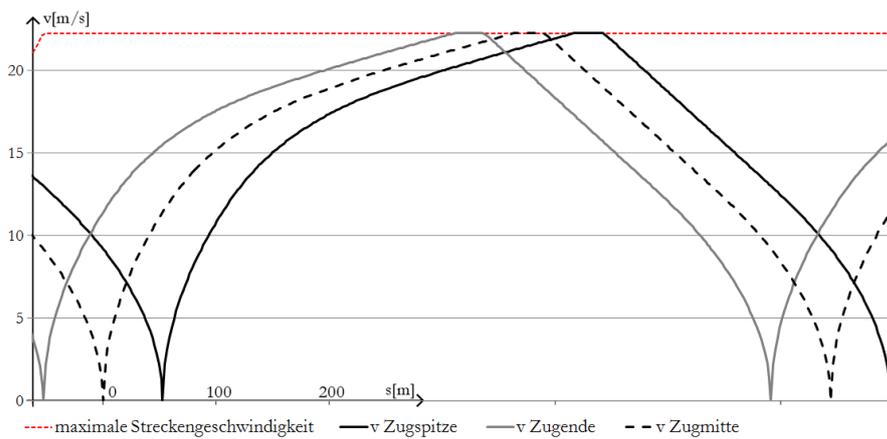


Abbildung 5.22.l: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, HZ-VT

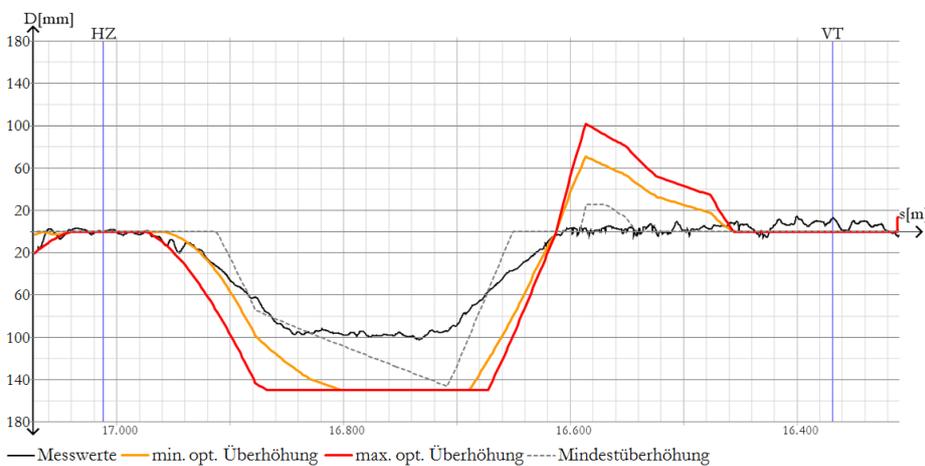


Abbildung 5.23.l: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, HZ-VT

5.5.3.13 Abschnitt Volkstheater – Neubaugasse

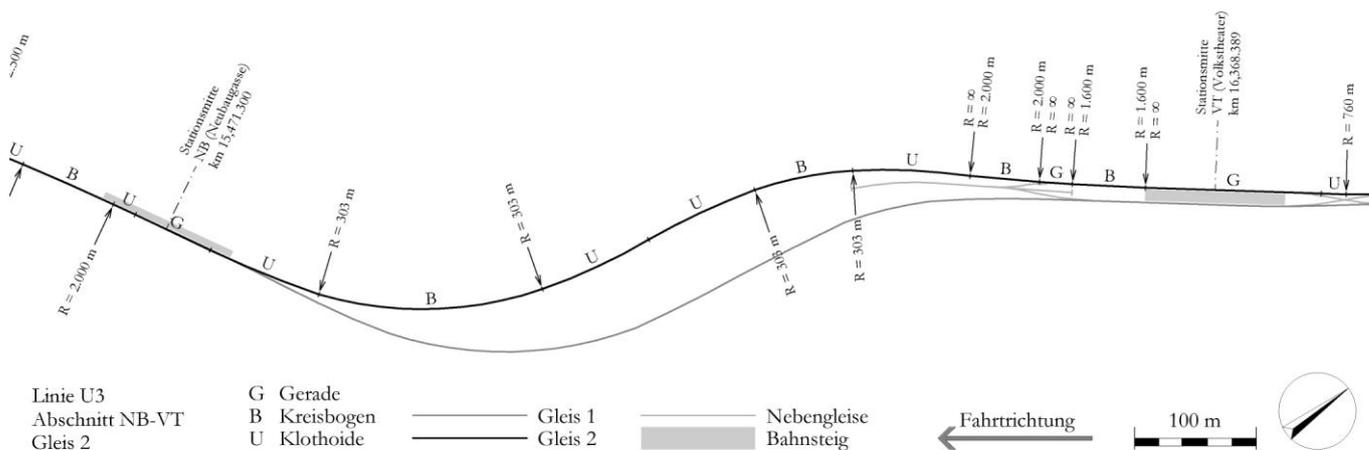


Abb. 5.19.m: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, Abschnitt VT-NB

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 2 zwischen den Haltestellen Volkstheater und Neubaugasse beträgt 897,089 m. Um 13,730 m steigt die Höhenlage der Strecke in diesem Bereich in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 40,000 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 2 befindet sich eine Weiche aufgrund eines Wende- bzw. Abstellgleises in der Nähe der Station Volkstheater, deren Lage in der Abb. 5.21.m zu sehen ist. Im Anschluss haben beide Tourengleise einen unterschiedlichen Höhenverlauf und befinden sich in der Station Neubaugasse in einer Doppelstocklage.

Im Krümmungsverlauf, der in der Abb. 5.20.m dargestellt ist, kann man erkennen, dass unmittelbar im Anschluss an den Bahnsteigbereich zwei durch eine Gerade voneinander getrennte Rechtsbögen mit Radien von 1.600 m und 2.000 m ohne Übergangsbögen angeordnet sind. Diese Trassierung wurde vermutlich aufgrund der an dieser Stelle situierten Weiche gewählt. Danach folgen ein Linksbogen mit einem Radius von 303 m und anschließend ein Rechtsbogen mit 303 m. Diese beiden Bögen sind von Übergangsbögen flankiert.

In der Abb. 5.23.m kann aus dem Verlauf der eingebauten Überhöhung abgelesen werden, dass die beiden Rechtsbögen nach der Station Volkstheater nicht überhöht sind. In den anschließenden Kreisbögen wurde die maximal zulässige Überhöhung eingebaut und somit auch die Mindestüberhöhung berücksichtigt.

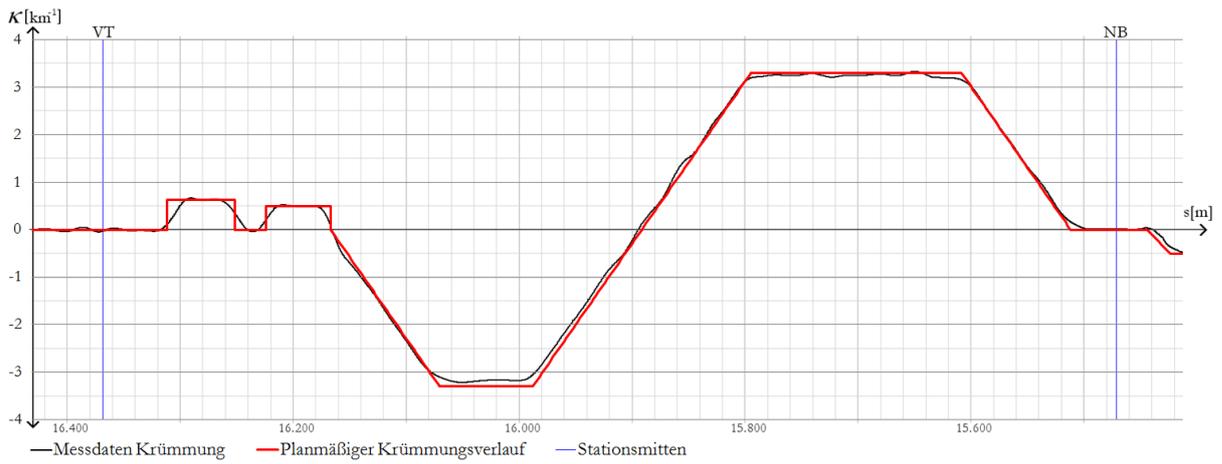


Abbildung 5.20.m: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, VT-NB

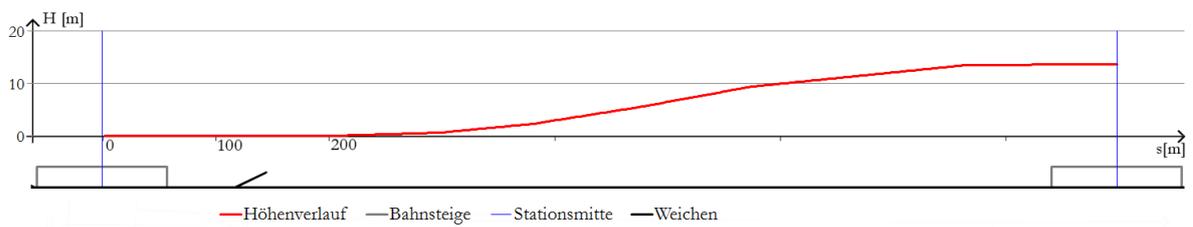


Abbildung 5.21.m: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 2, VT-NB

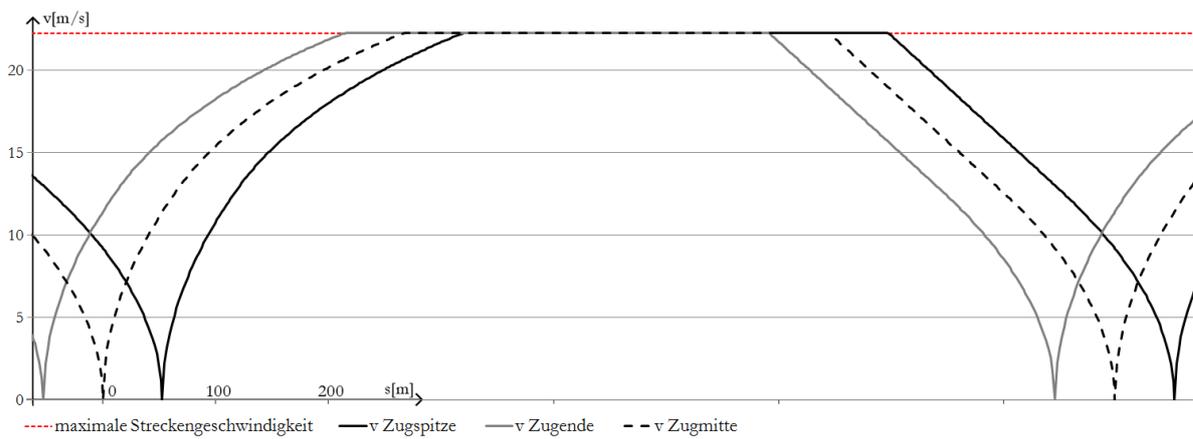


Abbildung 5.22.m: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, VT-NB

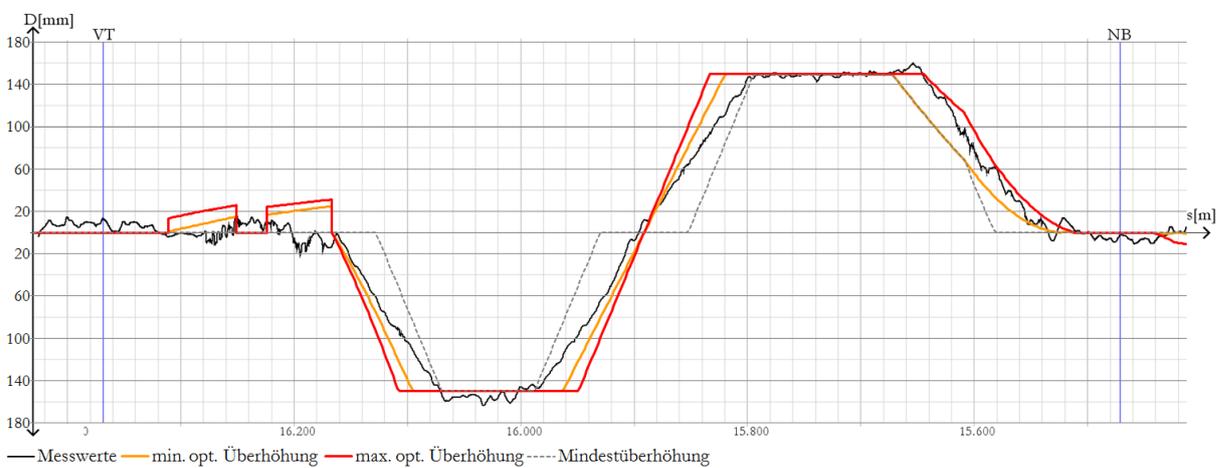


Abbildung 5.23.m: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, VT-NB

5.5.3.14 Abschnitt Neubaugasse – Zieglergasse

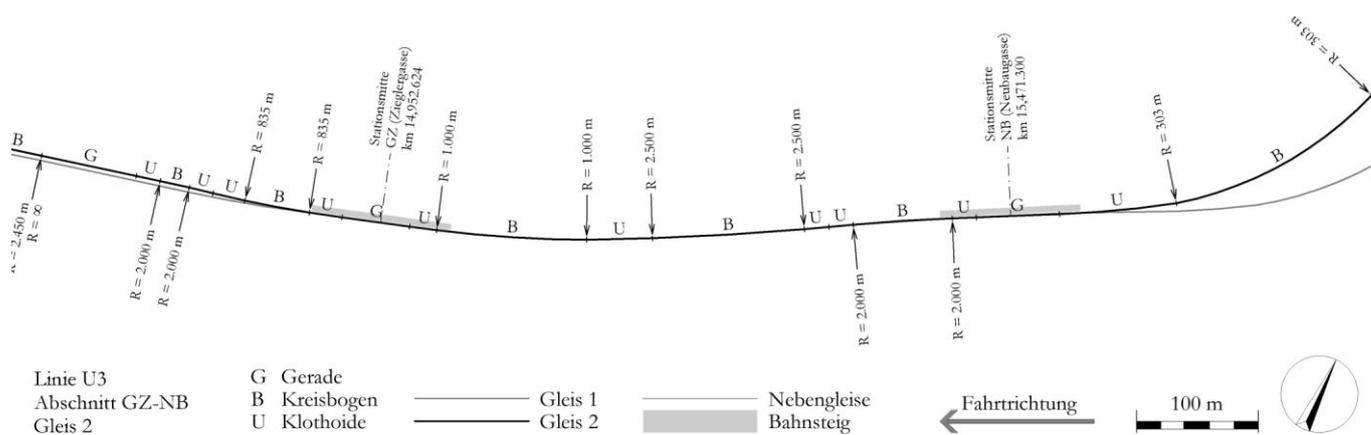


Abb. 5.19.n: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, Abschnitt NB-GZ

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 2 zwischen den Haltestellen Neubaugasse und Zieglergasse beträgt 518,676 m. Die Höhenlage der Strecke verringert sich in diesem Bereich um 0,780 m in Fahrtrichtung. Die größte auftretende Neigung ist ein Gefälle von 9,759 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 2 befinden sich keine Weichen, da die beiden Hauptgleise in Doppelstocklage übereinander verlaufen.

Aufgrund des kurzen Stationsabstandes gibt es keinen Bereich, den der gesamte Zug mit gleichbleibender Höchstgeschwindigkeit passiert, wie in Abb. 5.22.n zu sehen ist.

Der in Abb. 5.20.n abgebildete Krümmungsverlauf zeigt einen bereits im Bahnsteigbereich beginnenden Linksbogen mit einem Radius von 2.000 m, der in einen Rechtsbogen in Form eines Korbbogens mit den Radien von 2.500 m und 1.000 m übergeht, der bis in den Bahnsteigbereich der Station Zieglergasse reicht.

Die in der Abb. 5.23.n abgebildete maximale optimale Überhöhung befindet sich am Beginn des Kreisbogens mit dem Radius von 1.000 m und liegt bei ca. 30 mm. Die eingebaute Überhöhung liegt in diesem Abschnitt im optimalen Bereich, die Abweichungen zwischen eingebaute und optimaler Überhöhung im restlichen Streckenabschnitt liegen bei maximal ca. 20 mm.

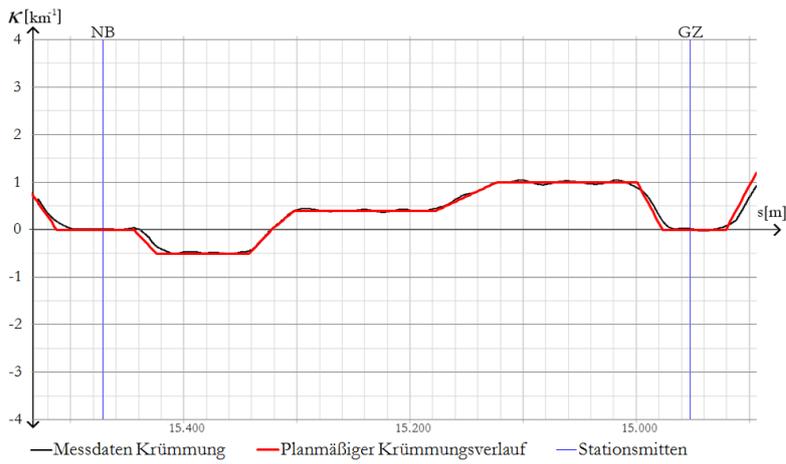


Abbildung 5.20.n: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, NB-GZ

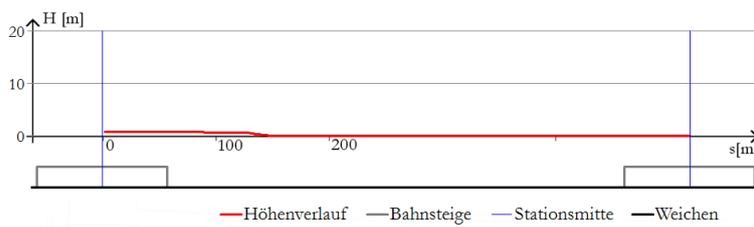


Abbildung 5.21.n: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 2, NB-GZ

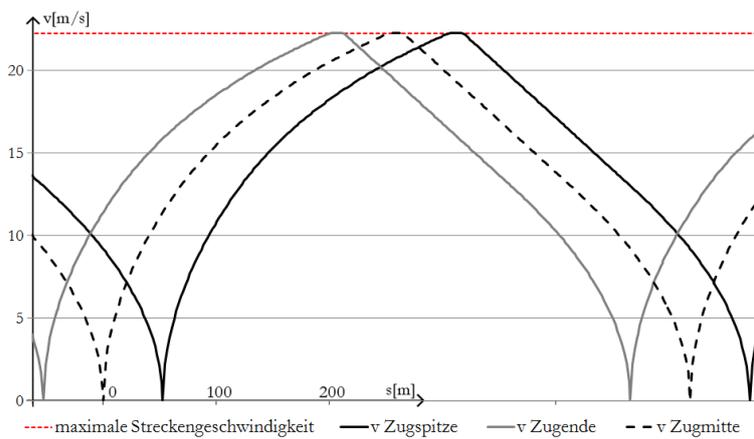


Abbildung 5.22.n: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, NB-GZ

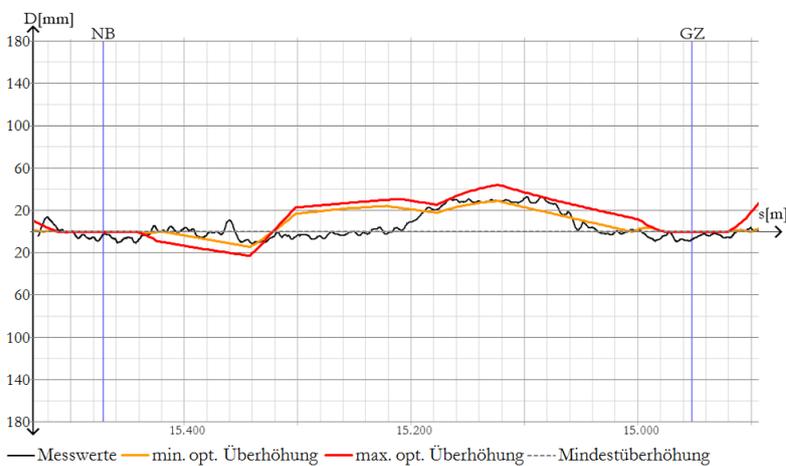


Abbildung 5.23.n: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, NB-GZ

5.5.3.15 Abschnitt Zieglergasse – Westbahnhof

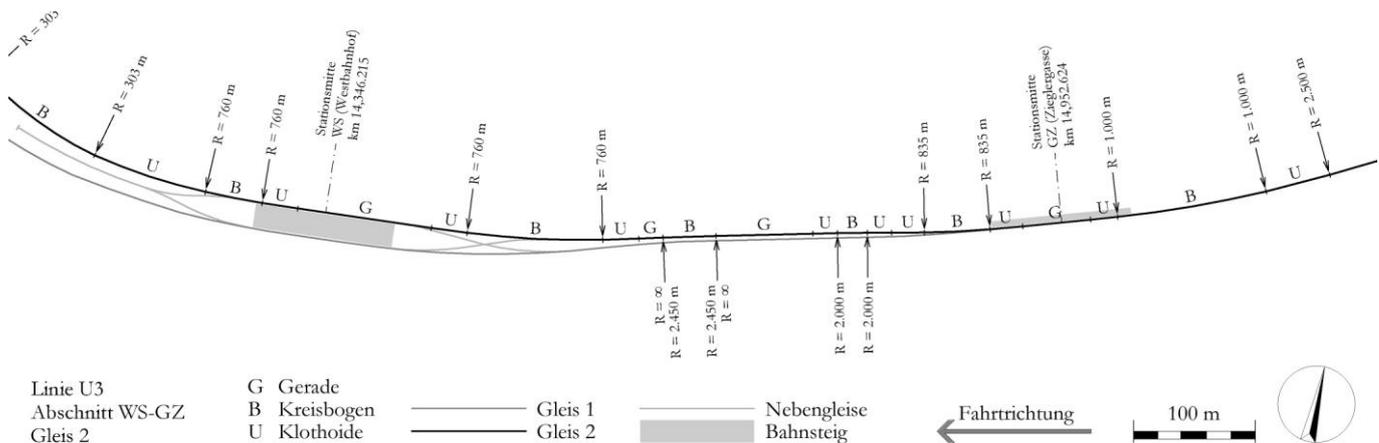


Abb. 5.19.o: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, Abschnitt GZ-WS

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 2 zwischen den Haltestellen Zieglergasse und Westbahnhof beträgt 606,409 m. Die Höhenlage der Strecke steigt in diesem Bereich um 3,000 m in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 23,348 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 2 befinden sich zwei Weichen aufgrund einer Überleitstelle zu Gleis 1, deren Lage in der Abb. 5.21.o zu sehen ist. Ausgehend von der Doppelstocklage der Gleise in der Haltestelle Zieglergasse haben die beiden Tourengleise einen unterschiedlichen Höhenverlauf und liegen schließlich im Bereich der Überleitstelle auf demselben Niveau.

Aufgrund des kurzen Stationsabstandes gibt es keinen Bereich, den der gesamte Zug mit gleichbleibender Höchstgeschwindigkeit passiert, wie in Abb. 5.22.o zu sehen ist.

Der in Abb. 5.20.o dargestellte Krümmungsverlauf zeigt einen Rechtsbogen mit einem Radius von 835 m, der unmittelbar nach dem Bahnsteigbereich beginnt. Er geht in einen Linksbogen mit einem Radius von 2.000 m über. Nach einer Gerade folgt ein Linksbogen mit einem Radius von 2.450 m, der ohne Übergangsbögen ausgeführt ist. In der Abb. 5.21.o ist ersichtlich, dass im Bereich dieses Bogens keine Weichen angeordnet sind. Der Grund für die Trassierung dieses Bogens kann somit aus den vorliegenden Daten nicht erklärt werden. Danach gibt es in diesem Streckenabschnitt noch einen Linksbogen mit einem Radius von 760 m.

Abb. 5.23.o zeigt, dass in dem gesamten Streckenabschnitt keine Überhöhung eingebaut ist. Die optimale Überhöhung ist am Beginn des letzten Bogens mit dem Radius von 760 m am größten und liegt bei ca. 60 mm. In diesem Bereich ist allerdings eine Weiche angeordnet, was der Grund für die fehlende Überhöhung sein dürfte. In den übrigen Kreisbögen liegt die maximale Abweichung zwischen der eingebauten Überhöhung und dem optimalen Bereich bei ca. 25 mm.

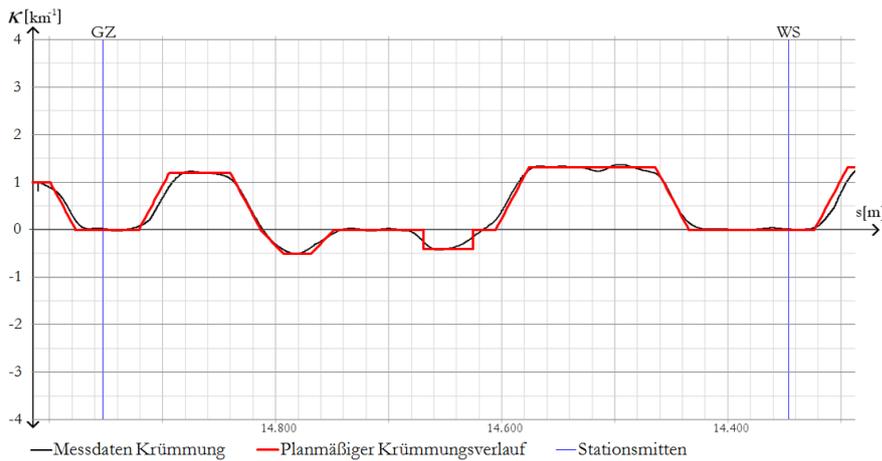


Abbildung 5.20.o: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, GZ-WS

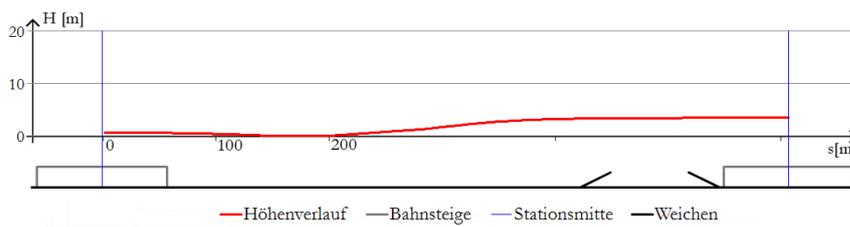


Abbildung 5.21.o: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 2, GZ-WS

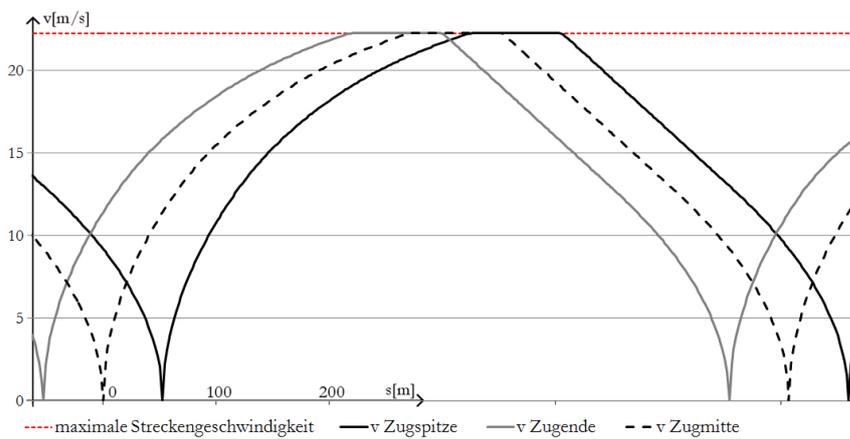


Abbildung 5.22.o: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, GZ-WS

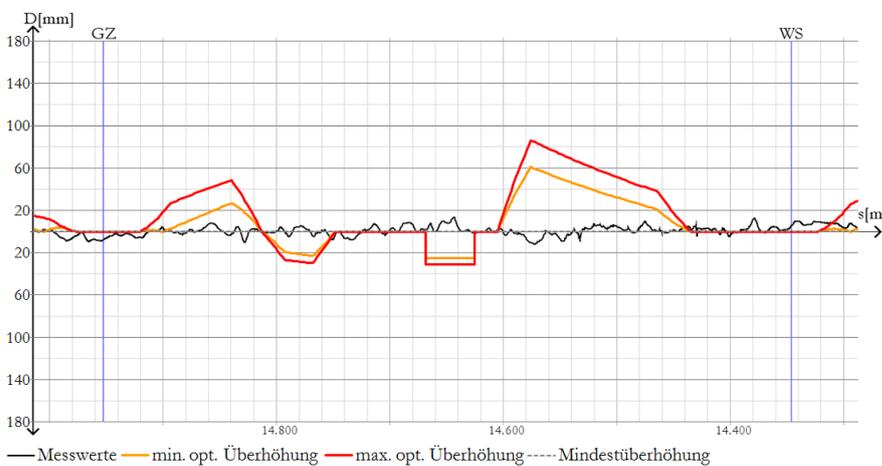


Abbildung 5.23.o: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, GZ-WS

5.5.3.16 Abschnitt Westbahnhof – Schweglerstraße

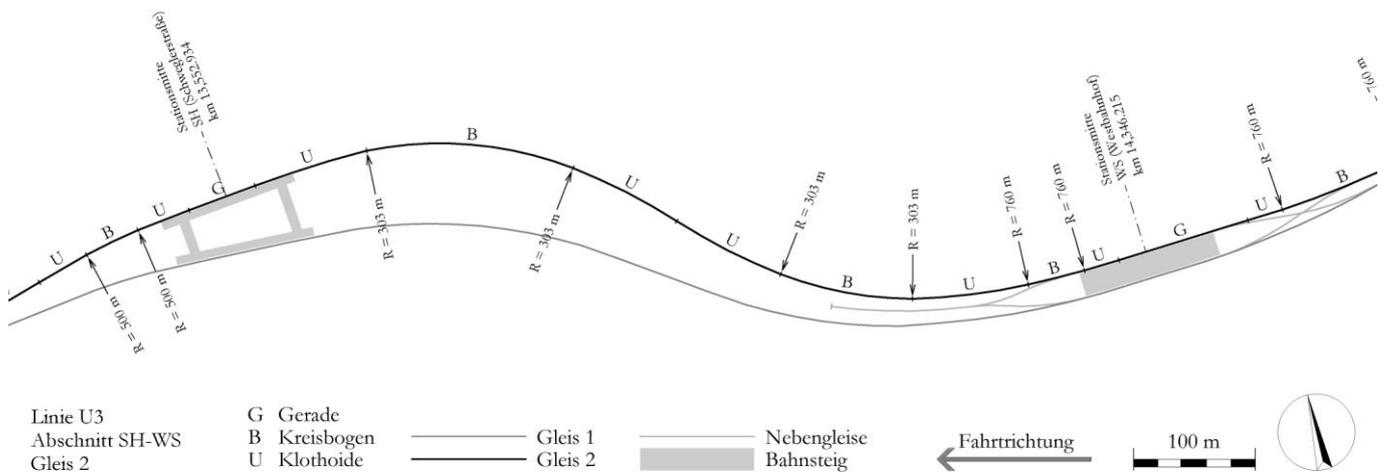


Abb. 5.19.p: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, Abschnitt WS-SH

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 2 zwischen den Haltestellen Westbahnhof und Schweglerstraße beträgt 793,281 m. Die Höhenlage der Strecke steigt in diesem Bereich um 19,692 m in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 40,000 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 2 befindet sich eine Weiche aufgrund eines Abstell- bzw. Wendegleises in der Nähe der Station Westbahnhof, deren Lage in der Abb. 5.21.p zu sehen ist.

In diesem Streckenabschnitt gibt es einen Rechtsbogen in Form eines Korbbogens mit den Radien von 760 m und 303 m, der schon im Bahnsteigbereich der Station Westbahnhof beginnt. Anschließend folgt ein Linksbogen mit einem Radius von 303 m, wie in der Abb. 5.20.p dargestellt ist.

In der Abb. 5.23.p sieht man, dass der erste Teil des Rechtsbogens mit dem Radius von 760 m nicht überhöht ist, was vermutlich an der in diesem Bereich eingebauten Weiche liegt. Die folgenden Kreisbögen sind mit dem Mindestradius trassiert, der dazu führt, dass die Mindestüberhöhung bei der Höchstgeschwindigkeit der maximal zulässigen Überhöhung entspricht. Die eingebaute Überhöhung liegt jedoch 20 bis 30 mm darunter. Somit müsste in diesem Streckenabschnitt die zulässige Fahrgeschwindigkeit verringert werden.

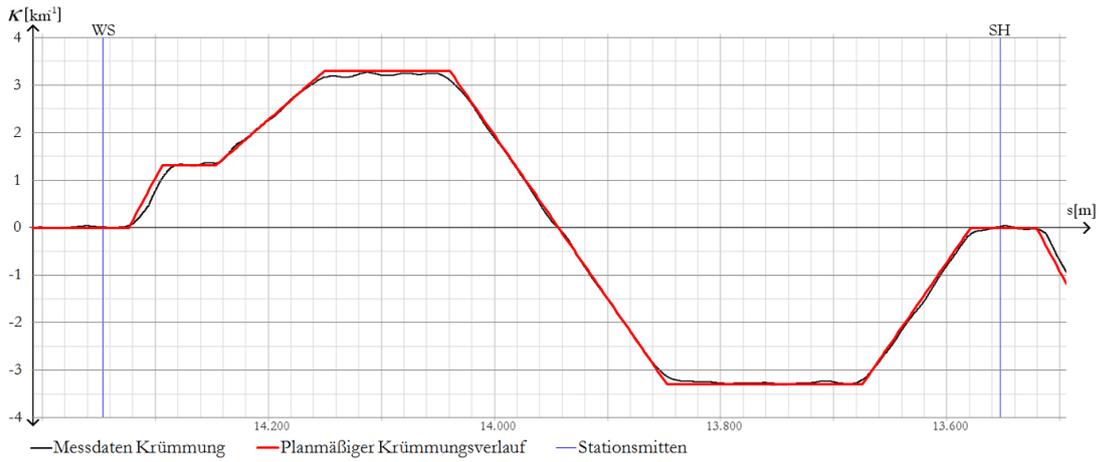


Abbildung 5.20.p: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, WS-SH

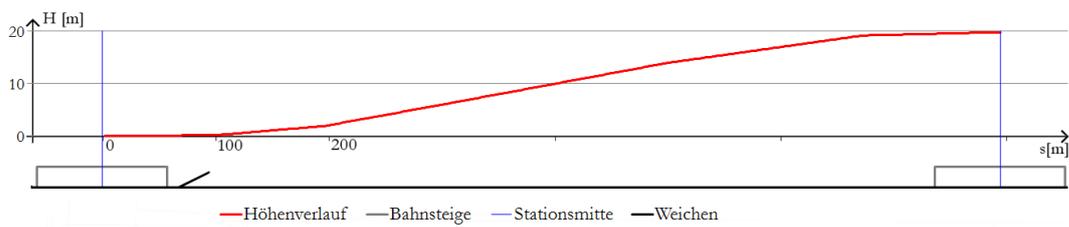


Abbildung 5.21.p: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 2, WS-SH

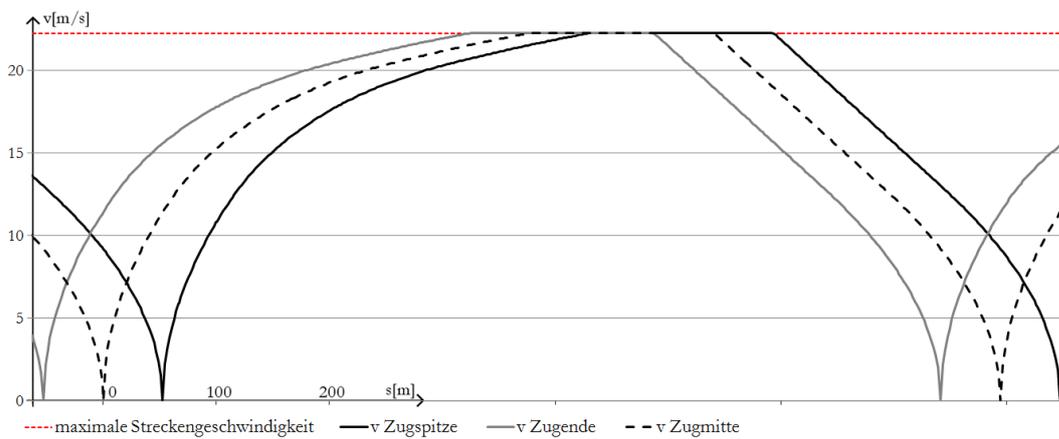


Abbildung 5.22.p: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, WS-SH

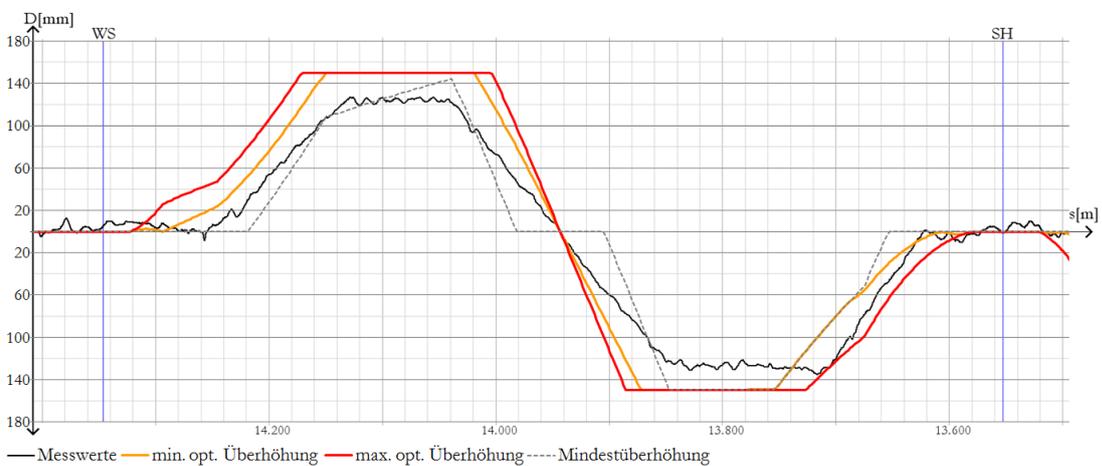


Abbildung 5.23.p: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, WS-SH

5.5.3.17 Abschnitt Schweglerstraße – Johnstraße

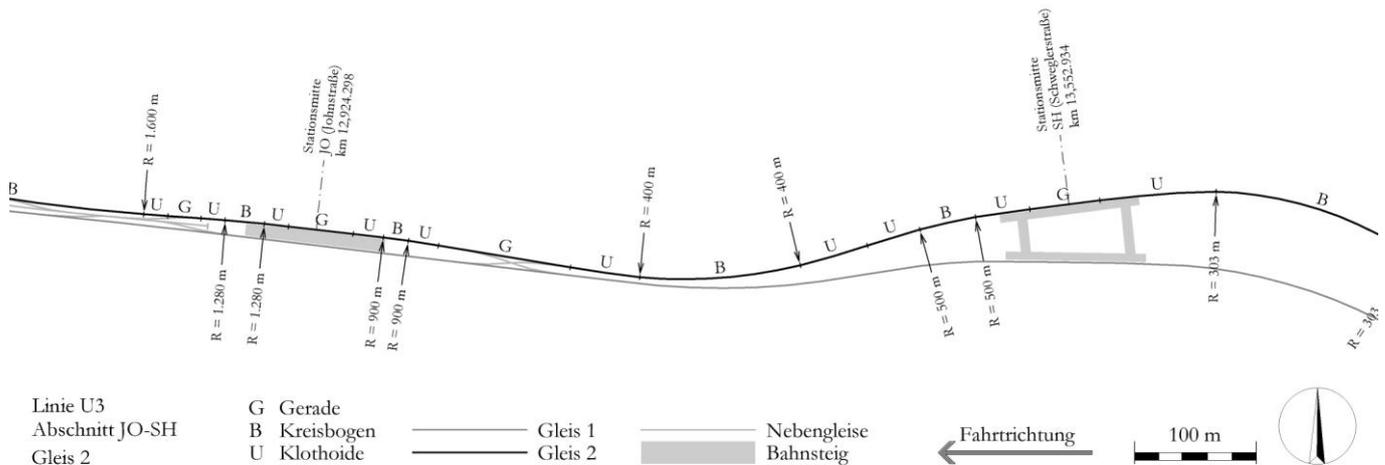


Abb. 5.19.q: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, Abschnitt SH-JO

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 2 zwischen den Haltestellen Schweglerstraße und Johnstraße beträgt 628,636 m. Die Höhenlage der Strecke steigt in diesem Bereich um 13,999 m in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 40,000 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 2 befinden sich zwei Weichen aufgrund einer Überleitstelle zu Gleis 1, deren Lage in der Abb. 5.21.q zu sehen ist.

Aufgrund des kurzen Stationsabstandes und der hohen Steigung im Beschleunigungsbereich wird die zulässige Maximalgeschwindigkeit in diesem Streckenabschnitt nicht erreicht, wie in der Abb. 5.22.q zu sehen ist.

Im in der Abb. 5.20.q dargestellten Krümmungsverlauf erkennt man im Anschluss an die Station Schweglerstraße einen Linksbogen mit einem Radius von 500 m, der in einen Rechtsbogen mit einem Radius von 400 m übergeht. Nach einer Zwischengeraden gibt es einen weiteren kurzen Linksbogen mit einem Radius von 900 m.

Die eingebaute Überhöhung im ersten Linksbogen bleibt geringfügig unter dem optimalen Bereich, wie man in der Abb. 5.23.q sehen kann. Im darauffolgenden Rechtsbogen liegt die eingebaute Überhöhung deutlicher unter dem optimalen Bereich. Die notwendige Mindestüberhöhung wird aber nicht unterschritten. Im Bereich des letzten Bogens gibt es keine eingebaute Überhöhung. Diese ist aufgrund der geringen Fahrgeschwindigkeiten hier auch nicht erforderlich.

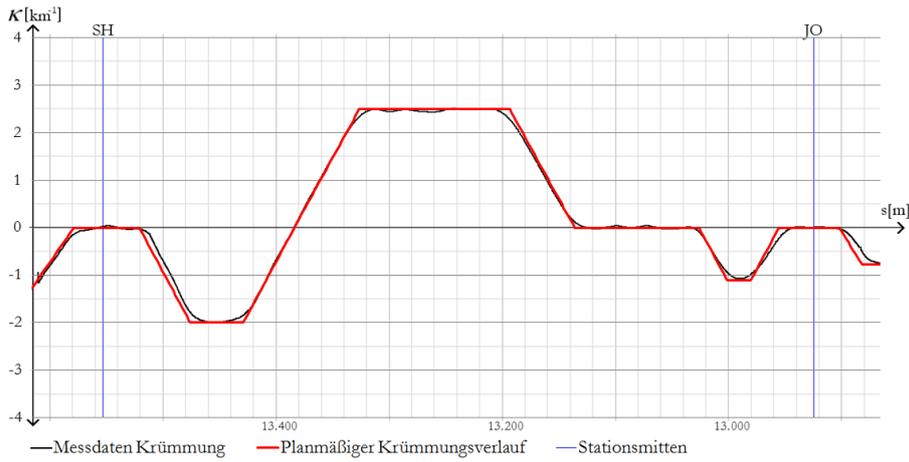


Abbildung 5.20.q: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, SH-JO



Abbildung 5.21.q: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 2, SH-JO

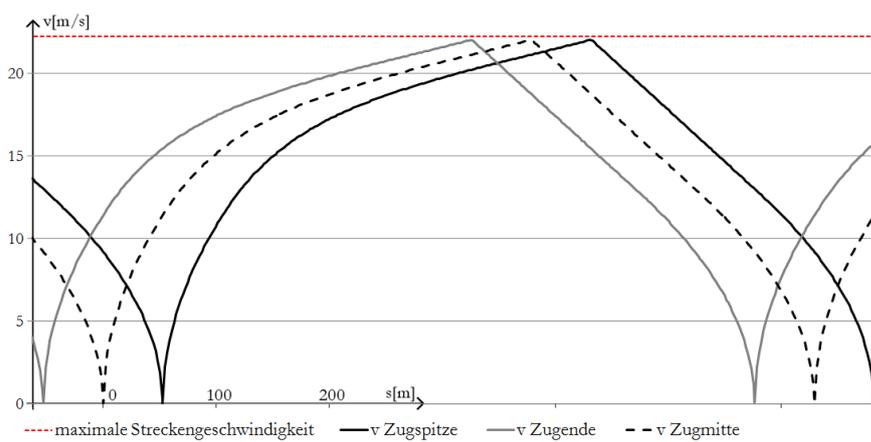


Abbildung 5.22.q: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, SH-JO

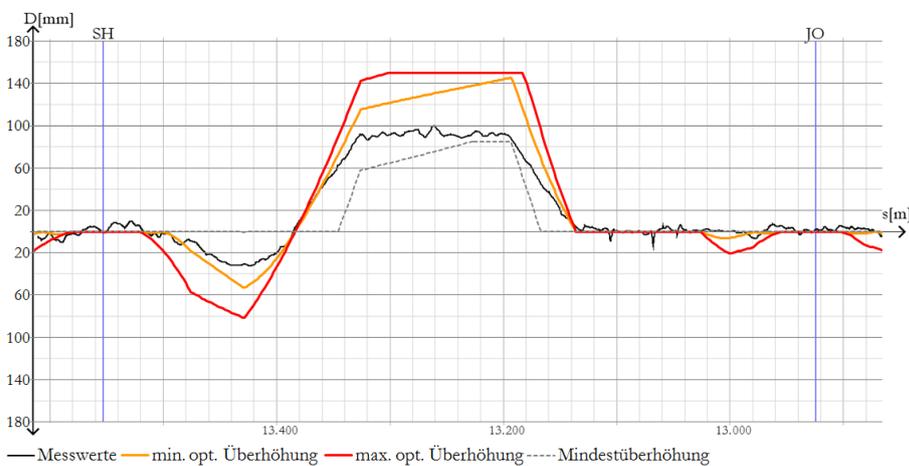


Abbildung 5.23.q: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, SH-JO

5.5.3.18 Abschnitt Johnstraße – Hütteldorfer Straße

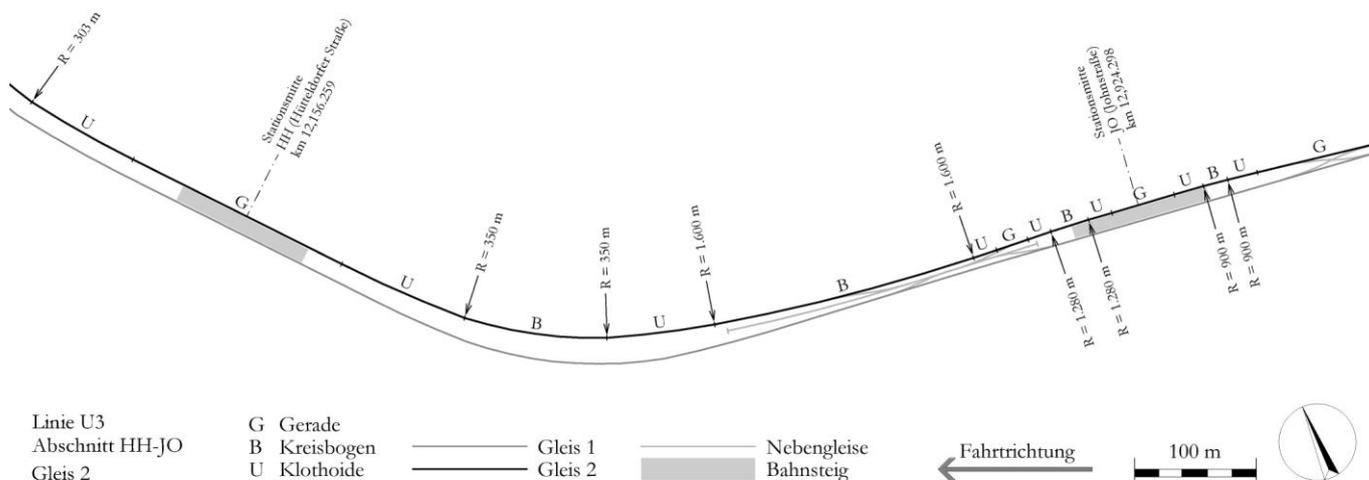


Abb. 5.19.r: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, Abschnitt JO-HH

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 2 zwischen den Haltestellen Johnstraße und Hütteldorfer Straße beträgt 768,039 m. Die Höhenlage der Strecke steigt in diesem Bereich um 1,509 m in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 25,000 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 2 befinden sich zwei Weichen aufgrund einer Überleitstelle zu Gleis 2 mit Abstellgleis, deren Lage in der Abb. 5.21.r zu sehen ist.

Der in der Abb. 5.20.r dargestellte Krümmungsverlauf zeigt einen kurzen Linksbogen mit einem Radius von 1.280 m, der zum Teil im Bahnsteigbereich der Station Johnstraße liegt. Nach einer kurzen Geraden folgt ein langgezogener Rechtsbogen mit einem Radius von 1.600 m, der schließlich in einen Rechtsbogen mit einem Radius von 350 m übergeht. An sämtlichen Krümmungswechseln sind Übergangsbögen angeordnet.

In der Abb. 5.23.r kann man sehen, dass der Linksbogen und der erste Teil des Rechtsbogens nicht überhöht sind, was vermutlich an der Situierung der Weichen in diesem Bereich liegt. Dadurch entsteht eine Abweichung der eingebauten Überhöhung zum optimalen Überhöhungsbereich von bis zu 40 mm. Der Rechtsbogen mit dem Radius von 350 m ist überhöht, wobei sich die eingebaute Überhöhung an der notwendigen Mindestüberhöhung orientiert. Trotzdem liegt die eingebaute Überhöhung im Bereich des Übergangsbogens nach dem Kreisbogenende über der Obergrenze der optimalen Überhöhung, was auf die Anwendung der klassischen Trassierung ohne Berücksichtigung der geringen Fahrgeschwindigkeiten zurückzuführen ist.

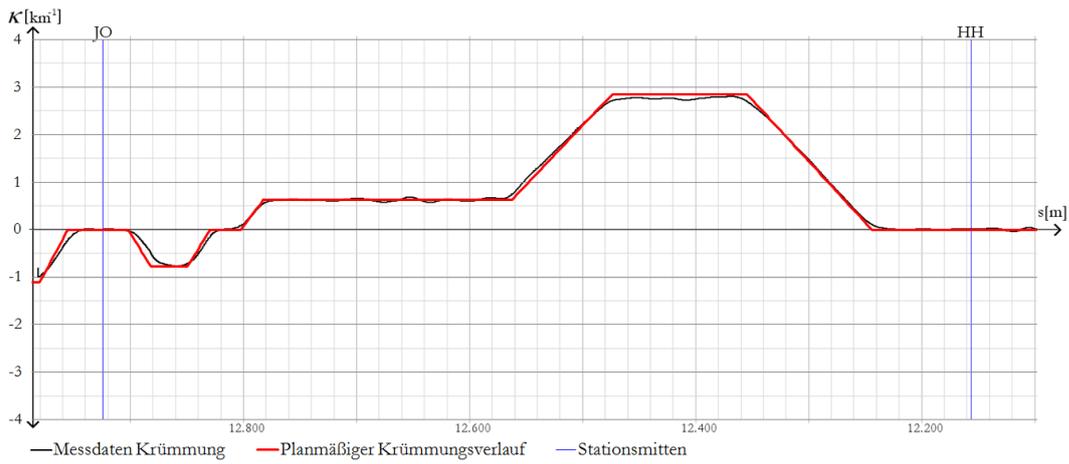


Abbildung 5.20.r: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, JO-HH

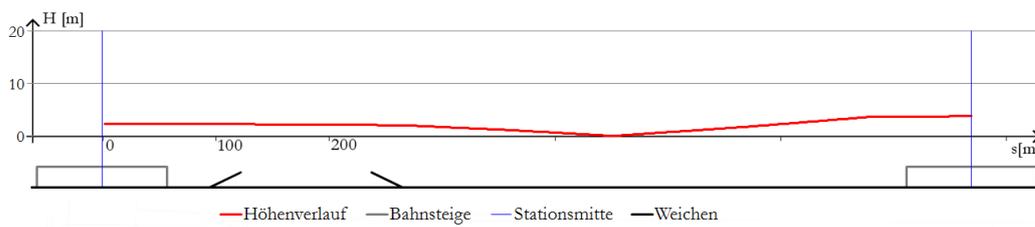


Abbildung 5.21.r: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 2, JO-HH

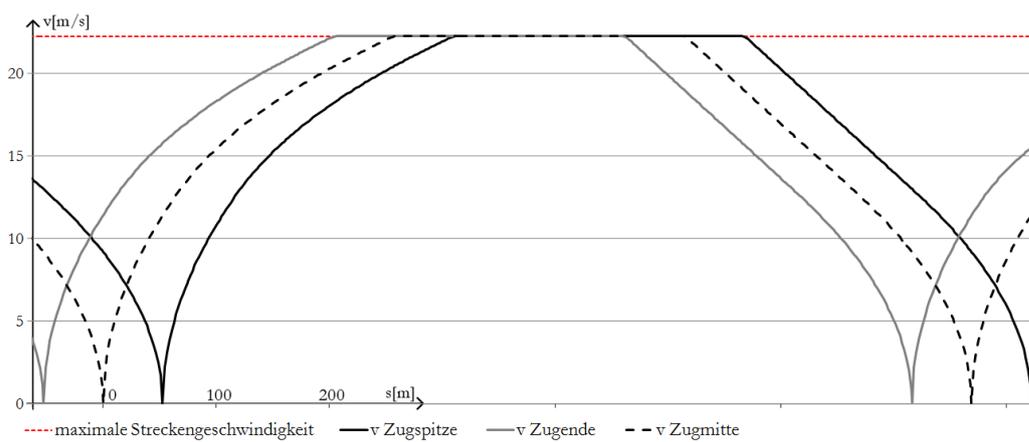


Abbildung 5.22.r: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, JO-HH

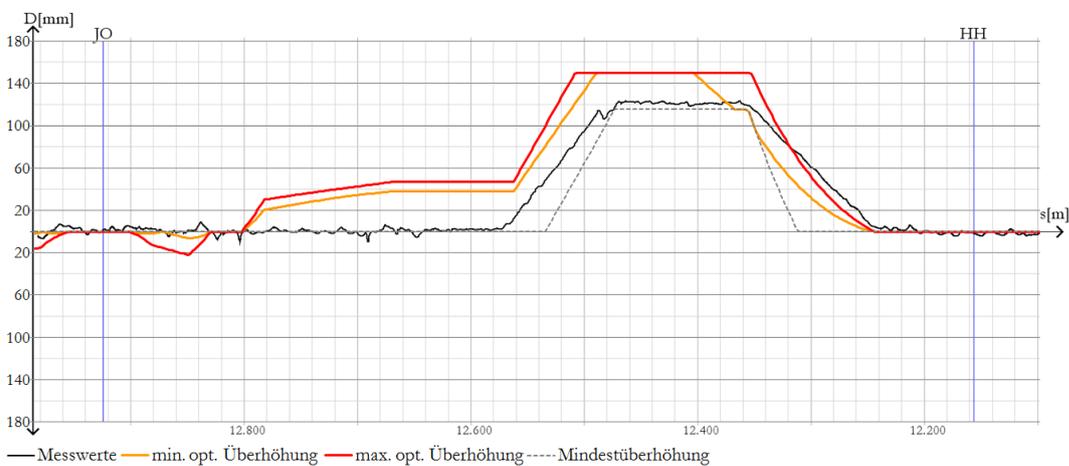


Abbildung 5.23.r: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, JO-HH

5.5.3.19 Abschnitt Hütteldorfer Straße – Kendlerstraße

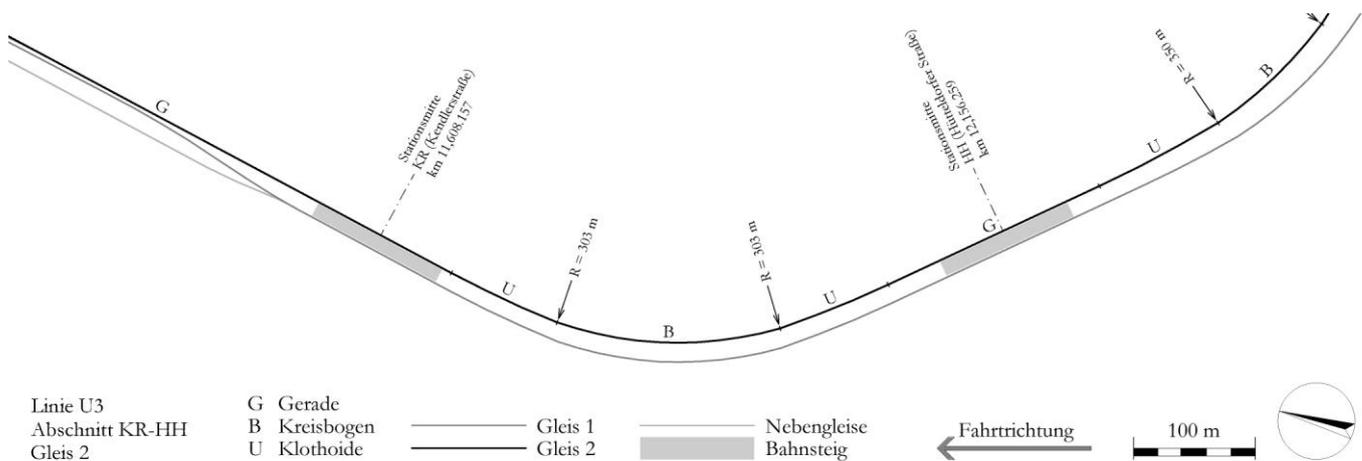


Abb. 5.19.s: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, Abschnitt HH-KR

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 2 zwischen den Haltestellen Hütteldorfer Straße und Kendlerstraße beträgt 548,102 m. Die Höhenlage der Strecke steigt in diesem Bereich um 10,450 m in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 39,894 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 1 befinden sich keine Weichen.

Aufgrund des kurzen Stationsabstandes und der hohen Steigung im Beschleunigungsbereich wird die zulässige Maximalgeschwindigkeit in diesem Streckenabschnitt nicht erreicht, wie in Abb. 5.22.s zu sehen ist.

Der in der Abb. 5.20.s dargestellte Krümmungsverlauf zeigt, dass es in diesem Streckenabschnitt nur einen Kreisbogen mit dem Mindestradius von 303 m gibt, der von Übergangsbögen flankiert ist. Der Bogenanfang liegt im Beschleunigungsbereich, das Bogenende befindet sich bereits im Bremsbereich. Während die eingebaute Überhöhung im ersten Übergangsbogen genau im optimalen Überhöhungsbereich zu liegen kommt, wie in der Abb. 5.23.s zu sehen ist, ist sie im zweiten Übergangsbogen größer als die Obergrenze der optimalen Überhöhung. Das führt dazu, dass der Großteil des Zuges beim Befahren dieses Bereichs einen Überhöhungsüberschuss erfährt.

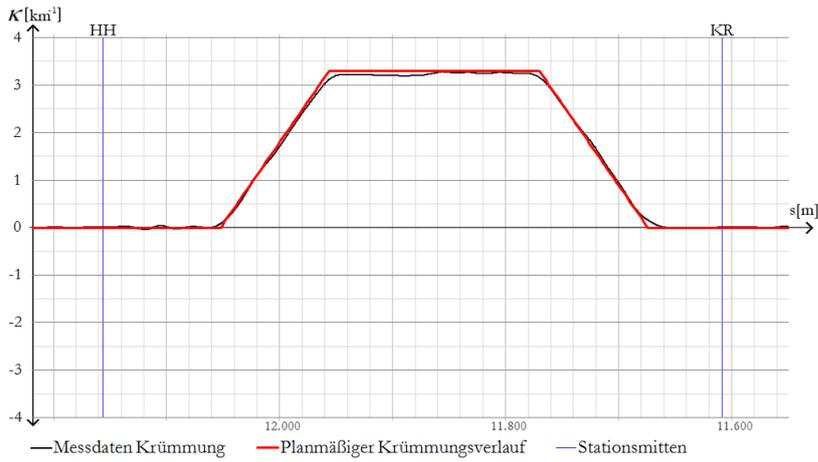


Abbildung 5.20.s: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, HH-KR

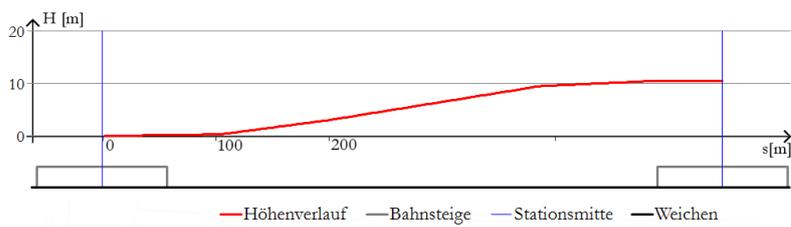


Abbildung 5.21.s: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 2, HH-KR

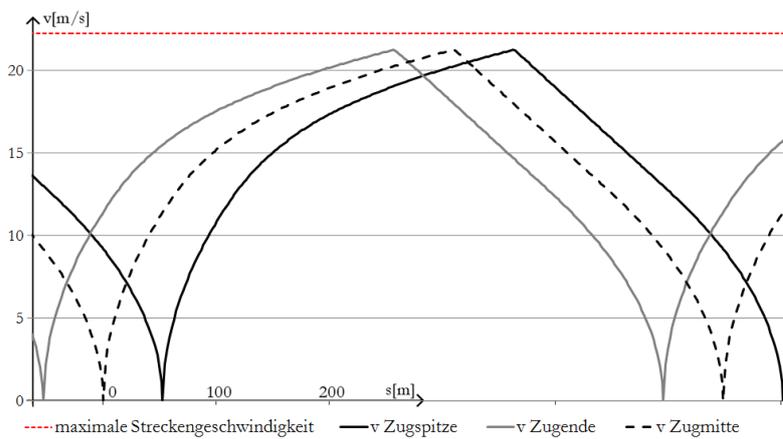


Abbildung 5.22.s: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, HH-KR

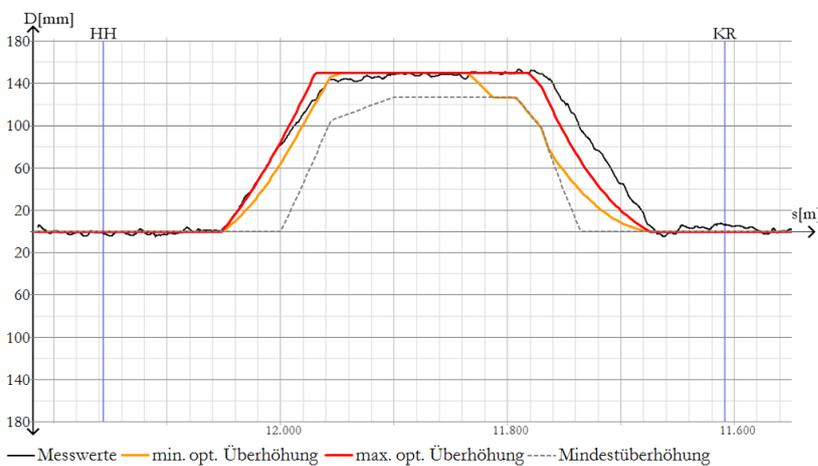


Abbildung 5.23.s: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, HH-KR

5.5.3.20 Abschnitt Kendlerstraße – Ottakring

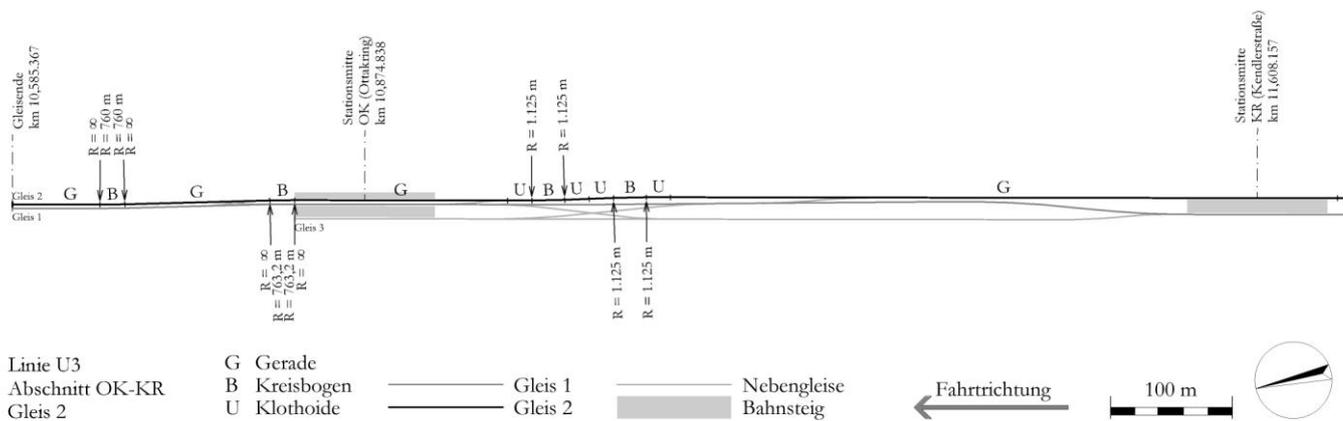


Abb. 5.19.t: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, Abschnitt KR-OK

Der Abstand der Stationsmittelpunkte auf Gleis 2 zwischen den Haltestellen Kendlerstraße und Ottakring beträgt 733,319 m. Die Bahnsteige der Station Kendlerstraße befinden sich unterirdisch, im Anschluss tauchen die Gleise jedoch auf und verlaufen im Bereich der Endstation Ottakring in Hochlage. Die Höhenlage der Strecke steigt in diesem Bereich um 0,500 m in Fahrtrichtung an. Die größte auftretende Neigung ist eine Steigung von 1,316 ‰. Entlang dieses Abschnittes des Gleises 2 befinden sich zwei Weichen, die einen Wechsel auf Gleis 1 und in weiterer Folge auf Gleis 3 ermöglichen, deren Lage in der Abb. 5.21.t zu sehen ist.

Der in der Abb. 5.20.t dargestellte Krümmungsverlauf zeigt, dass der gegenständliche Streckenabschnitt im Wesentlichen entlang einer Geraden verläuft. In der zweiten Hälfte des Streckenbereichs gibt es eine Bogenfolge aus einem kurzen Linksbogen und einem anschließenden kurzen Rechtsbogen, die beide einen Radius von 1.125 m haben und durch Übergangsbögen ergänzt werden.

Unter Berücksichtigung des Geschwindigkeitsverlaufs aus Abb. 5.22.t ergibt sich der in Abb. 5.23.t dargestellte Verlauf des optimalen Überhöhungsbereiches, der beim ersten Bogen einen Wert von ca. 50 mm erreicht. Tatsächlich ist in diesem Bereich jedoch keine Überhöhung eingebaut.

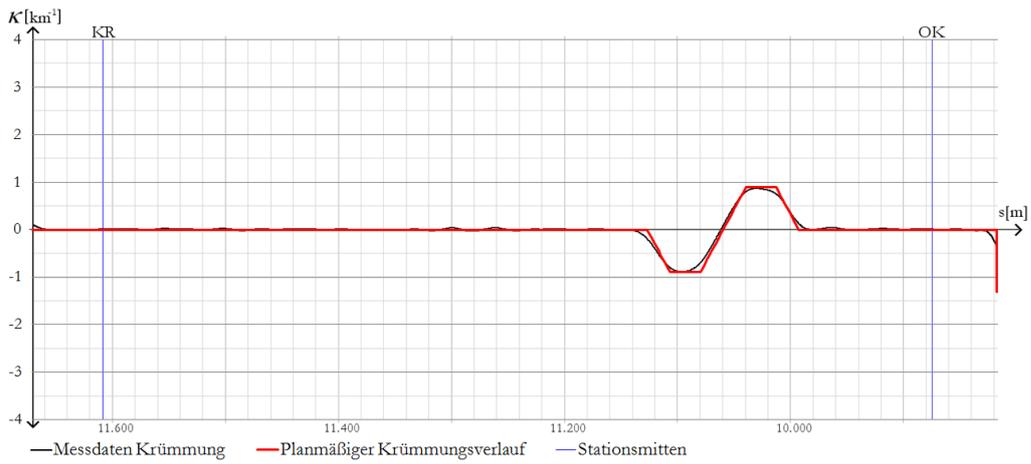


Abbildung 5.20.t: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, KR-OK

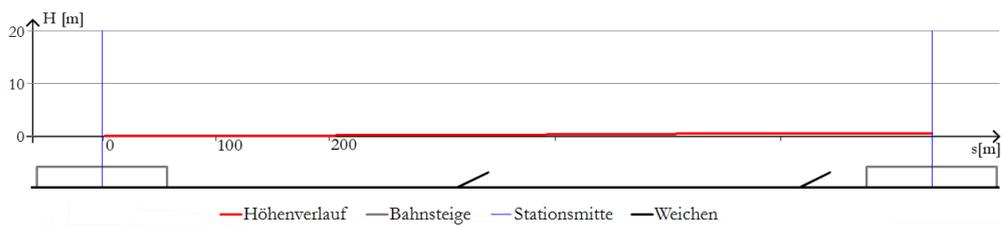


Abbildung 5.21.t: Längsneigung und Lage der Weichen, Gleis 2, KR-OK

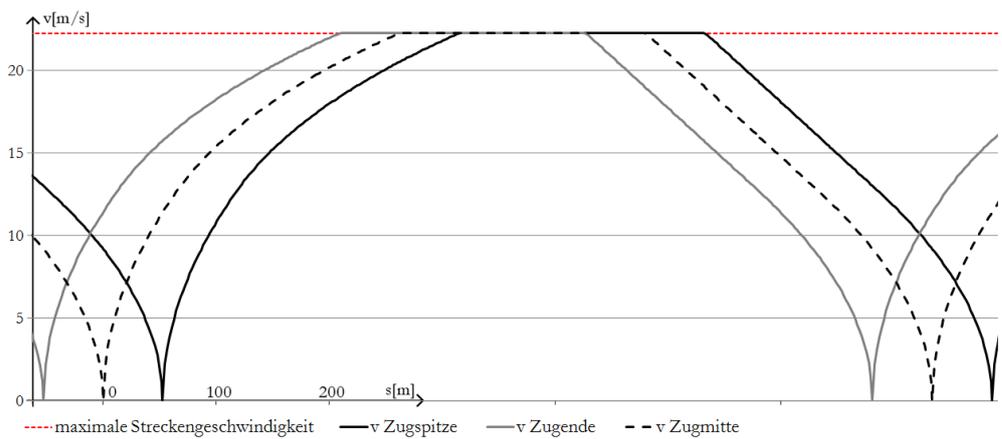


Abbildung 5.22.t: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, KR-OK

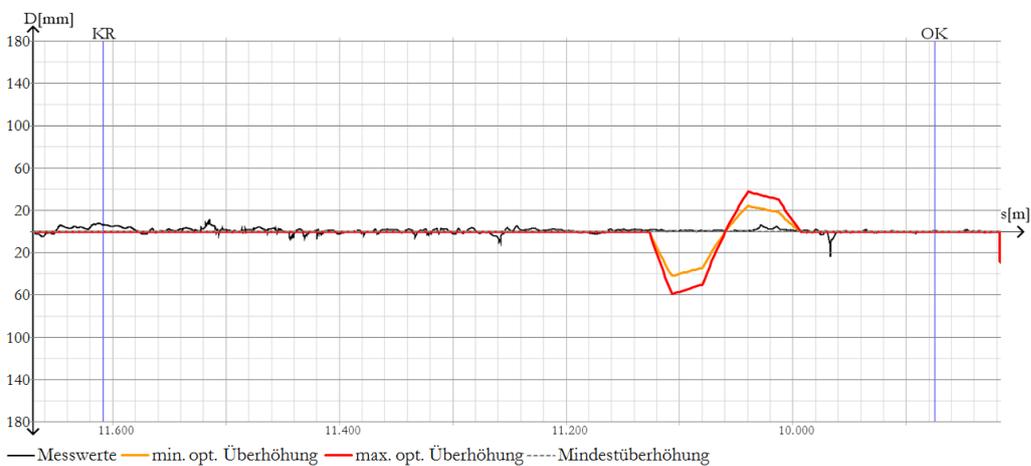


Abbildung 5.23.t: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, KR-OK

5.6 Zusammenfassung und Interpretation der Auswertungsergebnisse

Die für die Auswertung der Messdaten von Krümmung und Überhöhung erstellten Diagramme wurden in Kapitel 5.5 bereits kommentiert. Dabei zeigt sich, dass gewisse Situationen vor allem hinsichtlich der Abweichung der eingebauten Überhöhung zu den optimalen Werten immer wieder in unterschiedlichen Streckenabschnitten beobachtet werden konnten. Gegliedert nach diesen charakteristischen Situationen wird in diesem Kapitel eine Zusammenfassung der Ergebnisse der in Kapitel 5.5 vorgenommenen Auswertung der Daten vorgenommen.

In diesem Zusammenhang werden fallweise auch Empfehlungen hinsichtlich der Abänderung von Trassierungsparametern ausgesprochen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass sich diese Aussagen auf das verwendete und in Kapitel 3 beschriebene Modell zur Berechnung der optimalen Überhöhung stützen. Dieses Modell liefert die Werte der optimalen Überhöhung punktuell aufgrund der vorhandenen Krümmung und den lokalen Geschwindigkeiten des vorbeifahrenden Zuges. Bei der Berechnung der optimalen Überhöhung wird jedoch keine Rücksicht auf den dadurch entstehenden Überhöhungsverlauf genommen. Kriterien wie die Rampenneigung, die Verwindung, die Parameter, die sich aus der Wankwinkelbewegung ergeben, und der echte Ruck werden bei der Ermittlung des Bereichs der optimalen Überhöhung nach dem verwendeten Modell nicht berücksichtigt. Wird also aufgrund einer Abweichung vom Bereich der optimalen Überhöhung die Empfehlung getroffen, die eingebaute Überhöhung entsprechend abzuändern, so ist stets zu prüfen, ob sich die angeführten Parameter dann noch im Bereich der zulässigen Werte befinden. Diese Überprüfung wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

Die in den folgenden Kapiteln 5.6.1 und 5.6.2 behandelten Themen betreffen die Überschreitung von in der Trassierungsvorschrift geregelten Grenzwerten, was einen Einfluss auf die zulässige Fahrgeschwindigkeit der U-Bahn hat. Anschließend werden in den Kapiteln 5.6.3 bis 5.6.7 jene Streckenbereiche behandelt, wo die eingebaute Überhöhung zwar allen Vorschriften entspricht, wo sich durch die Änderung der Überhöhung aber eine Verbesserung der Fahreigenschaften hinsichtlich des Fahrkomforts und des Verschleißes ergeben könnte.

5.6.1 Krümmungswechsel ohne Übergangsbögen

Bei der Auswertung der Streckendaten im Kapitel 5.5 zeigt sich an den abgebildeten Krümmungsverläufen, dass es entlang des Gleises 1 der Linie U3 insgesamt einen Kreisbogen ohne Übergangsbögen gibt. Dieser befindet sich im Streckenabschnitt ED-AW. Auf Gleis 2 sind in

den Bereichen AW-ED, RG-LA, VT-NB und GZ-WS insgesamt fünf Kreisbögen ohne Übergangsbögen eingebaut. In den Tourengeleisen soll aber laut Trassierungsvorschrift für die Wiener U-Bahn eigentlich nicht auf die Anordnung von Übergangsbögen zwischen Trassierungselementen mit unterschiedlichen Krümmungen verzichtet werden. [13]

Die eingebauten Kreisbögen ohne Übergangsbögen sind mit Ausnahme des Bogens im Streckenabschnitt GZ-WS stets in der unmittelbaren Nähe einer Weiche eingebaut. Demzufolge kann man annehmen, dass in diesen Fällen geometrische Zwänge im Bereich der abzweigenden Gleise zur Wahl der aktuell eingebauten Trassierungselemente geführt haben. Jedenfalls gibt es in der Trassierungsvorschrift für derartige Ausnahmefälle eine Regelung bezüglich des maximal zulässigen Rucks, der durch abrupte Krümmungswechsel auf Tourengeleisen auftreten darf. Dieser Grenzwert der Differenz der freien Seitenbeschleunigung liegt bei $0,196 \text{ m/s}^2$, was einer Differenz des Überhöhungsfehlbetrages von 30 mm entspricht. [13]

In den Abbildungen 5.18.a-t und 5.23.a-t des Kapitels 5.5 ist die Differenz des Überhöhungsfehlbetrages für die Zugmitte anhand der Sprünge im Verlauf der roten Kurve der Obergrenze der optimalen Überhöhung abzulesen. Berücksichtigt man jedoch jenen Radsatz des Zuges, der den Krümmungswechsel mit der höchsten Geschwindigkeit überfährt, so kann man sich für diese Stelle des Zuges aus dem in den Abbildungen 5.17.a-t und 5.22.a-t dargestellten Geschwindigkeitsprofil die maximal auftretende Differenz der Fehlüberhöhungen berechnen. Außer im Streckenabschnitt AW-ED auf Gleis 2 ergeben sich aufgrund dieser Berechnung bei allen ohne Übergangsbögen eingebauten Kreisbögen Werte für den Ruck, die geringfügig über den zulässigen Obergrenzen laut Trassierungsvorschrift liegen. Der auftretende Ruck in den Streckenabschnitten ED-AW auf Gleis 1 (ca. $0,38 \text{ m/s}^2$) und RG-LA auf Gleis 2 (ca. $0,41 \text{ m/s}^2$) ist sogar ca. doppelt so groß wie die in der Trassierungsvorschrift festgelegte Obergrenze.

Daraus ergibt sich, dass in fast allen angeführten Fällen eine Geschwindigkeitsbeschränkung erfolgen muss. Eine nachträgliche Änderung der Grundrisstrassierung an diesen Stellen ist vermutlich nicht einfach umzusetzen. Trotzdem sollte man sich im Falle von größeren Instandsetzungsarbeiten Gedanken darüber machen, ob es mit vertretbarem Aufwand möglich ist, diese Krümmungswechsel im Sinne einer Verbesserung des Fahrkomforts und einer Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit zu entschärfen.

5.6.2 Eingebaute Überhöhung unter der Mindestüberhöhung

Die Mindestüberhöhung ist jene Überhöhung, die bei der planmäßigen Fahrgeschwindigkeit des Zuges zu einem Überhöhungsfehlbetrag führt, der exakt dem maximal zulässigen Überhöhungs-

fehlbetrag von 100 mm gemäß Trassierungsvorschrift entspricht. In den Abbildungen 5.18.a-t und 5.23.a-t im Kapitel 5.5 wurde die Mindestüberhöhung zufolge des in den Abbildungen 5.17.a-t und 5.22.a-t dargestellten Geschwindigkeitsverlaufs eingetragen. Sie liegt somit um den maximal zulässigen Überhöhungsfehlbetrag von 100 mm unter der ausgleichenden Überhöhung für den schnellsten Radsatz des Zuges.

Im Zuge der Auswertungen der Messergebnisse des Überhöhungsverlaufs konnte festgestellt werden, dass es einige Streckenabschnitte auf beiden Gleisen der Linie U3 gibt, wo die eingebaute Überhöhung bereichsweise unter der anhand des zugrunde gelegten Geschwindigkeitsverlaufs berechneten Mindestüberhöhung liegt.

Auf Gleis 1 tritt diese Unterschreitung der Mindestüberhöhung um bis zu ca. 60 mm (Streckenabschnitt LA-RG) in sechs Streckenabschnitten auf. Auf Gleis 2 gibt es vier Abschnitte, wo die eingebaute Überhöhung teilweise unter der Mindestüberhöhung liegt. Die maximale Differenz beträgt ca. 50 mm und wird im Streckenabschnitt HZ-VT erreicht. In der folgenden Tabelle 5.03 sind alle Streckenabschnitte eingetragen, in denen die Mindestüberhöhung unterschritten wird.

Tabelle 5.03: Zusammenfassung aller Streckenabschnitte der Linie U3, in denen das maximal mögliche Geschwindigkeitsprofil aufgrund der vorhandenen Trassierungsparameter abgemindert werden muss

Gleis	Abschnitt	Geschwindigkeitsbeschränkung zufolge		
		Bogenradius	Krümmungssprung	Mindestüberhöhung
Gleis 1	SH-WS			ja
	NB-VT			ja
	HZ-SZ	ja		ja
	SZ-SE			ja
	LA-RG			ja
	SG-ED			ja
	ED-AW		ja	
Gleis 2	RG-LA		ja	
	SE-SZ			ja
	SZ-HZ	ja		ja
	HZ-VT			ja
	VT-NB		ja	
	GZ-WS		ja	
	WS-SH			ja

Um die in den Abbildungen 5.17.a-t und 5.22.a-t dargestellte Geschwindigkeit ausnutzen zu können, müsste in den angeführten Bereichen die Überhöhung des Gleises entsprechend vergrößert werden. Solange das nicht geschieht, sind Geschwindigkeitsbeschränkungen erforderlich, um die auftretende Fehlüberhöhung unter dem Grenzwert zu halten.

Die in der Tabelle 5.03 angeführten Streckenabschnitte beinhalten jene Bereiche der Tourengleise der Linie U3, in denen das maximal mögliche Geschwindigkeitsprofil aufgrund von zu engen Bogenradien, zu geringen Überhöhungen oder aufgrund eines zu großen Rucks infolge eines abrupten Krümmungswechsels nicht eingehalten werden kann. Es zeigt sich somit, dass ca. 35 % der untersuchten Streckenabschnitte nicht mit dem modellierten, technisch möglichen Geschwindigkeitsprofil befahren werden können, da sich dabei eine Überschreitung von in der Trassierungsvorschrift verankerten Grenzwerten ergeben würde.

In den Abbildungen 5.01 und 5.02 ist der gemessene Geschwindigkeitsverlauf auf Gleis 1 und 2 dargestellt, der Streckenabschnitte erkennen lässt, die nicht mit der maximal möglichen Geschwindigkeit befahren wurden. Alle optisch identifizierbaren Bereiche mit Geschwindigkeitsbeschränkungen mit Ausnahme des Streckenabschnittes ED-SG auf Gleis 2 finden sich in der Tabelle 5.03 wieder

5.6.3 Kreisbögen mit zu geringer Überhöhung

Die optimale Überhöhung in einem Kreisbogen ist von der Fahrgeschwindigkeit (bzw. von dem entlang eines beschleunigten Zuges auftretenden Geschwindigkeitsbereich) und vom Bogenradius abhängig. Außerhalb des Bahnsteigbereiches ist daher prinzipiell davon auszugehen, dass die optimale Überhöhung größer als null ist. Relativ kleine Überhöhungen werden jedoch in der Regel zugunsten der einfacheren Herstellung des Gleises nicht eingebaut. So ist es nicht weiter verwunderlich, dass es entlang der untersuchten Strecken zahlreiche Kreisbögen gibt, die nicht überhöht sind, obwohl die optimale Überhöhung in diesen Bereichen einen Wert von bis zu ca. 20 mm hat.

Es gibt jedoch auch etliche Kreisbögen, die ohne Überhöhung ausgeführt wurden, obwohl die Untergrenze der optimalen Überhöhung Werte von bis zu ca. 70 mm vorgeben würde. Ebenso gibt es auch zahlreiche überhöhte Kreisbögen, die eine Differenz von bis zu ca. 70 mm zwischen der minimalen optimalen Überhöhung und der eingebauten Überhöhung aufweisen.

In den folgenden Tabellen 5.04 und 5.05 wird ein Überblick über alle Streckenbereiche gegeben, wo gemäß den Abbildungen 5.18.a-t und 5.23.a-t im Bereich eines Kreisbogens die eingebaute Überhöhung zumindest teilweise um mehr als 20 mm unter der Untergrenze der vorgeschlagenen

optimalen Überhöhung liegt. Dabei werden auch jene Streckenbereiche, die aufgrund der Unterschreitung der Mindestüberhöhung bereits zu einer Erwähnung im Kapitel 5.6.2 geführt haben, nochmals hinsichtlich der Abweichung zur optimalen Überhöhung bewertet.

Kreisbögen mit einer Differenz von 20 mm oder weniger zwischen der Untergrenze der optimalen Überhöhung und der eingebauten Überhöhung werden nicht angeführt, da die Wahl der Funktion der Untergrenze der optimalen Überhöhung auf einigen Annahmen beruht und daher in vielen Bereichen auch etwas niedriger angesetzt werden könnte.

Tabelle 5.04: Zusammenstellung aller Streckenabschnitte entlang des Gleises 1 der Linie U3, die Kreisbögen mit zu geringen Überhöhungen aufweisen

Gleis 1	Abschnitt	Bogen-Nr.	max. Differenz zur Untergrenze der opt. Überhöhung [mm]	max. Differenz zur Obergrenze der opt. Überhöhung [mm]
	OK-KR	2	60	85
	JO-SH	1	40	65
	SH-WS	1	60	90
		2	30	35
	WS-GZ	1	70	85
		2	30	50
	NB-VT	2	50	50
	VT-HZ	2	45	70
	HZ-SZ	1	40	40
	SZ-SE	2	50	70
	SE-LA	1	30	65
	LA-RG	1	60	120
		2	75	75
	KN-SG	1	30	65
	SG-ED	1	50	80
	ED-AW	1	25	40

Kreisbögen mit zu geringer eingebauter Überhöhung gibt es in 13 der 19 auf Gleis 1 untersuchten Streckenabschnitte, das sind ca. 68 %. Die maximal auftretenden Abweichungen zwischen der eingebauten und der Untergrenze der optimalen Überhöhung liegen bei ca. 75 mm.

Tabelle 5.05: Zusammenstellung aller Streckenabschnitte entlang des Gleises 2 der Linie U3, die Kreisbögen mit zu geringen Überhöhungen aufweisen

Gleis 2	Abschnitt	Bogen-Nr.	Max. Differenz zur Untergrenze der opt. Überhöhung [mm]	Max. Differenz zur Obergrenze der opt. Überhöhung [mm]
	SA-EK	3	70	95
		4	65	95
	PP-AW	1	60	75
	RG-LA	1	30	50
		2	50	50
		3	40	70
	LA-SE	1	65	90
	SE-SZ	2	50	85
	SZ-HZ	1	45	90
		2	50	70
	HZ-VT	1	75	90
		2	70	100
	GZ-WS	4	60	85
	WS-SH	1	30	30
	SH-JO	2	55	60
	JO-HH	2	35	45
	KR-OK	1	40	60

Kreisbögen mit zu geringer eingebauter Überhöhung gibt es in 12 der 20 auf Gleis 2 untersuchten Streckenabschnitte, das sind ca. 60 %. Die maximalen Abweichungen zwischen eingebauter und minimaler optimaler Überhöhung liegen bei wie beim Gleis 1 bei ca. 75 mm.

Die in den Tabellen 5.04 und 5.05 angeführten Streckenabschnitte weisen Kreisbögen mit einer Überhöhung auf, die deutlich unter dem Bereich der optimalen Überhöhung liegt. Die Aussage der Tabellen 5.04 und 5.05 ist jedoch nicht, dass die Überhöhung bei allen angeführten Kreisbögen um den angeführten, konstanten Wert vergrößert werden sollte, da in manchen Bögen der optimale Überhöhungsbereich stark ansteigt bzw. abnimmt.

5.6.4 Kreisbögen mit veränderlicher Überhöhung

Am deutlichsten wird die Abhängigkeit der optimalen Überhöhung von der Geschwindigkeit beim Betrachten der Abbildung 5.24, die einen Ausschnitt der Abbildung 5.23.a zeigt. Darauf ist der Überhöhungsverlauf des Streckenabschnittes SA-EK des Gleises 2 abgebildet. Während die optimale Überhöhung im Kreisbogen bei km 23,9 durch eine konstante Überhöhung von 100 mm erreicht werden kann, ist der optimale Verlauf der Überhöhung im Kreisbogen bei km 23,7 nahezu linear verlaufend. Die ausgeführte konstante Überhöhung von ca. 30 mm in diesem Bogen liegt am Bogenende im Bereich der Obergrenze der optimalen Überhöhung, am Bogenanfang jedoch weit unter der Untergrenze des optimalen Bereichs.

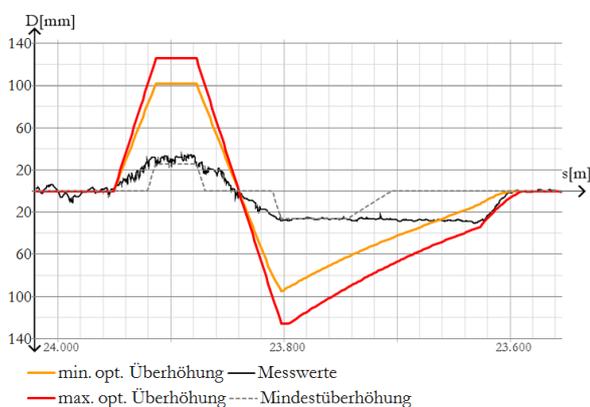


Abbildung 5.24: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, SA-EK, km 24,0 bis km 23,6, Ausschnitt aus Abb. 5.23.a

Daraus kann man folgern, dass es in manchen Kreisbögen unter Berücksichtigung des tatsächlichen Geschwindigkeitsprofils sinnvoll wäre, von der gängigen Praxis der über den Verlauf des Kreisbogens konstanten Überhöhung abzugehen. Stattdessen sollte eine Überhöhungsrampe im Kreisbogen eingebaut werden, die sich in Beschleunigungsbereichen an den optimalen Überhöhungswerten am Bogenanfang und -ende orientiert. In Kreisbögen, die nur teilweise in einer beschleunigten Bewegung durchfahren werden, sind auch Zwischenpunkte für die Modellierung der Überhöhungsrampe zu berücksichtigen.

Weitere Kreisbögen, die mit einer Überhöhungsrampe versehen werden sollten, befinden sich zum Beispiel in den Streckenabschnitten WS-GZ, SZ-SE, SE-LA und EK-SA auf Gleis 1 sowie in den Streckenabschnitten PP-AW, LA-SE, SE-SZ, HZ-VT und GZ-WS auf Gleis 2.

Tatsächlich gibt es bereits Bereiche entlang der Tourengleise der Linie U3, wo sich die eingebaute Überhöhung im Verlauf des Kreisbogens ändert. So besitzt der erste Kreisbogen im Streckenabschnitt SH-WS auf Gleis 1 eine konstante Krümmung, aber die Überhöhung liegt im ersten Teil des Bogens bei 60 mm, um schließlich auf 110 mm anzusteigen, wie in der in der Abb. 5.18.e

dargestellt ist. In diesem Bereich sind keine Weichen eingebaut, die eine Begründung für den Überhöhungsverlauf darstellen könnten. Falls die Wahl der veränderlichen Überhöhung tatsächlich nur aufgrund der in diesem Bereich ansteigenden Geschwindigkeit erfolgt ist, wird die Annäherung an den optimalen Verlauf jedoch nicht besonders gut erreicht, vor allem, da die eingebaute Überhöhung teilweise unter der Mindestüberhöhung zu liegen kommt.

Ein weiteres Beispiel einer geschwindigkeitsabhängigen Überhöhung im Kreisbogen findet sich im ersten Bogen des Streckenabschnittes GZ-NB, wo die Steigung der Überhöhungsrampe ähnlich ist zur Steigung der Funktionen des optimalen Überhöhungsverlaufs, wie in der Abb. 5.18.g dargestellt ist. Hier ist somit die Fehlüberhöhung während der Beschleunigungsphase annähernd konstant.

In der Abb. 5.18.h zeigt sich, dass die Überhöhungsrampe am Beginn des zweiten Bogens des Streckenabschnittes NB-VT des Gleises 1 teilweise im Bereich des Kreisbogens liegt. Der Grund für diese Wahl des Überhöhungsverlaufs könnte ebenfalls der Versuch sein, die ansteigenden Geschwindigkeiten im Beschleunigungsbereich zu berücksichtigen. Tatsächlich liegt die eingebaute Überhöhung durch den flachen Anstieg der Überhöhungsrampe jedoch teilweise unter der Mindestüberhöhung. Insofern ist dieser Überhöhungsverlauf definitiv nicht optimal. Eine ähnliche Situation gibt es beispielsweise in den Abschnitten HZ-SZ und SZ-SE des Gleises 1, wo die Mindestüberhöhung ebenfalls unterschritten wird.

Ein weiteres Beispiel einer sich im Kreisbogen ändernden Überhöhung stellt der in der Abb. 5.23.n dargestellte Überhöhungsverlauf des Streckenabschnittes NB-GZ auf Gleis 2 dar. Der zweite Bogen hat in der zweiten Bogenhälfte einen nahezu optimalen Überhöhungsverlauf.

5.6.5 Übergangsbögen mit zu geringer Überhöhung

Eine immer wieder kehrende Situation ist jene, dass bei engen Kreisbögen, die mit hohen Geschwindigkeiten befahren werden, die eingebaute Überhöhung in Übergangsbögen in den Abbildungen 5.18.a-t und 5.23.a-t deutlich unter dem optimalen Bereich liegt. Das liegt an den verwendeten Formeln zur Ermittlung der Grenzen der optimalen Überhöhung.

Diese sind darauf ausgelegt, die Überhöhung stets im Bereich der ausgleichenden Überhöhung für einen Teil des Zuges zu halten und erreichen maximal den Wert der maximal zulässigen Überhöhung. Die Fehlüberhöhung im Bereich des Kreisbogens, die sich aus der Differenz der ausgleichenden Überhöhung und der maximal zulässigen Überhöhung ergibt, wird in jenem kurzen Bereich zwischen dem Erreichen der maximal zulässigen Überhöhung durch die Funktionen der optimalen Überhöhung und dem Kreisbogenanfang aufgebaut. Bei der klassischen

Trassierung fällt die Überhöhungsrampe mit dem Übergangsbogen zusammen, wodurch die Fehlüberhöhung entlang des gesamten Übergangsbogens aufgebaut wird.

Somit ergibt sich im Bereich der Übergangsbögen von mit hohen Geschwindigkeiten befahrenen engen Kreisbögen, dass die in den Abbildungen 5.18.a-t und 5.23.a-t eingezeichneten optimalen Überhöhungsverläufe zu einem wesentlich höheren echten Seitenruck führen, als die nach den klassischen Trassierungsregeln eingebauten Überhöhungsverläufe. Die Beurteilung, welcher Überhöhungsverlauf zu bevorzugen ist, muss daher unter Berücksichtigung der sich daraus ergebenden Werte des echten Seitenrucks erfolgen.

5.6.6 Übergangsbögen mit zu großer Überhöhung

Die klassischen Trassierungsregeln sehen eine konstante Überhöhung im Bereich des Kreisbogens und das Zusammenfallen von Übergangsbogen und Überhöhungsrampe vor. Das kann in Beschleunigungs- oder Bremsbereichen dazu führen, dass bei jenem Übergangsbogen, der im Bereich der geringeren Fahrgeschwindigkeiten liegt, die eingebaute Überhöhung über der Obergrenze der optimalen Überhöhung liegt.

Im Gegensatz zur Untergrenze der optimalen Überhöhung, deren Verlauf zum Teil auf Annahmen beruht, ist die Obergrenze der optimalen Überhöhung dadurch gekennzeichnet, dass die Summe der bei einem Zug auftretenden Fehlüberhöhungen und Überhöhungsüberschüsse ausgeglichen ist. Eine Überhöhung, die die Obergrenze der optimalen Überhöhung übersteigt, führt zu einem überwiegenden Überhöhungsüberschuss, was unerwünscht ist. Alle zusätzlich zu beachtenden Parameter wie der echte Seitenruck, die Verwindung und die Parameter der Wankwinkelbewegung erreichen mit zunehmender Überhöhung ebenfalls ungünstigere Werte. Somit ist eindeutig klar, dass Überhöhungsverläufe, die die Obergrenze der optimalen Überhöhung übersteigen, keinerlei Vorteile bringen.

Daher kann festgehalten werden, dass in den folgenden Streckenabschnitten, in denen die Kurve der optimalen Überhöhung im Übergangsbogen überschritten wird, die Verringerung der eingebauten Überhöhung zu einer Verbesserung der Fahreigenschaften hinsichtlich des Fahrkomforts und des Verschleißes führen wird. In den im Folgenden angeführten Streckenabschnitten ist die eingebaute Überhöhung um bis zu 45 mm größer als die Obergrenze der optimalen Überhöhung.

Gleis 1: KR-HH | VT-HZ | ED-AW | AW-PP | PP-EK

Gleis 2: EK-PP | PP-AW | AW-ED | ED-SG | SZ-HZ | JO-HH | HH-KR

Eine zu große eingebaute Überhöhung in den Beschleunigungsbereichen tritt somit in ca. 31 % der untersuchten Streckenabschnitte auf.

5.6.7 Optimal überhöhte Bögen

Abgesehen von den bereits geschilderten Abweichungen gibt es jedoch auch Kreisbögen, wo der gemessene Überhöhungsverlauf genau im optimalen Bereich der Überhöhung liegt. Ein Beispiel dafür ist der zweite Kreisbogen des Streckenabschnittes JO-SH auf Gleis 1. Der zugehörige Überhöhungsverlauf ist in der Abbildung 5.18.d dargestellt. Weitaus größer ist hingegen die Zahl jener Bögen, deren Überhöhungsverlauf zwar teilweise ganz gut mit dem optimalen Bereich übereinstimmt, aber eben nicht über den gesamten Verlauf.

6 Schlussfolgerung

Die Linie U3 ist eine bei ihrem Bau komplett neu trassierte Linie, ähnlich der Linie U1, die davor errichtet wurde. Es war einerseits also nicht notwendig, auf bestehende Trassen Rücksicht zu nehmen, andererseits konnte man die aus dem Bau der zuvor errichteten Linien des Wiener U-Bahn-Netzes gewonnenen Erfahrungen bei der Linie U3 nutzen.

Insofern ist es relativ erstaunlich, dass gezeigt werden konnte, dass die Trassierung der U3 in einigen Bereichen so erfolgt ist, dass Mindestwerte aus der aktuell gültigen Trassierungsvorschrift nur durch die Anordnung einer Geschwindigkeitsbeschränkung eingehalten werden können, wobei festgehalten werden muss, dass die zum Zeitpunkt des Baus der Linie U3 gültige Trassierungsvorschrift dem Autor nicht vorliegt.

Weiters konnte festgestellt werden, dass zwischen der eingebauten Überhöhung auf den Tourengleisen der Linie U3 und dem ermittelten Bereich der optimalen Überhöhung oftmals große Unterschiede bestehen.

Diese Unterschiede bedeuten jedoch nicht in allen Fällen, dass eine der berechneten optimalen Überhöhung entsprechende Überhöhung besser ist als die eingebaute. Das liegt einerseits daran, dass die Untergrenze der optimalen Überhöhung auf einigen Annahmen basiert, was zum Beispiel den Geschwindigkeitsverlauf eines voll besetzten Zuges, das Geschwindigkeitsprofil bei energiesparender Fahrweise oder aber den für den optimalen Fahrkomfort erforderlichen Betrag der Fehlüberhöhung betrifft. Andererseits ist durch den gewählten Ansatz der optimalen Überhöhung, deren Berechnung nur auf den Geschwindigkeits- und Krümmungswerte des betrachteten Streckenpunktes basiert, nicht gewährleistet, dass dabei ein akzeptabler Verlauf von Verwindung, Seitenruck sowie Wankwinkelgeschwindigkeit, -beschleunigung und -ruck entsteht.

Ein ausgereifterer Ansatz zur Ermittlung der optimalen Überhöhung müsste die angeführten Parameter berücksichtigen und im Idealfall in Bezug zur auftretenden Fehlüberhöhung setzen. Aufgrund der teilweise recht großen Abweichungen bei den Überhöhungsverläufen der untersuchten Streckenabschnitte kann jedoch trotz der Unschärfen des verwendeten Ansatzes für die Untergrenze der optimalen Überhöhung davon ausgegangen werden, dass eine Anpassung der eingebauten Überhöhung in diesen Fällen zu Verbesserungen führt.

Anders verhält es sich bei der maximalen optimalen Überhöhung, die aufgrund des gewählten Ansatzes tatsächlich eine obere Grenze darstellt, bei deren Überschreitung es definitiv zu einer Verschlechterung von Fahrkomfort und Verschleißwerten kommen muss. Nachdem in den

untersuchten Streckenabschnitten auch Fälle auftreten, in denen die eingebaute Überhöhung diese Obergrenze überschreitet, gibt es somit auch definitiv ein Optimierungspotential bei der eingebauten Überhöhung der Linie U3.

Das angewendete Verfahren zur Berechnung der optimalen Überhöhung eignet sich somit für das Auffinden von großen Abweichungen zwischen dem eingebauten Überhöhungsverlauf und den optimalen Werten.

Aufgrund des Fertigstellungsdatums des letzten Teilstücks der Linie U3 im Jahr 2000 sind entlang dieser Linie keine Wiener Bögen® eingebaut. Da der gewählte Ansatz zur Berechnung der optimalen Überhöhung nur auf punktuelle Trassierungsparameter zurückgreift, könnte man auch im Fall einer Strecke mit Schwerpunktstrassierung prinzipielle Aussagen zum Optimierungspotential der eingebauten Überhöhung machen. So könnte man den Überhöhungsverlauf aktueller Neubaustrecken bzw. neu geplanter Strecken der Wiener U-Bahn auswerten und durch einen Vergleich mit den Ergebnissen der Auswertung der U3 herausfinden, ob sich die Vorgangsweise zur Festlegung der eingebauten Überhöhung im Lauf der Zeit geändert hat.

Für eine detailliertere Beurteilung von Neubaustrecken wäre es aufgrund der Eigenschaften des Wiener Bogens® jedoch sinnvoll, dabei auch Parameter wie den Ruck und die Wankwinkelbewegung zu berücksichtigen.

Anhang A: Coriolis-Kraft bei der Wr. U-Bahn

Die Coriolis-Kraft entsteht, wenn sich Objekte in einem rotierenden Inertialsystem relativ dazu bewegen. Sie wirkt daher auch auf einen Zug, der sich auf der Erdoberfläche bewegt. Die Wirkungsrichtung der Kraft steht normal auf die Bewegungsrichtung des Objekts und auf den Winkelgeschwindigkeitsvektor des Inertialsystems.

$$\vec{F}_C = 2 \cdot m \cdot \vec{v} \times \vec{\omega} \quad (\text{A.01}) [57]$$

\vec{F}_C [N] Corioliskraft

$\vec{\omega}$ [1/s] Winkelgeschwindigkeitsvektor der Erdrotation

\vec{v} [m/s] Geschwindigkeitsvektor des Zuges

Die horizontale Komponente der Corioliskraft ist abhängig vom Breitengrad auf der Erdoberfläche, vom Betrag der Geschwindigkeit und von der Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation. Für eine Bewegung auf der Nordhalbkugel der Erdoberfläche ergibt sich durch die Corioliskraft unabhängig von der Bewegungsrichtung eine in Fahrtrichtung nach rechts gerichtete Beschleunigung gemäß der folgenden Formel:

$$a_{C,h} = 2 \cdot v \cdot \omega \cdot \sin \varphi \quad (\text{A.02})$$

$a_{C,h}$ [m/s²] horizontale Komponente der Coriolisbeschleunigung

ω [1/s] Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation: $\omega = 7,2921 \cdot 10^{-5}$

v [m/s] Fahrgeschwindigkeit: $v_{\max} = 22,2$ m/s

φ [°] Winkel der nördlichen Breite für Wien: $\varphi = 48,2^\circ$

$$a_{C,h,\max} = 2 \cdot 7,29 \cdot 10^{-5} \cdot 22,2 \cdot \sin 48,2^\circ = 0,00241 \text{ m/s}^2$$

Diese Beschleunigung ist vernachlässigbar klein gegenüber den anderen bei der Eisenbahnfahrt auftretenden Seitenbeschleunigungen, was durch den folgenden Vergleich der Gleichungen (2.14) und (A.02) untermauert wird:

$$a_{C,h} \hat{=} a_R \rightarrow R = \frac{v}{2 \cdot \omega \cdot \sin \varphi} = \frac{22,2}{2 \cdot 7,29 \cdot 10^{-5} \cdot \sin 48,2^\circ} = 204.250 \text{ m}$$

$$D_{equ} = \frac{a_{C,h}}{g} \cdot b = \frac{0,00241}{9,81} \cdot 1500 = 0,37mm$$

Die Coriolis-Beschleunigung in horizontaler Richtung bei einer Fahrt mit der Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h entspricht also einer Fahrt durch einen Bogen mit einem Radius von ca. 204 km. Für diesen Bogenradius wäre die ausgleichende Überhöhung lediglich 0,37 mm.

Der vertikale Anteil der Coriolis-Kraft, der bei einer Nord-Süd-Fahrt zu null wird und bei einer Ost-West-Fahrt das Maximum erreicht, hat die gleiche Größenordnung und ist somit ebenfalls zu vernachlässigen.

Anhang B: Übersichtsplan der Linie U3

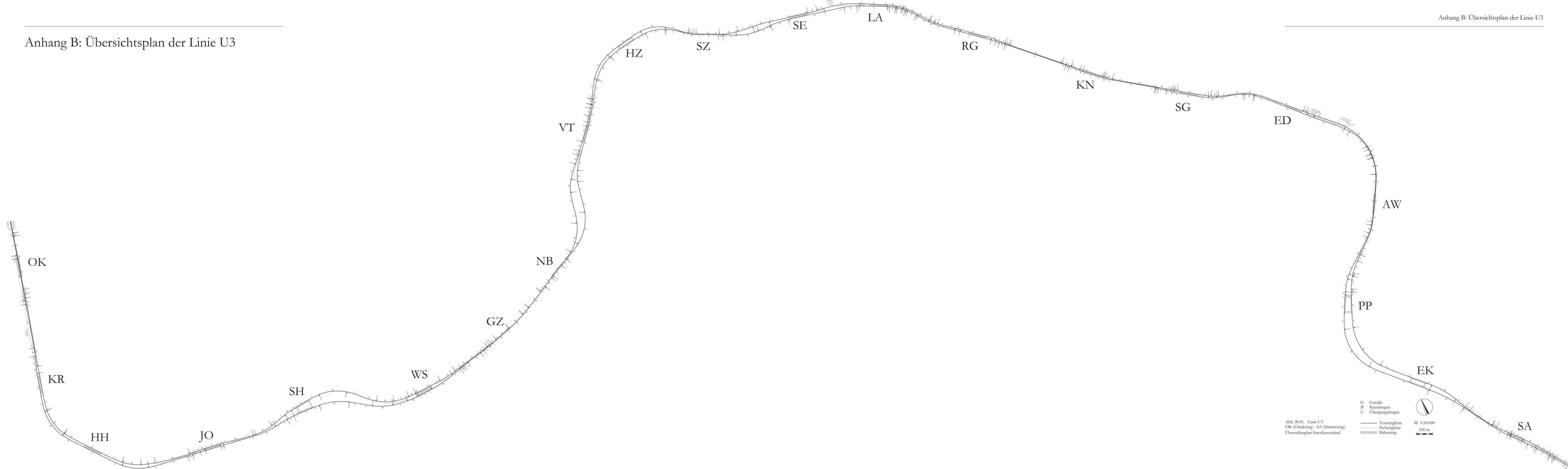


Abb. B.01: Linie U3
OK (Ottakring) - SA (Simmering)
Übersichtsplan Streckenverlauf

Legend and scale information:

- G Gerade
- B Kreisbogen
- U Übergangsbogen
- Tourengeleise
- Nebengeleise
- Bahnsteig
- M 1:10.000
- 100 m

Literaturverzeichnis

- [01] HINKEL, Walter Johann, Karl TREIBER, Gerhard VALENTA, Helmut LIEBSCH (2004): *U-Bahnen gestern-heute-morgen von 1863 bis 2010*. Wien: N.J. Schmid Verlag, ISBN: 3 900 607 443.
- [02] FREYSTEIN Hartmut; MUNCKE Martin; SCHOLLMEIER Peter (2008): *Entwerfen von Bahnanlagen. Handbuch*. 2. Auflage, Hamburg: DVV Media Group GmbH / Eurailpress, ISBN 978-3-7771-0379-2.
- [03] HÖDL, Johann (2009): *Das Wiener U-Bahn-Netz. 200 Jahre Planungs- und Verkehrsgeschichte*. Wien: Grasl Druck & Neue Medien, Herausgeber: Wiener Linien GmbH & Co KG, ISBN 978 3 200 00184 7.
- [04] LICHTBERGER Bernhard (2010): *Handbuch Gleis*. 3. Auflage, Hamburg: DVV Media Group GmbH / Eurailpress, ISBN 978-3-7771-0400-3.
- [05] KAISER, Wolfgang (2008): *Wiener Schienennahverkehr. Straßenbahn – Stadtbahn – U-Bahn*. München: GeraMond Verlag, ISBN 3-7654-7363-0.
- [06] MATTHEWS Volker (2011): *Bahnbau*. 8. Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, ISBN 978-3-8348-1291-9.
- [07] JOCHIM Haldor; Frank LADEMANN (2009): *Planung von Bahnanlagen. Grundlagen – Planung – Berechnung*. München: Carl Hanser Verlag, ISBN 978-3-446-41345-0.
- [08] HÖFLING, Kurt (2008): *Der Ausbau des Wiener U-Bahn Netzes*. Hauptvortrag anlässlich des Geotechnikerfestes 2008 der Universität für Bodenkultur Wien, Department für Bautechnik und Naturgefahren, pdf-Dokument, zuletzt abgerufen am 12.02.2013 unter: http://www.baunat.boku.ac.at/fileadmin/_/H87/H873/FFIG/Geotechnikerfest/Hauptvortrag_Der_Ausbau_d._Wr._U-Bahn_Hoefling.pdf.
- [09] HOHNECKER Eberhard (1993): *Zukunftssichere Trassierung von Eisenbahn-Hochgeschwindigkeitsstrecken*. Forschungsarbeiten des Verkehrswissenschaftlichen Instituts an der Universität Stuttgart, Hrsg: G. Heimerl, Bericht 19, ISBN 3-922203-19-1.
- [10] WEIGEND Manfred (2004): *Linienführung und Gleisplangestaltung*. = Schriftenreihe für Verkehr und Bahntechnik, Band 3, 1. Auflage, Hamburg: Eurailpress, ISBN 3-7771-0321-7.
- [11] FISCHMEISTER Edgar (2012): *Strukturelles Sicherheits-Management für die Instandhaltung von urbanen Gleisen*, Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen der technischen Universität Wien.
- [12] FSV (2006): *RVE 05.00.01 – Linienführung von Gleisen*. Ausgabe 1. Juni 2006, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr.
- [13] WIENER LINIEN (2002): *Trassierungsvorschrift für die Wiener U-Bahn*. Wiener Linien GmbH. & Co. KG, Abteilung Neubau, U-Bahn-Planung.

- [14] FISCHMEISTER Edgar; ROLLINGER Wolfgang (1999): *134 Jahre Oberbau in Wien. Vom Holzlangschwellenoberbau zum Hochschalldämmenden Oberbau 1865-1999*. Wien: N.J. Schmid Verlag.
- [15] HASSLINGER Herbert (2005): *Kosteneinsparungen am Fahrweg. Die Optimierung der Lebenszykluskosten durch die Neue Trassierungsmethode ATM Advanced Track-Alignment*. Pdf-Präsentationen der ARGE Fahrwegoptimierung, zuletzt abgerufen am 12.01.2014 unter „http://www.fahrwegoptimierung.at/files/deutsch/ATM_Grundlagen.pdf“ und „http://www.fahrwegoptimierung.at/files/deutsch/ATM_Umsetzung.pdf“
- [16] WIENER LINIEN (2009): *B6-61-1-0001 Richtlinie Trassierung Strassenbahn*. Wiener Linien Bau- und Anlagenmanagement – Stabsstelle Planung und Organisation, Verfasser: Markus Ossberger.
- [17] ARGE FAHRWEGOPTIMIERUNG: *Projekte*. Zuletzt abgerufen am 10.02.2014 unter „<http://www.fahrwegoptimierung.at/projekte.htm>“
- [18] TINAVIENNA (2012): *Sanfte Kurvenfahrt: Der Wiener Bogen*. Pdf-Datei, zuletzt abgerufen am 13.01.2014 unter „<http://www.tinavienna.at/assets/20-Wiener-Loesungen/Wiener-Loesungen-pdf-de-neu/111-Wiener-Linien07Wiener-Bogen.pdf>“
- [19] WITTMANN Günter (1995). *Grundlagen der Fabrdynamik beim schienengebundenen Verkehr* (S. 9-20). In: *Gleisbau-Planung und Vermessung*. Wiesbaden: Verlag Chmielorz GmbH, ISBN 3-87124-141-5
- [20] MARX Lothar; MOSSMANN Dietmar (2011): *Arbeitsverfahren für die Instandhaltung des Oberbaus*. 7. Auflage, Berlin: Bahn Fachverlag GmbH, ISBN: 978-3-9808002-8-0.
- [21] SPITZER Alexander (1991): *Die Trassenführung der Linie* (S. 203-204). In: *Die U-Bahn-Linie U3 1981-1997*. Wien, Compress Verlag, ISBN 3-900607-22-2
- [22] LEHOTZKY Peter (1991): *Die Fahrzeuge der Linie* (S. 227-230). In: *Die U-Bahn-Linie U3 1981-1997*. Wien, Compress Verlag, ISBN 3-900607-22-2
- [23] REKKER Walter (1991): *U3/3 Leonhardgasse – Wassergasse (Station „Kardinal Nagl-Platz“)* (S. 99-105). In: *Die U-Bahn-Linie U3 1981-1997*. Wien, Compress Verlag, ISBN 3-900607-22-2
- [24] MARTL Gerhard (2000): *Die Fahrzeugtypen der Wiener U-Bahn* (S.138-148). In: *3 Jahrzehnte U-Bahn-Bau in Wien*. Wien, Keller Verlag, ISBN 3-900607-397
- [25] STOCKINGER Hans, VALENTA Gerhard (2000): *Der Gleisbau bei der Wiener U-Bahn* (S. 56-59). In: *3 Jahrzehnte U-Bahn-Bau in Wien*. Wien, Keller Verlag, ISBN 3-900607-397
- [26] STRAHBERGER Hans, KUKACKA Michael, RICHTER Hans (2000): *Zugsicherungstechnik* (S. 130-135). In: *3 Jahrzehnte U-Bahn-Bau in Wien*. Wien, Keller Verlag, ISBN 3-900607-397
- [27] WEHRSTEDT Manfred (1995). *Gesetze und Vorschriften beim Entwurf von Gleistrassen für die kommunalen Verkehrsbetriebe* (S. 21-38). In: *Gleisbau-Planung und Vermessung*. Wiesbaden: Verlag Chmielorz GmbH, ISBN 3-87124-141-5

- [28] WIENER LINIEN (o.J.): Datenfiles („u3g1.net“ und „u3g2.net“) der Solltrassierung der Linie U3, zuletzt abgerufen am 21.11.2013 vom „Track Optimizer“-Server der Wiener Linien
- [29] WIENER LINIEN (2005): *B6-B67-3-1003 Regelpläne der Wiener U-Bahn*. Wiener Linien GmbH & Co. KG, Abteilung Neubau, U-Bahn-Planung.
- [30] WIENER LINIEN (2006): *Track Optimizer*. Inserat zum Projekt Track Optimizer in Location Austria – The Magazine for Business Location Austria, Ausgabe 03/2006, zuletzt abgerufen am 13.02.2014 unter „http://www.austriatoday.at/pdf_download/Business.pdf“
- [31] WIENER LINIEN (Hrsg.) (2011): Schienenfahrzeuge der Wiener Linien. Datenblätter. Pdf-Dokument, zuletzt abgerufen am 14.12.2013 unter http://www.wienerlinien.at/media/files/2011/schienenfahrzeuge_kinder_53382.pdf
- [32] WIENER LINIEN (2012): Gleismessschieb des Gleises 1 der Linie U3 vom 03.05.2012; pdf-Dokument, abgerufen über den TrackOptimizer-Server
- [33] WIENER LINIEN (2013): Alles über uns. Unternehmensinfo. Betriebsangaben 2012. Pdf-Dokument, zuletzt abgerufen am 13.12.2013 unter: „http://www.wienerlinien.at/media/files/2013/betriebsangaben_2012_95106.pdf“.
- [34] WIENER LINIEN (2013b): Wiener Linien/Unternehmen/Organisation/Unternehmensprofil. Zuletzt abgerufen am 10.02.2014 unter: „<http://www.wienerlinien.at/eportal/ep/channelView.do/pageTypeId/9322/channelId/-32229>“.
- [35] WIENER LINIEN (2013c): Wiener Linien/Aktuelles/News/U2 auf verlängerter Strecke unterwegs. Zuletzt abgerufen am 10.02.2014 unter „<http://www.wienerlinien.at/eportal/ep/contentView.do/pageTypeId/9320/programId/9419/contentTypeId/1001/channelId/-26075/contentId/31985>“.
- [36] WIENER LINIEN (2013d): *U1 Verlängerung Ausbau Oberlaa*. Pdf-Dokument, zuletzt abgerufen am 31.01.2014 unter „http://www.wienerlinien.at/media/files/2013/u1_ausbau_116493.pdf“.
- [37] WIENER STADTWERKE – VERKEHRSBETRIEBE (1992): *U-Bahn-Doppeltriebwagen Type „U“ und „U11“*, Datenblätter, pdf-Dokumente, zuletzt abgerufen am 18.02.2014 unter „http://www.fpdwl.at/fahrzeuge/plaene/U_1.pdf“ und „http://www.fpdwl.at/fahrzeuge/plaene/U1_1.pdf“
- [38] SIEMENS (2013): *Metro System – Wien V-Wagen*, Österreich; Pdf-Dokument, zuletzt abgerufen am 25.01.2014 unter „<http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/de/rail-solutions/metros/slideshow/Datenblatt-Metro-Wien-DE.pdf>“.
- [39] STADT WIEN (2009): *Rückspeisung von Bremsenergie bei Schienenfahrzeugen der Wiener Linien – KlIP I-Umsetzungsbeispiele*. Zuletzt abgerufen am 11.02.2014 unter folgendem Link:

- „<http://www.wien.gv.at/umwelt/klimaschutz/programm/klip1/beispiele/bremsenergie.html>“
- [40] STADT WIEN (o.J.): U-Bahn-Ausbauphasen – Netzpläne; zuletzt abgerufen am 19.11.2013 unter „<http://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/projekte/verkehrsplanung/u-bahn/geschichte.html>“.
- [41] ROLLINGER Wolfgang (2013b): mündliche Auskunft bezüglich der Überarbeitung der Trassierungsvorschrift der Wr. U-Bahn, 21.11.2013
- [42] STECKLER Paul (2013): Persönliche Stellungnahme, Gespräch mit Paul Steckler, Mitarbeiter M Institut für Verkehrswissenschaften, TU Wien, Notizen zum Gespräch liegen dem Verfasser vor.
- [43] KLINKE, Jan Paul (2009): *Möglichkeiten zur Modellierung und Untersuchung von Rotationsbewegungen und deren Überlagerungen in populären Fabrgeschäften*. Masterarbeit im Fachbereich Physik und ihre Didaktik, Universität Bielefeld, pdf-Dokument, zuletzt abgerufen am 26.03.2014 unter „<http://www.physik.uni-bielefeld.de/didaktik/Examensarbeiten/Masterarbeit%20Klinke.pdf>“
- [44] TAUSCHITZ Peter (2011): *Fabrdynamik*. Folien zur VO Öffentlicher Personennahverkehr, TU Wien, Institut für Verkehrswissenschaften.
- [45] ÖMER Bernhard (2008): *CUBAL / NetScan. Krümmungsbasierte Verortung und Aufnahme von Urbanen Schienennetzen*, pdf-Dokument, zuletzt aufgerufen am 24.03.2014 unter „http://www.eurailtelematics.com/fileadmin/user_upload/eurailtelematics.com/Vortraege08/OEmer_dt.pdf“.
- [46] OSTERMANN Norbert (2012): Folien zur VO Eisenbahnwesen im SS 2012, TU Wien, Institut für Verkehrswissenschaften.
- [47] OSTERMANN Norbert (2011): Unterlagen zur VO ÖPNV im WS 2011, TU Wien, Institut für Verkehrswissenschaften.
- [48] ROLLINGER Wolfgang (2013): Skriptum zur VO ÖPNV im WS 2013, TU Wien, Institut für Verkehrswissenschaften.
- [49] ROLLINGER Wolfgang (2011): Skriptum zur VO Bahnerhaltung. 5. Auflage, TU Wien, Institut für Verkehrswissenschaften.
- [50] APA-OTS (2009): *46 Stück neue U6-Triebwagen von Bombardier an die Wiener Linien übergeben*. OTS-Originaltext-Presseaussendung vom 01.07.2009. Zuletzt abgerufen am 27.01.2014 unter „http://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20090701_OTS0103/46-stueck-neue-u6-triebwagen-von-bombardier-an-die-wiener-linien-uebergeben“
- [51] DIE PRESSE (2014): *U5: Wiens neue Linie in Startposition*. Artikel vom 29.01.2014 in der Printausgabe von „Die Presse“ von Martin Stuhlpfarrer.
- [52] KURIER (2014): *Wien will ein Viertel weniger Autos*. Artikel vom 30.01.2014 in der Printausgabe des „Kurier“ von Elias Natmessnig.

- [53] BLASL P. (2013): *Gleisplan U-Bahn Wien*. Png-Datei, zuletzt abgerufen am 19.11.2013 unter „<http://www.fpdwl.at/forum/index.php?page=Attachment&attachmentID=12479>“
- [54] GONZALEZ Gerardo Valido (2014): Fanpage der Wiener Linien, Fahrzeugtypen der Wiener U-Bahn. Zuletzt abgerufen am 13.02.2014 unter „<http://www.fpdwl.at/fahrzeuge/index.php?type=ubahn>“
- [55] PRILLINGER, Horst (2009); *Die Wiener U-Bahn*. Zuletzt abgerufen am 24.01.2014 unter folgenden Links:
 „http://homepage.univie.ac.at/horst.prillinger/metro/deutsch/technische_daten.html“
 „http://homepage.univie.ac.at/horst.prillinger/metro/deutsch/typen_e_und_t.html“
- [56] STADTVERKEHR-AUSTRIA-Wiki (2014): Dokumentation des Stadtverkehrs in Österreich, zuletzt abgerufen am 10.02.2014 unter folgenden Links:
 „[http://xover.mud.at/~tramway/stvkr-a-wiki/index.php/Betriebsbahnhof_Michelbeuern_\(MICH\)](http://xover.mud.at/~tramway/stvkr-a-wiki/index.php/Betriebsbahnhof_Michelbeuern_(MICH))“
 „[http://xover.mud.at/~tramway/stvkr-a-wiki/index.php/Type_U11_\(Wien\)](http://xover.mud.at/~tramway/stvkr-a-wiki/index.php/Type_U11_(Wien))“
 „[http://xover.mud.at/~tramway/stvkr-a-wiki/index.php/Type_U2_\(Wien\)](http://xover.mud.at/~tramway/stvkr-a-wiki/index.php/Type_U2_(Wien))“
 „[http://xover.mud.at/~tramway/stvkr-a-wiki/index.php/Type_UGM1_\(Wien\)](http://xover.mud.at/~tramway/stvkr-a-wiki/index.php/Type_UGM1_(Wien))“
 „[http://xover.mud.at/~tramway/stvkr-a-wiki/index.php/Betriebsbahnhof_Erdberg_\(ERD\)](http://xover.mud.at/~tramway/stvkr-a-wiki/index.php/Betriebsbahnhof_Erdberg_(ERD))“
- [57] WIKIPEDIA: *Corioliskraft*. Zuletzt abgerufen am 7.2.2014 unter „<http://de.wikipedia.org/wiki/Corioliskraft>“.
- [58] WIKIPEDIA: *U-Bahnlinie 2 (Wien)*. Zuletzt abgerufen am 10.02.2014 unter „[http://de.wikipedia.org/wiki/U-Bahnlinie_2_\(Wien\)](http://de.wikipedia.org/wiki/U-Bahnlinie_2_(Wien))“.
- [59] W24-Nachtschiene (2011): Video aus dem Führerstand eines V-Wagen auf der Linie U3 auf der Fahrt von Ottakring nach Simmering. Youtube-Clip zuletzt abgerufen am 18.11.2013 unter „<http://youtu.be/BZB-MIxXXQg>“.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.01:	Zugkraftdiagramm: qualitativer Verlauf der maßgeblichen Kräfte, eigene Darstellung, ergänzt nach [02] und [46]	9
Abb. 2.02:	Qualitative Darstellung des Beschleunigungsverlaufes, eigene Darstellung.....	10
Abb. 2.03:	Bremsregelung, Geschwindigkeits-Weg-Diagramm, eigene Darstellung nach [48]	12
Abb. 2.04:	Geschwindigkeits-Zeit- und Geschwindigkeits-Weg-Diagramm einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung bis zur Höchstgeschwindigkeit, eigene Darstellung.....	14

Abb. 2.05:	Fahrschaubild eines konstant beschleunigten Zuges zwischen zwei Stationen, eigene Darstellung, verändert nach [02] und [27].....	14
Abb. 2.06:	Fahrschaubild eines konstant beschleunigten Zuges zwischen zwei Stationen mit geringem Abstand, eigene Darstellung	15
Abb. 2.07:	Fahrschaubild eines konstant beschleunigten Zuges mit abschnittsweiser Geschwindigkeitsbeschränkung, eigene Darstellung.....	16
Abb. 2.08:	Energiesparende Fahrweise durch reduzierte Höchstgeschwindigkeit, eigene Darstellung nach [46].....	16
Abb. 2.09:	Energiesparende Fahrweise durch Ausrollphase nach Erreichen der Höchstgeschwindigkeit, eigene Darstellung, verändert nach [48].....	17
Abb. 2.10:	Beschleunigungen bei einer Bogenfahrt, eigene Darstellung, verändert nach [06]	19
Abb. 2.11:	Verlauf von Seitenbeschleunigung und Ruck bei einer Bogenfahrt, eigene Darstellung, verändert nach [19].....	25
Abb. 2.12:	Normierte Krümmung bzw. Überhöhung und Ableitungsfunktionen einer Klothoide mit linearer Überhöhungsrampe, eigene Darstellung nach [12].....	28
Abb. 2.13:	Normierte Überhöhung und Ableitungsfunktionen einer Klothoide mit linearer Überhöhungsrampe mit Ausrundungen, eigene Darstellung	29
Abb. 2.14:	Normierte Überhöhung und Krümmung in Bezug auf die Schwerpunktlage sowie deren Ableitungsfunktionen für einen Wiener Bogen®, eigene Darstellung nach [12]	30
Abb. 3.01:	Ermessensbereich für die Wahl der Überhöhung, eigene Darstellung, verändert nach [02] und [10]	41
Abb. 3.02:	Bereich der optimalen Überhöhung für eine Kreisbogenfahrt mit konstanter Geschwindigkeit, zugehörige Radien für eine Geschwindigkeit von 80 km/h, eigene Darstellung, verändert nach [10].....	43
Abb. 3.03:	Ober- und Untergrenzen der optimalen Überhöhung in den Bereichen der gleichmäßig beschleunigten Fahrt und der Beharrungsfahrt, $R = 350$ m, eigene Darstellung.....	52
Abb. 3.04:	Ober- und Untergrenzen der optimalen Überhöhung in den Bereichen der gleichmäßig beschleunigten Fahrt und der Beharrungsfahrt, $R = 600$ m, eigene Darstellung.....	53
Abb. 3.05:	Ober- und Untergrenzen der optimalen Überhöhung mit Ausnahme der Haltestellenbereiche, $R = 600$ m, eigene Darstellung.....	55
Abb. 4.01:	U-Bahn-Netzplan und Schnellbahnlinien (blau) in Wien, aktueller Ausbaustand (Jänner 2014), Darstellung ergänzt nach [40].....	58
Abb. 4.02:	Schotterloser Regeloberbau mit Kunststoffschwelen, aus [11].....	64

Abb. 4.03:	Neuer Wiener Oberbau mit Bi-Block-Schwellen und Sylomer-Lager, aus [29]65
Abb. 4.04:	Anlageverhältnisse und Stationen der Linie U3, unter Verwendung von [05], [28], [53], [59], eigene Darstellung.....68
Abb. 4.05:	Aufrissdarstellung eines Doppeltriebwagens der Type U, U ₁₁ bzw. U ₂ , aus [11] ...70
Abb. 4.06:	Aufrissdarstellung eines Steuer- und eines Motorwagens der Type V/v, aus [38].73
Abb. 5.01:	Geschwindigkeitsprofil für das Gleis 1 der Linie U3, Messfahrt am 03.11.2010 mit einem V-Wagen, grau unterlegte Bereiche wurden für die Ermittlung des idealisierten Beschleunigungsverlaufs herangezogen, eigene Darstellung.....82
Abb. 5.02:	Geschwindigkeitsprofil für das Gleis 2 der Linie U3, Messfahrt am 11.07.2013 mit einem V-Wagen, grau unterlegte Streckenabschnitte (mit Ausnahme von WS3-SH) wurden für den idealisierten Beschleunigungsverlauf herangezogen, eigene Darstellung.....83
Abb. 5.03:	Beschleunigungsverlauf auf Gleis 1 der Linie U3 in Abhängigkeit von der Zeit, Messfahrt am 03.11.2010 mit einem V-Wagen, eigene Darstellung.....83
Abb. 5.04:	Beschleunigungsverlauf auf Gleis 2 der Linie U3 in Abhängigkeit von der Zeit, Messfahrt am 11.07.2013 mit einem V-Wagen, eigene Darstellung.....84
Abb. 5.04.a:	Vergrößerter Ausschnitt des Beschleunigungsverlaufs auf Gleis 2 der Linie U3 in Abhängigkeit von der Zeit, Stationen Kardinal-Nagl-Platz bis Stubentor, Messfahrt am 11.07.2013 mit einem V-Wagen, eigene Darstellung.....85
Abb. 5.05:	Vergleich der maximal möglichen Beschleunigung zufolge der Antriebsleistung mit den Messdaten der Beschleunigungskurven in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ausgewählter Streckenabschnitte entlang des Gleises 1 der Linie U3, Messfahrt am 03.11.2010 mit einem V-Wagen, eigene Darstellung86
Abb. 5.06:	Überlagerung der Messdaten der Beschleunigungskurven ausgewählter Streckenabschnitte entlang des Gleises 1 der Linie U3 von einer Messfahrt am 03.11.2010 mit einem V-Wagen mit dem idealisierten Beschleunigungsverlauf des Messzuges sowie eines vollbesetzten V-Wagen-Zuges, eigene Darstellung88
Abb. 5.07:	Überlagerung der Messdaten der Beschleunigungskurven ausgewählter Streckenabschnitte entlang des Gleises 2 der Linie U3 von einer Messfahrt am 11.07.2013 mit einem V-Wagen mit dem idealisierten Beschleunigungsverlauf des Messzuges, eigene Darstellung.....89
Abb. 5.08:	Überlagerung der Messdaten der Geschwindigkeitskurven ausgewählter Streckenabschnitte entlang des Gleises 1 der Linie U3 von einer Messfahrt am 03.11.2010 mit einem V-Wagen mit dem idealisierten Geschwindigkeitsverlauf des Messzuges der Type V, eigene Darstellung.....91
Abb. 5.09:	Überlagerung der Messdaten der Geschwindigkeitskurven ausgewählter Streckenabschnitte entlang des Gleises 2 der Linie U3 von einer Messfahrt am

	11.07.2013 mit einem V-Wagen mit dem idealisierten Geschwindigkeitsverlauf der Type V, eigene Darstellung.....	92
Abb. 5.10:	Vergleich der idealisierten Geschwindigkeitskurve beim Bremsvorgang mit den Messdaten der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Wegstrecke ausgewählter Streckenabschnitte entlang des Gleises 1 der Linie U3 von einer Messfahrt am 03.11.2010 mit einem V-Wagen, eigene Darstellung	94
Abb. 5.11:	Vergleich des gewählten idealisierten Beschleunigungsverlaufs mit den Messdaten der Bremsverzögerung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ausgewählter Streckenabschnitte entlang des Gleises 1 der Linie U3 von einer Messfahrt am 03.11.2010 mit einem V-Wagen, eigene Darstellung	95
Abb. 5.12:	Vergleich der idealisierten Geschwindigkeitskurve beim Bremsvorgang mit den Messdaten der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Wegstrecke ausgewählter Streckenabschnitte entlang des Gleises 2 der Linie U3 von einer Messfahrt am 11.07.2013 mit einem V-Wagen, eigene Darstellung	96
Abb. 5.13:	Vergleich des gewählten idealisierten Beschleunigungsverlaufs mit den Messdaten der Bremsverzögerung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ausgewählter Streckenabschnitte entlang des Gleises 1 der Linie U3 von einer Messfahrt am 11.07.2013 mit einem V-Wagen, eigene Darstellung	96
Abb. 5.14.a-t:	Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 1, der Buchstaben-Index bezeichnet den Streckenabschnitt gemäß der im Folgenden angeführten Zuordnung, eigene Darstellungen.....	100 - 138
Abb. 5.15.a-t:	Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 1, der Buchstaben-Index bezeichnet den Streckenabschnitt gemäß der im Folgenden angeführten Zuordnung, eigene Darstellungen	101 - 139
Abb. 5.16.a-t:	Längsneigung und Lage der Weichen und Bahnsteige, Gleis 1, der Buchstaben-Index bezeichnet den Streckenabschnitt gemäß der im Folgenden angeführten Zuordnung, eigene Darstellungen	101 - 139
Abb. 5.17.a-t:	Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 1, der Buchstaben-Index bezeichnet den Streckenabschnitt gemäß der im Folgenden angeführten Zuordnung, eigene Darstellungen.....	101 - 139
Abb. 5.18.a-t:	Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 1, der Buchstaben-Index bezeichnet den Streckenabschnitt gemäß der im Folgenden angeführten Zuordnung, eigene Darstellungen.	101 - 139

Zuordnung der Buchstaben-Indizes der Abbildungen 5.14 bis 5.18:

- a Abschnitt Ottakring - Kendlerstraße
- b Abschnitt Kendlerstraße – Hütteldorfer Straße
- c Abschnitt Hütteldorfer Straße – Johnstraße
- d Abschnitt Johnstraße – Schweglerstraße
- e Abschnitt Schweglerstraße – Westbahnhof

- f Abschnitt Westbahnhof – Zieglergasse
- g Abschnitt Zieglergasse – Neubaugasse
- h Abschnitt Neubaugasse – Volkstheater
- i Abschnitt Volkstheater – Herrengasse
- j Abschnitt Herrengasse – Stephansplatz
- k Abschnitt Stephansplatz – Stubentor
- l Abschnitt Stubentor – Landstraße
- m Abschnitt Landstraße – Rochusgasse
- n Abschnitt Rochusgasse – Kardinal-Nagl-Platz
- o Abschnitt Kardinal-Nagl-Platz – Schlachthausgasse
- p Abschnitt Schlachthausgasse – Erdberg
- q Abschnitt Erdberg – Gasometer
- r Abschnitt Gasometer – Zippererstraße
- s Abschnitt Zippererstraße – Enkplatz
- t Abschnitt Enkplatz - Simmering

Abb. 5.19.a-t: Grundrissplan Trassierung U3, Gleis 2, der Buchstaben-Index bezeichnet den Streckenabschnitt gemäß der im Folgenden angeführten Zuordnung, eigene Darstellungen..... 140 - 178

Abb. 5.20.a-t: Überlagerung der Messdaten der Krümmung mit der planmäßigen Krümmung, Gleis 2, der Buchstaben-Index bezeichnet den Streckenabschnitt gemäß der im Folgenden angeführten Zuordnung, eigene Darstellungen..... 141 - 179

Abb. 5.21.a-t: Längsneigung und Lage der Weichen und Bahnsteige, Gleis 2, der Buchstaben-Index bezeichnet den Streckenabschnitt gemäß der im Folgenden angeführten Zuordnung, eigene Darstellungen..... 141 - 179

Abb. 5.22.a-t: Geschwindigkeitsverlauf für die Überhöhungsberechnung, Gleis 2, der Buchstaben-Index bezeichnet den Streckenabschnitt gemäß der im folgenden angeführten Zuordnung, eigene Darstellungen..... 141 - 179

Abb. 5.23.a-t: Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, der Buchstaben-Index bezeichnet den Streckenabschnitt gemäß der im folgenden angeführten Zuordnung, eigene Darstellungen.. 141 - 179

Zuordnung der Buchstaben-Indizes der Abbildungen 5.19 bis 5.23:

- a Abschnitt Simmering - Enkplatz
- b Abschnitt Enkplatz - Zippererstraße
- c Abschnitt Zippererstraße - Gasometer
- d Abschnitt Gasometer - Erdberg
- e Abschnitt Erdberg - Schlachthausgasse
- f Abschnitt Schlachthausgasse – Kardinal-Nagl-Platz
- g Abschnitt Kardinal-Nagl-Platz - Rochusgasse
- h Abschnitt Rochusgasse - Landstraße
- i Abschnitt Landstraße - Stubentor

j	Abschnitt Stubentor - Stephansplatz	
k	Abschnitt Stephansplatz – Herrengasse	
l	Abschnitt Herrengasse - Volkstheater	
m	Abschnitt Volkstheater - Neubaugasse	
n	Abschnitt Neubaugasse - Zieglergasse	
o	Abschnitt Zieglergasse - Westbahnhof	
p	Abschnitt Westbahnhof - Schweglerstraße	
q	Abschnitt Schweglerstraße - Johnstraße	
r	Abschnitt Johnstraße – Hütteldorfer Straße	
s	Abschnitt Hütteldorfer Straße - Kandlerstraße	
t	Abschnitt Kandlerstraße - Ottakring	
Abb. 5.24:	Vergleich der optimalen Überhöhung mit den Messwerten der eingebauten Überhöhung, Gleis 2, SA-EK, km 24,0 bis 23,6, Ausschnitt aus Abb. 5.23.a, eigene Darstellung.....	186
Abb. B.01:	Linie U3, OK (Ottakring) – SA (Simmering), Übersichtsplan Streckenverlauf im Maßstab 1 : 10.000 unter Verwendung von [28], eigene Darstellung.....	195
Abb. C.01:	Ausschnitt des Datenfiles der Soll-Trassierung für den Streckenabschnitt Kandlerstraße – Hütteldorfer Straße mit der Erläuterung der enthaltenen Parameter, eigene Darstellung.....	197

Tabellenverzeichnis

Tab. 4.01:	Zusammenstellung der technischen Kenndaten der Fahrzeuge der Linien U1-U4 unter Verwendung von [01], [11], [24], [31], [38], [54], [55], [56].....	74
Tab. 5.01:	Stationierung und Höhenkote der Stationsmittelpunkte sowie Längsneigung entlang des Bahnsteigs, Linie U3, Gleis 1 und 2 unter Verwendung der Datenfiles der Solltrassierung [28]	79
Tab. 5.02:	Stationsabstände, Mindestradien und Durchschnittsneigungen entlang der Tourengleise der Linie U3 unter Verwendung der Datenfiles der Solltrassierung [28]	80
Tab. 5.03:	Zusammenfassung aller Streckenabschnitte der Linie U3, in denen das maximal mögliche Geschwindigkeitsprofil aufgrund der vorhandenen Trassierungsparameter abgemindert werden muss	182
Tab. 5.04:	Zusammenstellung aller Streckenabschnitte entlang des Gleises 1 der Linie U3, die Kreisbögen mit zu geringen Überhöhungen aufweisen	184
Tab. 5.05:	Zusammenstellung aller Streckenabschnitte entlang des Gleises 2 der Linie U3, die Kreisbögen mit zu geringen Überhöhungen aufweisen	185