



H o c h s c h u l e N e u b r a n d e n b u r g
Fachbereich Landschaftswissenschaften und Geomatik
Studiengang Geodäsie und Messtechnik

Überprüfung der Geradlinigkeit und des Höhenverlaufs von Messgleisen am Beispiel der BVG U-Bahnwerkstatt Grunewald

URN: urn:nbn:de:gbv:519-thesis2015-0813-5

Bachelorthesis

Zur Erlangung des akademischen Grades

„Bachelor of Engineering“ (B.Eng.)

Vorgelegt von: Peter Gerndt

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Larisch

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Kieser

Danksagung

Bedanken möchte ich mich in erster Linie bei der Leitung der U-Bahn Betriebswerkstatt Grunewald. Diese machte die umfangreiche Messung des Messgleises 410 in „Halle 4“, durch umrangieren der Züge, für einen längeren Zeitraum überhaupt erst möglich.

Des Weiteren gilt mein Dank dem Unternehmen Schmid Ingenieure GmbH. Neben dem Vorschlag diesen Auftrag als Thematik für eine Bachelorarbeit zu wählen, sind sämtliche Messmittel und Auswertungsmöglichkeiten gestellt worden. Eigens für diese Thematik konnte ein Gleismesswagen der Firma Trimble Railway GmbH ausgeliehen werden.

Bedanken möchte ich mich zu dem vor allem bei meinen Betreuern Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-J. Larisch und Herrn Dipl.-Ing. (FH) T. Kieser. Beide Betreuer standen mir während der Vorbereitung der Messung, der Durchführung der Messung sowie der Auswertung und des Schreibens an der Ausarbeitung stets mit Rat und Tat zur Seite.

Kurzfassung

Eisenbahnfahrzeuge unterliegen im Laufe ihrer Betriebszeit hohen Belastungen und daraus resultierendem Verschleiß bis zu Schädigungen. Um die Betriebssicherheit im Bahnverkehr zu gewährleisten, sind diese Fahrzeuge nach bestimmten Einsatzparametern zu warten und zu prüfen. Messgleise sind dabei gängige Prüfnormale, um betriebsrelevante Maße an Zügen zu kontrollieren. Da diese Messgleise bestimmten Genauigkeitstoleranzen unterliegen ist die Vermessungstechnische Untersuchung dieser, regelmäßig durchzuführen. Im Rahmen der Bachelorthesis wurde ein Messgleis der U-Bahnbetriebswerkstatt Grunewald (Berlin Charlottenburg) mittels unterschiedlicher Messverfahren bestimmt und auf Toleranzehaltung geprüft.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	8
1. Einführung in die Thematik	9
1.1. Zielsetzung der Bachelorthesis	10
1.2. Aufbau der Arbeit	11
2. Geschichtlicher Hintergrund der U-Bahn Berlin	12
2.1. Chronik der Berliner U-Bahn	12
2.2. Groß- und Kleinprofil	16
3. Betriebswerkstatt Grunewald	18
3.1. Messgleise 406, 408, 410 und 412: Bau und Konstruktion	19
3.2. Toleranzen des Schienenverlaufes	20
4. Das Messgleis als Prüfkörper	21
5. Überprüfung des Messgleises 410 in Lage und Höhe	23
5.1. Aufgabenstellung	24
5.2. Vermessungsnetz in der Betriebswerkstatt Grunewald	24
5.3. Methodische Vorgehensweise bei der Auswertung	25
5.4. Tachymetrische Messung mit Gleismesslatte	31
5.4.1. Das Messverfahren	31
5.4.2. Auswertungsergebnisse Gleismesslatte Lage	36
5.4.3. Auswertungsergebnisse Gleismesslatte Höhe	39
5.4.4. Auswertungsergebnisse Gleismesslatte Spurweite (Parallelität)	42
5.4.5. Auswertungsergebnisse Gleismesslatte Überhöhung	44
5.4.6. Erläuterungen zum Messverfahren mit Gleismesslatte	46
5.4.7. Epochenvergleich Messgleis 410	48
5.5. Tachymetrische Messung mit Gleismesswagen	56
5.5.1. Das Messverfahren	56
5.5.2. Ergebnisse Lage und Vergleich zu Messung Gleismesslatte	62
5.5.3. Ergebnisse Höhe und Vergleich zu Messung Gleismesslatte	68
5.5.4. Ergebnisse Spurweite und Vergleich zu Messung Gleismesslatte	74
5.5.5. Ergebnisse Überhöhung und Vergleich Messung Gleismesslatte	77
5.5.6. Erläuterungsbericht Messverfahren mit Gleismesswagen	80
5.6. Pfeifeilhöhenmessverfahren	81
5.7. Überprüfung auf mögliche Refraktionseinflüsse	85
5.8. Entscheidung auf Toleranzehinhaltung	86
6. Fazit und Abschlussbericht	90
6.1. Vergleich der Messmethoden	90
6.2. Abschlussbericht	91

Anhang	95
A1: Gesprächsbericht Betriebswerkstatt	95
A2: Festpunktnetz Halle 4	97
A3: Programmablaufplan der Auswertung	98
A4: Auszug Datenblatt Tachymeter Trimble S8	100
A5: Messergebnisse der Gleismesswaage	101
A6: Arbeitsablaufplan der Messung	102

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Links Wagenkasten im Kleinprofil; Rechts Wagenkasten im Großprofil	17
Abbildung 2: Betriebswerkstatt Grunewald Einfahrt zur „Halle 4“	18
Abbildung 3: Panorama Innenraum „Halle 4“.	19
Abbildung 4: Unterkonstruktion (Zweifeldstahlträger auf Stahlbetonstützen)	19
Abbildung 5: Oberkonstruktion (Rippenplatte mit Schiene)	20
Abbildung 6: Messungen an Achse Drehgestell; Radrückenabstand (unten); Radgeometrie (oben)	21
Abbildung 7: Messung Wagenkastenhöhe: Prinzipskizze (links); Markierung für Messung (rechts)	22
Abbildung 8: Festpunkt in Stirnfläche der Werkstattplattform (links), Werkstattplattform (rechts) Skizze Vermarktung (unten)	25
Abbildung 9: Skizze freie Standpunktwahl	26
Abbildung 10: Prinzipskizze ausgeglichene Gerade	27
Abbildung 11: Messung mit Gleismesslatte	31
Abbildung 12. Übersichtsplan Messgleis 410 (Messaufbau mit Gleismesslatte)	32
Abbildung 13: Ausgewertete linke Schiene ohne Standpunktwechsel bei Messung (links Diagramm; rechts Praxisfoto, Prinzipskizze)	34
Abbildung 14: Epoche BA; Lage; LS	37
Abbildung 15: Epoche BA; Lage; RS	38
Abbildung 16: Epoche BA; Höhe; LS	40
Abbildung 17: Epoche BA; Höhe; RS	41
Abbildung 18: Epoche BA; Spurweite (Parallelität)	43
Abbildung 19: Epoche BA; Überhöhung	45
Abbildung 20 Peakanzeige	47
Abbildung 21. Diagramm Epochenvergleich; Lage; LS	52
Abbildung 22. Gleismesswagen GEDO CE 2.0, Trimble S8 St.Pkt Tor, TSC3 Controller	56
Abbildung 23. Übersichtsplan MG410 (Messaufbau mit Gleismesswagen)	57
Abbildung 24. LVDT-Sensor	59
Abbildung 25: Differenzen aus Prellbock- und Tor Messung	60

Abbildung 26. GMW;Lage;LS	63
Abbildung 27. GMW;Lage;RS	64
Abbildung 28. GMW;Höhe;LS	69
Abbildung 28. GMW;Höhe;LS	70
Abbildung 29. GMW;Spur	75
Abbildung 31. GMW;Spur	77
Abbildung 32. GMW;Überhöhung	78
Abbildung 33. GMW; Überhöhung	79
Abbildung 34: Schienenverlauf (grau) Sehne (rot) Pfeilhöhen (rot)	81
Abbildung 35: Praktischer Einblick der Pfeilhöhenmessung	81
Abbildung 36: Lageverlauf rechte Schiene GML (rot) Sehnen (orange)	82
Abbildung 37: Pfeilhöhenmessung im Vergleich zur Gleismesslattenmessung	83
Abbildung 38: Temperaturmessung an vier Position des Gleises 410	85
Abbildung 39: Toleranzverstoß; Lage; linke Schiene	86
Abbildung 40: Toleranzverstoß; Lage; rechte Schiene	87
Abbildung 41: Toleranzverstoß; Höhe; linke Schiene	87
Abbildung 42: Toleranzverstoß; Höhe; rechte Schiene	88
Abbildung 43: Toleranzverstoß; Spurweite	88
Abbildung 44: Toleranzverstoß; Überhöhung	89

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einfluss der Streckenmessgenauigkeit auf Querrichtung	35
Tabelle 2: Epoche BA;GML;Lage;LS	37
Tabelle 3: Epoche BA;GML;Lage;RS	38
Tabelle 4: Epoche BA;GML;Lage;LS;Ergebnisse	39
Tabelle 5: Epoche BA;GML;Lage;RS:Ergebnisse	39
Tabelle 6: Epoche BA;GML;Höhe;LS	40
Tabelle 7: EpocheBA;GML;Höhe;RS	41
Tabelle 8: Epoche BA;GML;Höhe;LS	42
Tabelle 9: Epoche BA;GML;Höhe;RS	42
Tabelle 10: Epoche BA;GML;Spurweite	43
Tabelle 11: Epoche BA;GML;Spurweite	44
Tabelle 12: Epoche BA;GML;Überhöhung	45
Tabelle 13: Epoche BA;GML;Überhöhung	46
Tabelle 14: Übersicht Schweißungen	48
Tabelle 15: Standardabweichungen Epochen	49
Tabelle 16:F-Test Vergleichbarkeit empirischer Standardabweichungen	50
Tabelle 17: Epochenvergleich;Lage;LS;2014-BA	53

Tabelle 18: Epochenvergleich;Lage;LS;2015-BA	53
Tabelle 19: Epochenvergleich;Lage;RS;2014-BA	54
Tabelle 20: Epochenvergleich;Lage;RS;2015-BA	54
Tabelle 21: GMW; Lage; LS	63
Tabelle 22: GMW; Lage; RS	64
Tabelle 23: GMW;Lage;LS;Ergebnisvergleich zu GML	65
Tabelle 24: Schätzung „ $\sigma_d 65 $	65
Tabelle 25: t-Test;GMW-GML;Lage;LS;Enden Schiene	66
Tabelle 26: t-Test;GMW-GML;Lage;LS;Mitte Schiene	66
Tabelle 27: GMW;Lage;RS;Ergebnisvergleich zu GML	67
Tabelle 28: Schätzung „ $\sigma_d 67 $	67
Tabelle 29: t-Test;GMW-GML;Lage;RS;Enden Schiene	68
Tabelle 30: t-Test;GMW-GML;Lage;RS;Mitte Schiene	68
Tabelle 31: GMW; Höhe; LS	69
Tabelle 32: GMW; Höhe; RS	70
Tabelle 33: GMW;Höhe;LS;Ergebnisvergleich zu GML	71
Tabelle 34: Schätzung „ $\sigma_d 71 $	71
Tabelle 35: t-Test;GMW-GML;Höhe;LS;Enden Schiene	71
Tabelle 36: t-Test;GMW-GML;Höhe;LS;Mitte Schiene	72
Tabelle 37: GMW;Höhe;RS;Ergebnisvergleich zu GML	72
Tabelle 38: Schätzung „ $\sigma_d 73 $	73
Tabelle 39: t-Test;GMW-GML;Höhe;RS;Enden Schiene	73
Tabelle 40: t-Test;GMW-GML;Höhe;RS;Mitte Schiene	74
Tabelle 41: GMW; Spur	75
Tabelle 42: GMW;Spur;Ergebnisvergleich zu GML	76
Abbildung 30. zusätzlicher vgl. mit Gleismesslatte	76
Tabelle 43: GMW; Überhöhung	78
Tabelle 44: GMW;Überhöhung;Ergebnisvergleich zu GML	79
Tabelle 45: Toleranzverstöße;Lage;LS	86
Tabelle 46: Toleranzverstöße;Lage;LS	89

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
BVG	Berliner Verkehrsbetriebe
ca.	circa
m	Meter
cm	Zentimeter
mm	Milimeter
ect.	ecetera
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
u.a.	unter anderem
BW-Gru	Betriebswerkstatt Grunewald
LS	linke Schiene
RS	rechte Schiene
GMW	Gleismesswagen
GML	Gleismesslatte
Spur	Spurweite
Linear	Linearer Trend
BA	Bachelorarbeit
s	empirische Standardabweichung 68%
σ	theoretische Standardabweichung 68%
s_d	empirische Standardabweichung der Differenz 68%
σ_d	theoretische Standardabweichung der Differenz 68%
n	Anzahl Messungen
f	Anzahl Freiheitsgrade ($f=n-1$)
n	Parameter linearer Trend, Schnitt mit mathematischer y-Achse
m	Parameter linearer Trend, „Anstieg“ der linearen Funktion
m.	mit
u.	und
NS	Normalspur
Max	Maximal
Min	Minimal
SP	Standpunkt
∞	Unendlich

1. Einführung in die Thematik

Eisenbahnfahrzeuge unterliegen im Laufe ihrer Betriebszeit hohen Belastungen und daraus resultierendem Verschleiß bis zu Schädigungen. Um die Betriebssicherheit im Bahnverkehr zu gewährleisten, sind diese Fahrzeuge nach bestimmten Einsatzparametern zu warten und zu prüfen. Zu diesem Zweck ist ein Instandhaltungssystem festzulegen. Dieses stellt sicher, dass geregelte Prüfverfahren zur Anwendung kommen und demnach der Sollzustand der Eisenbahnfahrzeuge eingehalten werden kann. Bestandteil jener Prüfverfahren ist unter anderem die Kontrolle betriebsrelevanter Maße, wie beispielsweise die Einhaltung der Spurbreite.¹ Dieses Messen am Fahrzeug und die eventuell daraus resultierenden Justierungen an sicherheitsrelevanten und funktionellen Maßen, müssen in der Form sichergestellt werden, dass ein optimales Zusammenspiel zwischen Fahrzeugaufbau und Laufwerk (Drehgestell) stattfindet. Das bedeutet, dass sicherheitsrelevante Themen sowie fahrdynamische Eigenschaften des Fahrzeuges optimal ausgenutzt werden. Das Messen ist dabei periodisch, nach bestimmten Zeitabständen oder gefahrenen Kilometern durchzuführen.² Um genaue Maße festlegen zu können sind Prüfkörper erforderlich. Im Eisenbahnbereich wird dieser Zweck unter anderem durch Messgleise erfüllt. Ein Messgleis ist ein gerades Gleis mit streng definierten Toleranzen. An diesem orientieren sich die Maße, welche für eine optimale Einstellung des Fahrzeuges erforderlich sind.³

Da die Anforderungen an die U-Bahnen in Berlin immer weiter steigen und somit auch die Wartungsarbeiten an den Fahrzeugen, wurden am 16. Oktober 2013 vier Messgleise in der Betriebswerkstatt Grunewald (Berlin Charlottenburg) in Betrieb genommen.⁴ Damit die Gleise ihren Anforderungen gerecht werden, beauftragt die BVG ein externes Unternehmen, die SCHMID Ingenieure GmbH, jährlich eine entsprechende Kontrollmessung der Messgleise durchzuführen.⁵

Die SCHMID Ingenieure GmbH ist eine inhabergeführte Ingenieurgesellschaft, die auf dem Gebiet des Bau- und Verkehrswesens tätig ist. Das Team besteht aus Ingenieuren, welche die Basis bei der Realisierung umfangreicher Bauprojekte im regionalen, nationalen und internationalen Bereich bilden. Die Tätigkeitsschwerpunkte umfassen im Allgemeinen den Bau technischer Anlagen und beziehen sich speziell auf den Gleis-, Straßen-, Tief- und Kabelwegebau.⁶

¹ vgl. DIN 27202-10 Teil 10, 2006, S. 4

² vgl. DIN 27202-10 Teil 10, 2006, S. 4

³ vgl. DIN 27202-10 Teil 10, 2006, S. 7

⁴ vgl. Radloff 2015a, S. 2

⁵ vgl. Radloff 2014b, S. 2 ff.

⁶ vgl. SCHMID Ingenieure GmbH 2016

Neben den Tätigkeiten der Planung, Bauleitung, Bauüberwachung und Bauvorbereitung durch Bauingenieure, führt das Unternehmen u.a. Qualitätskontrollen, Absteckungen und Überwachungsmessungen durch. Eigens für diesen Zweck existiert eine Vermessungsabteilung unter der Leitung von Dipl.-Ing.(FH) Thomas Kieser.⁷

Die jährliche Kontrollmessung der Messgleise in der U-Bahn Betriebswerkstatt Grunewald, als Auftrag der Vermessungsabteilung, ergab schließlich das Thema der Bachelorthesis. Der Auftrag konnte mittels der Unterstützung des Unternehmens und der U-Bahn Betriebswerkstatt Grunewald so ausgeweitet werden, dass nähere Untersuchungen an einem der vier Messgleise durchgeführt werden konnten. Diese Untersuchungen bilden den Hauptteil der Bachelorthesis.

1.1. Zielsetzung der Bachelorthesis

Hauptziel der Arbeit ist *die genaue Untersuchung des Messgleises 410 in der Betriebswerkstatt Grunewald*. Dazu werden die Anforderungen an das Messgleis durch die BVG und das Werkstattpersonal festgestellt, um diese dann mit Hilfe von unterschiedlichen Messmethoden zu überprüfen. Das Ergebnis ist eine präzise Aussage darüber, ob das Messgleis diesen Anforderungen gerecht wird. Des Weiteren wird das qualitativ, quantitativ und wirtschaftlich beste Verfahren ermittelt. Dabei bildet ein umfangreicher Vergleich die Grundlage zur Entscheidungsfindung.

⁷ vgl. SCHMID Ingenieure GmbH 2016

1.2. Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Bachelorthesis stellt eine ingenieurtechnische Bearbeitung eines praxisrelevanten Themas dar und gliedert sich in einen theoretischen und einen praktischen Teil.

Der theoretische Teil der Arbeit umfasst die Kapitel 2 bis 4 und bezieht sich insbesondere auf den geschichtlichen Hintergrund der Berliner U-Bahn. Außerdem wird ein Bericht über die Betriebswerkstatt Grunewald erstellt. Der theoretische Teil ist als reine Literaturrecherche zu betrachten und beinhaltet keine eigenen Interpretationen oder Deutungen.

Den Hauptteil der Arbeit bildet der praktische Teil der Bachelorthesis. Dieser Teil umfasst das gesamte Kapitel 5 und beinhaltet eine Reihe von Grafiken und Berechnungen, aber vor allem die Vergleiche der unterschiedlichen Messverfahren.

Anschließend folgt eine Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse sowie ein Fazit der Arbeit.

2. Geschichtlicher Hintergrund der U-Bahn Berlin

Die Umsetzung der Idee, eine Eisenbahn durch den Untergrund einer Stadt fahren zu lassen erfolgte bereits 1863 in der britischen Hauptstadt London. Diese Stadt war zu jener Zeit, mit 2,6 Millionen Menschen, die größte Metropole Europas.⁸ Doch die U-Bahn in London war zu Beginn ihrer Entstehungsgeschichte ein unangenehmer Ort. Die Planer der Tunnel bedachten nicht, dass die Lokomotiven mit Dampfkraft betrieben werden müssen. Der produzierte Rauch der Lokomotiven stand aufgrund von mangelnder Entlüftung in den Tunneln und verpestete in einem enormen Ausmaß die Atemluft, sodass neue Lösungsansätze unerlässlich waren.⁹

Nach und nach entstanden in anderen Teilen Europas vergleichbare Untergrundbahn-Projekte. Der Bau der U-Bahn von Budapest, Ende des 19. Jahrhunderts, zählt dabei zu einem der bedeuteten Projekte. Anlässlich der 1000-Jahr-Feier Ungarns, eine Veranstaltung bei der zahlreiche Besucher erwartet wurden, kam die Idee für eine U-Bahn. In diesem Zusammenhang fiel das erste Mal der Name „Werner von Siemens“. Dieser projektierte das U-Bahnvorhaben so, dass die Strecke 1896 pünktlich in Betrieb genommen werden konnte.¹⁰ Siemens brachte Erfahrung in diesem Gebiet mit, da er bereits in Berlin den Anstoß für eine Bahn dieser Art gab. Dort verzögerte sich der Bau jedoch aufgrund von Bürokratie und Planungsschwierigkeiten. Sein bahnbrechender Gedanke hinter der Planung war es, die Züge nicht durch Verbrennen von Kohle anzutreiben, sondern die Kraft der Elektrizität zu nutzen. Bis heute wird im Rahmen dessen von der „Großen Elektrifizierung“ gesprochen.¹¹

2.1. Chronik der Berliner U-Bahn

Im folgenden Abschnitt der Arbeit werden die wichtigsten Eckpunkte der Berliner Untergrundbahn in einer Chronik erklärt. Geschichtlich bedeutende Ereignisse gelten dabei als Rahmen zur Orientierung und Einordnung des Zeitgeschehens der Entstehung der Berliner U-Bahn. Die Historie der Berliner U-Bahn beginnt in der Zeit des zweiten deutschen Reichs.

⁸ vgl. Hänßler 2013

⁹ vgl. Hänßler 2013

¹⁰ vgl. Reinhardt 2014, S. 275

¹¹ vgl. Schomacker 2009a

Zweites Deutsches Reich

Das Berlin am Ende des 19. Jahrhunderts zeigte sich als offene, pulsierende und rasch wachsende Stadt, wodurch es zunehmend zu ernsteren Verkehrsproblemen kam. Es entstanden zahlreiche Straßenbahnenlinien, welche zu damaliger Zeit durch Pferde betrieben wurden. Doch auch diese bewältigten die wachsenden Anforderungen nicht. Wie bereits angesprochen war es schließlich Werner von Siemens, welcher den Anstoß zu neuen Verkehrswegen gab.¹²

Werner von Siemens, ein Industrieller und Erfinder, vertraute auf die Kraft der Elektrizität. Er stellte sich eine Art Hochbahn auf stählenden Viadukten vor. Eine ähnliche Bahn existierte bereits in New York. Die Hochbahn in Berlin sollte durch die Friedrichstraße führen, doch die Planung von Siemens fanden ein jähes Ende. Die Stadtväter und nicht zuletzt der preußische König selbst, lehnten das Projekt aus ästhetischen Gründen ab.¹³ Siemens gab allerdings nicht auf und stellte im Jahr 1882 einen weiteren Bauantrag. Die Planung blieb gleich, nur der Standort fiel diesmal auf die Leipziger Straße. Doch auch dieser Antrag scheiterte. Was jedoch blieb, war die Idee Bahnen durch Elektrizität anzutreiben. Dies gelang bereits 1881 bei einer Straßenbahnenlinie in Berlin-Lichterfelde und breitete sich weltweit rasant in den Nahverkehrsbahnen aus.¹⁴

Zehn Jahre später, 1891, stellte Werner von Siemens einen weiteren Bauantrag, welcher nach langen Verhandlungen schließlich Genehmigung fand. Die Strecke sollte von der Warschauer Brücke über das Hallesche Tor zur Gitschiner Straße führen. Die Bauarbeiten begannen 1896, was Werner von Siemens jedoch nicht mehr miterlebte, er starb 1892.¹⁵ 1899 wurde die angesprochene Hochbahn soweit fertig gestellt, dass mit ersten Testfahrten begonnen werden konnte. Jene Eröffnung wurde durch die sogenannte „Ministerfahrt“ durchgeführt.¹⁶

Der heutige Berliner Stadtteil Charlottenburg war zu damaligen Zeit eine eigenständige Stadt und wollte durch eine Hochbahn mit Berlin verbunden werden. Doch der Protest gegen die Hochbahn auf Grund von ästhetischen Gründen steigerte sich und so wurde in der Zeit der Jahrhundertwende die erste unterirdische Bahn Berlins geplant. Ein neues Kapitel der Berliner Verkehrsgeschichte begann.

¹² vgl. Schomacker 2009a

¹³ vgl. Reinhardt 2014, S. 277

¹⁴ vgl. Blume 2016

¹⁵ vgl. Blume 2016; Reinhardt 2014, S. 277

¹⁶ vgl. Reinhardt 2014, S. 278

Im Zuge dessen konnten bis zu Beginn des Ersten Weltkrieges insgesamt 14 Untergrund- und Hochbahnen, mit einer Gesamtstrecke von etwa 37 km, in Betrieb genommen werden.¹⁷

Weimarer Republik

Während der Zeit des Ersten Weltkrieges stagnierte der Bau der U-Bahn in Berlin stark und kam schließlich zum Ende des Krieges gänzlich zum Erliegen.¹⁸ Erst mit Ende des Kaiserreiches 1918 und in der Zeit der Weimarer Republik wurden die Baumaßnahmen wieder aufgenommen. Mit Inkrafttreten des „Groß-Berlin-Gesetzes“ und der damit einhergehenden Eingemeindung von insgesamt sieben Städten und nahezu 60 Gemeinden wuchs Berlin von rund zwei Millionen Einwohnern auf nahezu vier Millionen. So hatte die U-Bahn in Berlin zu dieser Zeit 100 Millionen Fahrgäste jährlich.¹⁹

Bis zur Gründung der Berliner Verkehrs- AG (BVG) im Jahr 1929 wuchs das Netz der Berliner U-Bahn rasant an. Die gesamte Netzlänge betrug nun bereits fast 53 km und erschloss mehr und mehr auch kleinere Teile der Stadt. - Die BVG gründete sich aus der Hochbahngesellschaft und den anderen zahlreichen Verkehrsträgern der Stadt. Mit Gründung der BVG entstand auch der Begriff „U-Bahn“, sowie das mit dem weißen U auf blauem Grund bekannte Logo.²⁰ In den Jahren von 1923 bis 1930 wuchs das Berliner U-Bahnnetz von 35 auf 80 km Netzlänge. Zahlreiche Stadtteile wurden erschlossen in denen bis dahin keine Linien fuhren. Doch die insgesamt schlechte wirtschaftliche Lage Ende der 20er Jahre, beendete das rasche Wachstum des U-Bahnnetzes in Berlin. Die folgenden Jahre wurden nicht besser. So lähmte der zweite Weltkrieg und die daraus entstehende Not die Bauvorhaben für die nächsten 30 Jahre.²¹

Drittes Reich

Seit Sommer 1931 fanden in Berlin keine Neubauten der U-Bahn statt. Dies änderte sich auch nicht mit der Machtübernahme der Nationalsozialisten. Anstatt das Netz auszubauen, wurden einige Bahnhöfe lediglich umbenannt.²² Die große Leistungsfähigkeit der U-Bahn stellte sich zu den Olympischen Spielen im Jahr 1936 heraus. Die Nationalsozialisten planten einige Neubauten und begannen diese teilweise auch. Jedoch wurden jene mit Beginn des Zweiten Weltkrieges komplett eingestellt.

¹⁷ vgl. Reinhardt 2014, S. 280

¹⁸ vgl. Schomacker 2009a

¹⁹ vgl. Reinhardt 2014, S. 361

²⁰ vgl. Schomacker 2009a

²¹ vgl. Schomacker 2009a

²² vgl. Reinhardt 2014, S. 427

Mit Ausbruch des Krieges begann schließlich eine Leidensgeschichte der Berliner U-Bahn. Bereits mit den ersten Luftangriffen auf die Stadt um 1940 waren Schäden am Netz zu beklagen. Ab 1945 konnte die Luftabwehr den Bomben der Alliierten nichts mehr entgegensetzen, sodass die Angriffe derartig heftig ausfielen, dass der U-Bahnverkehr in Teilabschnitten komplett zum Erliegen kam. Ende April mussten die beiden letzten, noch fahrenden Linien schließlich wegen Strommangel ihren Fahrbetrieb einstellen. Aufgrund der starken Luftschlüsse waren die Tunnel derart massiv beschädigt, dass ein Drittel des Netzes mit Wasser aus der Spree geflutet war.²³ Mit Beendigung der Kriegshandlung und der bedingungslosen Kapitulation der Nazi-Regierung begann gleichzeitig der Wiederaufbau des Berliner U-Bahnnetzes.²⁴

Nachkriegsdeutschland

Das Deutschland nach dem Krieg war geteilt. Besonders war das in Berlin zu spüren. Vier Sektoren, geteilt durch die Siegermächte, trennten die Stadt. Bis zum Bau der Berliner Mauer 1961 gab es einschneidende Ereignisse. Unter anderem konnten bis 1950 alle vom Krieg zerstörten Linien wieder vollständig aufgebaut werden. Nach dem Bau der Mauer trennte sich die BVG in eine Ost- und eine West-Verwaltung. Der Verwaltung der BVG-West nahm zeitnah die Planung am „200-km-Plan“ auf. Dieser beinhaltete eine starke Verdichtung des vorhandenen U-Bahnnetzes. Vergleichbare Planungen im Bereich der U-Bahn fanden im Ostteil Berlins nicht statt. Der von der Sowjetunion besetzte Teil Deutschlands hatte zunehmend mit den Kriegsreparationszahlungen zu kämpfen. Dies wirkte sich auch auf die U-Bahn in Berlin aus. 120 Wagen mussten für die Moskauer Metro bereitgestellt werden, zudem Material sowie Personal.²⁵

Zwei deutsche Staaten

Vor dem Bau der Mauer 1961 fuhren die U-Bahnlinien auch über die vier Sektoren der Stadt grenzüberschreitend weiter. Ab dem Bau der Mauer und der endgültigen Trennung der Stadt endete auch der U-Bahnverkehr zwischen Ost und West. Linien welche von West nach West unter dem Ostteil fuhren hielten ihren Betrieb bei. Bahnhöfe im Ostteil der Stadt wurden dabei jedoch nicht bedient. Bis zum Jahr 1989 wuchs das Netz im Westteil der Stadt rasant an, sodass 134 km Gesamtlänge entstanden. Der Berliner Osten betrieb davon knapp 27 km. Der Ausbau im Ostteil ist mit dem im Westen nicht zu vergleichen.²⁶

²³ vgl. Schomacker 2009a

²⁴ vgl. Reinhardt 2014, S. 471

²⁵ vgl. Reinhardt 2014, S. 470

²⁶ vgl. Reinhardt 2014, S. 549

Das wiedervereinigte Deutschland

Im Zuge der Deutschen Wiedervereinigung gab es 1992 schließlich auch die Vereinigung der beiden Verkehrsgesellschaften. Sämtliche Bahnhöfe im Osten Berlins, welche aufgrund der Teilung geschlossen waren, wurden wieder eröffnet und bedient. So vollendete sich die Wiedervereinigung Deutschlands auch bei den Nahverkehrsmitteln Berlins. Zudem konnten nach der Vereinigung Berlins eine Reihe von Streckenverlängerungen, sowie zahlreiche Verzweigungen und viele Umbauten in Angriff genommen werden.²⁷ Das U-Bahnnetz in Berlin umfasst heute zehn Linien mit einer Gesamtstrecke von 146 km und einer Anzahl von insgesamt 173 U-Bahnhöfen.²⁸

2.2. Groß- und Kleinprofil

Seit Beginn an fährt die Berliner U-Bahn mit Hilfe von Elektromotoren, welche ihre Energie aus Stromschienen entlang der Strecke speisen. Doch eine Reihe von Veränderungen im Profil der Bahnen und deren Bauweise sollen in diesem Kapitel Erwähnung finden. So besteht bis Heute ein großer Unterschied in den Profilen der Bahnen. Im Allgemeinen ist von Groß- und Kleinprofil die Rede.²⁹ Werner von Siemens entwickelte bereits im 19. Jahrhundert die Kleinprofil-Bahnen. Die Großprofil-Bahnen hingegen wurden 1912 von der Stadt Berlin und der Firma AEG entworfen. Die Großprofilzüge sind, wie der Name sagt, im Querschnitt bzw. Profil größer abgemessen und benötigen im Tunnel deutlich mehr Platz. Die Wagenkasten-breite und -höhe unterscheidet sich merklich zum Kleinprofil. Die größte Differenz besteht jedoch in der Art der Stromabnahme. Neben dem Gleis verläuft die Stromschiene. Dies gilt für beide Profilarten. Auch gilt für beide Bahnen, dass die Züge über Gleichstrom betrieben werden. Beim Kleinprofil ist jedoch die Stromabnahme eine deutlich andere, als im Großprofil. So bezieht ein Zug im Kleinprofil seinen Fahrstrom aus der Stromschiene, da der Strom seinen Weg zum Fließen finden muss. Dieser Vorgang, d.h das Leiten des Stroms, geschieht über die Fahrschiene. Zudem nimmt der Stromabnehmer, ein Schleifarm, welcher sich seitlich am Zug befindet, den Strom von der freiliegenden Stromschiene direkt von der Oberseite der Schiene ab.(vgl. Abb.1 links) Im Gegensatz dazu berührt der Schleifarm im Großprofil die Stromschiene von unten. (vgl. Abb.1 rechts) Das Ergebnis ist ein Sicherheitsgewinn, da die Stromschiene abgedeckt werden kann. Auch der Weg des Stromflusses ist ein Anderer. So wird beim Großprofil der Strom aus der Fahrschiene gespeist und gibt diesen

²⁷ vgl. Reinhardt 2014, S.785

²⁸ vgl. BerlinOnline 2016

²⁹ vgl. Schomacker 2009b

über die Stromschiene zurück.³⁰ Ein Kuriosum ist, dass es in Berlin sehr wenig Zugfahrer gibt, die ermächtigt sind beide Profile zu fahren. Ein U-Bahnfahrer wird entweder im Klein- oder im Großprofil ausgebildet. Zusätzlich ist der Austausch zwischen Zügen auf Kleinprofil- und Großprofilstrecken nicht möglich, da die Technik und die Abmaße der Bahnen zu verschieden sind.³¹

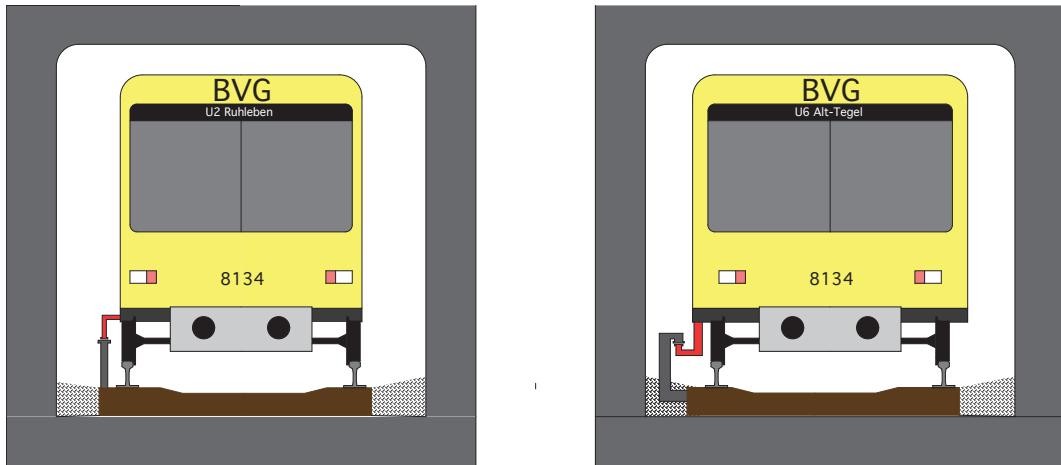


Abbildung 1: Links Wagenkasten im Kleinprofil; Rechts Wagenkasten im Großprofil

Desweitert stellt sich die Frage, weshalb es überhaupt zwei unterschiedliche Profile gibt. Die Stadt Berlin wollte sich von der Kleinprofil-Bahn, welche sich ausschließlich in privater Hand befand, distanzieren und aus den Erfahrungen lernen die mit der Bahn bis dahin gemacht wurde. So entstanden die Planungen für einen deutlich größeren Wagenkasten und ein verbessertes Stromabnahmesystem. Die erste Großprofilstrecke Berlins eröffnete 1923. Seit diesem Jahr werden in Berlin ausschließlich Strecken des Großprofils errichtet. Da bis 1923 bereits einige Strecken im Kleinprofil gebaut wurden und der Umbau schwer zu realisieren wäre, ist die Pflege beider Profile bis heute unerlässlich.³²

Die ersten U-Bahnwagen waren aus einem Holzgerippe und konnten demnach nur mit niedrigen Geschwindigkeiten fahren. Dieses wurde dann nach und nach durch ein Gerippe aus Stahl ersetzt. Zudem wurde bereits in den 1930 Jahren leichtere Aluminiumwagen getestet. Bis heute wachsen die Anforderungen an die Züge, da Geschwindigkeiten bis 80 Kilometer pro Stunde durchaus erreicht werden können.³³ Um dabei die Sicherheit für Fahrgäste zu gewährleisten, müssen sämtliche Züge nach bestimmten Richtlinien geprüft und gegebenenfalls repariert werden. Zu diesem Zweck existieren eine Reihe von Betriebswerkstätten. Diese sind in ganz Berlin verteilt und sichern die Betriebsfähigkeit der U-Bahn Berlin.

³⁰ vgl. Schomacker 2009b

³¹ vgl. Schomacker 2009b

³² vgl. Schomacker 2009b

³³ vgl. Schomacker 2009b

3. Betriebswerkstatt Grunewald

Die Betriebswerkstatt Grunewald (BwGru) ist eine der ältesten Werkstätten der Berliner U-Bahn. Zusätzlich ist sie die einzige Werkstatt, die ausschließlich Kleinprofilzüge wartet. Erbaut wurde sie im Jahr 1913. Die bis dahin einzige Werkstatt in Berlin, an der Warschauer Brücke, sah sich zunehmend überbelastet. Rasch musste für Entlastung gesorgt werden, sodass die Planungen für die Betriebswerkstatt in Charlottenburg Gestalt annahmen. Zur Inbetriebnahme der Werkstatt existierte eine Wagenhalle. Da dieser Bestand auf lange Sicht keine signifikante Entlastung bot, wurden bis zum Jahr 1926 drei weitere Hallen errichtet.³⁴

Die Werkstatt befindet sich direkt am U-Bahnhof zum Berliner Olympiastadion und besitzt eine Gesamtfläche von fünf Hektar.³⁵ Darüber hinaus ist Grunewald eine Betriebswerkstatt. Das bedeutet, dass neben kleineren Arbeiten und Reinigungen auch große Umbauarbeiten, Kontrollen, Inbetriebnahmen, aber vor allem Abnahmen der Züge durchgeführt werden können.³⁶ Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurden die Umbauarbeiten der „Halle 4“ im Oktober 2013 abgeschlossen. Das Resultat ist ein umfangreicher Neubau der Halle mit vier neuen Werkstattgleisen, einem Reinigungsgleis und einem „Grafittigleis“. Derzeit wird an dem Umbau der Halle drei gearbeitet.³⁷

Eine Besonderheit der Werkstattgleise in „Halle 4“ ist der Anwendungsnutzen als Messgleise. Die vermessungstechnische Abteilung der SCHMID Ingenieure GmbH war beauftragt, den Bau der Gleise vermessungstechnisch zu begleiten. Ein besonderer Wert wurde dabei auf die innere Genauigkeit der Messgleise gelegt.³⁸



Abbildung 2: Betriebswerkstatt Grunewald Einfahrt zur „Halle 4“³⁹

³⁴ vgl. Reineke 2016

³⁵ vgl. BerlinOnline 2016

³⁶ vgl. Schomacker 2009c

³⁷ vgl. BVG 2016

³⁸ vgl. Radloff 2015a, S. 2 ff.

³⁹ vgl Kieser 2015a

3.1. Messgleise 406, 408, 410 und 412: Bau und Konstruktion

Die Abbildung 3 zeigt den Innenraum der „Halle 4“ in der Betriebswerkstatt Grunewald. Wie bereits angesprochen, werden die Gleise in dieser Halle, als Messgleise genutzt. Hier wird die Instandsetzung die U-Bahnfahrzeuge durchgeführt und anschließend für den betriebssicheren Einsatz an den Messgleisen ausgerichtet. Daher wurden bei der Erstellung dieser Gleisanlagen erhöhte Toleranzanforderungen an die innere Geometrie der Gleislage gestellt.



Abbildung 3: Panorama Innenraum „Halle 4“.

Unterkonstruktion

Bei der Wahl der Unterkonstruktion (vgl. Abb. 4) wurden Zweifeldstahlträger miteinander verschweißt und auf Stahlbetonstützen befestigt. Auf diesen Längsträgern wurden Rippenplatten verlegt und fest mit dem Längsträger verschraubt. Um die teilweise unterschiedlich hoch gelagerten Längsträger in der Höhenlage auszugleichen, wurden Stahlbleche zwischen Unterkante Rippenplatte und Oberkante Längsträger eingebaut. Sind die Rippenplatten fest verschraubt ist die Endlage der Schiene nur noch bedingt justierbar. Das hat zur Folge, dass die Installation der Zweifeldstahlträger sowie die Bohrungen der Rippenplatten unbedingt vermessungstechnisch betreut werden müssen.⁴⁰



Abbildung 4: Unterkonstruktion (Zweifeldstahlträger auf Stahlbetonstützen)

⁴⁰ vgl. Radloff 2015a, S. 2 ff.

Oberbaukonstruktion

Wie bereits erwähnt kann die Lage der Schienen nur sehr bedingt reguliert werden. Die Rippenplatten liegen in Querrichtung, nicht veränderbar, auf dem Längsträger (vgl. Abb.5). Durch die einseitige Einlage von Spurplättchen, kann die Richtung der Fahrschienen minimal berichtigt werden. Plus bzw. minus vier Millimeter sind korrigierbar.⁴¹



Abbildung 5: Oberkonstruktion (Rippenplatte mit Schiene)

3.2. Toleranzen des Schienenverlaufes

Die BVG legt dem Bau der Messgleise folgende Toleranzen zugrunde:⁴²

- „Formtoleranz Geradlinigkeit“ der Lage des Gleises:

Auf einer Bezugslänge/Messpunktabstand von 5 Metern ist eine Abweichung von +/- 1 mm, d.h. 2 mm auf 5 m zulässig.

- „Formtoleranz Geradlinigkeit“ der Höhe des Gleises:

Auf einer Bezugslänge/Messpunktabstand von 5 Meter ist eine Abweichung von +/- 1 mm, d.h. 2 mm auf 5 m zulässig.

- Gegenseite Lage der Schienen (Spurweite)

Auf einer Bezugslänge/Messpunktabstand von 5 m ist die Spur von 1433 bis 1437 mm herzustellen. Sollwert entspricht der Normalspur 1435 mm

- Gegenseite Höhe der Schienen (Überhöhung)

Der Querhöhenunterschied darf einen Wert von +/- 0,5 mm nicht überschreiten. Die linke Schiene darf an keiner Stelle mehr als 0,5mm von der Höhe der rechten Schiene (rechte Schiene Höhenbezugsstrang) abweichen.

⁴¹ vgl. Radloff 2015a, S. 2 ff.

⁴² vgl. Radloff 2015a, S. 2 ff.

4. Das Messgleis als Prüfkörper

In diesem Kapitel soll eine Vorstellung über das Arbeiten mit den Messgleisen, als Prüfnormal vermittelt werden. Zu diesem Zweck konnte mit Hilfe des Werkstattleiters Herr Drescher ein weiterer Termin in der Betriebswerkstatt Grunewald vereinbart werden. Während der Arbeiten an einem der Kleinprofilzüge auf dem Gleis 406 ist somit ein praktischer Eindruck der Arbeiten entstanden.

Messungen ohne Bezug auf die Messgleise

Die Messung der Radgeometrie erfolgt mit zwei analogen Messinstrumenten. Gemessen wird der Raddurchmesser mit einem Aufsatzbügel (vgl. Abb. 6 oben links) sowie die Spurkanzdicke und Spurkranzhöhe mit einem zweiachsigen analogem Messschieber (vgl. Abb. 6 oben rechts). Der Abstand zweier Räder ist starr. Gemessen wird an den Radrücken einer Achse (vgl. Abb. 6 unten). Durch Addition mit der Spurkanzdicke ergibt sich die Spurbreite. Diese Maße werden vom Mechaniker notiert und auf Toleranzverstöße geprüft. In Absprache mit dem Schichtleiter kann es zu Nachjustierungen oder zum ganzen Austausch von Teilen kommen.⁴³



Abbildung 6: Messungen an Achse Drehgestell; Raddrückenabstand (unten); Radgeometrie (oben)

⁴³ vgl. Anhang 1: Gesprächsbericht BwGru

Messungen mit Bezug auf die Messgleise

Eines der Maße, welches Bezug auf die Messgleise nimmt, ist die Wagenkastenhöhe (vgl. Abb.7). Angenommen wird dabei, dass die Schienen des Messgleises „exakt“ gleich hoch sind. Um die Wagenkastenhöhe zu bestimmen, wird eine Art Richtscheit (vgl. Abb.7 links, als blaue Linie dargestellt) über die Schienen gelegt und der Abstand vom Richtscheid zu einer Markierung (vgl. Abb.7 rechts) am Wagenkasten gemessen. Das Messen erfolgt durch einen geeichten Gliedermaßstab. Das ermittelte Maß wird geprüft und mit Richtwerten verglichen. Überschreiten die ermittelten Maße den Richtwert, muss an der Federung der Drehgestelle die Höhe des Wagenkastens auf das Soll-Maß gerichtet werden.⁴⁴

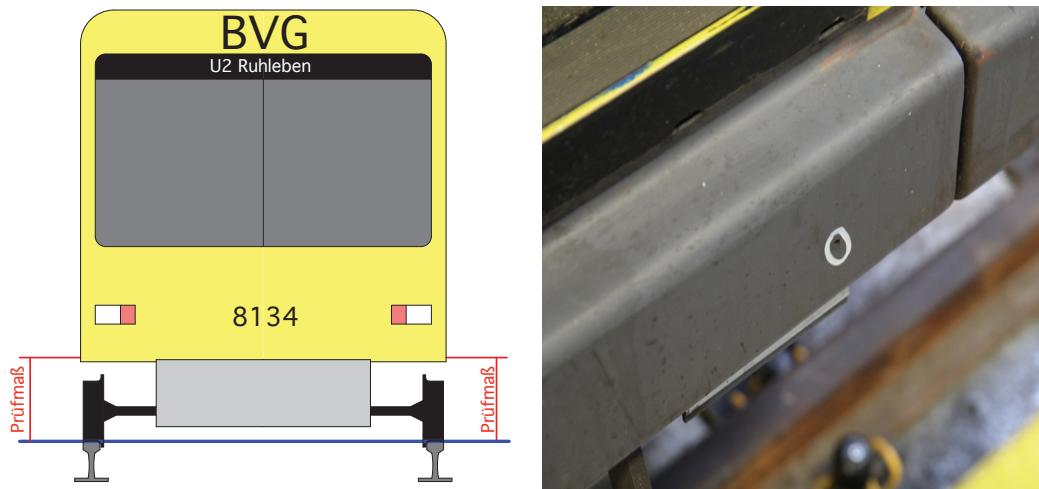


Abbildung 7: Messung Wagenkastenhöhe: Prinzipskizze (links); Markierung für Messung (rechts)

Die Markierungen zur Messung der Wagenkastenhöhe befinden sich bei jedem Drehgestell. Jeder Wagen hat zwei Drehgestelle. Die Züge des Kleinprofils setzen sich aus bis zu vier Wageneinheiten zusammen. Insgesamt sind demnach acht Drehgestelle zur Justierung der Wagenkastenhöhe vorhanden.⁴⁵

Zusätzlich muss für alle Wagen die Längsabweichungen untereinander festgelegt werden. Dafür existieren Justiereinrichtungen an den jeweiligen Kupplungen. Auch hier besteht die Annahme, dass die Gleise „exakt“ ausgerichtet und somit als „gerade“ anzusehen sind.⁴⁶ Am Besichtigungstermin in der Betriebswerkstatt Grunewald war es nicht möglich diesen Vorgang der Justierung praktisch zu dokumentieren, sodass es bei diesen Ausführungen bleiben muss.

⁴⁴ vgl. Anhang 1: Gesprächsbericht BwGru

⁴⁵ vgl. Anhang 1: Gesprächsbericht BwGru

⁴⁶ vgl. Anhang 1: Gesprächsbericht BwGru

5. Überprüfung des Messgleises 410 in Lage und Höhe

Im Zuge des Auftrages der SCHMID Ingenieure GmbH konnte durch Unterstützung der BVG-Betriebswerkstatt Grunewald das Gleis 410 zu weiteren Untersuchungen genutzt werden. Demnach wurde die Messung insofern ausgeweitet, dass ein Vergleich von unterschiedlichen Messmethoden möglich war. Neben den Vergleichen der Methoden, konnten zusätzlich diverse Analysen durchgeführt werden. Zu nennen ist dabei insbesondere die Nichteinhaltung von Messanordnungen und deren Auswirkungen auf das Messergebnis, zum Beispiel eine Messanordnung zur optimalen Ausnutzung der genaueren Richtungsmessgenauigkeit im Vergleich zur schlechteren Streckenmessgenauigkeit. Nachfolgend sollen die Messmethoden vorgestellt und kurz erläutert werden.

Tachymetrische Messung auf Gleismesslatte

Gemessen wurde mit dem Tachymeter Trimble S8 auf ein, in der Gleismesslatte, integriertes Prisma des Herstellers Trimble Railway GmbH (ehemals Sinnig GmbH). Es gab zwei Tachymeterstandpunkte, die sich ungefähr in Gleisachse beider Schienen des Messgleises 410 befanden.

Tachymetrische Messung auf Gleismesswagen

Durch die Vermittlung von SCHMID Ingenieure GmbH stellte das Unternehmen Trimble Railway GmbH, einen GEDO Gleismesswagen zur Verfügung. Dieser wurde mit einem Prisma bestückt und konnte ebenfalls mit dem Trimble S8 von zwei Instrumentenstandpunkten gemessen werden. Jedoch befanden sich die Standpunkte diesmal am Ende und am Anfang des Messgleises 410.

Pfeilhöhenmessverfahren

Dieses Messverfahren stellt eine analoges Vergleichsmessverfahren dar. Dafür wird zwischen zwei Punkten an einer Schiene eine Schnur gespannt und der Abstand von der Fahrkante zur Schnur mit einem Maßstab bestimmt. Mit diesem Messverfahren ist ausschließlich die Lage der Schiene zu überprüfen.

Analoge Gleismesswaage

Als letztes Messverfahren kam die Gleismesswaage der Firma Robel zum Einsatz. Mit dieser Anwendung konnten Vergleichsmessungen für die Spurweite und gegenseitige Höhenlage beider Schienen durchgeführt werden.

5.1. Aufgabenstellung

Das Gleis 410 ist eines von vier Messgleisen, welches geprüft werden soll. Wie im Kapitel 3.2 Toleranzen des Schienenverlaufes erläutert, unterliegt es bestimmten Anforderungen.

Zusammengefasst beinhaltet die Aufgabenstellung für die Vermessung folgende Punkte:

- die Überprüfung der Geraadlinigkeit der Schienen (links wie rechts)
- die Überprüfung des Höhenverlaufes der Schienen (links wie rechts)
- die Überprüfung der Spurweite und daraus resultierende Parallelität der Schienen
- die Überprüfung der gegenseitigen Höhenlage
- ein Epochenvergleich zu den Vorjahrsmessungen

Die Messung der Gleise erfolgt durch Koordinatenmesstechnik. Demzufolge ist für eine Messung mit mehreren Tachymeterstandpunkten ein übergeordnetes Netz erforderlich.

5.2. Vermessungsnetz in der Betriebswerkstatt Grunewald

Zur Einhaltung der äußereren Genauigkeit ist ein genaues Ingenieurnetz erforderlich. Zu diesem Zweck wurde nach Abschluss der Bauarbeiten zum Errichten der Messgleise durch die Schmid Ingenieure GmbH, eine umfangreiche Polygonierung durchgeführt.⁴⁷ Da eine Abmarkung der Polygonpunkte in der Halle ein Problem darstellt, fiel die Wahl, in Abstimmung mit der Abteilung U-Bahn Vermessung, auf Adapter-Vermarkungen in den „Stirnflächen der Werkstattplattformen“. (vgl. Abb.8) Diese sind durch M8 Gewindegülsen vermarkt und werden bei Bedarf mit einem Prismenadapter bestückt (vgl. Abb.8 unten). Jedes Messgleis (406,408,410 und 412) besitzt sechs dieser Adapterpunkte.⁴⁸

Zu den Genauigkeiten und Einsatzmöglichkeiten dieser Festpunkte werden im Zuge der Beschreibung der einzelnen Messverfahren nähere Ausführungen gegeben.

⁴⁷ vgl. Kieser 2014b; Anhang 2: Festpunktnetz „Halle 4“

⁴⁸ vgl. Kieser 2014c

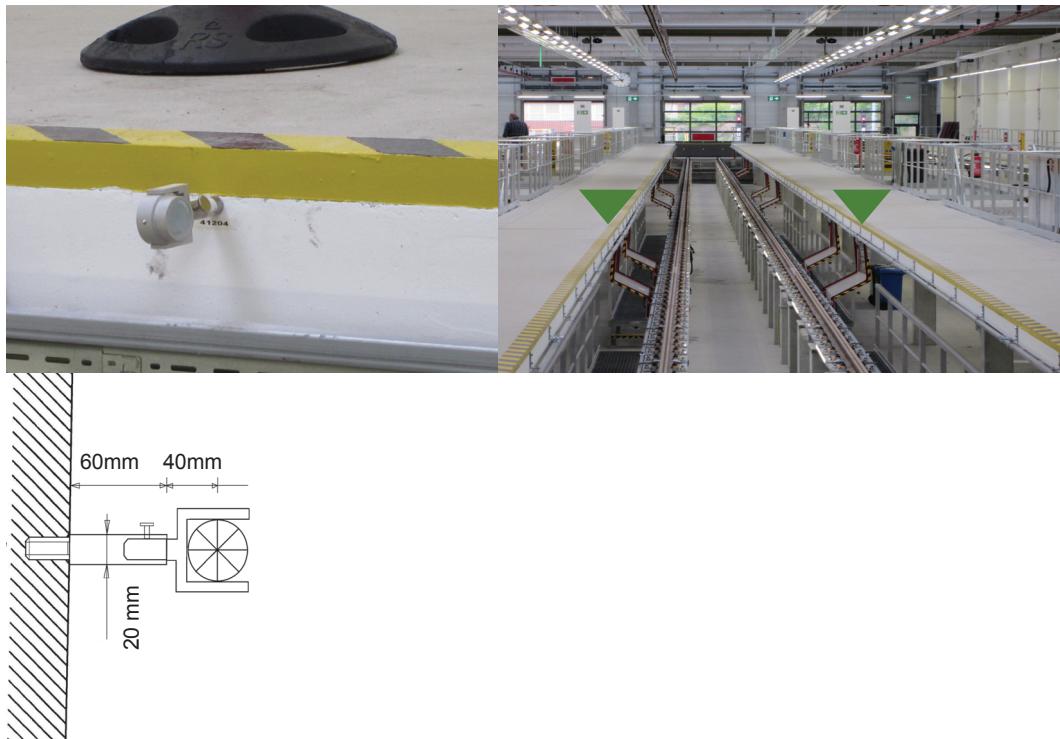


Abbildung 8: Festpunkt in Stirnfläche der Werkstattplattform (links), Werkstattplattform (rechts) Skizze Vermarktung (unten)⁴⁹

5.3. Methodische Vorgehensweise bei der Auswertung

Erklärung des Messungsaufbau

Jedes Verfahren erhält einen Überblick über die genutzte Ausrüstung, deren Gebrauch sowie einen Ablaufplan. Dafür ist für die Hauptverfahren Verfahren (Gleismesslatte u. Gleismesswagen) ein Übersichtsplan mit allen wichtigen Verfahrenseckpunkten enthalten.

Allgemeingeltende Signalisierung

Die Abbildung 12 auf 31 zeigt einen schematischen Übersichtsplan am Beispiel der Auswertung mit der Gleismesslatte. Da nicht alle 175 Punkte dargestellt werden können, sind Sprünge signalisiert. Beide Hauptmessungen beinhalten einen solchen Übersichtsplan, um daran den Messaufbau zu erklären. Dabei gilt, auch für folgende Diagramme, immer die gleiche Farbsignalisierung:

- | | | | |
|---------------------------|--|------------------|--|
| - Linke Schiene | | - Orientierungen | |
| - Rechte Schiene | | - Spurweite | |
| - Instrumentenstandpunkte | | - Überhöhung | |

⁴⁹ vgl. Kieser 2014c

Auswertung der Geradlinigkeit der Schienenlage

In der Bachelorthesis soll es u. a. um einen Vergleich verschiedener Messmethoden gehen. Um das durchzuführen, ist eine einheitliche Vorgehensweise bei der Auswertung erforderlich. Im Anhang 3 befindet sich ein allgemeiner Programmablaufplan, welcher diese Vorgehensweise erklärt. Beim Bestimmen der Koordinaten durch Messungen von verschiedenen Standpunkten entsteht ein Problem. Durch die Stationierung und die unterschiedlichen Aufstellungsweisen kommt es zu Genauigkeitsänderungen und Streuungen. Diese haben direkten Einfluss auf die gemessenen Koordinaten der Schiene (vgl. Abb. 9 links).

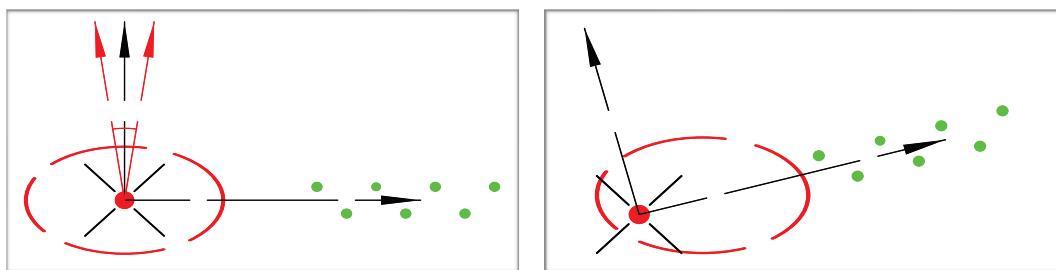


Abbildung 9: Skizze freie Standpunktwahl

Die Abbildung 9 stellt das Problem skizzenhaft dar. Der rote Punkt beschreibt einen Standpunkt, dessen Koordinaten über eine freie Standpunktwahl (Helmert-Transformation) bestimmt ist. Bei jeder freien Standpunktwahl wird die Genauigkeit der Standpunktkoordinate bestimmt (vgl. Abb. 9 rote Ellipse). Auch die Orientierungsunbekannte wird berechnet (vgl. Abb. 9 linke Skizze, roter Doppelpfeil). In diesen Bereichen schwankt die Orientierung und die Genauigkeit der Koordinate. In der rechten Skizze der Abbildung 9 stellt sich, im Gegensatz zur linken Skizze, somit ein extrem verzerrtes Bild dar. Jedoch ist der Standpunkt und die Orientierung in dem vorgegebenen Fehlerbereichen. Dies wirkt sich gravierend auf die Koordinaten aus, welche an der Schiene gemessen wurden (vgl. Abb. 9 grüne Punkte). Sie sind verdreht und weisen einen Offset auf. Jedoch ist eines auffällig: Die innere Geometrie der Punkte bleibt erhalten, die Abstände und Winkel von Punkt zu Punkt sind in beiden Skizzen gleich. Diese Tatsache wird durch geschicktes Handeln ausgenutzt, sodass eine, von der Stationierung komplett unabhängige, Auswertung und vor allem Vergleich durchgeführt werden kann.

Ein erfolgsversprechender Ansatz ist die ausgeglichene Gerade. Diese stellt den Sollverlauf der Schiene dar und bildet den mittleren Verlauf durch alle Schienepunkte (vgl. Abb. 10). Das Ergebnis ist eine lineare Funktion in der Form $y=mx+n$. Die Parameter der Funktion („m“ und „n“) sind allerdings immer noch direkt abhängig von der Stationierung, jedoch nicht der lotrechte Abstand von dieser zu

den gemessenen Punkten in Grün (vgl. Abb. 10). Diese Gerade als Solllage bildet die Grundlage aller Auswertungen und Vergleiche in den folgenden Kapiteln.

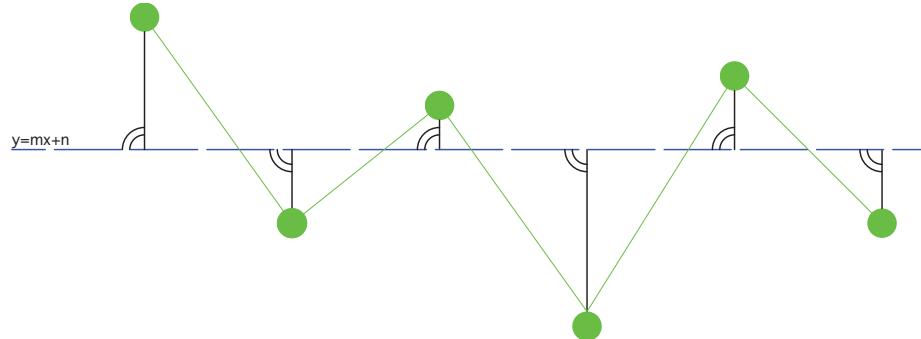


Abbildung 10: Prinzipskizze ausgeglichene Gerade

Bei einem Vergleich der unterschiedlichen Messmethoden können dann die Abweichungen zur Solllage (lineare Funktion) verglichen und bewertet werden. Dies geht allerdings nur da die Annahme besteht, dass sich die Positionen der Schienenpunkte während der Messung nicht verändert haben. Das ist auszuschließen, da die Messung durchgängig stattfand und in der Zeit kein Zug auf das Gleis gefahren ist. In der Auswertung der Messung mit der Gleismesslatte wird ein Epochenvergleich mit den Vorjahrsmessungen durchgeführt. Durch das Befahren der Messgleise können einige Bereiche der Schiene Veränderungen unterliegen, andere Bereiche hingegen behalten ihre Position bei. Doch bei der Auswertung mit einer ausgeglichenen Gerade werden alle Punkte berücksichtigt. So kann es also sein, dass der Einfluss, welche die tatsächlich veränderten Punkte auf die Funktion haben, so stark ist, dass bei einer Deformationsanalyse der Schiene, Punkte als signifikant geändert eingestuft werden obwohl das nicht zutrifft. In Folge dessen muss der Programmablaufplan im Anhang 3 für den Epochenvergleich erweitert werden. Um eine Aussage über die Veränderungen der Schiene treffen zu können, kann mit Hilfe der lotrechten Abstände zur Solllage, die auch als Verbesserungen zur ausgeglichenen Gerade bezeichnet werden können, eine Standardabweichung bestimmt werden. Es kann dann beispielsweise eine Aussage getroffen werden, wie: 95% aller lotrechten Abstände zur Solllage befinden sich in einem Bereich von plus bzw. minus einem Millimeter. Besteht schließlich die Frage welche Punkte sich verändert haben sind eine Reihe von Vorüberlegungen nötig.

Verändern sich Punkte in ihrer Lage, so haben sie direkten Einfluss auf die ausgeglichenen Gerade. Die Frage ist nur, wie stark sich eine Anzahl von Punkten verändern muss, um die Funktion derartig zu beeinflussen, dass auch Punkte als

signifikant geändert gelten, die sich nicht geändert haben. Um weitere Aussagen zu treffen ist vorerst eine Schätzung erforderlich, was als signifikante Änderung einzustufen ist. An dieser Stelle wird der „Vorstellung der Ergebnisse des Epochenvergleichs“ vorgegriffen. Das hat den Hintergrund über die Schätzung der veränderten Punkte, die keinen signifikanten Einfluss auf die Funktion haben, eine möglichst realistische Aussage treffen zu können. Aus den Ergebnissen ergibt sich, dass eine Differenz zur Solllage, von einer zur anderen Epoche, bei etwa 0,6 Millimeter als signifikant einzuschätzen ist. Anhand der Epoche Bachelorarbeit, Lage der linke Schiene, ergibt sich folgender Sachverhalt:

Einleitung: Einige Messergebnisse der Epoche Bachelorarbeit wurden für eine Quasiepoche „2016“ geändert, sodass genau nachvollzogen werden kann an welchen Punkten geändert wurde und an welchen nicht.

Fragestellung: Wie viele Punkte müssen um welchen Betrag einseitig geändert werden, damit sie signifikanten Einfluss auf die Funktion und den daraus resultierenden lotrechten Abständen zu den Punkten, welche keinen Änderungen unterlagen, aufweisen.

Ergebnis: Der Ergebnissuche lag eine Iteration zugrunde. Diese wählte zufällig Stellen an der Schiene aus. An diesen Stellen wurden jeweils fünf Punkte um den Betrag von einem Millimeter nach links verschoben. Im Anschluss jeder Iteration wurde betrachtet, welchen Einfluss dieser Eingriff auf das Gesamtergebnis hat. Bei einer Gesamtzahl von etwa 70 Punkten ergab diese Iteration einen so starken Einfluss auf die ausgeglichenen Gerade, dass erstmals auch Punkte als signifikant geändert galten, die jedoch keinerlei Änderung widerfahren haben.

Daraus folgt, dass bei einem Epochenvergleich maximal 40 Prozent der Werte sich um höchstes einem Millimeter ändern dürfen, sodass präzise Aussagen darüber getroffen werden können welche Punkte sich tatsächlich verändert haben. Aus der Erfahrung der letzten Messungen und der Stabilität der Schienen ist eine solche Änderung der Lage und Höhe jedoch nicht zu erwarten.

Auswertung der Geradlinigkeit des Höhenverlaufs

Der Untersuchung des Höhenverlaufs wird die gleiche Art der Auswertung zugrunde gelegt, wie der der Lageanalyse, da sich auch hier das Problem des Genauigkeitsspiels durch unterschiedliche Höhenübertragungen aus der freien Standpunktwahl ergibt. Die Auswertemethode ist demnach nahezu identisch mit der Lage.

Auswertung der Spurweitenbestimmung (auch Parallelität der Schienen)

Mit Hilfe des Gleismesswagens und der analogen Gleismesswaage wird der Parameter „Spurweite“ direkt gemessen. Um Ergebnisse zu liefern, ist kein Auswertungsablauf notwendig. Anders sieht das bei der Messung mit der Gleismesslatte aus. Hierbei könnte die Spurweite mit Hilfe des Satz des Pythagoras aus Koordinaten berechnet werden. Allerdings beinhaltet diese Auswertung die schlechte Streckenmessgenauigkeit, 1mm+1ppm, des Tachymeters und vor allem die Differenzen, resultierend aus den unabhängigen Einzelmessungen benachbarter Schienenpunkte.⁵⁰ Es kann schlicht keine exakte Station zur Messung der gegenüberliegenden Schienenpunkte gefunden werden. Somit kann der kürzeste Abstand zwischen zwei Stützpunkten nicht aufgehalten werden.

Ein Ansatz ist auch hier die ausgeglichenen Gerade, nur diesmal durch beide Schienen, sodass die ausgeglichene Gerade die Gleisachse rekonstruiert. Die Abstände von der Funktion zu den jeweiligen Schienenpunkten können nach geltendem Programmablauf ausgeführt werden.⁵¹ Da nun der lotrechte Abstand von der Schiene zur Funktion berechnet wurde, kann durch einfache Addition der Abstände der gegenüberliegenden Schienenpunkte die Spurweite bestimmt werden.

Die Parallelität der Schienen wird durch eine Winkelberechnung kontrolliert indem durch alle ermittelten Spurweiten ein linearer Trend, in der Form $y=mx+n$, gelegt wird. Hierbei ist der Faktor „m“, der Anstieg der Funktion, zu analysieren. Das Sollergebnis für den Faktor „m“ ist Null. Das würde bedeuten, dass die Schienen exakt parallel verlaufen. Würde das Ergebnis einen Anstieg enthalten, so kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob die Schienen den Trend haben auseinander zu driften oder sich zu verengen und wie stark diese Aufweitung oder Verengung des Gleises tatsächlich ist.

Auswertung der Überhöhung

Die Auswertung der Überhöhung erfolgt durch einfache Höhendifferenzenbildung der gegenüberliegenden Schienenpunkte. Dabei wird die rechte Schiene als Null angesehen und der Höhenunterschied zur linken Schiene wird als positive oder negative Überhöhung ausgegeben.

⁵⁰ vgl. Kapitel 5.4 Tachymetrische Messung mit Gleismesslatte

⁵¹ vgl. Anhang 3: Programmablaufplan der Auswertung

Nachteile des Auswertungsansatzes „ausgeglichene Gerade“

Ein klarer Nachteil der Methode ist, dass sich die ausgeglichene Gerade auf sämtliche Punkte bezieht, die gemessen wurden und somit auch auf mögliche Ausreißer des Messverfahrens. Diese können den Anstieg „m“ (auch als Winkel darstellbar) und den Schnitt mit der mathematischen y-Achse „n“ beeinflussen. Dieser Fehlereinfluss lässt sich kaum korrigieren, da eine klare Ausreißerdetektierung schwer zu bewerten und durchzuführen ist.

Ein weiterer Nachteil ist die Auswertung mit Excel. Komplett automatisierte Programmabläufe sind nicht möglich. Der Faktor „Mensch“ ist somit eine erhebliche Fehlerquelle und kann nur durch stetige Kontrolle eingedämmt werden. Diesen Fehler zu umgehen wäre durch Programme wie z.B. Caplan der Cremer Programmentwicklung GmbH möglich. Allerdings ist dann die komplette Transparenz des Vorganges nicht einzusehen. Somit fällt die Entscheidung des Auswertungssprogramms auf Excel.

5.4. Tachymetrische Messung mit Gleismesslatte

Mit diesem Verfahren wurde bereits die Bauüberwachungsmessung sowie Folgemessungen der Gleise durchgeführt. Es bildet die Grundlage aller Vergleiche und ist deswegen auch das erste beschriebene Verfahren. Zusätzlich wird ein Epochenvergleich der Vorjahresmessungen durchgeführt und somit eine Beurteilung zur signifikanten Änderung der Schiene gegeben.

5.4.1. Das Messverfahren

Messungsaufbau

Abbildung 12 zeigt den schematischen Übersichtsplan des Messgleises 410. Gemessen wurde von zwei Standpunkten aus (vgl. Abb. 12 gelbe Felder), da dies aufgrund von Fehlereinflüssen, der im Vergleich zur Richtungsmessung ungenauerer Entfernungsmessung des Tachymeters, nötig ist. In Benutzung war ein Tachymeter S8 der Firma Trimble. Dieses Tachymeter beinhaltet die Funktion „Finelok“, mit dem es möglich sein soll das Prisma sehr exakt, immer am gleichen Punkt anzuzielen.⁵² Für nähere Informationen befindet sich ein Auszug des Datenblattes des Tachymeters Trimble S8 im Anhang 4. Zusätzlich wurde eine Gleismesslatte der Firma Trimble Railway GmbH genutzt (vgl. Abb. 11). Auf der Abbildung 11 ist im Vordergrund die Gleismesslatte und das Instrument im Hintergrund an dem Stützpunkt 113, zu sehen. Gemessen wird gerade, die vom Tor aus gesehen, linke Schiene. Es ist darauf zu achten, dass beim Aufhalten der Schienenpunkte die GML (Gleismesslatte) fest am Schienenkopf anliegt. Gemessen wird in einem Rhythmus von 20 Punkten links, dann 20 Punkte rechts.



Abbildung 11: Messung mit Gleismesslatte

⁵² vgl. Trimble 2016

LS	Prellbock Messgleis 410	RS
175		175
174		174
173		173
172		172
171		171
170		170
169		169
168		168
167		167
166		166
.		.
.		.
.		.
.		.
121		121
120		120
119		119
118		118
117		117
116		116
115		115
114		114
113	Standpunkt 1 in Höhe des Stützpunktes 113	113
112		112
111		111
110		110
109		109
108		108
107		107
106		106
.		.
.		.
.		.
.		.
52		52
51		51
50		50
49		49
48		48
47		47
46		46
45		45
44		44
43		43
42		42
41		41
40		40
39	Standpunkt 2 in Höhe des Stützpunktes 39	39
38		38
37		37
36		36
35		35
34		34
32		32
31		31
30		30
29		29
.		.
.		.
.		.
.		.
6		6
5		5
4		4
3		3
2		2
1		1
LS	Hallentor Messgleis 410	RS

Abbildung 12. Übersichtsplan Messgleis 410 (Messaufbau mit Gleismesslatte)

Fehlerbetrachtung der Lage

Vom Standpunkt „1“ (vgl. Abb. 12) ist die Punktfolge der Messung von Stützpunkt 1 bis 80 gemessen. Zwischen 81 und 144 wird keine Messung durchgeführt. Erst ab dem Punkt 145 wird der Vorgang wieder aufgenommen und schließlich bei Punkt 175 vollendet. Beim Standpunkt „2“ (vgl. Abb.12) wird eine durchgängige Punktfolge gemessen, um die bei Standpunkt „1“ entstandene Lücke zu schließen. Dabei wird am Anfang und Ende des Messabschnittes eine Überlappung von 20 Punkten hergestellt. Vom Standpunkt „2“ werden demzufolge die Schienenpunkte von 70 bis 155 gemessen. *Doch warum diese Lücke und warum zwei Standpunkte?* Dies soll anhand des Auswertungsdiagramms in der Abbildung 13 der linken Schiene gezeigt werden. Der Auswertung liegt zugrunde, dass die gesamte Schiene vom Standpunkt „1“ gemessen wurde. Der Standpunkt „1“ befindet sich auf der Höhe des Stützpunktes 113 (vgl. Abb.12). Das rote Rechteck in der Abbildung 13 soll auf einen ungewöhnlichen Verlauf der Schiene im Bereich der Stützpunkte 105 bis 121 hinweisen. Genau in der Mitte des roten Rechtecks liegt der Stützpunkt 113. An dieser Stelle hat die Schiene einen nahezu rechten Winkel zum Tachymeter (vgl Abb.13 Skizze und Foto). Die Skizze in der Abbildung 13 zeigt Fehlerellipsen deren große Halbachse deutlich größer, als deren kleine Halbachse ist. Jener Unterschied hat den Hintergrund, dass bei einer tachymetrischen Aufnahme von Punkten die Richtungsmessgenauigkeit deutlich besser ist, als die Streckenmessgenauigkeit. Ein Zahlenbeispiel soll dies verdeutlichen.⁵³

Standardabw. Richtungsmessung S8: 0,3 mgon (1“) entspricht 0,05 mm auf 10 m

Standardabw. Streckenmessung S8: 1 mm +1 ppm entspricht 1 mm auf 10 m

Das Rechenbeispiel zeigt, dass auf einer Entfernung von zehn Metern, das Verhältnis von großer und kleiner Halbachse mit dem Faktor 20 beschrieben werden kann. *Nur wie kann dieser Fehlereinfluss minimiert oder gar beseitigt werden?* Um diese Frage zu beantworten muss vorerst eine weitere Frage beantwortet werden. *Was soll von der Schiene bestimmt werden?* Bestimmt werden soll der Verlauf der Schiene, sprich der Querabstand der Punkte zueinander. Im Diagramm der Abbildung 13 entspricht dies dem Abstand zur roten ausgeglichenen Gerade. Der Längsabstand spielt dagegen eine zu vernachlässigende Rolle. Es kann demzufolge durch eine Messaufstellung nahe der Schienenachse der Einfluss des Streckenfehlers beseitigt werden. Erst ab einem bestimmten Winkel des Tachymeters zur Schiene, zeigt die Streckenmessgenauigkeit Wirkung auf die Querrichtung.

⁵³ vgl. Trimble 2016

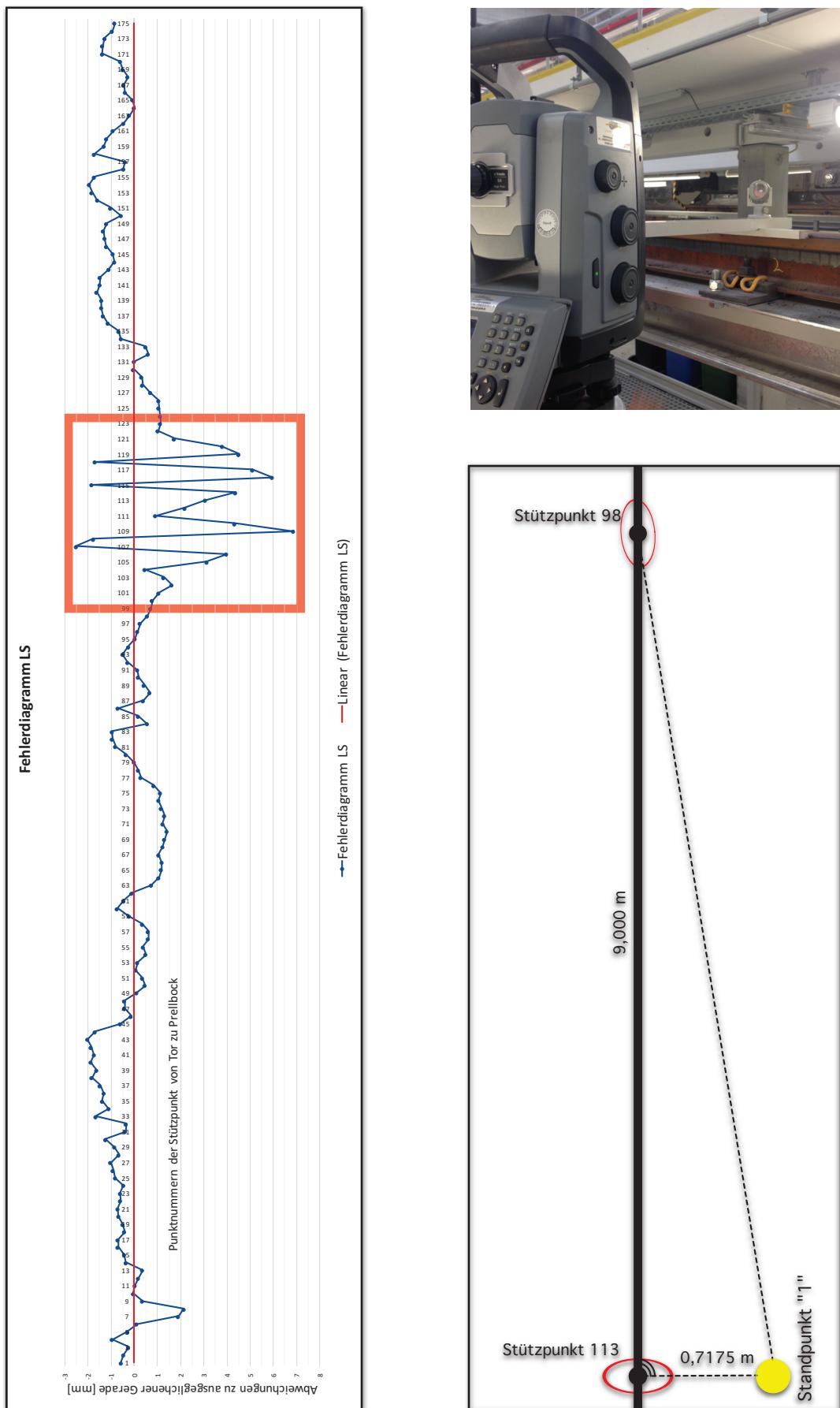


Abbildung 13: Ausgewertete linke Schiene ohne Standpunktwechsel bei Messung (links Diagramm; rechts Praxisfoto, Prinzipskizze)

In der Skizze in Abbildung 13 wird auf bestimmte Parameter hingewiesen. So hat der Standpunkt einen lotrechten Abstand von 0,7175 m zur Schiene. Das hat den Hintergrund, dass beide Schienen des Gleises gemessen werden und somit versucht wird, den Standpunkt relativ genau auf die Gleisachse zu platzieren.

Bei einer Spurweite von 1,435 m ergibt sich somit der optimale Abstand von 0,7175 m zur Schiene. An dieser Stelle, 90° zur Schiene, ist der Einfluss der Streckenmessgenauigkeit auf die Querrichtung der Schiene maximal. Es resultiert der einfache Einfluss. Wäre der Standpunkt direkt in der Schienenachse, so hätte die Streckenmessgenauigkeit keinen Einfluss, also „0“. Bei näherer Betrachtungsweise dieser Überlegung erinnert diese an den Sinus eines Winkels ($\sin 90^\circ=1$; $\sin 0^\circ=0$). Es lässt sich daraus ein Mindestabstand von Stützpunkt zu Standpunkt berechnen, bei dem der Streckenfehler keinen signifikanten Einfluss auf die Querrichtung der Schiene hat (vgl. Tab. 1).

Tabelle 1: Einfluss der Streckenmessgenauigkeit auf Querrichtung

Winkel Schiene zu St.Pkt. [°]	Einfluss „s Strecke“ auf die Querrichtung der Schiene [mm]	Strecke auf Schiene $=(0,7175/\tan \text{Winkel Schiene} - \text{St.Pkt.})$ [m]
0	0,000	n.d.
1	0,017	41,106
2	0,035	20,547
3	0,052	13,691
4	0,070	10,261
5	0,087	8,201
6	0,105	6,827
10	0,174	4,069
15	0,259	2,678
45	0,707	0,718
90	1,000	0,000

Die Tabelle zeigt, dass bei einem lotrechten Abstand zur Schiene von 0,7175 m, ein Mindestabstand zum letzten Stützpunkt von etwa neun bis zehn Metern eingehalten werden muss, um der Streckenmessgenauigkeit den signifikanten Einfluss auf die Querrichtung der Schiene zu entziehen. Bei einem Stützpunktabstand der Schienen von 0,6 m ergibt sich somit zwingend eine Anzahl von mindestens 15 Stützpunkten vom Standpunkt zur Aufnahme der Messung.

Fehlerbetrachtung der Höhe

Auch die Höhe wird über eine ausgeglichene Gerade ausgewertet, sodass der Einfluss der Stationierung uninteressant für das Messergebnis ist.⁵⁴ Anzustreben ist hierbei auch, dass der signifikante Fehlereinfluss der Streckenmessgenauigkeit möglichst auszuschließen ist. Durch die Aufstellung des Tachymeters auf Höhe des Prismas der Gleismesslatte (Zielachse Tachymeter = Prisma GML) kann dieser Fehler jedoch leicht ausgeschlossen werden.

Genauigkeitvorüberlegung

Unter Betrachtung der eingehaltenen Messanordnungen ergeben sich folgende Genauigkeitseinschätzungen. Die Annahme, dass das Tachymeter S8 mit der Funktion „Finelock“ immer die gleiche Position im Prisma anzielt und demnach eine Standardabweichung von 0,3 mgon angenommen werden kann, wird etwas aufgeweicht, sodass sich die Standardabweichung auf 0,5 mgon geschätzt wird.

- Einzelpunktquerabstand zur ausgeglichenen Gerade bei einer durchschnittlichen Zielentfernung von 50 m = $\pm 0,4$ mm ($1\sigma \Rightarrow 68\%$)
- Einzelpunkthöhenabstand zur ausgeglichenen Gerade bei einer durchschnittlichen Zielentfernung von 50 m = $\pm 0,4$ mm ($1\sigma \Rightarrow 68\%$)
- Spurweitenbestimmung $\sqrt{2} \cdot 0,4$ mm = $\pm 0,6$ mm ($1\sigma \Rightarrow 68\%$)
- Überhöhung $\sqrt{2} \cdot 0,4$ mm = $\pm 0,6$ mm ($1\sigma \Rightarrow 68\%$)

5.4.2. Auswertungsergebnisse Gleismesslatte Lage

Die folgenden Seiten beinhalten die Ergebnisse der Auswertung der Messung mit der Gleismesslatte und dem Tachymeter. Werte mit negativen Vorzeichen entsprechen Punkten, welche sich links von der Solllage befinden - Werte mit positiven Vorzeichen entsprechen Punkten rechts der Solllage. Die Auswertungsergebnisse werden grafisch sowie tabellarisch dargestellt. Eine statistische Beurteilung der Genauigkeit sowie Kennzahlen (Minimum, Maximum) der ermittelten Werte folgen im Anschluss der Ergebnisdarstellung.

⁵⁴ vgl. Kapitel: 5.3Methodische Vorgehensweise bei der Auswertung S.20

Epoche Bachelorarbeit; GML; linke Schiene; Lageverlauf

Tabelle 2: Epoche BA;GML;Lage;LS

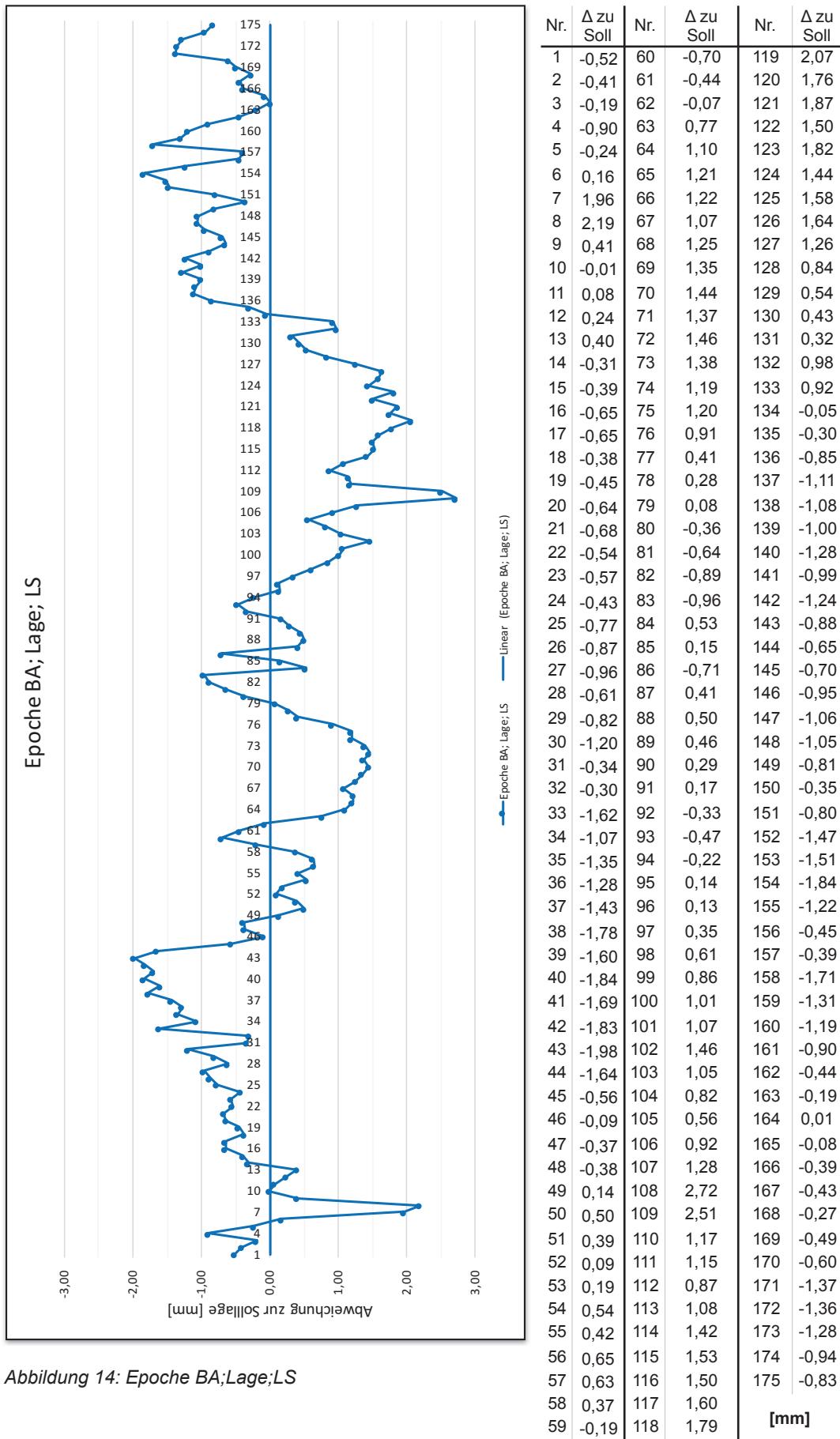


Abbildung 14: Epoche BA;Lage;LS

Epoche Bachelorarbeit;GML; rechte Schiene; Lageverlauf

Tabelle 3: Epoche BA;GML;Lage;RS

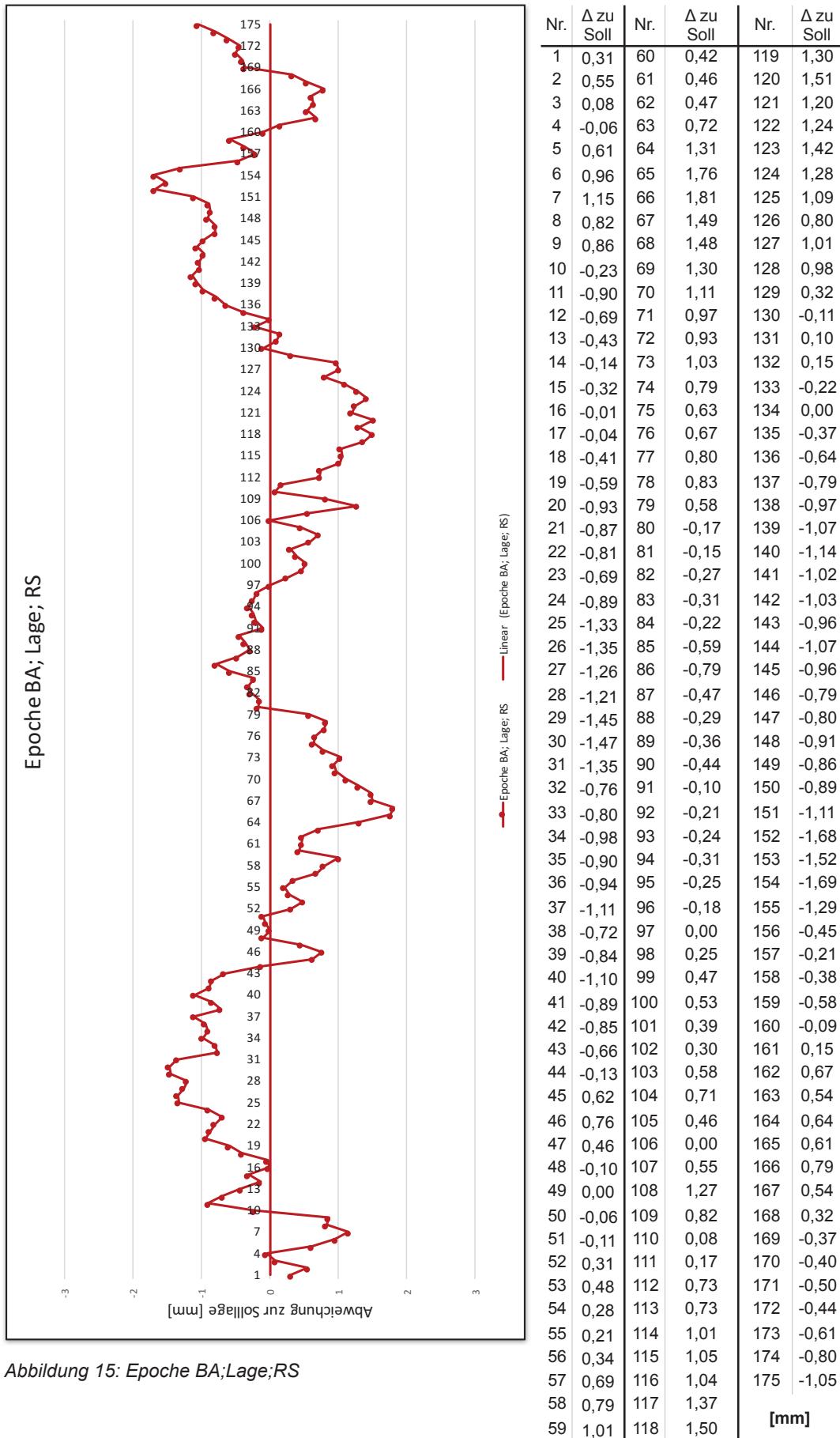


Abbildung 15: Epoche BA;Lage;RS

[mm]

Ergebnisbewertung Lage

Dargestellt sind die Lageverläufe der linken sowie der rechten Schiene des Messgleises 410. Ermittelt wurden diese Werte durch die Messung mit der Gleismesslatte, wobei jeder Schienenpunkt separat aufgehalten wird.

Lage linke Schiene

Tabelle 4: Epoche BA;GML;Lage;LS;Ergebnisse

„S“ aus Doppelbeobachtung	0,15 mm	$1^*\sigma$ (68%) f=19
„S“ gesamte Schiene	2,06 mm	$2^*\sigma$ (95%) f=174
Maximalwert Links	-1,98 mm	Punkt 43
Maximalwert Rechts	2,72 mm	Punkt 108

Lage rechte Schiene

Tabelle 5: Epoche BA;GML;Lage;RS;Ergebnisse

„S“ aus Doppelbeobachtung	0,16 mm	$1^*\sigma$ (68%) f=19
„S“ gesamte Schiene	1,6 mm	$2^*\sigma$ (95%) f=174
Maximalwert Links	-1,69 mm	Punkt 154
Maximalwert Rechts	1,81 mm	Punkt 66

5.4.3. Auswertungsergebnisse Gleismesslatte Höhe

Die folgenden Seiten beinhalten die Ergebnisse der Auswertung der Messung mit Gleismesslatte und Tachymeter. Auswertungsergebnisse werden grafisch sowie tabellarisch dargestellt. Dabei entsprechen negative Werte, Punkten unterhalb der Sollhöhe - Positive dementsprechend oberhalb der Sollhöhe. Eine statistische Beurteilung der Genauigkeit sowie Kennzahlen (Minimum, Maximum) der ermittelten Werte folgen im Anschluss der Ergebnisdarstellung

Epoche Bachelorarbeit; GML; linke Schiene; Höhenverlauf

Tabelle 6: Epoche BA;GML;Höhe;LS

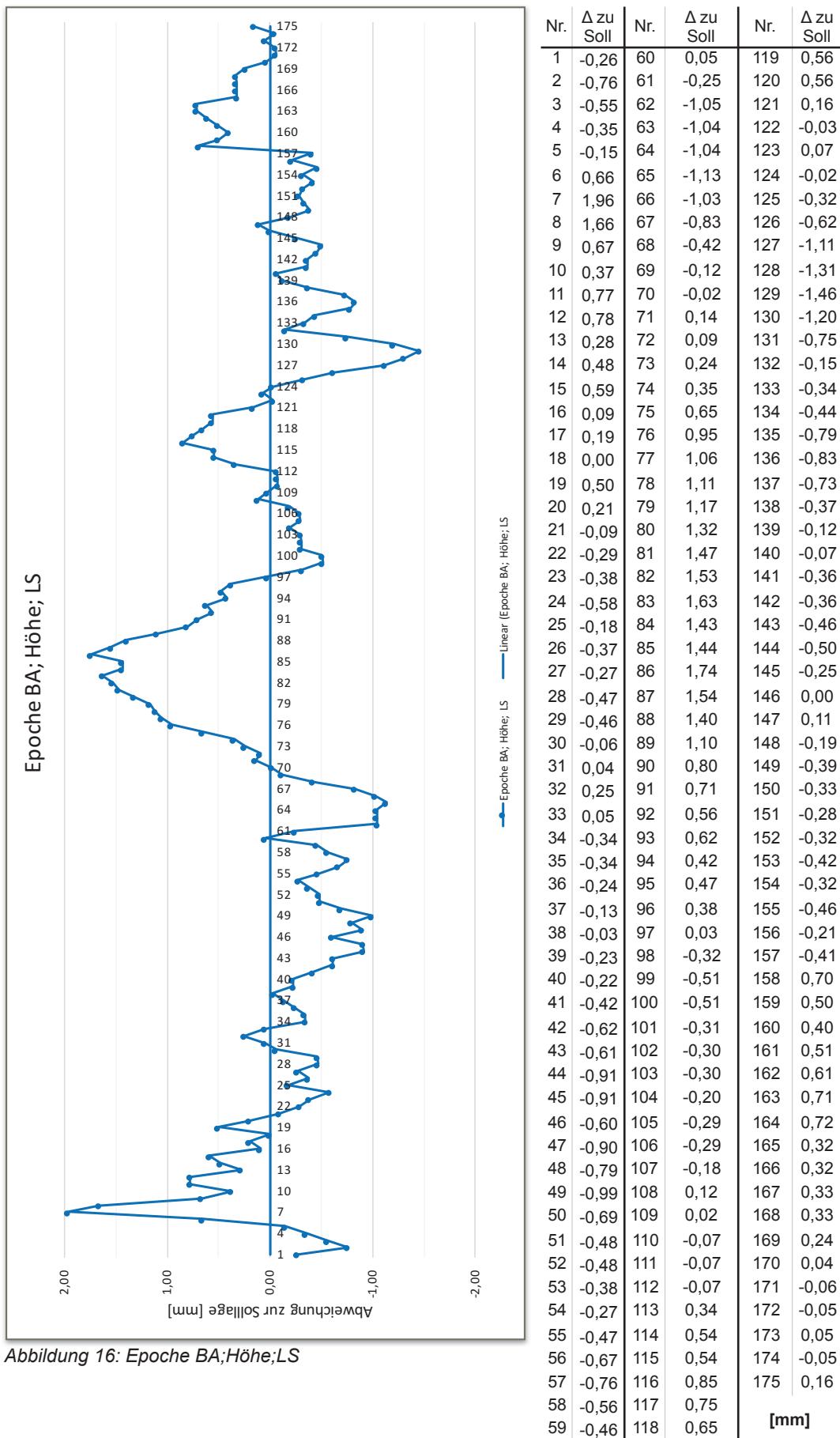


Abbildung 16: Epoche BA;Höhe;LS

[mm]

Epoche Bachelorarbeit; GML; rechte Schiene; Höhenverlauf

Tabelle 7: EpocheBA;GML;Höhe;RS

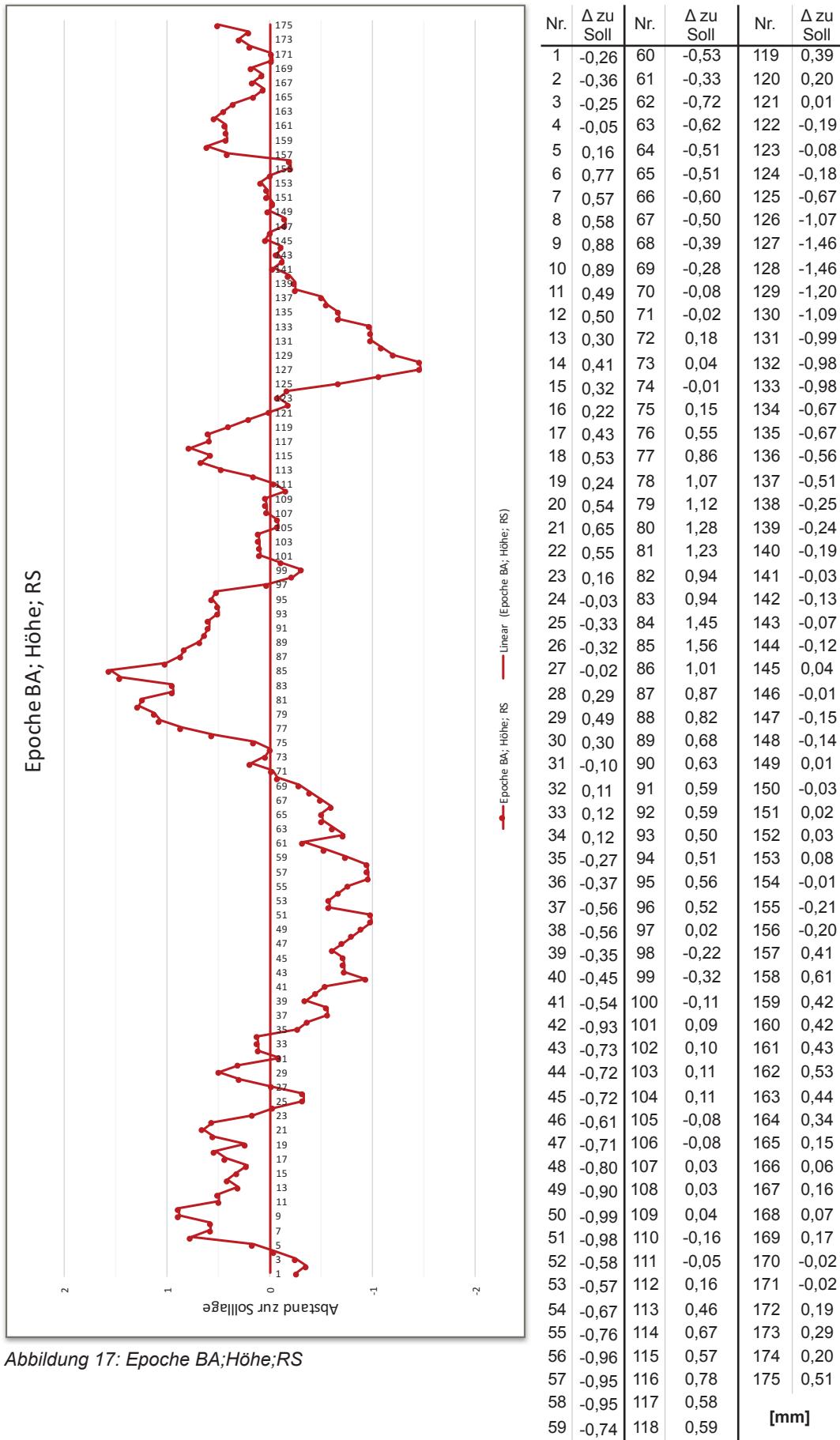


Abbildung 17: Epoche BA;Höhe;RS

[mm]

Ergebnisbewertung Höhe

Dargestellt sind die Höhenverläufe der linken sowie rechten Schiene des Messgleises 410. Ermittelt wurden diese Werte durch die Messung mit der Gleismesslatte, wobei jeder Schienenpunkt separat aufgehalten wird.

Höhe linke Schiene

Tabelle 8: Epoche BA;GML;Höhe;LS

„S“ aus Doppelbeobachtung	0,23 mm	$1^*\sigma$ (68%) f=19
„S“ gesamte Schiene	1,3 mm	$2^*\sigma$ (95%) f=174
Maximalwert Oben	1,96 mm	Punkt 7
Maximalwert Unten	-1,46 mm	Punkt 129

Höhe rechte Schiene

Tabelle 9: Epoche BA;GML;Höhe;RS

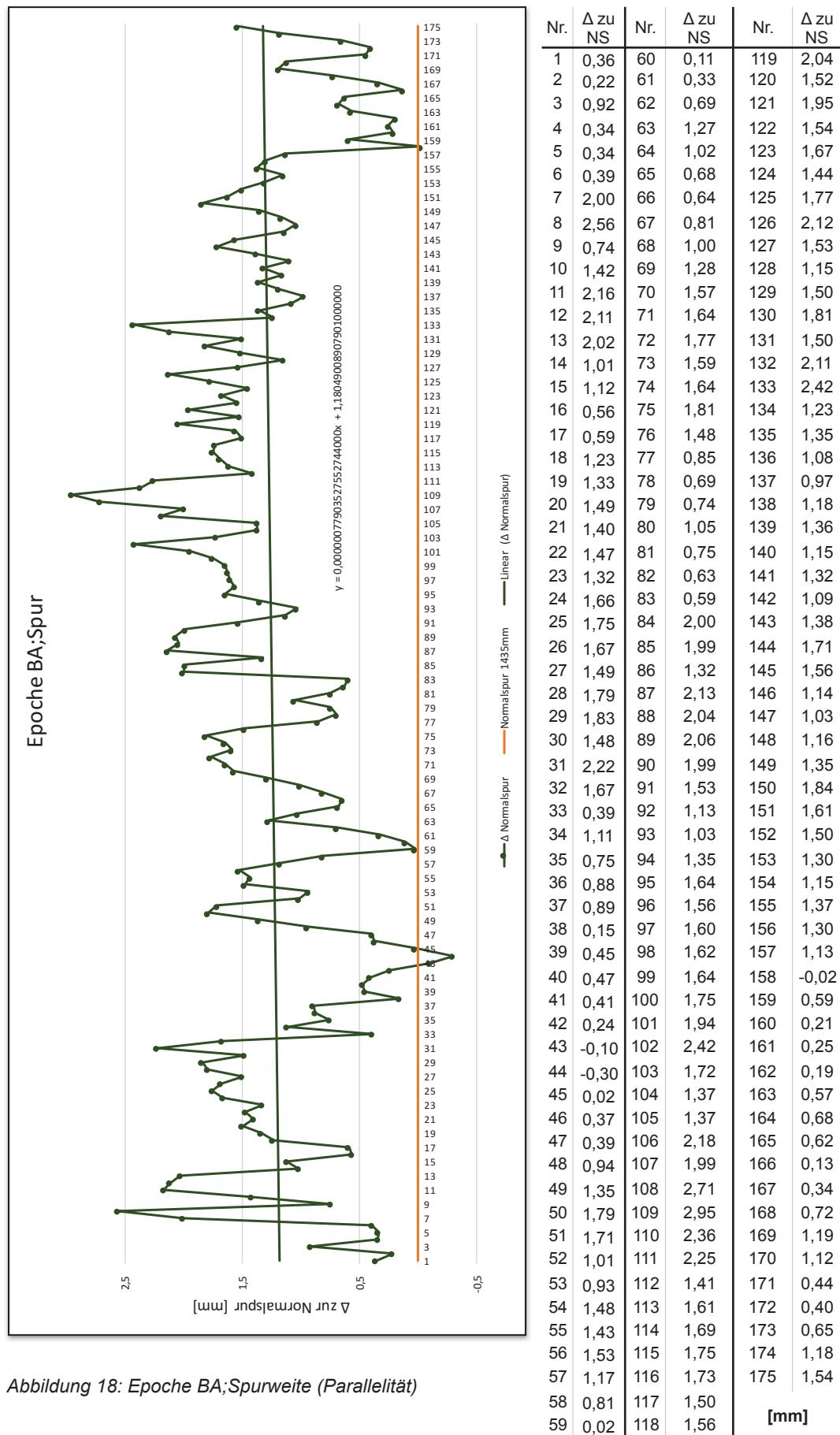
„S“ aus Doppelbeobachtung	0,19 mm	$1^*\sigma$ (68%) f=19
„S“ gesamte Schiene	1,2 mm	$2^*\sigma$ (95%) f=174
Maximalwert Oben	1,56 mm	Punkt 85
Maximalwert Unten	-1,46 mm	Punkt 128 u. 127

5.4.4. Auswertungsergebnisse Gleismesslatte Spurweite (Parallelität)

Die folgenden Seiten beinhalten die Ergebnisse der Auswertung der Messung mit Gleismesslatte und Tachymeter. Auswertungsergebnisse werden grafisch sowie tabellarisch dargestellt. Dabei entsprechen negative Werte, Spurweiten unterhalb der Normalspur von 1,435 m - Positive dementsprechend oberhalb der Normalspur. Eine statistische Beurteilung der Genauigkeit sowie Kennzahlen (Minimum, Maximum) der ermittelten Werte folgen im Anschluss der Ergebnisdarstellung.

Epoche Bachelorarbeit; GML; Spurweite (Parallelität)

Tabelle 10: Epoche BA;GML;Spurweite



Ergebnisbewertung Spurweite (Parallelität)

Tabelle 11: Epoche BA;GML;Spurweite

Anstieg m	0,000000779035	Winkel = 0,005 mgon
Maximalwert Positiv	2,95 mm	Punkt 109 Spur = 1,4379m
Maximalwert Unten	+0 mm	Punkt 45 Spur = 1,435m

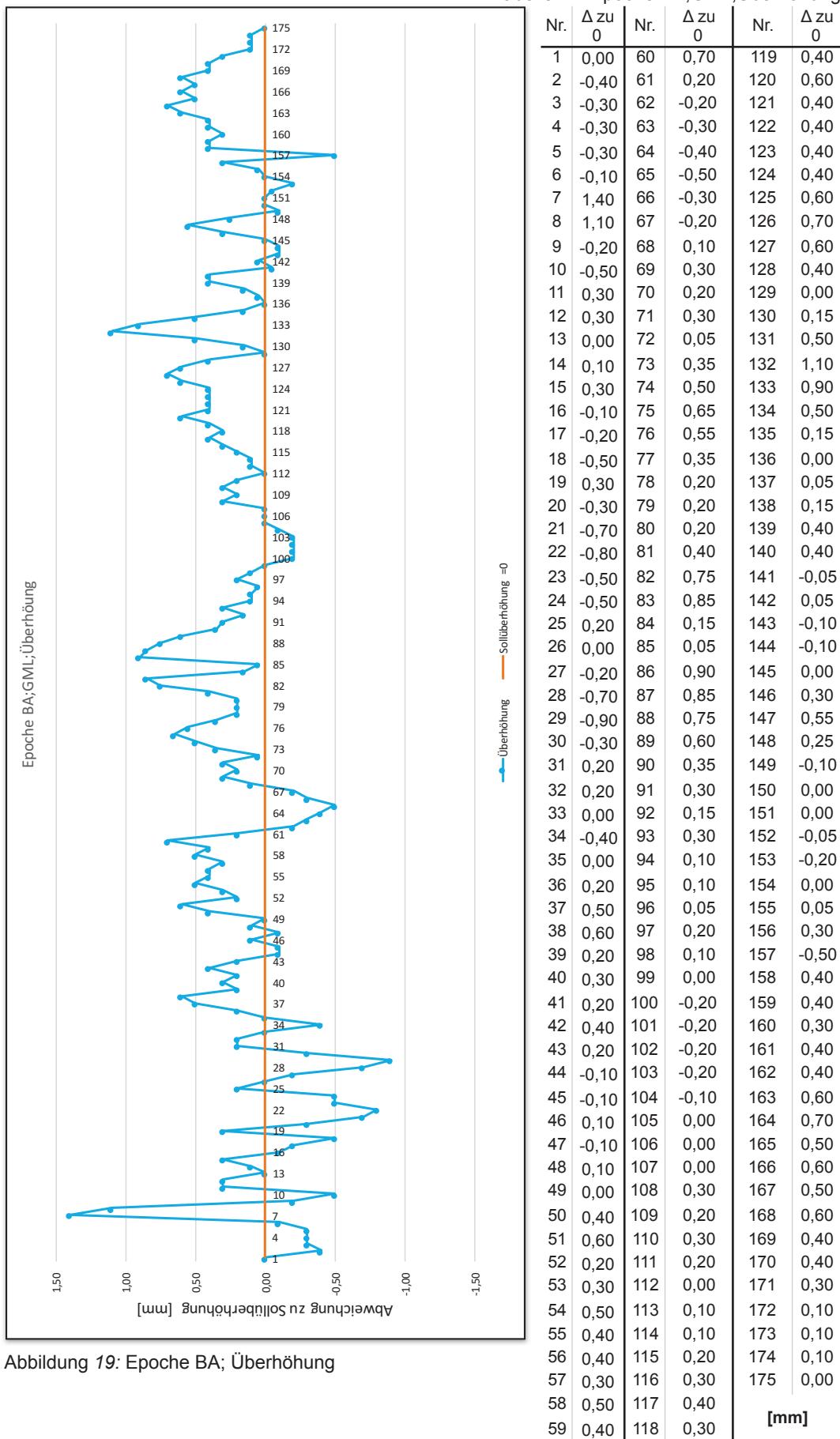
Interessant ist der lineare Trend der Spurweiten, welcher als durchgezogene grüne Linie dargestellt ist - speziell der Parameter „m“, welcher den Anstieg der Funktion beschreibt. Entspräche dieser Wert „0“, so hätten die Schienen einen exakt parallelen Verlauf. Ist der Wert positiv, so ist ein auseinander driften der Schienen zu verzeichnen. Bei einem negativen Anstieg würden die Schienen sich immer mehr annähern. In dem Fall des Messgleises 410 driften die Schienen vom Tor zum Prellbock auseinander, da der Anstieg des linearen Trends positiv ist. *Doch wie stark ist diese Aufweitung?* Der Parameter „m“ hat einen Wert von 0,000000779035. Dieser Wert entspricht einem Winkel von etwa 0,005 mgon. Abschließend lässt sich sagen, dass die Schienen des Messgleises 410 bei einer Länge von 110 m um 0,008 mm auseinander driften. Dieser Wert ist so klein, dass er demzufolge als „nicht signifikant“ angesehen werden kann, sodass das Messgleis 410 mit diesem Messverfahren als parallel anzunehmen ist.

5.4.5. Auswertungsergebnisse Gleismesslatte Überhöhung

Da die rechte Schiene des Messgleises als „Richtstrang“ gilt, wird diese bei der Überhöhung mit „0“ angenommen und die Höhendifferenz zur rechten Schiene als positive oder negative Überhöhung ausgegeben.

Epoche Bachelorarbeit; GML; Überhöhung

Tabelle 12: Epoche BA;GML;Überhöhung



Ergebnisbewertung Überhöhung

Tabelle 13: Epoche BA;GML;Überhöhung

Maximalwert linke Schiene Höher als die Rechte	1,40 mm	Punkt 7
Minimalwert linke Schiene niedriger als die Rechte	-0,90 mm	Punkt 29

Die Überhöhung lässt sich nicht unabhängig der Stationierung auswerten, so dass hinter den Ergebnissen noch ein kleines Fragezeichen übrig bleibt, was erst durch Vergleichsmessungen beseitigt werden kann.

5.4.6. Erläuterungen zum Messverfahren mit Gleismesslatte

In diesem Unterpunkt soll auf Probleme und Hürden der Messung hingewiesen werden sowie eine Zusammenfassende Bewertung zu den Messergebnissen erfolgen.

Genauigkeitsentscheidung

Bezugnehmend auf die Genauigkeitsvorüberlegung im Kapitel 5.4.1 kann folgende Aussage getroffen werden. Die geschätzten Genauigkeiten stellen sich als zu schlecht geschätzt heraus. Die Messergebnisse und daraus berechneten Standardabweichungen sind deutlich besser. Dies liegt möglicherweise an der aufgeweichten Standardabweichung der Richtungsmessung mit Hilfe der Tachymeterfunktion „Finelock“. Es ist davon auszugehen, dass die angegebenen 0,3 mgon für eine Richtungsmessung tatsächlich Bestand haben. Bezuglich dieses Themas existiert eine Bachelorarbeit der Fachhochschule Nordwestschweiz in der das Tachymeter Trimble S8 wissenschaftlich untersucht wurde und zu dem gleichen Ergebnis führte.⁵⁵

⁵⁵ vgl. Imholz, Schmid 2008

Zusammenfassung der Messergebnisse

Für alle ermittelten Parameter gilt, dass in den Grafiken der Messergebnisse eine Reihe von unregelmäßigen Abständen zu deren Solllagen dargestellt sind. Es kann der Eindruck erweckt werden, dass diese Parameter oft nicht das gewünschte Ergebnis haben. Jedoch muss beachtet werden, dass diese Ergebnisse teilweise im Bereich von zehntel Millimetern schwanken und somit kein signifikantes Ergebnis darstellen. Jedoch ist auffällig, dass alle Diagramme an gewissen Punkten deutliche Schwankungen besitzen. Der erste Eindruck kann somit auf Ausreißer im Messverfahren hindeuten. Diese „Ausreißer“ entlang der Schiene treten jedoch periodisch auf. Am Beispiel der Lageauswertung der linken Schiene lässt sich dieser Sachverhalt darstellen.

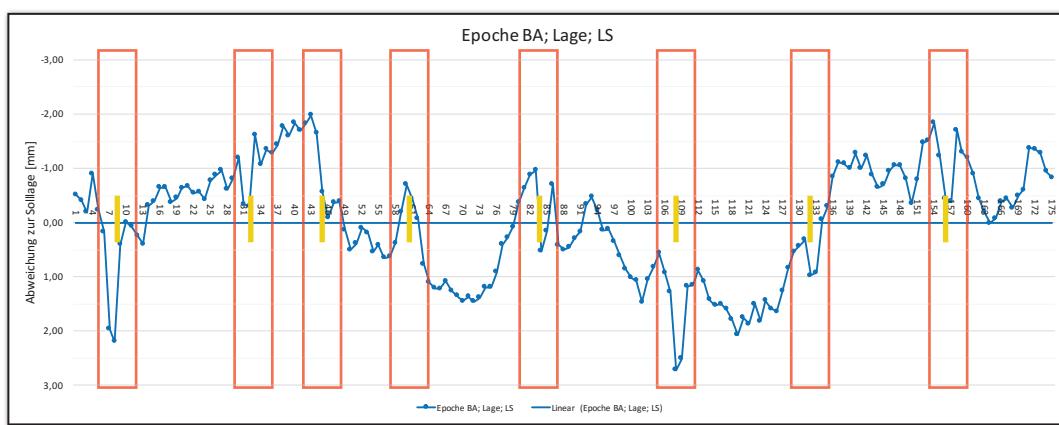


Abbildung 20 Peakanzeige

Wie eben erwähnt ist an dieser Datenreihe auffällig, dass immer wieder periodische „Peaks“ neben dem eigentlichen Verlauf auftreten (vgl. Abb. 20 rote Rechtecke). Zwar ist eine bestimmte Regelmäßigkeit zur erkennen, jedoch sind die Ausdehnungen der Peaks nicht immer gleich. Ein Problem ist, dass teilweise extreme Punktunterschiede durch diese Peaks entstehen, was doch eher auf Ausreißer hinweisen könnte. Die Lösung liegt in der Bauweise des Messgleises. Die gelben Balken in der Abbildung 20 weisen auf die Schweißungen der Schiene hin. Die Schienen der Messgleise bestehen aus mehreren, miteinander verschweißten Einzelschienen. Das Verschweißen der Schienen verlangt einen hohen handwerklichen Erfahrungsschatz. Trotz der wiederholten Nachbearbeitung mit Schleifgeräten sind diese Schweißungen deutlich in der Messung zu erkennen und zu lokalisieren. Schweißungen sind immer zwischen zwei Stützpunkten anzutreffen, da sonst keine glatte Auflagefläche der Schiene möglich wäre. Sie bilden die Hauptfehlerquelle der Messgleise.

Tabelle 14: Übersicht Schweißungen

Schweißungen Gleis (linke- und rechte Schiene identisch)			
Schweißung Stützpunkt n u. m	Schienenlänge zur letzten Schweißung	Schweißung Stützpunkt n u. m	Schienenlänge zur letzten Schweißung
zwischen 7 u. 8	15 Meter	zwischen 84 u. 85	15 Meter
zwischen 31 u. 32	15 Meter	zwischen 108 u. 109	15 Meter
zwischen 45 u. 46	9 Meter	zwischen 132 u. 133	15 Meter
zwischen 60 u. 61	9,6 Meter	zwischen 156 u. 157	15 Meter

Probleme und Auffälligkeiten

Im Gesamtüberblick ist dieses Messverfahren als äußerst „bequem“ zu beschreiben. Die Messung mit zwei Standpunkten ist sehr gut in drei bis vier Stunden durchzuführen. Da allerdings eine Reihe von Messanforderungen zu beachten sind (z.B. Zielhöhe, Mindestpunktabstand), ist dieses Messverfahren insbesondere in der Vorbereitung und Auswertung aufwändig und erfordert durchaus ein höheres Maß an Konzentration. Eine Schwäche des Verfahrens ist, dass Parameter wie Spurweite und Überhöhung nicht direkt und unabhängig gemessen werden. Das hat zur Folge, dass mögliche Fehler bei der dreidimensionalen Koordinatenbestimmung direkten Einfluss auf diese Parameter des Gleises haben. Ein weiteres, generelles Problem, welches während der Messung aufgetreten ist, dass bei zu enger Aufstellung der Stativbeine auf dem Betonboden das Instrument starken Vibrationen ausgesetzt wird. Diese Vibrationen werden von dem Tachymeter selbst erzeugt. Eine Nachfrage bei Trimble ergab, dass dafür der Kompensator verantwortlich sei und somit immer eine ausreichend breite Aufstellung der Stativbeine von Nöten ist. Bei der Messung des Messgleises 410 wurde dieser Fehler beachtet und die Stativbeine ausreichend auseinander aufgestellt, sodass keine Vibrationen aufgefallen sind. Dies bedeutet jedoch nicht, dass diese nicht vorhanden waren und direkten Einfluss auf die Messung hatten.

5.4.7 Epochenvergleich Messgleis 410

Im Zuge der Bachelorthesis bietet sich für das Messgleis 410 ein Epochenvergleich an. Die Schmid Ingenieure GmbH begleitet die Messgleise in der „Halle 4“ bereits seit des Baus vermessungstechnisch. Dabei wurde immer das Verfahren mit Gleismesslatte und Tachymeter eingesetzt. Dieses Verfahren wurde in den vorhergehenden Kapiteln bereits erklärt. Die Messgleise wurden in den Jahren 2014 und 2015 sowie für die Bachelorarbeit im Oktober 2015 gemessen. Die Auswertung der Ergebnisse wurden nach dem geltendem Verfahren dieser

Bachelorarbeit⁵⁶ ausgewertet und verglichen. Zudem konnte für jede Messung aufgrund von Doppelbeobachtungen eine empirische Standardabweichung der Einzelmessung ermittelt werden.

Tabelle 15: Standardabweichungen Epochen

Epoche		s Lage [mm]	s Höhe [mm]
2014	LS	0,14	0,15
	RS	0,12	0,14
2015	LS	0,23	0,21
	RS	0,18	0,19
Bachelorarbeit	LS	0,16	0,15
	RS	0,17	0,18

Nach der Theorie liegen nun folgende Schritte zugrunde, um eine signifikante Änderung zur Vorjahrsmessung festzustellen.

geg:

- empirische Standardabweichungen der Einzelmessungen
- Ermittelte Epochendifferenz
- Freiheitsgrade der Standardabweichungen = 20

ges:

- signifikante Änderungen des Messgleises 410

Lösung: Ein Lösungsansatz ist der „Zweistichproben t-Test für ungepaarte Stichproben“. Voraussetzung dafür ist, dass beide Messungen unabhängig voneinander erhoben wurden. Zusätzlich müssen beide Standardabweichungen der jeweiligen Epoche gleich genau sein.⁵⁷

Einem Epochenvergleich der Schienen unterliegen ausschließlich die Einzelwerte des Lageverlaufes sowie des Höhenverlaufes. Die Bestimmung der Spurweite und der Überhöhung resultieren aus diesen Messungen, sodass es keinen Sinn macht diese ebenfalls zu prüfen.

Wie bereits beschrieben müssen für einen „Zweistichproben t-Test für ungepaarte Stichproben“ die Standardabweichungen der Einzelmessungen gleichgenau sein. Um dieses zu ermitteln wird vor dem t-Test ein Fisher-Test durchgeführt, welcher feststellt ob beide Standardabweichungen gleich genau sind.⁵⁸ (vgl. Pogrammablaufplan Epochenvergleich statistische Tests) Die nachfolgende Tabelle zeigt

⁵⁶ vgl. 5.3 Methodische Vorgehensweise S.24

⁵⁷ vgl. Hain 2015, S.9

⁵⁸ vgl. Foppe 2015, S.90

einen dieser Tests am Beispiel der linken Schiene: Epochenvergleich 2015 und Bachelorarbeit.

Tabelle 16: F-Test Vergleichbarkeit empirischer Standardabweichungen

Epochen:	BA	s:	0,16	f:	20	Quantil F-Verteilung:	2,464
	2015		0,23		20	Irrtumswahrscheinlichkeit α :	5,00 %

0 Hypothese: $s_{2015} = s_{BA}$

A Hypothese: $s_{2015} \neq s_{BA}$

Testgröße: $F = \frac{s_{2015}}{s_{BA}} = 1,472$

Entscheidung: $1,472 < 2,464 \Rightarrow 0$ Hypothese angenommen, Standardabweichungen gleich genau

Dieser Test steht repräsentativ für alle durchgeführten Tests. Von Epoche zu Epoche sind somit alle Standardabweichungen als gleich genau anzusehen.

Nachdem die Vergleichbarkeit der einzelnen Messungen festgestellt ist, kann die Untersuchung auf signifikante Änderungen der Schiene beginnen. Mit dem „Zweistichproben t-Test für ungepaarte Stichproben“ wird aus der Anzahl der Freiheitsgrade und den Standardabweichungen der jeweiligen Epoche eine Standardabweichung für die Differenz zwischen beiden Epochen ermittelt. Am Beispiel Epochenvergleich zwischen 2015 und Bachelorarbeit ergibt sich dieser Sachverhalt in Formel ausgedrückt:

$$s_d^2 = \frac{f_{2015} * s_{2015}^2 + f_{BA} * s_{BA}^2}{f_{2015} + f_{BA}}$$

Für die Testgröße wird folgende Formel zugrunde gelegt:

$$T = \frac{Wert_{2015} - Wert_{BA}}{\sqrt{\frac{1}{n_{2015}} + \frac{1}{n_{BA}}} * s_d}$$

Auffällig an diesen Formeln ist, dass sofern die Freiheitsgrade f hoch sind, es im Fall der Messung an den Messgleisen $f=19$, zu extrem genauen Standardabweichungen kommt. Ein Auswertungsversuch ergab eine Standardabweichung der Differenz von 0,02 mm. Diese Standardabweichungen können nicht der Wirklichkeit entsprechen, da so hohe Genauigkeiten, mit diesem Messverfahren schlicht nicht erreicht werden können. Es muss eine andere Lösung gefunden werden. Der wohl sinnvollste Ansatz ist es, aus allen Messungen eine theoretische Standardabweichung zu schätzen, d.h. eine Annahme von unendlich vielen Freiheitsgraden. Werden die Ergebnisse der Messungen betrachtet und somit auch die dazugehörigen Standardabweichungen, so lässt sich für den gesamten Epochenvergleich eine Standardabweichung von 0,2 mm festlegen. Durch Fehlerfortpflanzung ergibt sich somit eine Standardabweichung der Differenz von 0,3mm ($s_d=\sqrt{2*0,2}$). Um eine Aussage darüber zu treffen, welche Punkte ihre Position signifikant geändert haben, wird der t-Test angewendet (Differenz/Standardabweichung). Angenommen wird eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %. Aus dieser Betrachtung ergibt sich, dass eine Differenz größer als etwa 0,6 mm, als signifikant einzuschätzen ist.

Auf den nachfolgenden Seiten sind die Werte tabellarisch aufgeführt, an denen es zu 95 %-iger Sicherheit eine signifikante Änderung geben hat. Alle anderen Werte und Differenzen werden aus Platzgründen nicht dargestellt. Um einen visuellen Eindruck über die drei Epochen zu bekommen, ist auf der folgenden Seite ein Diagramm des Lageverlaufes der linken Schiene eingefügt.

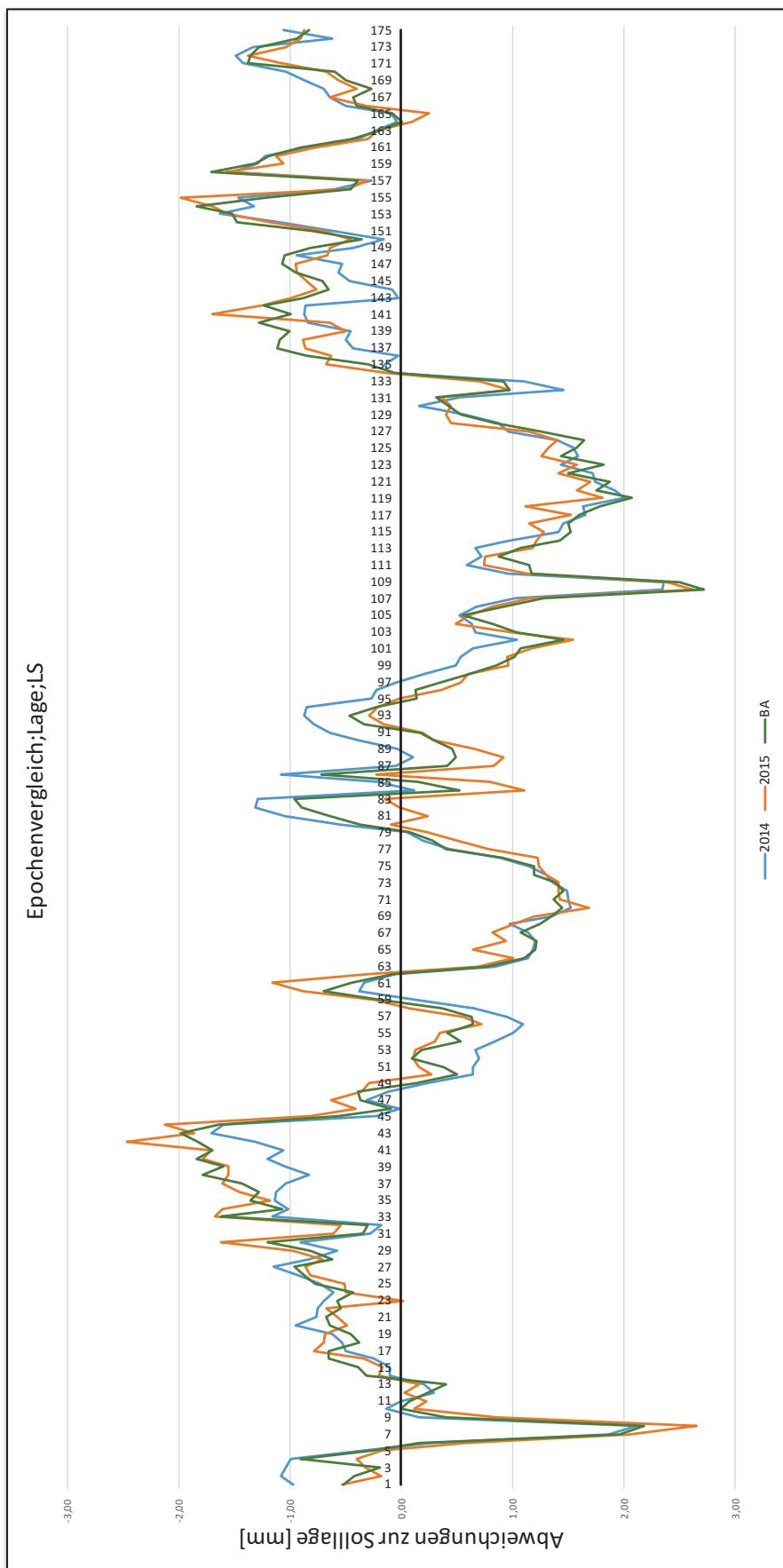


Abbildung 21. Diagramm Epochenvergleich; Lage; LS

Epochenvergleich; Lage; linke Schiene

Tabelle 17: Epochenvergleich; Lage; LS; 2014-BA

Epochen:	2014	σ Differenz:	0,3mm	f:	∞	Quantil F-Verteilung:	1,961
	BA					Irrtumswahrscheinlichkeit α :	5,00 %

0 Hypothese: 2014 = BA

A Hypothese: 2014 \neq BA

Testgröße: $T =$ Differenz
Einzelpunkte
0,3mm

Nr	Differenz	T
2	-0,66	2,21
3	-0,85	2,82
38	0,95	3,16
39	0,72	2,42
40	0,64	2,14
41	0,63	2,11
52	0,60	2,01
55	0,59	1,97
90	-0,68	2,26
91	-0,81	2,71
94	-0,63	2,09
136	0,83	2,76
137	0,68	2,25
143	0,85	2,84

Tabelle 18: Epochenvergleich; Lage; LS; 2015-BA

Epochen:	2015	σ Differenz:	0,3mm	f:	∞	Quantil F-Verteilung:	1,961
	BA					Irrtumswahrscheinlichkeit α :	5,00 %

0 Hypothese: 2015 = BA

A Hypothese: 2015 \neq BA

Testgröße: $T =$ Differenz
Einzelpunkte
0,3mm

Nr	Differenz	T
23	0,59	1,97
42	-0,63	2,10
61	-0,72	2,40
81	0,88	2,94
82	0,87	2,91
83	0,81	2,72
85	0,65	2,17
118	-0,66	2,21
140	0,64	2,12
141	-0,70	2,33
155	-0,76	2,52

Epochenvergleich; Lage; rechte Schiene

Tabelle 19: Epochenvergleich; Lage; RS; 2014-BA

Epochen:	2014 BA	$\sigma_{\text{Differenz}}:$	0,3mm	f:	∞	Quantil F-Verteilung:	1,961
						Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha:$	5,00 %

0 Hypothese: 2014 = BA

A Hypothese: 2014 \neq BA

Testgröße: $T =$ Differenz
Einzelpunkte
0,3mm

Nr	Differenz	T
1	-0,68	2,25
2	-0,62	2,06
3	-0,73	2,43
5	-0,96	3,21
6	-0,71	2,38
7	-1,26	4,21
9	-0,83	2,78
12	-0,62	2,05
16	-0,60	1,99
37	0,77	2,55
42	0,66	2,19
52	0,65	2,16
54	0,67	2,22
55	0,60	1,99

Tabelle 20: Epochenvergleich; Lage; RS; 2015-BA

Epochen:	2015 BA	$\sigma_{\text{Differenz}}:$	0,3mm	f:	∞	Quantil F-Verteilung:	1,961
						Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha:$	5,00 %

0 Hypothese: 2015 = BA

A Hypothese: 2015 \neq BA

Testgröße: $T =$ Differenz
Einzelpunkte
0,3mm

Nr	Differenz	T
7	-0,59	1,97
9	-1,09	3,65
94	0,73	2,43
100	0,67	2,24
104	0,77	2,56
136	-0,74	2,45
137	-0,81	2,71
140	-0,69	2,30
145	0,60	2,01
162	-0,73	2,42
163	-0,81	2,70
164	-0,73	2,43
168	-0,65	2,16

Aus der Auswertung des Epochenvergleichs des Lageverlaufes ergibt sich eine eher zufällige Auswahl an Punkten, welche als signifikant geändert gelten. Diese Tatsache kann darauf Hinweisen, dass es bei der Messung dieser Punkte zufällige Fehler gegeben haben könnte. Grundsätzlich kann jedoch davon ausgegangen werden, dass beide Schienen keiner gravierenden signifikanten Änderung unterliegen.

Epochenvergleich; Höhe

Der Epochenvergleich des Messgleises hat auf beiden Schienen nahezu keine signifikanten Ergebnisse erzielt. Noch weniger als jene, die in dem Lagevergleich tabellarisch Aufzählung fanden. Dementsprechend wird auf eine tabellarische Aufzählung der Ergebnisse verzichtet.

Ergebnis

Im Zuge der Untersuchungen auf eine signifikante Änderung der dreidimensionalen Schienenposition können mit dem zur Verfügung stehenden Messmitteln und denen dazugehörigen Genauigkeiten, bei Auswertung und Messung, nur geringe signifikante Änderungen festgestellt werden. Demzufolge ist davon auszugehen das, dass Messgleis 410 durch die tägliche Nutzung in der Werkstatt nur wenig signifikanten Belastungen unterliegt. Durch die erhobenen Messungen kann dem Gleis im Allgemeinen eine hohe Stabilität bescheinigt werden.

5.5. Tachymetrische Messung mit Gleismesswagen

Die Messung mit Hilfe des Gleismesswagens stellte sich als zeitlich und organisatorisch aufwendigstes Messverfahren heraus. Demnach konnten mit diesem Messverfahrens die meisten Messergebnisse erhoben werden.

5.5.1. Das Messverfahren

Messungsaufbau

Abbildung 23 zeigt den schematischen Übersichtsplan des Messgleises 410. Gemessen wurde von zwei Standpunkten aus (vgl. Abb. 23 gelbe Felder). Im Vergleich zur Messung mit der Gleismesslatte standen diese Standpunkte über der vom Tor aus gesehenen linken Schiene des Messgleises (vgl. Abb. 22). Gemessen wurde von jedem Standpunkt aus, zwei mal die komplette Schiene (174Punkte), sprich insgesamt vier mal 174 Messungen. In Benutzung war auch hier das Tachymeter S8 der Firma Trimble mit seiner Funktion „Finlock“, welches sich bereits bei der Messung mit der Gleismesslatte als äußerst nützlich erwiesen hat. Der wichtigste Aspekt dieser Messung ist jedoch der Gleismesswagen (vgl. Abb.22), mit ihm wurden die Parameter, Überhöhung und Spurweite, bestimmt. Zusammengeflossen sind alle Daten auf dem TSC3 Controller, ein mobiler Handcomputer, der mit dem Tachymeter und dem Gleismesswagen über Funk verbunden war. Auf den Aufbau und die Sensorik des Gleismesswagens soll nachfolgend genauer eingegangen werden.



Abbildung 22. Gleismesswagen GEDO CE 2.0, Trimble S8 St.Pkt Tor, TSC3 Controller

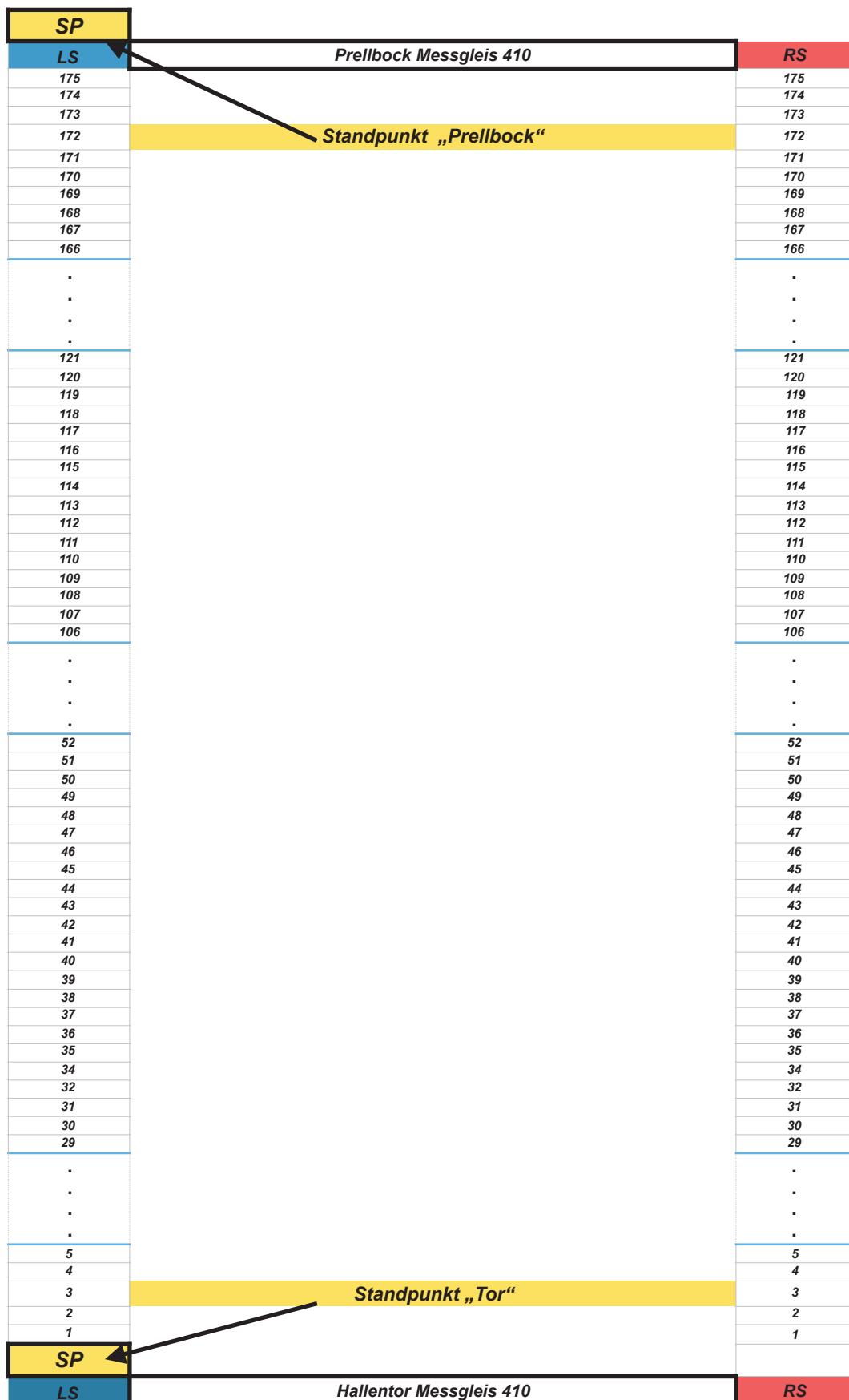


Abbildung 23. Übersichtsplan MG410 (Messaufbau mit Gleismesswagen)

Gleismesswagen GEDO CE 2.0

Der Gleismesswagen GEDO CE 2.0 ist ein Rollwagen zur Erfassung der geometrischen Größen des Gleises mittels verschiedener Sensoren. Mit Hilfe des Gleismesswagen können, abhängig von dem Umfang des Auftrages und zusätzlichem Equipment, Spurweitenmessungen, Überhöhungsmessungen, Lage und Höhenmessung des Gleises sowie Lichtraummessungen durchgeführt werden. Der Gleismesswagen GEDO CE 2.0 basiert auf einem Mittelträger. Dieser enthält die Sensoren und Elektronikkomponenten zur Spurweiten und Überhöhungsmessung. Der Mittelträger besitzt eine Laufrolle sowie eine mittels Gasdruckfeder betriebene Anpressvorrichtung, die über einen Hebel arretiert werden kann. Eine Adoptionsvorrichtung auf dem Mittelträger ermöglicht das Aufsetzen von Tachymeter, GNSS-Empfänger, Scanner oder Prisma. Der Gleismesswagen besitzt zusätzlich einen austauschbaren Adapter, mit dessen Hilfe er für unterschiedliche Spurweiten einsatzbar ist.⁵⁹

Laut Bedienungsanleitung sind folgende Worte der Trimble Railway Industry, für die Messung an dem Messgleis 410 besonders interessant.

„Die Spurweitenmessung erfolgt über einen im Mittelholm integrierten Schlitten, der auf einem Linearführungslager aufgesetzt ist und über eine Gasdruckfeder nach außen gedrückt wird. An dem Schlitten befinden sich zwei Kugellager, die an die Schieneninnenkante in einer Höhe von 14 mm unterhalb der Schienenoberkante angedrückt werden. Die Position des Schlittens wird mit einem Linearweggeber erfasst.“⁶⁰

„Ein im Mittelträger montierter Neigungssensor erfasst die Querneigung des Messwagens und damit die Überhöhung des Gleises.“⁶¹

Zur Messung der Spurweite wird der Sensortyp LVDT genutzt. Ein LVDT (Linear Variable Differential Transformer) ist ein analoger Sensor zur Wegmessung. Der Grundgedanke dahinter ist das eine lineare Bewegungsänderung in ein elektrisches Signal umgewandelt wird.

⁵⁹ vgl. Trimble Railway Industry (2013) S. 3

⁶⁰ vgl. Trimble Railway Industry (2013) S. 4

⁶¹ vgl. Trimble Railway Industry (2013) S. 4

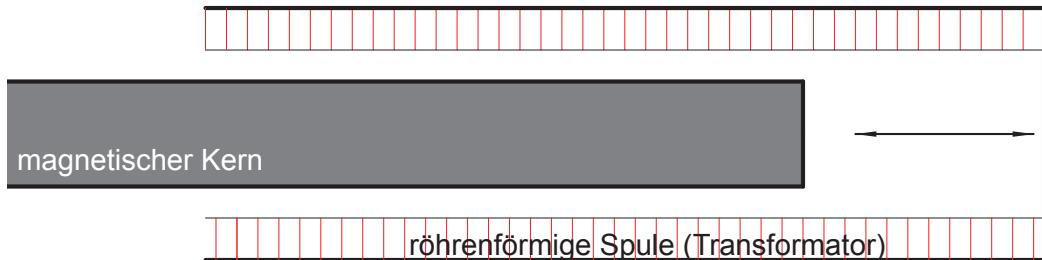


Abbildung 24. LVDT-Sensor

Der magnetische Kern (vgl. Abb. 24) ist beweglich und bewirkt durch seine lineare Bewegung, im Fall des Gleismesswagens, die Veränderung der Spurweite, eine Spannungsänderung in der röhrenförmigen Spule (Transformator). Diese Spannungsänderung kann gemessen werden und daraus resultierend eine Länge oder im konkreten Fall die Spurweite des Gleises.⁶²

Der Spurweitensensor des Gleismesswagen besitzt einen Arbeitsbereich von - 20 mm bis + 60 mm und eine Genauigkeit von +0,3mm.⁶³

Zur Messung der Überhöhung kommt ein kapazitiver Winkelsensor zum Einsatz. Kapazitive Sensoren messen die Veränderung der Kapazität eines oder mehrerer Kondensatoren.⁶⁴

Der Überhöhungssensor des Gleismesswagen besitzt einen Arbeitsbereich von +/- 14,5° oder 350 mm (bei Spurweite 1.435 mm) und eine Genauigkeit von +/- 0,5 mm (statisch).⁶⁵

Fehlerbetrachtung Lage

Wie bereits in der Fehlerbetrachtung der Lage, im Kapitel 5.4.1 Gleismesslatte, erwähnt wurde ist ein Aufbau nahe der Schiene wichtig, um den Fehlereinfluss der Streckenmessgenauigkeit auf die Querlage der Schiene zu vermeiden. Jedoch konnte aufgrund des Hallenaufbaus und der gegebenen Vermessungsausrüstung keine Zielachs- und Prismenhöhengleichheit hergestellt werden. Insbesondere der Standpunkt „Prellbock“ musste deutlich über der linken Schiene positioniert werden, da der Aufbau der Werkstatt keine andere Lösung bot. Daraus leitet sich ein Problem ab, da nun zusätzlich der Kippachsfehler des Tachymeters Einfluss auf das Ergebnis gewinnt. Bei einer Aufstellung des

⁶² vgl. WAY CON Engineering (2016)

⁶³ vgl. Trimble Railway Industry (2013) S. 11

⁶⁴ vgl. Physikinstrumente (2016)

⁶⁵ vgl. Trimble Railway Industry (2013) S. 11

Tachymeters in der die Zenitwinkelmessung immer etwa bei 100 gon schwankt, sprich Zielachs- und Prismenhöhengleichheit hergestellt ist, kann dieser Fehler komplett vernachlässigt werden, da er auf jeden gemessenen Punkt gleich wirkt. Auch bei der Messung in zwei Fernrohrlagen kann der Kippachsfehler ausgeschlossen werden. Abbildung 25 verdeutlicht das Problem am konkreten Beispiel des ersten Mittelungsversuchs von Standpunkt „Halle“ und Standpunkt „Prellbock“.

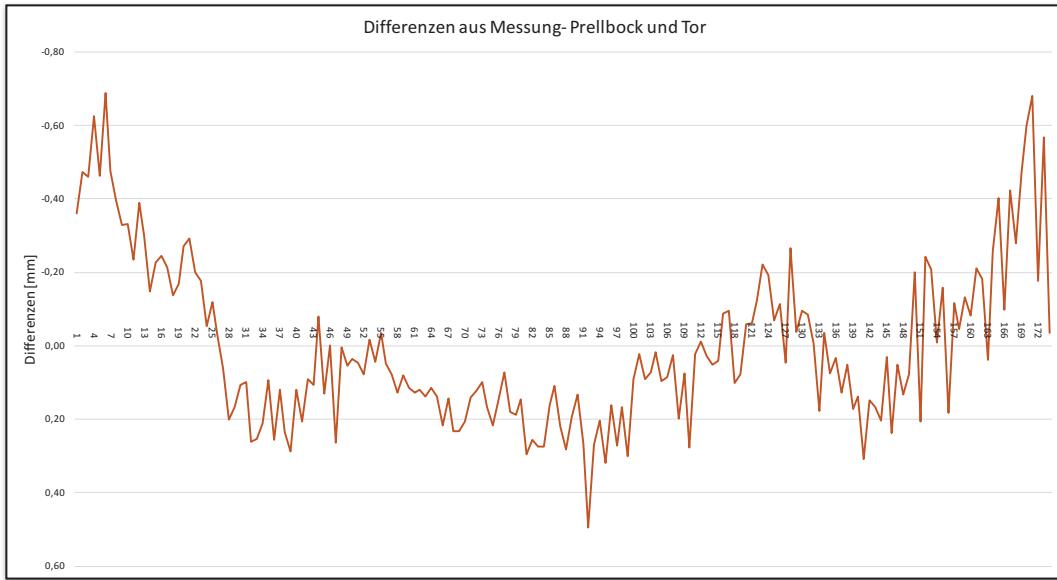


Abbildung 25: Differenzen aus Prellbock- und Tor Messung

Die Abbildung 25 zeigt die Differenzen der Ergebnisse vom Standpunkt „Prellbock“ und Standpunkt „Tor“. Auffällig ist, dass sich die Messergebnisse zu den beiden Enden der Schiene deutlicher unterscheiden als in der Mitte. Diese Unterschiede sind zwar nicht enorm (zehntel Millimeterbereiche), jedoch sind sie sehr ärgerlich, da auf eine Messung in zwei Lagen verzichtet wurde. Ein Ansatz zur Lösung ist ein gewichtetes Mittel. Die Punkte bei denen der Kippachsfehler einen hochsignifikanten Einfluss haben werden für die Auswertung nicht genutzt. Punkte, welche schätzungsweise einen niedrigeren Signifikanzanteil des Kippachsfehlers besitzen, werden mit geringer werdendem Abstand zum Standpunkt niedriger gewichtet. Da der Kippachsfehler nicht bekannt ist, muss aus den Differenzen geschätzt werden, welche Punkte als hochsignifikant- und welche, als signifikant bewertet werden müssen (vgl. Abb. 25). Eine Differenz der Beobachtungen von 0,3mm scheint in der Mitte des Diagramms als zufällig zu gelten. An den äußereren Enden der Schiene scheinen demzufolge Abweichungen der Ergebnisse über 0,3mm als „signifikant kippachsfehlerbelastet“ einschätzbar zu sein. Werte über 0,4mm als „hoch signifikant kippachsfehlerbelastet“ und werden für die Mietling nicht benutzt. Daraus ergibt sich jedoch ein weiteres Problem. Die Richtungsmessgenauigkeit des Tachymeters liegt bei 0,3 mgon, sprich einer Bo-

gensekunde. Dieser Wert entspricht auf 100 Metern eine Standardabweichung von 0,5 Millimetern. Somit kommt die Genauigkeitsvorbetrachtung der Lage zu folgendem Ergebnis:

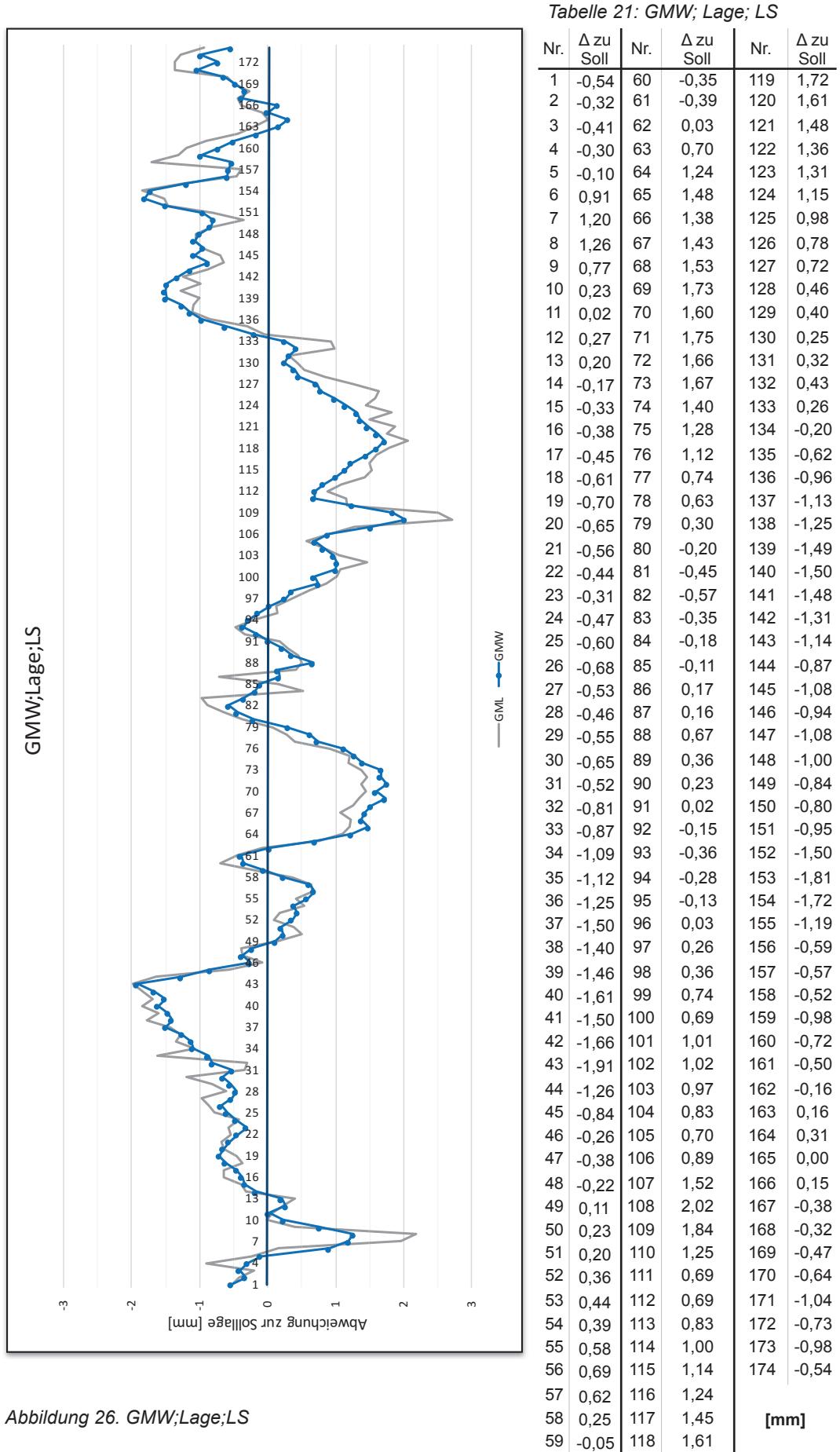
An den beiden Enden der Schiene (30 Punkte) wird eine Standardabweichung von 0,4mm geschätzt. Diese ergibt sich, da von jedem Standpunkt jeder Stützpunkt doppelt gemessen werden kann. Ein arithmetisches Mittel der Standardabweichung von 0,5 mm ergibt nach Fehlerfortpflanzungsgesetz etwa 0,4mm. Die Punkte mittig der Schiene können besser geschätzt werden. Aufgrund der Erfahrung, welche bei der Auswertung der Gleismesslatte gemacht wurden kann hierbei eine Genauigkeit von 0,2 mm angegeben werden. Diese Genauigkeitsvoreinschätzung gilt jedoch nur für die linke Schiene des Messgleises 410. Der Lageverlauf der rechten Schiene hingegen ergibt sich aus der Lage der linken Schiene und der dazu addierten Spurweite aus den Sensorwerten. Demzufolge kann die Genauigkeitseinschätzung des Querabstandes zur Solllage der rechten Schiene ($\sqrt{0,4^2+0,3^2}$) auf 0,5 mm für die schlechten Enden der Schiene geschätzt werden. Die genauere Mitte kann mit einer Standardabweichung von 0,35 mm geschätzt werden.

Fehlerbetrachtung Höhe

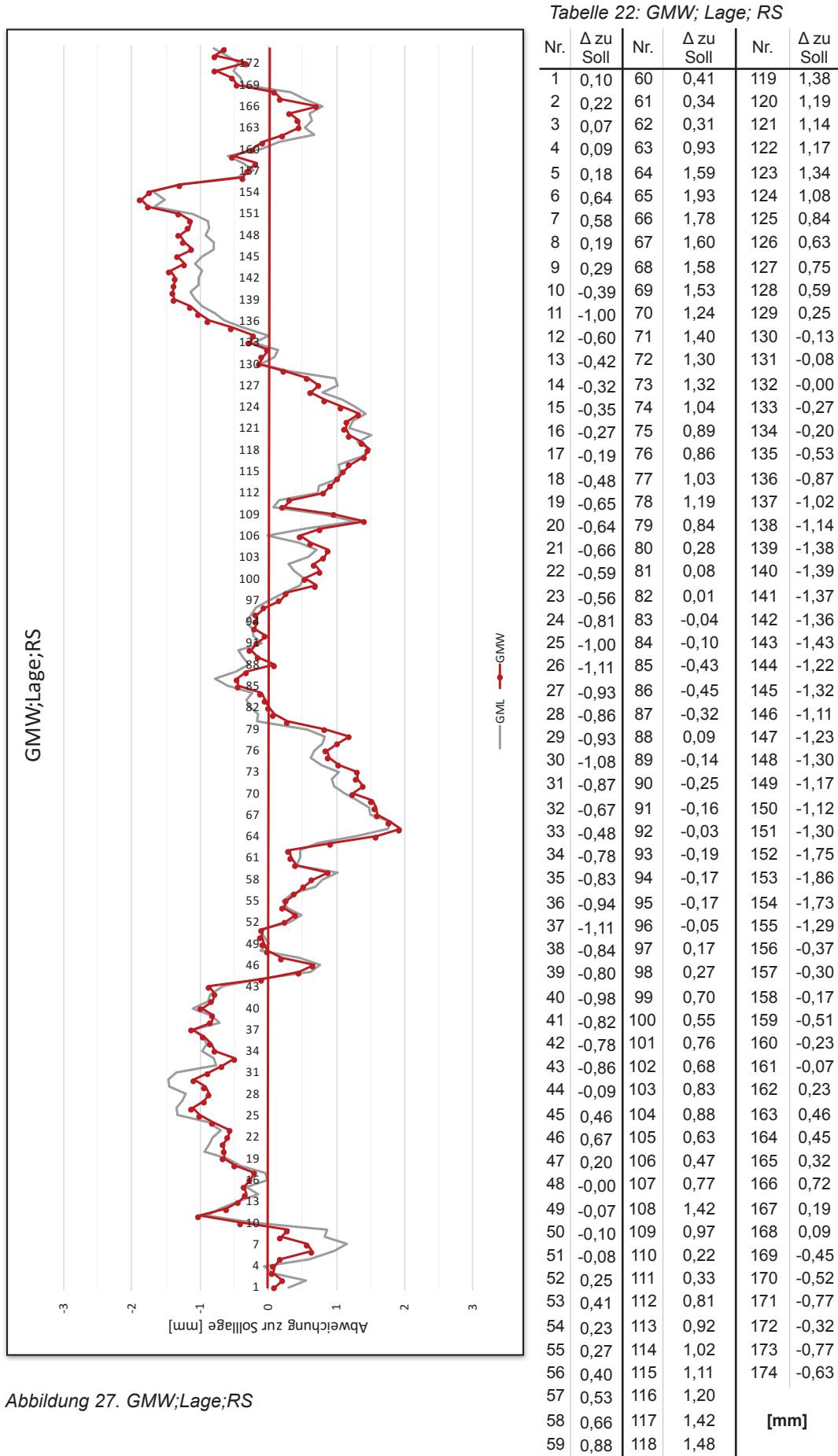
Wie bei der Fehlerbetrachtung der Lage ergibt sich, durch die erhöhte Standpunktlage zur Schiene, auch für die Betrachtung der Höhe ein Problem. Die Streckenmessgenauigkeit nimmt ab einem bestimmten Zenitwinkel Einfluss auf die Genauigkeit der Höhenmessung. Dieser Fehler musste bewusst in Kauf genommen werden, da der Aufbau der Halle keine anderen Instrumentenstandpunkte auf der Schiene zuließen. Aus der Genauigkeitsbetrachtung der Lage, bei der Messung mit der Gleismesslatte, ist ein Mindestpunktabstand von neun Metern berechnet worden, bei dem die Streckenmessgenauigkeit keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis hat. Dieser Wert kann auch für die Höhenauswertung angenommen werden. Da nun allerdings die Punkte höhenmäßig bestimmt werden, von einem Standpunkt der mehr als 110 Meter entfernt ist, ergeben sich ähnlich wie bei der Lage, folgende Genauigkeitsvoreinschätzungen des Höhenverlaufes. Bei den Enden des Messgleises müssen ungenauere Standardabweichung geschätzt werden. Die Werte entsprechen 0,4mm für 15 Punkten an den jeweiligen Enden der linken Schiene. Für die Mitte der linken Schiene ist auch in dem Fall der Höhenbewertung eine Genauigkeit von 0,2mm durchaus schätzbar. Durch die Genauigkeit des Neigungssensors ergibt sich für die Enden der rechten Schiene ein Wert von 0,64mm ($\sqrt{0,4^2+0,5^2}$) und für die Mitte der rechten Schiene ein Wert von 0,53mm ($\sqrt{0,2^2+0,5^2}$).

5.5.2. Ergebnisse Lage und Vergleich zu Messung Gleismesslatte

Die folgenden Seiten beinhalten die Ergebnisse der Auswertung der Messung mit dem Gleismesswagen und dem Tachymeter. Werte mit negativen Vorzeichen entsprechen Punkten, welche sich links von der Solllage befinden - Werte mit positiven Vorzeichen dementsprechend rechts der Solllage. Die Auswertungsergebnisse werden grafisch sowie tabellarisch dargestellt. Eine statistische Beurteilung der Genauigkeit sowie Kennzahlen (Minimum, Maximum) werden im Vergleich zur Messung mit der Gleismesslatte dargestellt. Zusätzlich ist für den optischen Vergleich der Ergebnisse von Gleismesslatte und Gleismesswagen die Messung der Gleismesslatte grau hinterlegt. Am Ende der Ergebnisbetrachtung steht eine Aussage, welche Werte sich gegenüber der Messung mit der Gleismesslatte signifikant unterscheiden. Grundlage für diesen Vergleich ist ein t-Test mit geschätzten theoretischen Standardabweichungen.

Gleismesswagen; Lageverlauf; LS

Gleismesswagen; Lageverlauf; RS



Ergebnisbewertung und Vergleich Lage

Linke Schiene

Tabelle 23: GMW;Lage;LS;Ergebnisvergleich zu GML

		Gleismesswagen		Gleismesslatte	
„S“ aus Doppelbeo.	Enden der Schiene (Punkte 1-25 u. 150-174)	0,35 mm	1* σ (68%) f=24	0,15 mm	1* σ (68%) f=19
	Mitte der Schiene (Punkte 26-149)	0,11mm	1* σ (68%) f=123		
„S“ gesamte Schiene		1,87 mm	2* σ (95%) f=174	2,06 mm	2* σ (95%) f=174
Maximalwert Links		-1,91 mm	Punkt 43	-1,98 mm	Punkt 43
Maximalwert Rechts		2,02 mm	Punkt 108	2,72 mm	Punkt 108

Die Gegenüberstellung zeigt, dass beide Messreihen durchaus starke Ähnlichkeiten aufweisen. Für einen Vergleich der Einzelmessergebnisse wird der t-Test genutzt. Um diesen zu erfüllen wird wie bei dem Epochenvergleich, aus dort gegebenen Grund, eine theoretische Standardabweichung geschätzt und daraus, über Fehlerfortpflanzung, eine theoretische Standardabweichung der Differenzen berechnet.

Tabelle 24: Schätzung „ σ_d “ GMW;Lage;LS;Vergleich-GML

Gleismesswagen	„ σ “ Enden der Schiene (Punkte 1-25 u. 150-174)	0,40mm	1* σ (68%) f=∞
	„ σ “ Mitte der Schiene (Punkte 26-149)	0,15mm	1* σ (68%) f=∞
Gleismesslatte	„ σ “ Gesamtschiene	0,20mm	1* σ (68%) f=∞
Differenz	„ σ “ Enden der Schiene (Punkte 1-25 u. 150-174)	0,45mm	1* σ (68%) f=∞
	„ σ “ Mitte der Schiene (Punkte 26-149)	0,25mm	1* σ (68%) f=∞

Nachfolgend sind die signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Messmethoden dargestellt. Verglichen werden die „schlechteren“ Außenbereiche der Schiene und nachfolgend die Mitte der Schiene. Dargestellt sind nur diejenigen Werte, welche den Test nicht bestanden haben, sprich jene die sich signifikant unterscheiden.

Tabelle 25: t-Test; GMW-GML; Lage; LS; Enden Schiene

Enden der linken Schiene (Punkte 1-25 u. 150-174)

Messverfahren	GMW	$\sigma_{\text{Differenz}}$:	0,45mm	f: ∞	Quantil F-Verteilung:	1,961
	GML				Irrtumswahrscheinlichkeit α :	5,00 %
0 Hypothese:	GMW = GML					
A Hypothese:	GMW \neq GML					
Testgröße:	T =	Differenz Einzelpunkte 0,45mm			Nr	Differenz
					8	-0,92
					158	1,18
						T
						2,06
						2,63

Das Alarmlimit der Differenz liegt bei 0,89 mm. Dies ist bei zwei Werten der Fall. Wird die Grafik (vgl. Abb. 26) hinzugezogen fallen diese Werte an den jeweiligen Ende der Schiene deutlich auf. Trotzdem bestätigt der Test, auch wenn das Alarmlimit vergleichsweise hoch ausfällt, dass Diagramm der Abbildung 26. Demnach stimmt der Großteil der Ergebnisse überein.

Tabelle 26: t-Test; GMW-GML; Lage; LS; Mitte Schiene

Mitte der linken Schiene (Punkte 26-149)

Messverfahren	GMW	$\sigma_{\text{Differenz}}$:	0,25mm	f: ∞	Quantil F-Verteilung:	1,961
	GML				Irrtumswahrscheinlichkeit α :	5,00 %
0 Hypothese:	GMW = GML					
A Hypothese:	GMW \neq GML					
Testgröße:	T =	Differenz Einzelpunkte 0,25mm			Nr	Differenz
					30	0,54
					32	-0,51
					33	0,75
					83	0,61
					84	-0,70
					86	0,88
					108	-0,70
					109	-0,66
					123	-0,50
					125	-0,60
					126	-0,86
					127	-0,54
					132	-0,55
					133	-0,66
					139	-0,49
						T
						2,17
						2,04
						2,98
						2,45
						2,82
						3,54
						2,79
						2,65
						2,02
						2,41
						3,45
						2,17
						2,20
						2,66
						1,96

Durch die deutlich bessere Standardabweichung der Differenz ergibt sich für den Test der Mitte ein Alarmlimit von 0,49 mm. Dieses Alarmlimit überschreiten 15 Punkte. Der Vergleich zur Abbildung 26 zeigt deutliche Unregelmäßigkeiten der Messung mit der Gleismesslatte, was durchaus auf Zufälligkeiten der Messung hinweisen kann. Der Verlauf der Messung mit dem Gleismesswagen verläuft deutlich harmonischer. Dies kann jedoch auch an der Tatsache liegen, dass jeder Punkt vier mal gemessen und ausgewertet wurde.

Rechte Schiene

Tabelle 27: GMW;Lage;RS;Ergebnisvergleich zu GML

„S“ aus Doppelbeo.	Enden der Schiene (Punkte 1-25 u. 150-174)	Gleismesswagen		Gleismesslatte	
		0,40 mm	1* σ (68%) f=24	0,16 mm	1* σ (68%) f=19
	Mitte der Schiene (Punkte 26-149)	0,11mm	1* σ (68%) f=123		
„S“ gesamte Schiene		1,70 mm	2* σ (95%) f=174	1,60 mm	2* σ (95%) f=174
Maximalwert Links		-1,86 mm	Punkt 153	-1,69 mm	Punkt 154
Maximalwert Rechts		1,93 mm	Punkt 65	1,81 mm	Punkt 66

Auch die Gegenüberstellung der rechten Schiene zeigt, dass beide Messreihen durchaus starke Ähnlichkeiten aufweisen. Die theoretischen Standardabweichungen für den t-Test werden wie folgt geschätzt.

Tabelle 28: Schätzung „ σ_d “ GMW;Lage;RS;Vergleich-GML

Gleismesswagen	„ σ “ Enden der Schiene (Punkte 1-25 u. 150-174)	0,50mm	1* σ (68%) f= ∞
	„ σ “ Mitte der Schiene (Punkte 26-149)	0,15mm	1* σ (68%) f= ∞
Gleismesslatte	„ σ “ Gesamtschiene	0,20mm	1* σ (68%) f= ∞
Differenz	„ σ “ Enden der Schiene (Punkte 1-25 u. 150-174)	0,55mm	1* σ (68%) f= ∞
	„ σ “ Mitte der Schiene (Punkte 26-149)	0,25mm	1* σ (68%) f= ∞

Lediglich die Standardabweichung der Differenz am Ende der rechten Schiene, ist im Vergleich zur Linken, um 0,1 mm schlechter geworden. Nachfolgend wird verglichen, welche Werte der Messreihen sich signifikant unterscheiden.

Tabelle 29: t-Test; GMW-GML; Lage; RS; Enden Schiene

Enden der rechten Schiene (Punkte 1-25 u. 150-174)

Messverfahren	GMW	σ Differenz:	0,55mm	f: ∞	Quantil F-Verteilung:	1,961
	GML				Irrtumswahrscheinlichkeit α :	5,00 %
0 Hypothese:	GMW = GML					
A Hypothese:	GMW \neq GML					
Testgröße:	T =	Differenz Einzelpunkte 0,55mm		Nr	Differenz	T

Der Vergleich der Messmethoden am Ende der Schienen weißt darauf hin, dass sich keine Punkte signifikant voneinander unterscheiden. Die Grafik der rechten Schiene (vgl. Abb.27) zeigt allerdings insbesondere an den Enden der Schiene deutliche Schwankungen. Diese sind allerdings aufgrund der schlechten Standardabweichung und dem resultierenden Alarmlimit von etwa 1 mm nicht gravierend genug.

Tabelle 30: t-Test; GMW-GML; Lage; RS; Mitte Schiene

Mitte der rechten Schiene (Punkte 26-149)

Messverfahren	GMW	σ Differenz:	0,25mm	f: ∞	Quantil F-Verteilung:	1,961
	GML				Irrtumswahrscheinlichkeit α :	5,00 %
0 Hypothese:	GMW = GML					
A Hypothese:	GMW \neq GML					
Testgröße:	T =	Differenz Einzelpunkte 0,25mm		Nr	Differenz	T

Auch bei dem Vergleich der Mitte der rechten Schiene konnten, bis auf einen Wert (Punkt 29), keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Das Alarmlimit für diesen Test liegt bei 0,5mm. Das ist durchaus verwunderlich, da die rechte Schiene durch den Gleismesswagen nicht direkt gemessen wurde. Die Lage der rechten Schiene ergibt sich aus der Lage der linken Schiene und den dazu addierten Sensorwerten des Gleismesswagens. Zudem konnten an der linken Schiene durchaus signifikante Unterschiede festgestellt werden. Es wurden demnach eine höhere Streuung und somit höhere Signifikanzunterschiede erwartet.

5.5.3. Ergebnisse Höhe und Vergleich zu Messung Gleismesslatte

Auch bei der Ergebnisvorstellung des Höhenverlaufes, ermittelt durch den Gleismesswagen, sind die Werte der Gleismesslatte grau hinterlegt. Die Auswertung und Bewertung der Ergebnisse wird auch hier mit einem zahlenmäßigen Vergleich der beiden Messverfahren durchgeführt und über einen t-Test auf Signifikanz geprüft.

Gleismesswagen; Höhenverlauf; LS

Tabelle 31: GMW; Höhe; LS

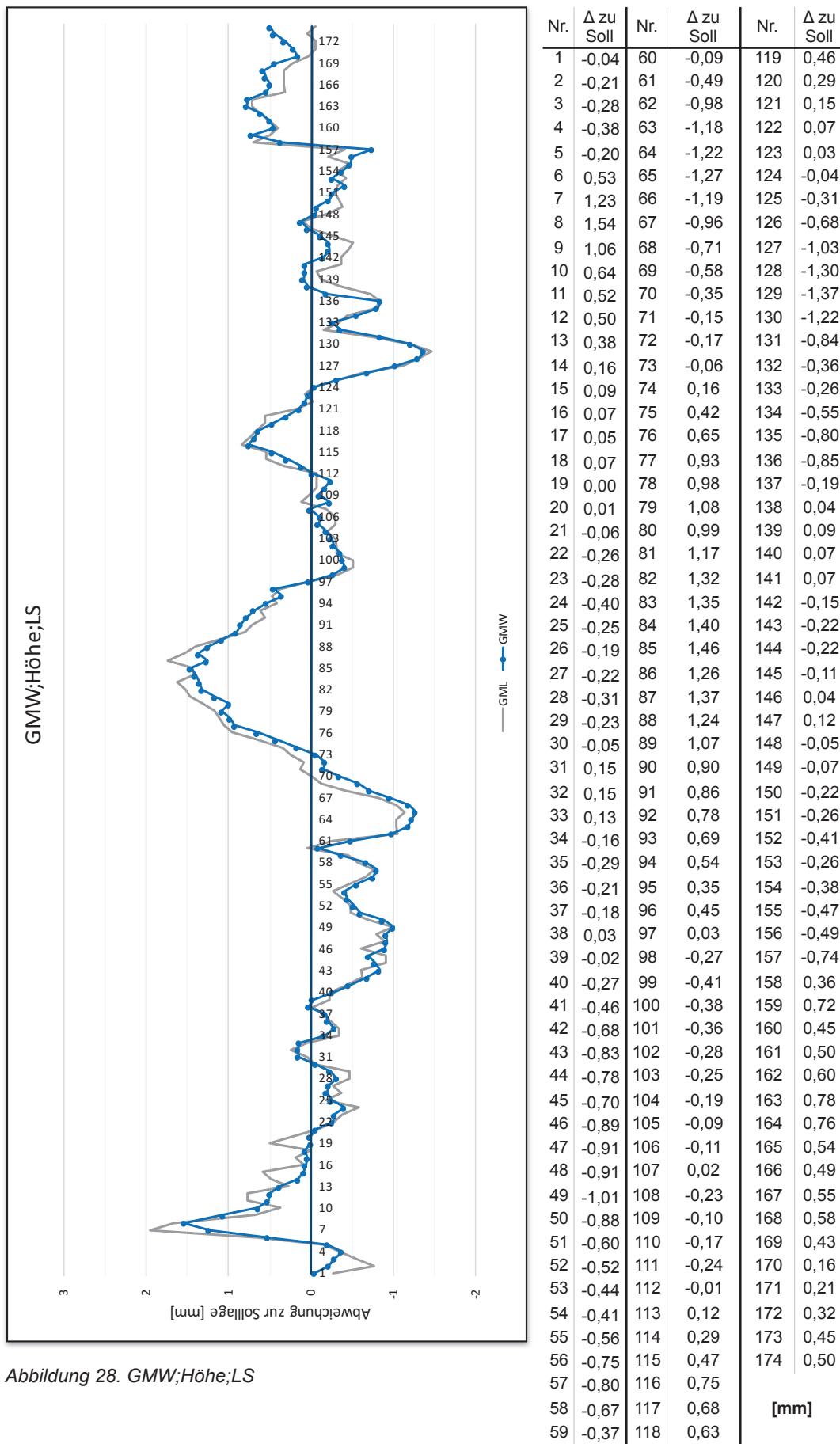
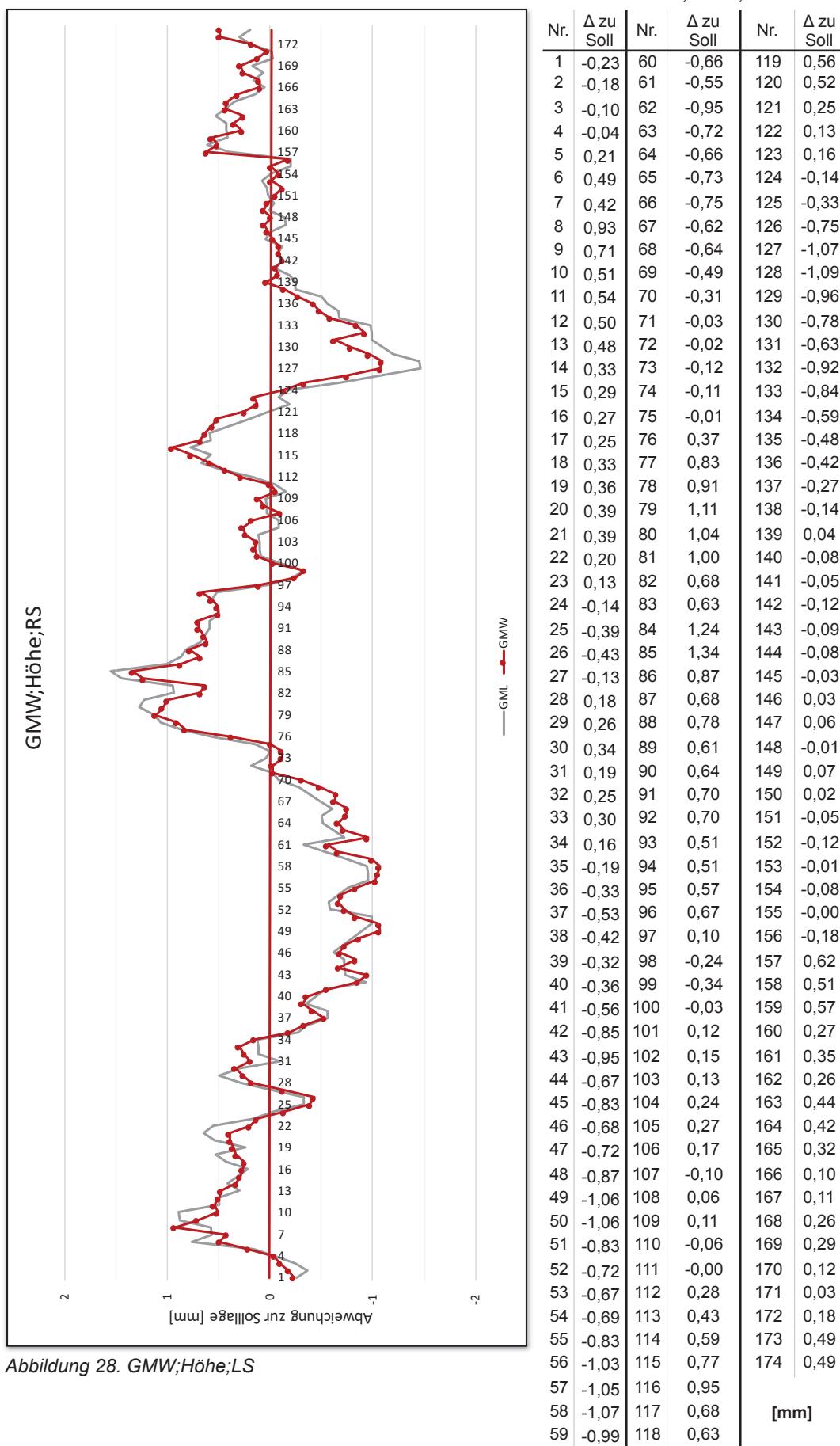


Abbildung 28. GMW; Höhe; LS

[mm]

Gleismesswagen; Höhenverlauf; RS

Tabelle 32: GMW; Höhe; RS



Ergebnisbewertung und Vergleich Höhe

Linke Schiene

Tabelle 33: GMW;Höhe;LS;Ergebnisvergleich zu GML

		Gleismesswagen		Gleismesslatte	
		Enden der Schiene (Punkte 1-25 u. 150-174)	0,28 mm 1* σ (68%) f=24	0,23 mm 1* σ (68%) f=19	
„S“ aus Doppelbeo.	Mitte der Schiene (Punkte 26-149)	0,13mm 1* σ (68%) f=123			
„S“ gesamte Schiene		1,25 mm 2* σ (95%) f=174		1,3 mm 2* σ (95%) f=174	
Maximalwert oberhalb		1,54 mm Punkt 8		1,96 mm Punkt 7	
Maximalwert unterhalb		-1,37 mm Punkt 129		-1,46 mm Punkt 129	

Auch der Höhenverlauf der beiden Messmethoden ähnelt sich stark. Die folgende statistische Auswertung wird zeigen ob es trotzdem signifikante Unterschiede in den Einzelmessungen gibt. Zunächst wird jedoch die theoretische Standardabweichung für den t-Test geschätzt.

Tabelle 34: Schätzung „ $\sigma_d

Gleismesswagen	„ σ “ Enden der Schiene (Punkte 1-25 u. 150-174)	0,30mm	1* σ (68%) f= ∞
	„ σ “ Mitte der Schiene (Punkte 26-149)	0,15mm	1* σ (68%) f= ∞
Gleismesslatte	„ σ “ Gesamtschiene	0,25mm	1* σ (68%) f= ∞
Differenz	„ σ “ Enden der Schiene (Punkte 1-25 u. 150-174)	0,40mm	1* σ (68%) f= ∞
	„ σ “ Mitte der Schiene (Punkte 26-149)	0,3mm	1* σ (68%) f= ∞

Der t-Test zur Prüfung der beiden Messreihen kommt zu folgendem Ergebnis:

Tabelle 35: t-Test;GMW-GML;Höhe;LS;Enden Schiene

Enden der linken Schiene (Punkte 1-25 u. 150-174)					
Messverfahren	GMW	σ Differenz:	0,40mm	f: ∞	Quantil F-Verteilung: 1,961
	GML				Irrtumswahrscheinlichkeit α : 5,00 %
0 Hypothese:	GMW = GML				
A Hypothese:	GMW \neq GML				
Testgröße:	T=	Differenz Einzelpunkte 0,4mm		Nr	Differenz
				-	-
					T

Das Alarmlimit für die Enden der rechten Schiene liegt bei 0,77 mm. Keiner der Punkte hat dieses Limit überschritten. Es existieren demnach keine signifikanten Unterschiede beider Messreihen.

Tabelle 36: t-Test; GMW-GML; Höhe; LS; Mitte Schiene

Mitte der linken Schiene (Punkte 26-149)				
Messverfahren	GMW	σ Differenz:	0,3mm	f: ∞
	GML			Quantil F-Verteilung: 1,961
				Irrtumswahrscheinlichkeit α : 5,00 %
0 Hypothese:	GMW = GML			
A Hypothese:	GMW \neq GML			
Testgröße:	T=	Differenz Einzelpunkte 0,3mm	Nr	Differenz
				T
			-	-

Das Alarmlimit für einen signifikanten Unterschied der Messreihen liegt bei 0,6 mm. Dieser Wert wurde bei der Differenzbildung der Einzelwerte nicht überschritten. Der Höhenverlauf der linken Schiene ist als nahezu gleich anzunehmen.

Rechte Schiene

Tabelle 37: GMW; Höhe; RS; Ergebnisvergleich zu GML

	„S“ aus Doppelbeo.	Gleismesswagen		Gleismesslatte	
		Enden der Schiene (Punkte 1-25 u. 150-174)	0,27 mm 1* σ (68%) f=24	0,19 mm 1* σ (68%) f=19	
„S“ gesamte Schiene	Mitte der Schiene (Punkte 26-149)	0,23mm	1* σ (68%) f=123		
Maximalwert oberhalb		1,11 mm	2* σ (95%) f=174	1,2 mm	2* σ (95%) f=174
Maximalwert unterhalb		1,34 mm	Punkt 85	1,56 mm	Punkt 85
		-1,09 mm	Punkt 128	-1,46 mm	Punkt 128

Auch für den Höhenverlauf der rechten Schiene ergibt sich ein stark ähnliches Bild. Jedoch ist die Standardabweichung der Mitte der Schiene hierbei die Schlechteste aller bisher Berechneten. Das kann darauf hinweisen, dass der Sensor des Gleismesswagens eine höhere Streuung der Messwerte aufweist als der Sensor für die Spur. Diese Vermutung wird durch das Datenblatt des Gleismesswagens unterstützt.⁶⁶

⁶⁶ vgl. Trimble Railway Industry 2013, S. 11

Die Schätzung der theoretischen Standardabweichungen für den t-Test beinhaltet folgendes Ergebnis.

Tabelle 38: Schätzung „ σ_d “ GMW; Höhe; RS; Vergleich-GML

Gleismesswagen	„ σ “ Enden der Schiene (Punkte 1-25 u. 150-174)	0,30mm	$1^*\sigma$ (68%) $f=\infty$
	„ σ “ Mitte der Schiene (Punkte 26-149)	0,25mm	$1^*\sigma$ (68%) $f=\infty$
Gleismesslatte	„ σ “ Gesamtschiene	0,20mm	$1^*\sigma$ (68%) $f=\infty$
Differenz	„ σ “ Enden der Schiene (Punkte 1-25 u. 150-174)	0,36mm	$1^*\sigma$ (68%) $f=\infty$
	„ σ “ Mitte der Schiene (Punkte 26-149)	0,32mm	$1^*\sigma$ (68%) $f=\infty$

Der t-Test zur Überprüfung von signifikanten Unterschieden beider Messverfahren ergibt folgende Ergebnisdarstellung.

Tabelle 39: t-Test; GMW-GML; Höhe; RS; Enden Schiene

Enden der rechten Schiene (Punkte 1-25 u. 150-174)

Messverfahren	GMW	σ Differenz:	0,36mm	f: ∞	Quantil F-Verteilung:	1,961
	GML				Irrtumswahrscheinlichkeit α :	
0 Hypothese:	GMW = GML					
A Hypothese:	GMW \neq GML					
Testgröße:	T=	Differenz Einzelpunkte 0,36mm		Nr	Differenz	T
				-	-	-

An den Enden der Schiene wurde ein Alarmlimit der Differenz von 0,75 mm berechnet. Keine der Differenzen hat diesen Wert überschritten.

*Tabelle 40: t-Test; GMW-GML; Höhe; RS; Mitte Schiene
Mitte der rechten Schiene (Punkte 26-149)*

Messverfahren	GMW	σ Differenz:	0,32mm	f: ∞	Quantil F-Verteilung:	1,961
	GML				Irrtumswahrscheinlichkeit α :	5,00 %
0 Hypothese:	GMW = GML					
A Hypothese:	GMW \neq GML					
Testgröße:	T =	Differenz Einzelpunkte 0,32mm		Nr	Differenz	T
				-	-	-

Für die Mitte der Schiene wurde ein Alarmlimit von 0,64 mm berechnet. Jedoch sind auch hier keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Alle ermittelten Unterschiede der Messreihen liegen unterhalb dieses Alarmlimits.

5.5.4. Ergebnisse Spurweite und Vergleich zu Messung Gleismesslatte

Die Stärke des Gleismesswagens ist die hohe Genauigkeit der Sensoren für Überhöhung und Spurweite. Sie soll genutzt werden, um die Bestimmung von Spurweite und Überhöhung der Gleismesslatte zu kontrollieren. Auf den Nachfolgenden Seiten ist der Unterschied zur Sollspurweite 1,435 m dargestellt. Ähnlich wie bei der Ergebnisdarstellung der Gleismesslatte wird ein linearer Trend bestimmt, mit dem die Parallelität der Schienen nachgewiesen werden kann und mit dem aus der Messung mit der Gleismesslatte verglichen wird.

Gleismesswagen; Spur von Sensor

Tabelle 41: GMW; Spur

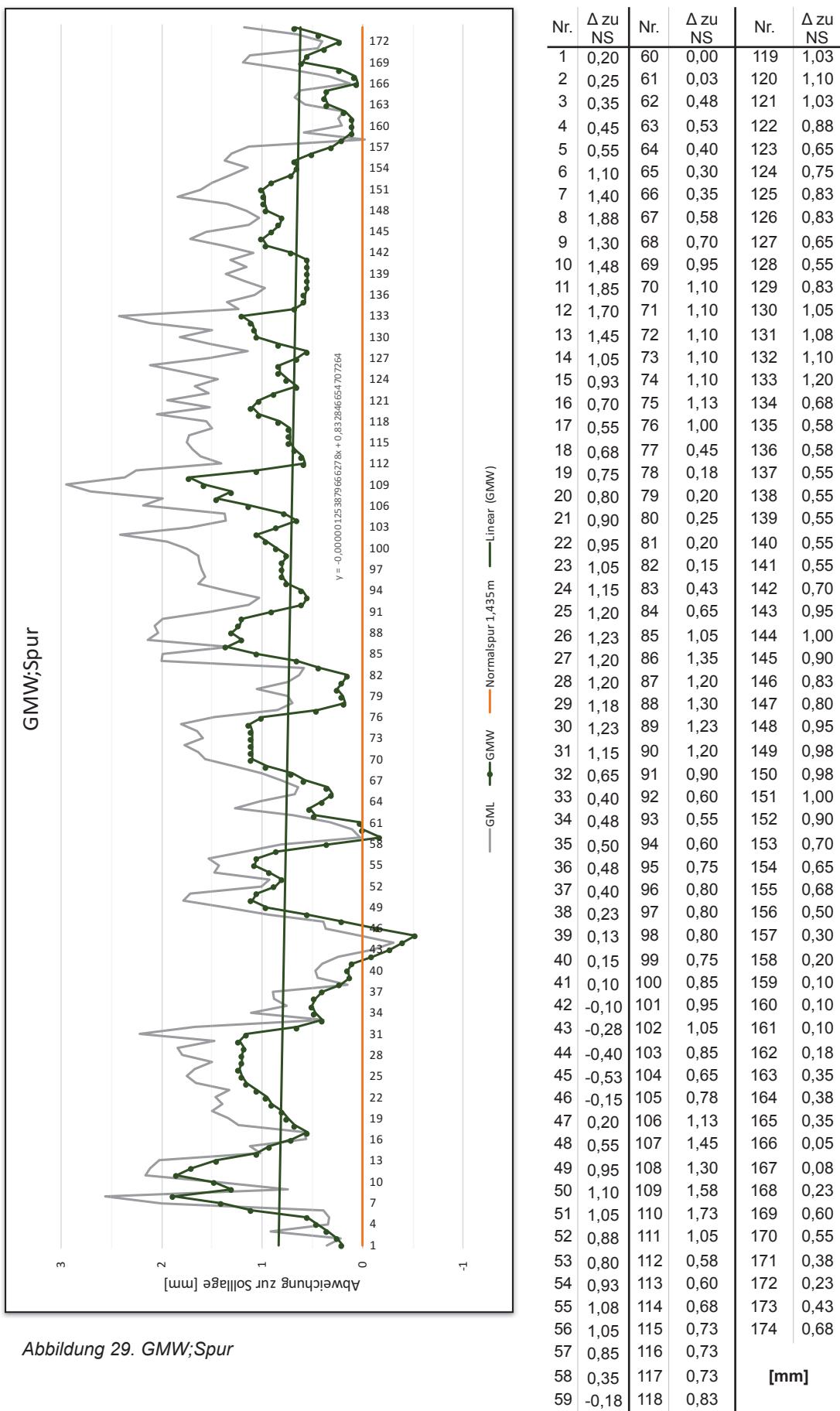


Abbildung 29. GMW; Spur

Ergebnisbewertung und Vergleich Spurweite

Da die Messung der Spurweite mit dem Gleismesswagen jedes einzelnen Punktes vier mal unabhängig voneinander durchgeführt werden konnte, wurde für jeden Spurweitenmesspunkt eine Standardabweichung berechnet. Demzufolge mussten 174 Standardabweichungen berechnet werden. Ein Mittel aus allen Werten ergab eine empirische Standardabweichung von 0,11 mm. Im Vergleich zur Messung mit der Gleismesslatte ergibt sich folgender Sachverhalt.

Tabelle 42: GMW;Spur;Ergebnisvergleich zu GML

GML			GMW	
Anstieg m	0,000000779	Winkel = 0,005 mgon	-0,000000125	Winkel = 0,008 mgon
Drift	Aufweitung			Verengung
Maximalwert Positiv	2,95 mm	Punkt 109 Spur = 1,4379m	1,88 mm	Punkt 8 Spur = 1,4369m
Maximalwert Unten	+0 mm	Punkt 45 Spur = 1,435m	-0,53 mm	Punkt 45 Spur = 1,4345m

Auffällig ist, dass sich das Gleis nach der Messung mit dem Gleismesswagen verengt (negativer Anstieg). Bei der Messung mit der Gleismesslatte wurde jedoch eine Aufweitung (positiver Anstieg) des Gleises festgestellt. Diese Unterschiede sind jedoch so gering, dass von keiner Signifikanz die Rede sein kann.

Das Diagramm in der Abbildung 29 zeigt teilweise sehr große Unterschiede zur Spurbreitenbestimmung mit der Gleismesslatte. Auffällig ist jedoch, dass beide Messreihen an manchen Stellen parallel zu verlaufen scheinen. Dies weist auf eine Art „Offset“ hin. Dieser ist allerdings nicht kontinuierlich vorhanden und kann somit nicht bewertet werden. Als weitere Vergleichsmöglichkeit wird die analoge Gleismesswaage der Firma Robel hinzugezogen. Die Abbildung 30 zeigt die Werte als gelben Verlauf. Die genauen Werte der Messung mit der Gleismesslatte sind im Anhang 5 zu finden.

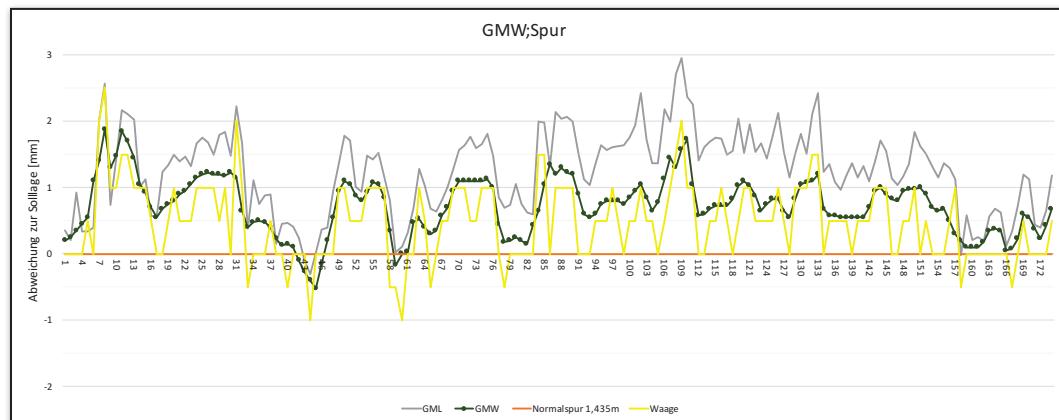


Abbildung 30. zusätzlicher vgl. mit Gleismesslatte

Die Gleismesswaage ist ein analoges Messsystem zur Bestimmung der Spurweite und Überhöhung und ist als Vergleichsmesssystem zum Einsatz gekommen. Die Ablesung an der Gleismesslatte kann nur auf den halben Millimeter geschätzt werden, was sich auch in der Grafik als sehr zackige Linie wider spiegelt. Diese Messung unterstützt vielmehr den Verlauf des Gleismesswagens, als die Messung mit der Gleismesslatte. Jedoch unterscheidet sich auch die Messung mit der Gleismesswaage teils gravierend von der, mit dem Gleismeswagen (vgl. Abb. 30 Punkte 7, 33). Dieses Problem kann natürlich an der Schätzung der Skala der Gleismesswaage liegen. Jedoch könnte es auch einen anderen Fehlerbewertungsansatz geben.

Die Geometrie des Gleismesswagens gibt es nicht her Spurweiten direkt zu messen. Der Gleismesswagen liegt an einer Seite mit zwei Rollen auf der Schiene auf (vgl. Abb 31). Das Prisma liegt in der Mitte beider Rollen und bildet einen Mittelwert aus erster und zweiter Rolle (vgl. Abb. 31. weißer Punkt).

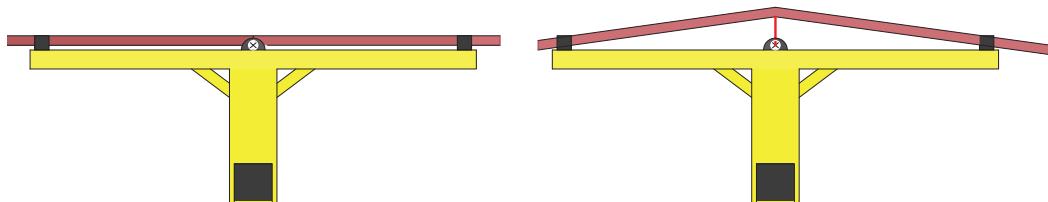


Abbildung 31. GMW;Spur

Der rechte Teil der Abbildung 31 zeigt einen eventuellen Schweißstoß in übertriebener Form. Was jedoch deutlich wird ist, dass die Spur um den Betrag der roten Linie falsch gemessen wurde. Wird das Diagramm der Abbildung 30 genauer betrachtet, so fällt auf, dass genau so ein Problem im Punkt 7 und 33 aufgetreten sein könnte.

5.5.5. Ergebnisse Überhöhung und Vergleich Messung Gleismesslatte

Die Ergebnisse der Überhöhung mit der Gleismesslatte sind unsicher. Dementsprechend interessant ist der Vergleich zu der Messung mit dem Gleismesswagen. Nachfolgend sind die Ergebnisse in tabellarischer und grafischer Form dargestellt. Grau hinterlegt sind auch in diesem Fall, die Ergebnisse der Gleismesslatte. Die rechte Schiene wird dabei als „0“ angesehen. Positive Ergebnisse weisen auf eine höhere linke Schiene hin. Negative hingegen signalisieren, dass die linke Schiene an der gemessenen Stelle niedriger ist als die Rechte.

Gleismesswagen; Überhöhung von Sensor

Tabelle 43: GMW; Überhöhung

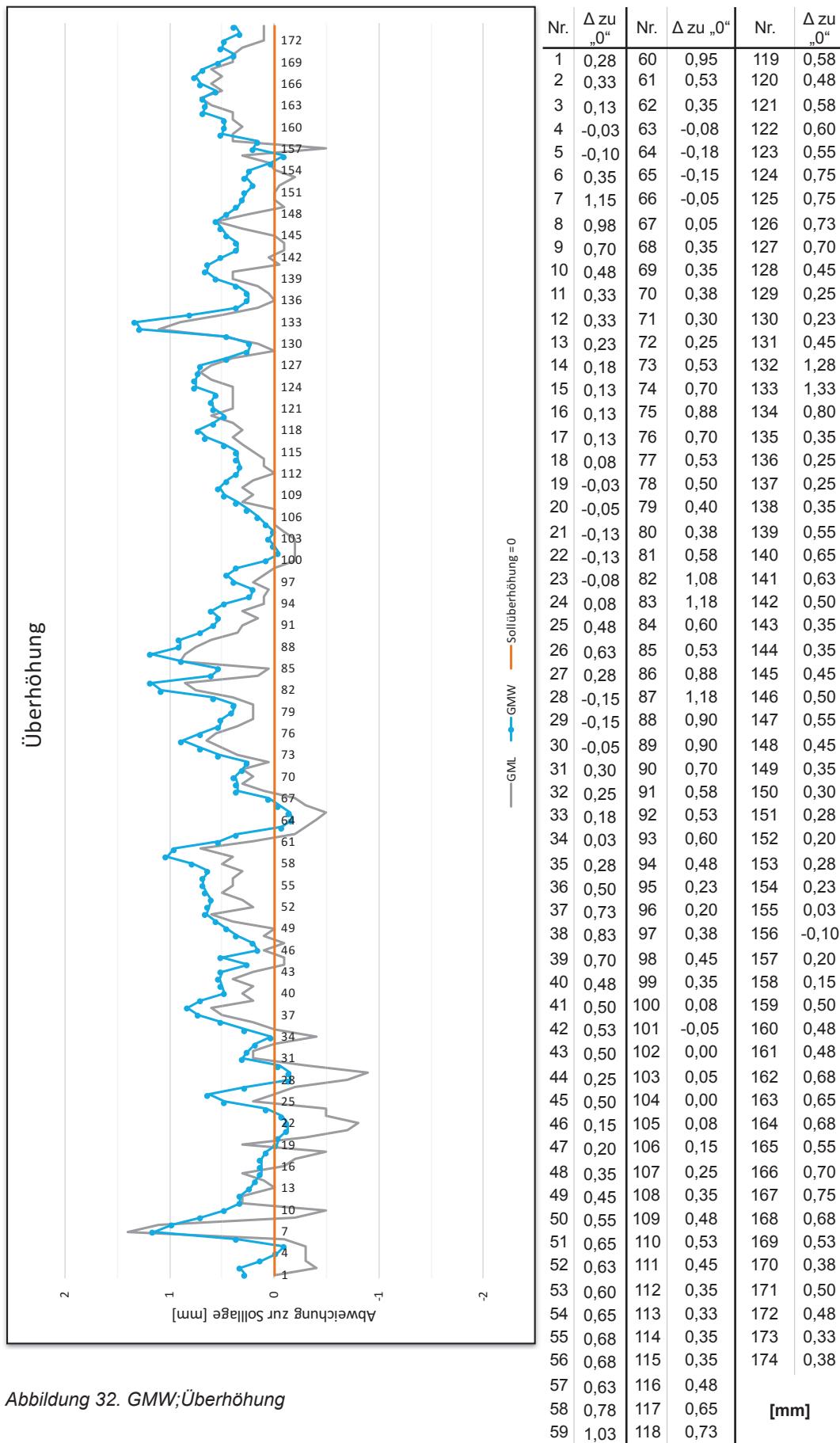


Abbildung 32. GMW; Überhöhung

[mm]

Ergebnisbewertung und Vergleich Überhöhung

Vor der Messung muss der Überhöhungssensor des Gleismesswagens kalibriert werden. Dafür wird der Messwagen auf das Gleis gesetzt und eine Überhöhungsmessung ausgelöst. Im Anschluss wird der Gleismesswagen gedreht. Das Sollergebnis aus der Addition beider Einzelmessungen ist Null. Eine Abweichung zu Null wird als kalibrierter Wert in jeder Einzelmeinung angebracht. Bei der Kalibrierung des Gleismesswagens ist das Ergebnis 0,04 mm und somit nicht signifikant.

Auch bei der Messung der Überhöhung wurde jede Überhöhung vier mal gemessen. Der Mittelwert für alle ermittelten Standardabweichungen beträgt 0,05mm.

Tabelle 44: GMW;Überhöhung;Ergebnisvergleich zu GML

	GML		GMW	
Maximalwert Positiv	1,40 mm	Punkt 7	1,33 mm	Punkt 133
Maximalwert Unten	-0,90mm	Punkt 29	-0,18 mm	Punkt 64

Wie bereits erwartet unterscheiden sich die Messreihen. Wobei wieder eine gewisse Parallelität des Verlaufs festzustellen ist. Die Bestimmung der Überhöhung weicht jedoch nicht so stark von der des Gleismesswagens ab als gedacht. Zusätzlich werden die Ergebnisse der Gleismesswaage auch bei der Messung der Überhöhung hinzugezogen

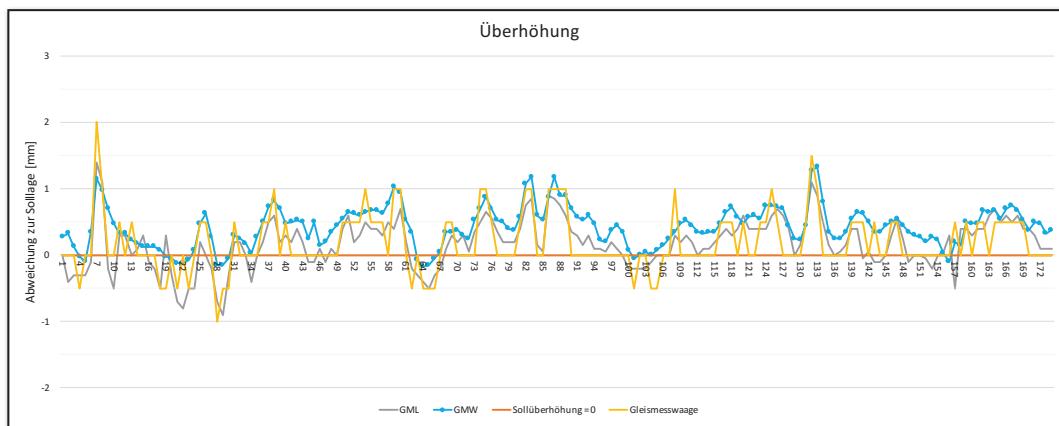


Abbildung 33. GMW; Überhöhung

Auch bei dieser Messung kann die Überhöhung auf den halben Millimeter geschätzt werden. Allerdings unterstützt die Messung mit der Gleismesswaage keine der beiden anderen Messergebnisse. Die Streuung ist zu stark. Auch eine

eventuelle Falschmessung aufgrund der Geometrie des Gleismesswagens⁶⁷ kann nicht festgestellt werden.

5.5.6. Erläuterungsbericht Messverfahren mit Gleismesswagen

Genauigkeitsentscheidung

Bezugnehmend auf die Genauigkeitsvorüberlegung im Kapitel 5.5.1 kann folgende Aussage getroffen werden. Die geschätzten Genauigkeiten stellen sich als zu schlecht geschätzt heraus. Die Messergebnisse und daraus berechneten Standardabweichungen sind deutlich besser. Der Hauptgrund der deutlich schlechteren Schätzung ist in der Überlegung zu den Sensoren zu finden. Das Datenblatt für den Gleismesswagen weiß Toleranzbereiche auf. Diese wurden für die Genauigkeitsvoreinschätzung genutzt. Allerdings sind diese Toleranzen mit einer höheren Wahrscheinlichkeit belegt (Standardabweichung =68%). Das Beispiel Spurweitenmessung veranschaulicht den Sachverhalt. Wird die ermittelte Standardabweichung der Spurweitenbestimmung mit drei multipliziert, $0,11*3$, ergibt sich ein Wert von 0,33mm. Dieser entspricht 3σ . Demnach befinden sich 99,7% aller Werte in einer Toleranz von $\pm 0,33\text{mm}$. Es resultiert ein fast gleicher Wert wie in dem Datenblatt.

Was die Bestimmung des Lage- und Höhenverlaufes der Schienen angeht, bringt der Gleismesswagen im Vergleich zur Messung mit der Gleismesslatte insgesamt keinen Genauigkeitsmehrwert. Ganz im Gegenteil, durch schlechte Messanordnung konnten Fehler wie Kippachsfehler bei der Lage und die schlechtere Streckenmessgenauigkeit beim Höhenverlauf nicht ausgeschlossen werden.

Was die Messung der Gleisparameter betrifft, wie Überhöhung und Spurweite, ist der Gleismesswagen für hochgenaue Messungen unverzichtbar.

Alles in allem unterstützt der Gleismesswagen die Ergebnisse der Gleismesslatte.

Probleme und Auffälligkeiten

Wie bereits angesprochen, kann die Geometrie des Gleismesswagens die direkte Messung der Spurweite und Überhöhung behindern. Davon abgesehen sind die größten Probleme bei dem Messverfahren durch den fehlerhaften Messaufbau entstanden. Dadurch konnten Fehler wie Kippachsfehler und ungenauerer Standardabweichung der Streckenmessung nicht beseitigt werden. Ein Messen

⁶⁷ vgl. Ergebnisbewertung und Vergleich Spurweite S.71

in zwei Fernrohrlagen wäre bei dieser Messanordnung zwingend erforderlich gewesen. Dies wäre zudem problemlos möglich gewesen, da der Programm-aufbau des Tachymeters diese Funktion beinhaltet und automatisch ausführt. Der Gleismesswagen hingegen ist einfach zu bedienen und sehr benutzerfreundlich zusammenzubauen.

5.6. Pfeileihöhenmessverfahren

Das Pfeileihöhenmessverfahren ist ein traditionelles Messverfahren aus dem Gleisbau. Dabei wird zwischen zwei Punkten der Schiene eine Sehne gespannt und der Abstand von der Sehne zur Schiene gemessen. Als Vergleichsmessverfahren wurde es an der rechten Schiene des Messgleises 410 durchgeführt.

Messungsaufbau

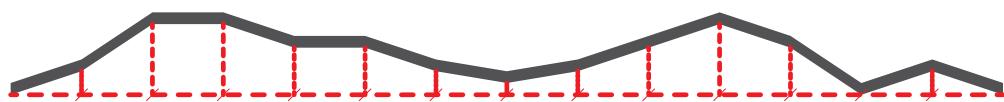


Abbildung 34: Schienenverlauf (grau) Sehne (rot) Pfeileihöhen (rot)

Die Abbildung 34 zeigt, skizzenhaft das Messverfahren. Dabei stellt die dicke graue Linie den Schienenverlauf übertrieben dar. Die rote gestrichelte Linie zeigt die angesprochene Sehne. Die davon lotrecht abgehenden Linien sind die gemessenen Pfeileihöhen. Praktisch stellt sich der Messaufbau wie folgt dar.



Abbildung 35: Praktischer Einblick der Pfeileihöhenmessung

Die Abbildung 35 zeigt die Messung der Pfeilhöhen. Die Schnur, welche extrem dünn ist und dessen Enden in zwei Aufsatzwinkeln verankert sind, wird an zwei Punkten der Schiene mit Schraubzwingen fixiert (vgl. Abb.35 grüner Pfeil). Gemessen wird mit einem Maßstab an der Schnur zur Schienenfahrkannte. Die Ablesung erfolgt auf den geschätzten halben Millimeter. Verglichen werden kann nur die Lage der rechten Schiene.

Auswertungsansatz

Da die Schiene mit ihrer Länge von 108 Metern schlicht zu lang ist, um eine Schnur durchgehend zu spannen, so musste wiederholt in einem Abstand von 30 Punkten (18 m) neu angesetzt werden.(vgl. Abb. 36) Es wurden fünf Punkte bei jedem Sehnenübergang überlappend gemessen. Ein Versuch die einzelnen gemessenen Sehnen ineinander zu transformieren scheiterte. So kann demzufolge nur jede einzelne Sehne mit den Ergebnissen der anderen Messverfahren verglichen werden. Da sich die Ergebnisse des Lageverlaufes aus der Messwagenmessung und der Messung mit der Gleismesslatte kaum unterscheiden, werden für einen Vergleich der Pfeilhöhenmessung nur die Ergebnisse der Messung mit der Gleismesslatte genutzt.

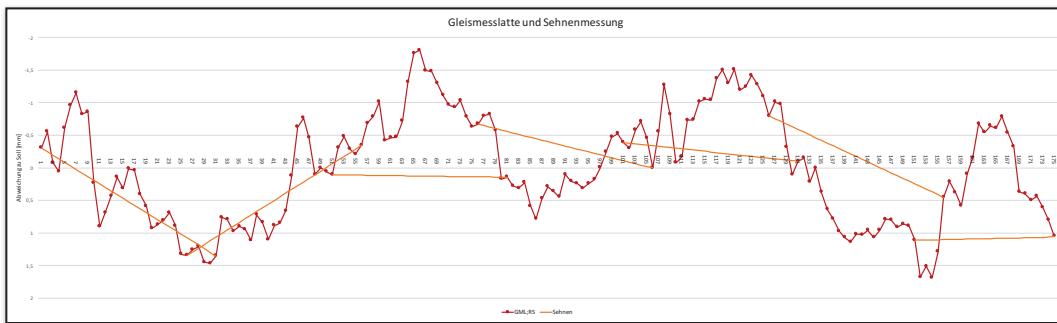


Abbildung 36: Lageverlauf rechte Schiene GML (rot) Sehnen (orange)

Jeder Anfangs- und Endpunkt der Sehne hat die Pfeilhöhe Null. Um einen Vergleich zu ermöglichen müssen die Ergebnisse aus der Gleismesslattenmessung auf diese Sehne transformiert werden. Berechnet wird der lotrechte Abstand von der Sehne (vgl. Abb. 36 orange Linie) zu den Einzelpunkten. Verglichen werden kann dann dieser lotrechte Abstand mit den gemessenen Pfeilhöhen.

Auswertungsergebnisse

Auf den folgenden Seiten ist jede Sehne aus der Pfeilhöhenmessung und der Berechnung aus der Gleismesslattenmessung grafisch, wie auch nummerisch dargestellt.

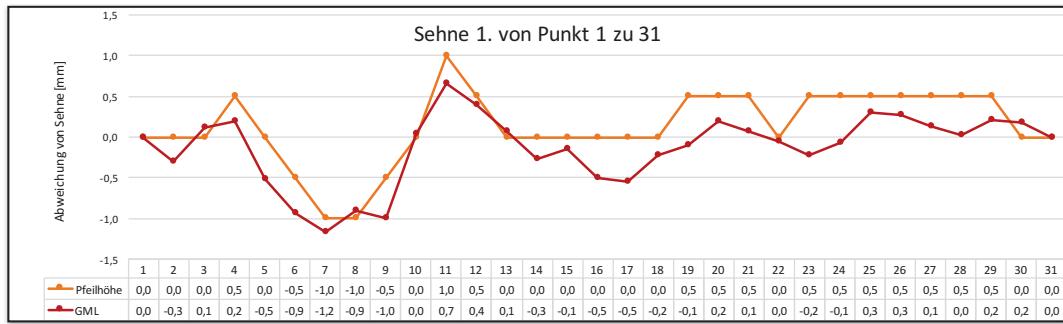
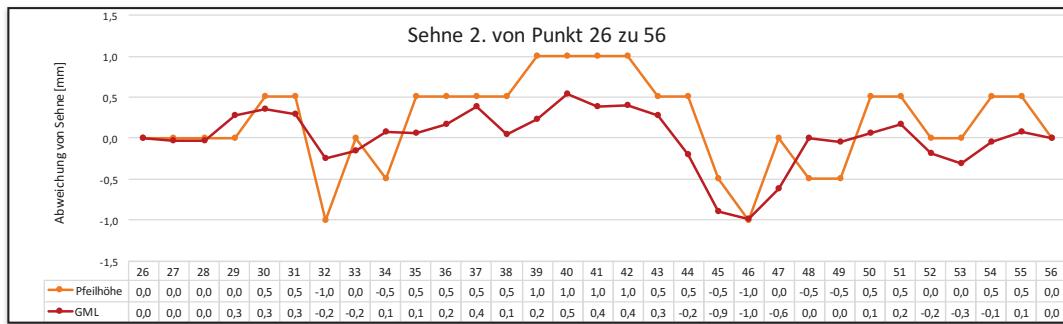
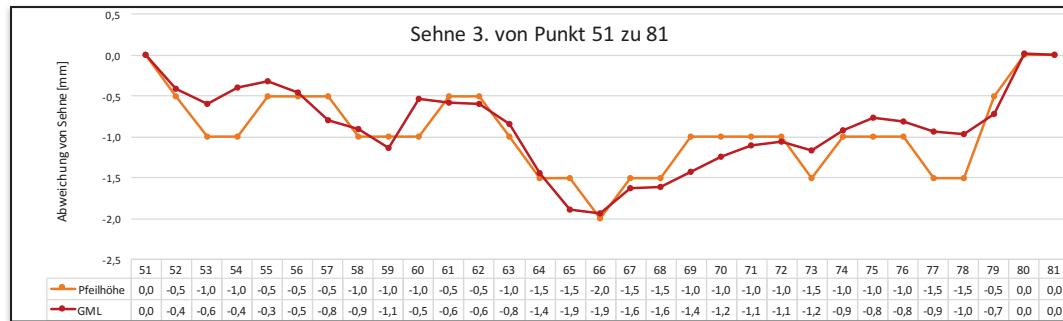


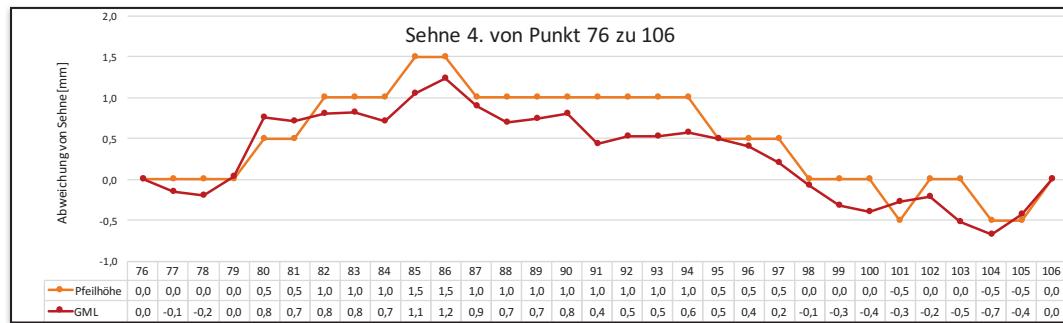
Abbildung 37: Pfeilhöhenmessung im Vergleich zur Gleismesslattenmessung



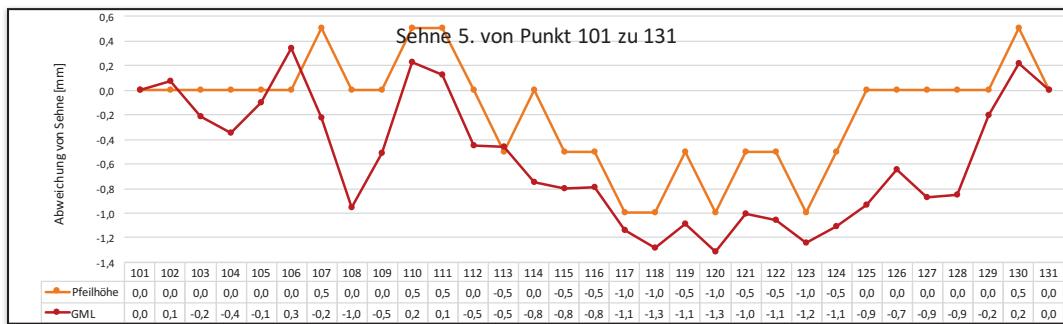
Fortsetzung zu Abbildung 37: Sehne 2



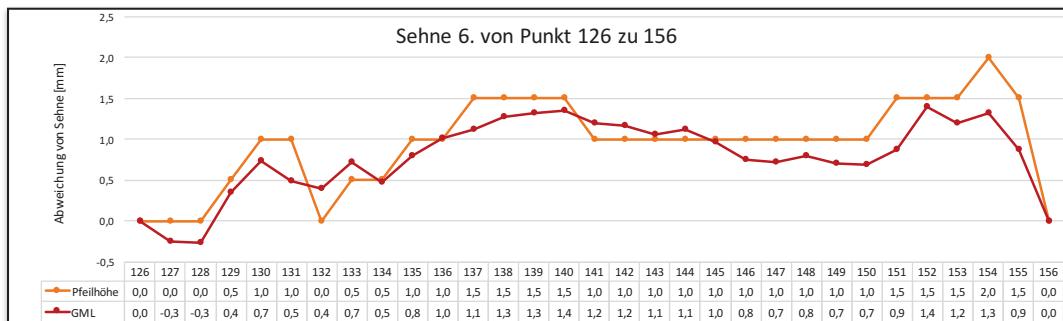
Fortsetzung zu Abbildung 37: Sehne 3



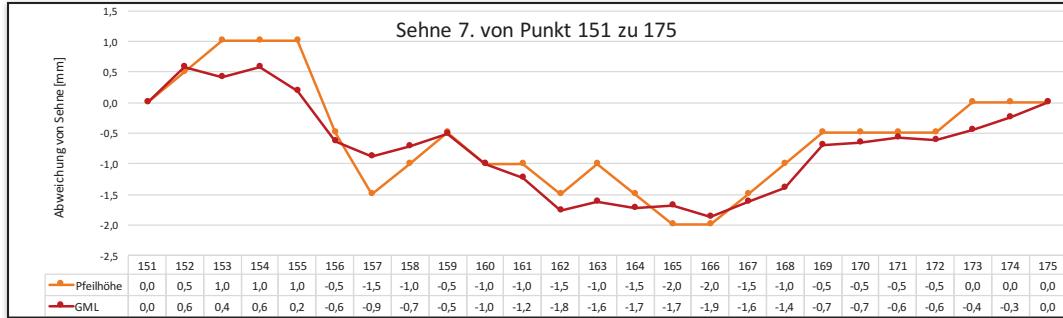
Fortsetzung zu Abbildung 37: Sehne 4



Fortsetzung zu Abbildung 37: Sehne 5



Fortsetzung zu Abbildung 37: Sehne 6



Fortsetzung zu Abbildung 37: Sehne 7

Ergebnisbewertung

Die Messung der Pfeilhöhen erfordert im Vergleich zu den anderen Messverfahren einen geringeren Aufwand. Das Ergebnis jedoch ähnelt dem, der Gleismesslatte sehr. Dies ist verwunderlich da sich die Ablesung am Maßstab nur auf den halben Millimeter schätzen lässt. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Messung nicht genauer sein kann als $\pm 0,5$ mm. Trotzdem sind starke Ähnlichkeiten der Werte erkennbar. Dieses Messverfahren ist durchaus nützlich, um auch Geradlinigkeiten im höheren Genauigkeitsbereich zu bestimmen.

5.7. Überprüfung auf mögliche Refraktionseinflüsse

Bei den beiden vorherigen Epochen der Messung an den Messgleisen kam der Verdacht auf, dass mögliche Refraktionseinflüsse durch Öffnen der Hallentore negativen Einfluss auf die Messergebnisse haben könnte. Um diesen Verdacht zu untersuchen wurde an vier Stellen der Halle, alle halbe Stunde, eine Temperaturmessung durchgeführt. Die Messung des Luftdrucks lief parallel jedoch in einem Zeitintervall von drei Stunden. Die genutzten Sensoren waren ein Schleuderthermometer zur Messung der Temperatur und der Luftdrucksensor des iPhones 6 des Herstellers Apple.

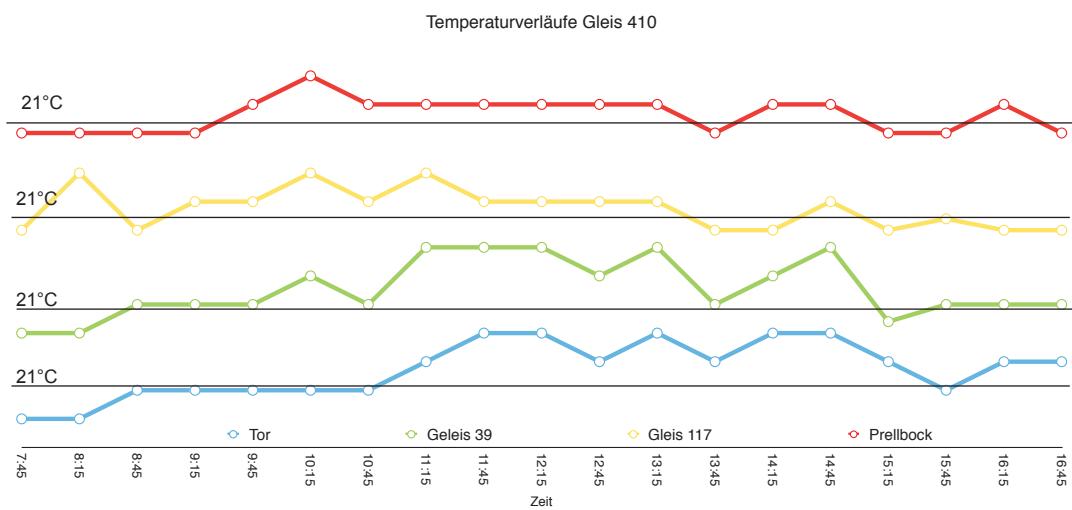


Abbildung 38: Temperaturmessung an vier Position des Gleises 410

Abbildung 38 zeigt alle vier Verläufe der Temperaturentwicklung in einem Zeitstrahl. Jeder Temperaturverlauf orientiert sich an der 21°C Linie. Gemessen wurde die Temperatur auf einem halben Grad Celsius genau. Tatsächlich weicht kein Temperaturverlauf mehr als 1°C von dem Richtwert der 21°C ab. Über die zeitliche Entwicklung ist somit kein Temperaturunterschied feststellbar. Und das, obwohl es im Laufe des Tages durchaus zu längeren Toröffnungen gekommen ist. Allerdings war der Temperaturunterschied zur Außentemperatur nicht sehr hoch. Auch der Luftdruck war an diesem Tag konstant bei etwa 1025 hpa. Eine Beeinflussung der Messung durch Refraktionseinwirkung kann somit für die Messung der Epoche Bachelorarbeit, als unwahrscheinlich eingestuft werden.

5.8. Entscheidung auf Toleranzinhaltung

Für die Bestimmung eines möglichen Toleranzverstoßes werden die erhobenen Messergebnisse Mittels Gleismesswagen herangezogen. Bezugnehmend auf die im Kapitel 3.2 zugrunde gelegten Toleranzen des Schienenverlaufs, lassen sich mit der vorliegenden Mess- und Auswertungsmethode folgende Aussagen über die Toleranzinhaltung des Messgleises 410 tätigen:

„Formtoleranz Geradlinigkeit“ der Lage, linke Schiene

Für die Beurteilung des Lageverlaufes der linken Schiene muss an jeder Stelle der Schiene ein Rechteck mit den Maßen fünf Meter mal zwei Millimeter auf den Verlauf der Schiene „passen“. Ist das nicht der Fall, so liegt an der betroffenen Stelle ein Toleranzverstoß vor.

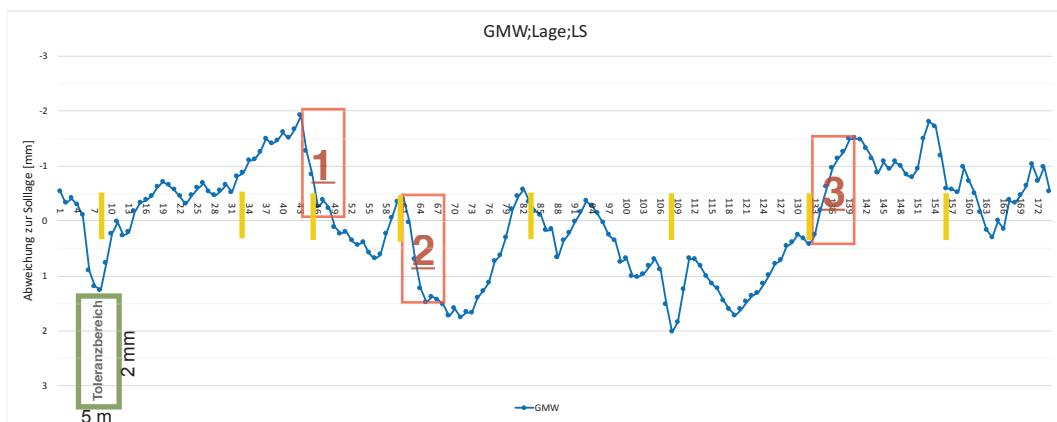


Abbildung 39: Toleranzverstoß; Lage; linke Schiene

Die Abbildung 39 weist auf insgesamt drei Toleranzverstöße im Lageverlauf hin.

Tabelle 45: Toleranzverstöße; Lage; LS

Toleranzverstöße		
Toleranzverstoß	Punktbereich	Beschreibung
1	43 - 51	Mitte Stoß
2	60 - 68	Nach Stoß
3	132 - 140	Nach Stoß

Insgesamt gilt für die linke Schiene, dass sich sämtliche Schweißstöße extrem negativ auf den Lageverlauf auswirken. Neben den drei ausgewiesenen Toleranzverstößen liegen nahezu alle anderen Schweißstöße nahe am Toleranzlimit.

„Formtoleranz Geradlinigkeit“ der Lage, rechte Schiene

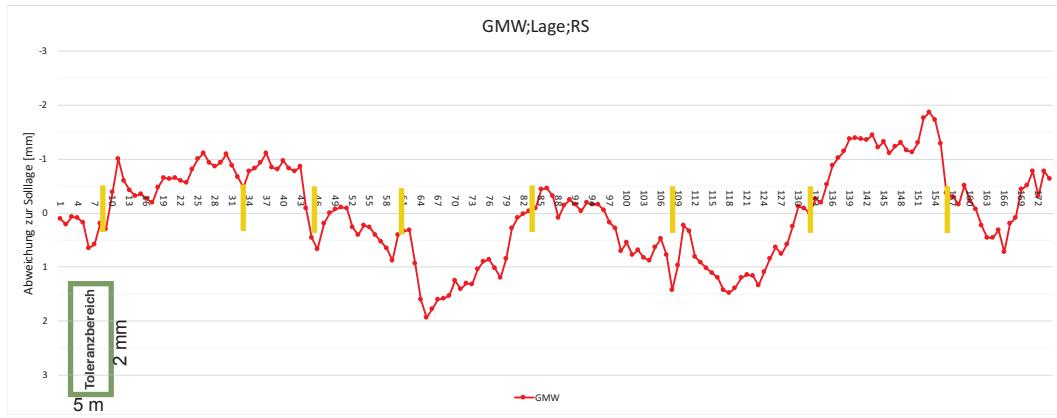


Abbildung 40: Toleranzverstoß; Lage; rechte Schiene

Der Lageverlauf der linken Schiene weist keinerlei Toleranzverstöße auf. Jedoch ist auch hier ein erhöhtes Risiko auf Toleranzeinhaltungen an den Schweißstößen gegeben.

„Formtoleranz Geradlinigkeit“ der Höhe, linke Schiene

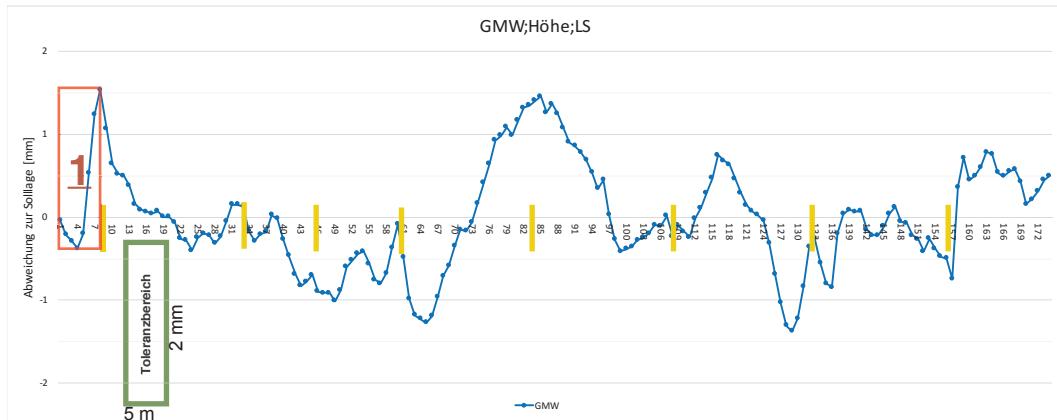


Abbildung 41: Toleranzverstoß; Höhe; linke Schiene

Der Höhenverlauf der linken Schiene weist einen Toleranzverstoß auf. Dieser befindet sich kurz nach dem Hallentor des Messgleises 410 in einem Punktbereich von Punkt 1 - 8. Zusammenfassend lässt sich die Aussage treffen, dass der Höhenverlauf im Allgemeinen einen sehr unregelmäßigen Verlauf darstellt. Auch hier kann die Ursache bei den Schweißstößen gefunden werden.

„Formtoleranz Geradlinigkeit“ der Höhe, rechte Schiene

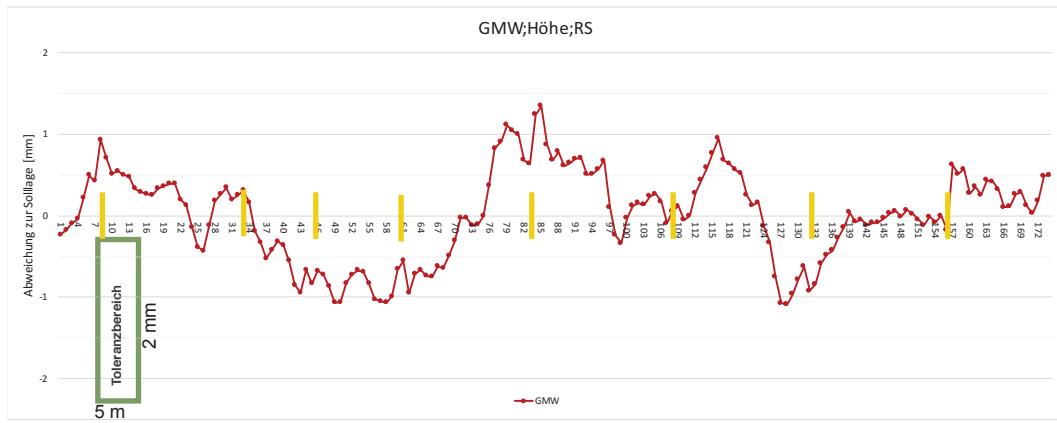


Abbildung 42: Toleranzverstoß; Höhe; rechte Schiene

Ähnlich dem Lageverlauf der rechten Schiene, kann dem Höhenverlauf der rechten Schiene kein Toleranzverstoß nachgewiesen werden.

Gegenseite Lage der Schienen (Spurweite)

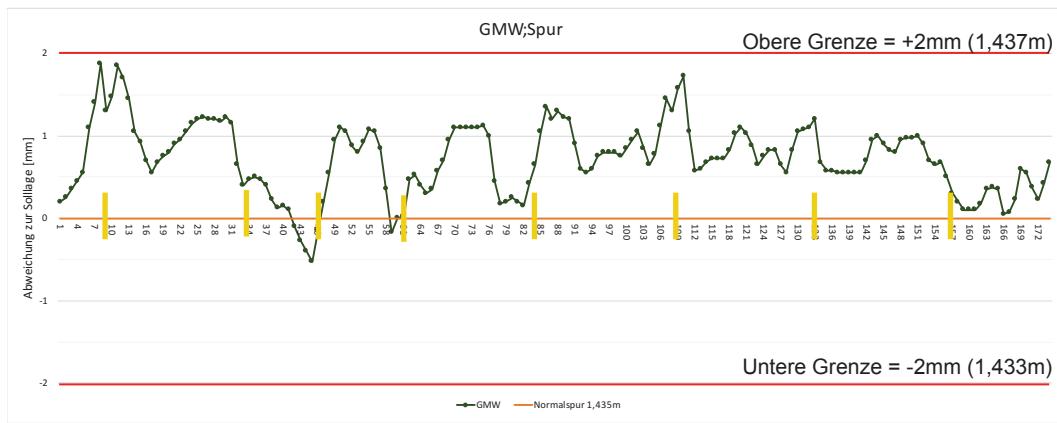


Abbildung 43: Toleranzverstoß; Spurweite

Der Toleranzbereich der Spurweite ist in der Abbildung 43 durch rote Begrenzungslinien dargestellt. Es fallen keine Punkte über oder unterhalb der Toleranzbereiche. Auffällig ist jedoch auch hier, dass Sprünge im Datenverlauf immer dann entstehen, wenn Schweißungen in der Nähe sind.

Gegenseite Höhenlage der Schienen (Überhöhung)

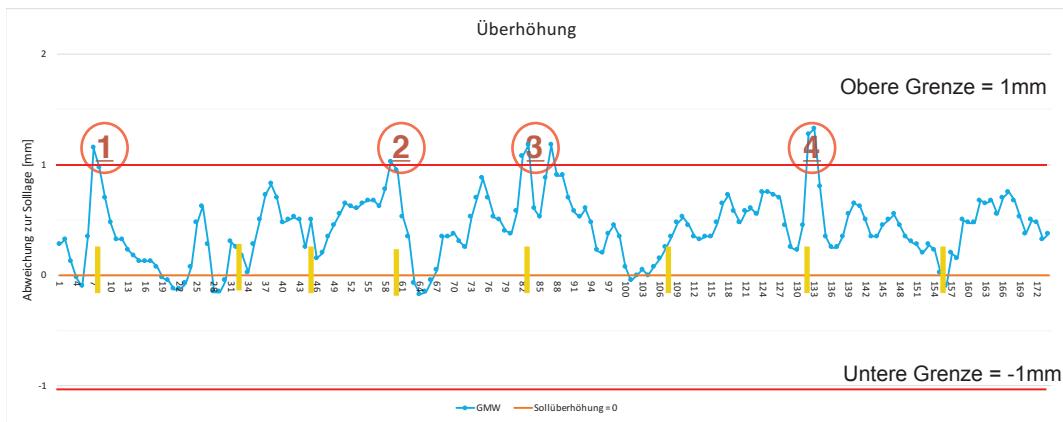


Abbildung 44: Toleranzverstoß; Überhöhung

Die roten Linien in Abbildung 44 weisen auf die Toleranzgrenzen der Überhöhungsmessung hin. Diese Toleranzgrenzen werden an insgesamt vier Stellen überschritten. Auch hier ist der Einfluss von Schweißstößen unmittelbar ablesbar.

Tabelle 46: Toleranzverstöße; Lage; LS

Toleranzverstöße			
Toleranzverstoß	Punkt	Beschreibung	Verstoßhöhe
1	7	vor Stoß	>0,5mm
2	58	vor Stoß	>0,5mm
3	81, 82, 85	vor u. hinter Stoß	>0,5mm
4	32, 33	vor u. hinter Stoß	>0,5mm

Zusammenfassung

Insgesamt konnten acht Toleranzverstöße festgestellt werden. Diese Verstöße beziehen ihren direkten Einfluss immer aus Schweißungen. Besonders der Schweißstoß zwischen den Stützpunkten sieben und acht ist häufig betroffen. Dieser stellt die Verbindung zwischen Messgleis (in der Halle) und Halleneinfahrt dar. Eventuelle Temperaturunterschiede zwischen dem Innenraum der Halle und außerhalb der Halle wirkt sich an dieser Stelle des Gleises aus und könnte zu Deformationen geführt haben. Dieser Ansatz ist jedoch nur als Annahme anzusehen.

6. Fazit und Abschlussbericht

Dieses Fazit soll Bezug auf die einleitenden Worte der Zielsetzung der Bachelorthesis nehmen. Dabei soll ein *Vergleich* aus den Erfahrungen mit den Messmethoden gegeben werden, sowie eine Erläuterung darüber ob es gelungen ist eine *genaue Untersuchung* des Messgleises 410 durchzuführen.

6.1. Vergleich der Messmethoden

Auf den vorherigen Seiten sind die Ergebnisse sämtlicher Messverfahren aufgezeigt. In diesem Kapitel soll es um einen umfassenden Vergleich und eine Entscheidung gehen, welches der Messverfahren sich als das qualitativ, quantitativ und wirtschaftlich bestes Verfahren herausgestellt hat.

Vergleich nach qualitativen Gesichtspunkten

Unter qualitativen Gesichtspunkten sind Parameter wie Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Anwenderfreundlichkeit der Messmethode zu verstehen. Die Erfahrungen, die während der Messung an dem Messgleis 410 gemacht wurden lassen jedoch keinen eindeutigen Entschluss darüber zu, welches der Messverfahren sich als Bestes im Punkt Qualität herausstellt. Was den Lage- und Höhenverlauf des Messgleises angeht ist die Messung mit dem Gleismesswagen, als auch die Messung mit der Gleismesslatte, gerade im Punkt Genauigkeit sehr stark. Jedoch ist bei der Messaufstellung beider Messverfahren einiges zu beachten. Dies ist auffällig und kann gerade bei der Nachbearbeitung durchaus zu Problemen führen. Eine gute Alternative stellt das Pfeilhöhenmessverfahren dar. Dieses Verfahren erreicht jedoch keine vergleichbare Genauigkeit. Allerdings wurde das Pfeilhöhenmessverfahren bei der Messung nicht ausgereizt. Es diente lediglich als Vergleich der beiden Hauptmessverfahren. Eventuelle Wiederholungsmessungen und Verbesserungen bei der Ablesung könnten durchaus deutliche Genauigkeitsgewinne bedeuten. Was die Bestimmung der Spurweite und der Überhöhung angeht, gibt es ein eindeutiges Ergebnis. Der Gleismesswagen ist dabei durch seine umfassende Sensorik verlässlich und sehr genau. Weder die Messung mit der Gleismesslatte, noch der Vergleichsmessung mit der Gleismesswaage können vergleichbare qualitative Ergebnisse liefern.

Vergleich nach quantitativen Gesichtspunkten

Der Betrachtung hinsichtlich quantitativer Gesichtspunkte meint möglichst viele Ergebnisse in möglichst kurzer Zeit zu erzielen. Dazu gehören die Auswertung und die Messung. Bei diesem Vergleich gibt es ein eindeutiges Ergebnis. Der Gleismesswagen kann mit einer Messung sämtliche Parameter des Gleises bestimmen. Da zudem Überhöhung und Spurweite direkt gemessen werden, ist kein weiterer Auswertungsaufwand nötig. Kein anderes Messverfahren im Rahmen des Vergleichs kann diese hoch redundante Messung in so kurzer Zeit liefern.

Vergleich nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten

Der Gleismesswagen weißt sowohl hinsichtlich qualitativer, als auch quantitativer Gesichtspunkten positive Aspekte auf. Er liefert also schnelle und verlässliche Ergebnisse. Wäre es der Fall, dass der Messwagen bei Messungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen häufig in den täglichen Gebrauch eingebunden werden kann, so würde er eine durchaus lohnende Anschaffung darstellen. Aufgrund seines hohen Anschaffungspreises rechnet er sich bei gelegentlichen Anwendungen jedoch nicht. Eine solide Mischung aus Qualität und Quantität stellt die Messung mit der Gleismesslatte dar. Sollte jedenfalls eine genaue Messung im Verhältnis zu einem niedrigen Anschaffungspreis stehen, so ist das Pfeilhöhenmessverfahren eine gute Alternative. Die Gleismesswaage hingegen ist für Genauigkeiten unter einem Millimeter weniger geeignet.

6.2. Abschlussbericht

Aufgrund der großen Menge der am Messtag erhobenen Daten, kam es zu einer dementsprechend umfangreichen Ausarbeitung der Bachelorthesis. Bezugnehmend auf das Hauptziel der Ausarbeitung, *die genaue Untersuchung des Messgleises 410 in der Betriebswerkstatt Grunewald*, ist zusagen, dass dieses erfüllt werden konnte. Dieses jedoch nicht fehlerfrei und ohne Ausschluss von auftretenden Problemen in Messung und Auswertung. Das Bestreben ein hochgenaues Messergebnis zu erzielen und eine daraus resultierende Entscheidung über die Einhaltung der Tolleranzgrenzen des Messgleises 410 zu treffen, kann trotz gemachten Fehler und auftretenden Probleme bestätigt werden. Auch trotz und vielleicht auch gerade durch gemachte Fehler und auftretender Probleme resultiert durch die Messung, an den Messgleisen der „Halle 4“ in der Betriebswerkstatt Grunewald, ein enormer Erfahrungsgewinn. Dieser Erfahrungsgewinn bezieht sich besonders auf fachliche Aspekte aber auch auf Aspekte der Zeiteinteilung, der Wirtschaftlichkeit und der Teamfähigkeit sowie dem eigenverantwortlichem Handeln.

Literaturverzeichnis

DIN 27202-10, Zustand der Eisenbahnfahrzeuge - Fahrzeugbau und Sondereinrichtungen - Teil 10: Messen Fahrzeugbau (Oktober 2006)

SCHMID Ingenieure GmbH, (2016): Geschichte, Unternehmen, Leistungen. Online verfügbar unter <http://www.schmidingenieure.de>, zuletzt geprüft am 02.02.2016

Schomacker M., (2009) A : Über 100 Jahre U-Bahn im Zeitraffer. Online verfügbar unter <http://www.berliner-untergrundbahn.de>, zuletzt geprüft am 14.02.2016

Schomacker M., (2009) B : Kleinprofil und Großprofil: Was heißt das eigentlich? Online verfügbar unter <http://www.berliner-untergrundbahn.de/profil1.htm> zuletzt geprüft 22.01.2016

Schomacker M., (2009) C : Werkstätten der Berliner U-Bahn. Online verfügbar unter <http://www.berliner-untergrundbahn.de/werkst.htm> 22.01.2016

Hänßler B., (2014): Kleine Geschichte der U-Bahn. Online verfügbar unter <https://www.tk.de/tk/wissen/technik-und-natur/kleine-geschichte-der-u---bahn-10007721/538258>, zuletzt geprüft 22.01.2016

Reinhardt W., (2014): Geschichte des Öffentlichen Personenverkehrs von den Anfängen bis 2014. Köln Springer Verlag

Blume D., (2016): Werner von Siemens 1816-1892 Ingenieur, Unternehmer. online verfügbar unter <https://www.dhm.de/lemo/biografie/werner-siemens>, Lebendiges Museum Online zuletzt geprüft 17.01.2016

BerlinOnline Stadtportal GmbH & Co.KG , (2016): U-Bahn Linien, Fahrpläne und Fahrpreise der U-Bahn in Berlin. Online verfügbar unter <https://www.berlin.de/tourismus/infos/nahverkehr/1742343-1721041-ubahn.html>, Tourismus und Hotel zuletzt geprüft 18.01.2016

BerlinOnline Stadtportal GmbH & Co.KG , (2016): U-Bahn Linien, Fahrpläne und Fahrpreise der U-Bahn in Berlin. Online verfügbar unter <https://www.berlin.de/tourismus/infos/nahverkehr/1742343-1721041-ubahn.html> zuletzt geprüft 21.01.2016

Reineke R., (2016): U-Bahn Betriebswerkstätten. Online verfügbar unter <http://hauptstrasse83f.de/nahverkehr/u-bahn/u-bahn-betriebswerkstatten/> zuletzt geprüft 20.01.2016

BVG, (2016): Eröffnung der U-Bahnwerkstatt Halle 4 in Grunewald online verfügbar unter <http://www.bvg.de/index.php/de/103842/name/Pressemitteilungen/article/1262856.html>, Berliner Verkehrsbetriebe zuletzt geprüft 17.10.2015

Trimble, (2016) Trimble S8 Total Station, online verfügbar unter <http://www.trimble.com/Survey/trimbles8.aspx> zuletzt geprüft am 29.01.2016

Gruber J. Joeckel R., (2010): Formelsammlung für das Vermessungswesen. 15. Auflage Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden

Hain J., (2015): Einfache statistische Testverfahren, Lehrstuhl für Mathematik an der Universität Würzburg. Online verfügbar unter http://www.uni-wuerzburg.de/fileadmin/10040800/user_upload/hain/SPSS/Testverfahren.pdf

Foppe K., (2015): Fehlerlehre und Statistik Vorlesungsskript im WS2014/2015 und SS2015. Hochschule Neubrandenburg

Imholz M. Schmid M., (2008): Untersuchung der Totalstation Trimble S8 im Hinblick auf hochgenaue Monitoring-Anwendungen. Fachhochschule Nordwestschweiz, Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik

Trimble Railway Industry, (2013): Bedienungsanleitung GEDO CE 2.0 Gleismesswagen, Version 1.1.5 Trimble Railway GmbH Korbacher Str. 15 D-97353 Wiesentheid

WAY CON Engineering, (2016): Funktionsweise von LVDT Sensoren, online verfügbar unter <http://www.lvdt.de/lvdt/>, Mehlbeerenstr. 4, 82024 Taufkirchen

physikinstrumente, (2016) Kapazitive Sensoren Kontaktfreie, direkte Positionsmessung mit Sub-Nanometer-Auflösung, Online verfügbar unter <http://www.physikinstrumente.de/technologie/kapazitive-sensoren.html>, Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG.

Unterlagen der SCHMID Ingenieure GmbH (Zugriff betriebsintern)

Radloff, U. (2015)A : Erläuterungsbericht Oberbautechnische Bewertung. SCHMID Ingenieure GmbH (HG)

Radloff, U. (2014)B : Honorarangebot für Vermessungstechnische Leistungen, Projekt BVG-Betriebswerkstatt Grunewald (BwGru) Werk- und Messgleise 406, 408, 410, 412. SCHMID Ingenieure GmbH (HG)

Kieser T. (2015) A : Deckblatt_Projektdokument. SCHMID Ingenieure GmbH (HG)

Kieser T. (2014)B : Netzübersicht Festpunktfeld Halle 4. SCHMID Ingenieure GmbH (HG)

Kieser T. (2014)C : Erläuterungsbericht: Erneuerung Festpunktfeld. SCHMID Ingenieure
GmbH (HG)

Anhang

A1: Gesprächsbericht Betriebswerkstatt

Ort: Betriebswerkstatt Grunewald; Machandelweg 24 in 14052 Berlin; Halle 4; Gleis 406

Zeit: Freitag, 22. Januar 2016 von 9 Uhr bis 10 Uhr

Gespräch mit: Werkstattleiter Herr Drescher; Schichtleiter; Mechaniker

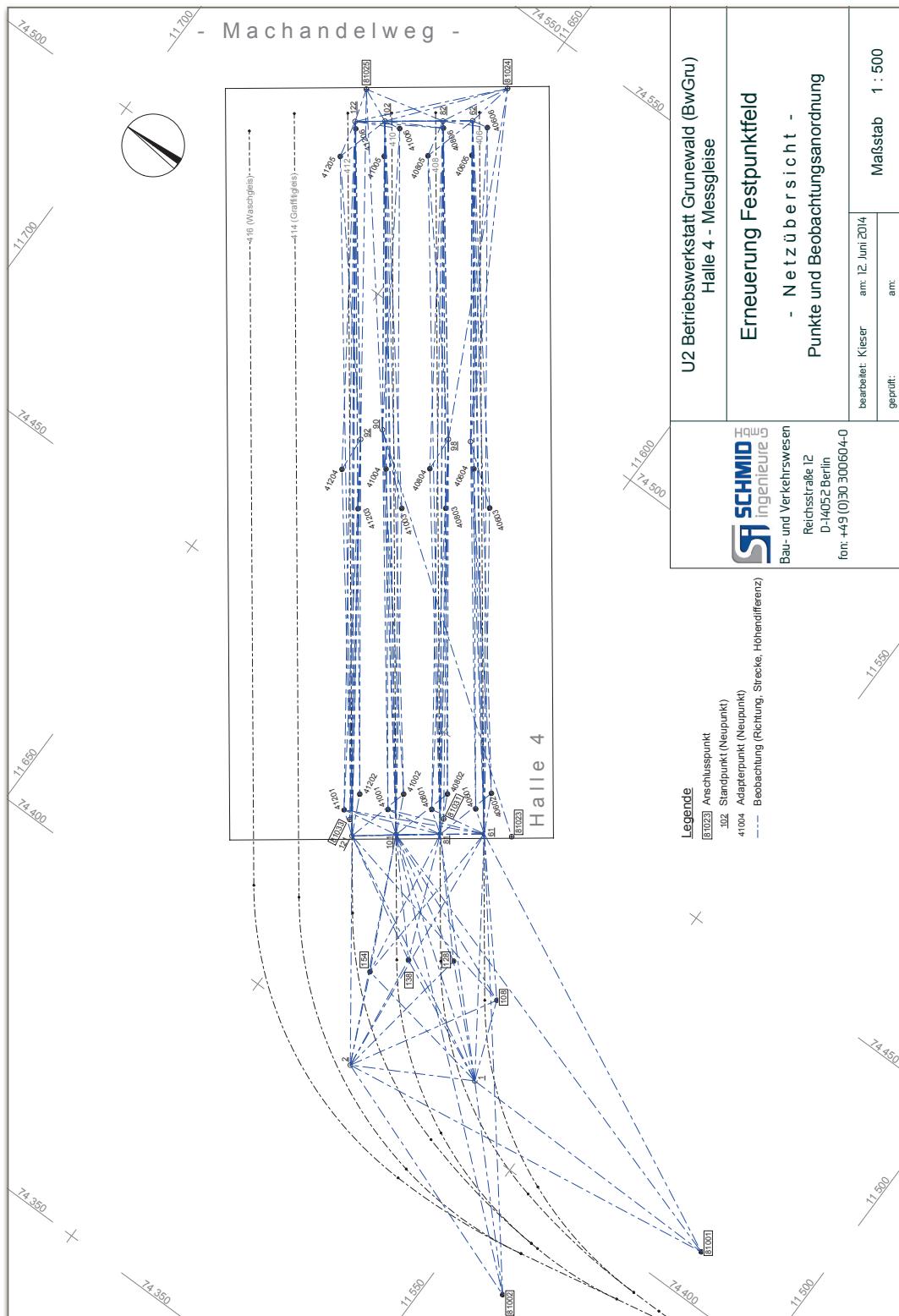
Gesprächsbericht in Stichpunktform Seite 1 von 2

- In welchen Perioden wird gemessen?
- Nach gefahrenen Kilometern (30.000),
 - oder Hauptuntersuchung
- Wird an allen Wagen der Bahn gemessen?
- An allen 4 Wagen der Züge
 - Pro Wagen an 2 Drehgestellen, insgesamt 8 Drehgestelle, 16 Achsen, 32 Räder
- Was ist Bestandteil der Messung ohne Messgleise?
- Messung der Radgeometrie und der Spurbreite.
- Radgeometrie?
- Raddurchmesser, Spurkranzdicke, Spurkranzhöhe und ein Verhältnis aus beiden Werten das Quermaß.
- Wie werden die Parameter der Radgeometrie gemessen?
- Raddurchmesser: Aufsatzbügel
 - Spurkranzparameter: 2-achsiger Messschieber
- Nach welchen Toleranzen muss geprüft werden?
- Streng vorgeschriebene Toleranzen in Prüftabellen für jedes Maß.
- Kann die Spurbreite nicht auch über die Messgleise ermittelt werden?
- Der Zug steht immer anders auf den Gleisen.
 - Ermittelt werden könnte die Spurbreite durch Messen aus Spurkranzende und Schienenkante.
 - Achse ist starr => Messung des Radrückenzabstandes.
- Wie ergibt sich daraus die Spurbreite?
- Durch Addition der Radkranzdicke
 - Die Toleranz ist dabei höher nach Innen als nach Außen
- Was genau bedeutet das?
- Das ermittelte Maß kann deutlich höhere Toleranzen nach Innen als nach Außen
- Welche Toleranzen gelten dabei?
- plus also zu Außen 1 mm; minus also Innen 3mm
- Und warum ist das so?
- Durch den Sinuslauf des Zuges würde er bei zu großer Spurbreite aus dem Gleis klettern.

Gesprächsbericht in Stichpunktform Seite 2 von 2

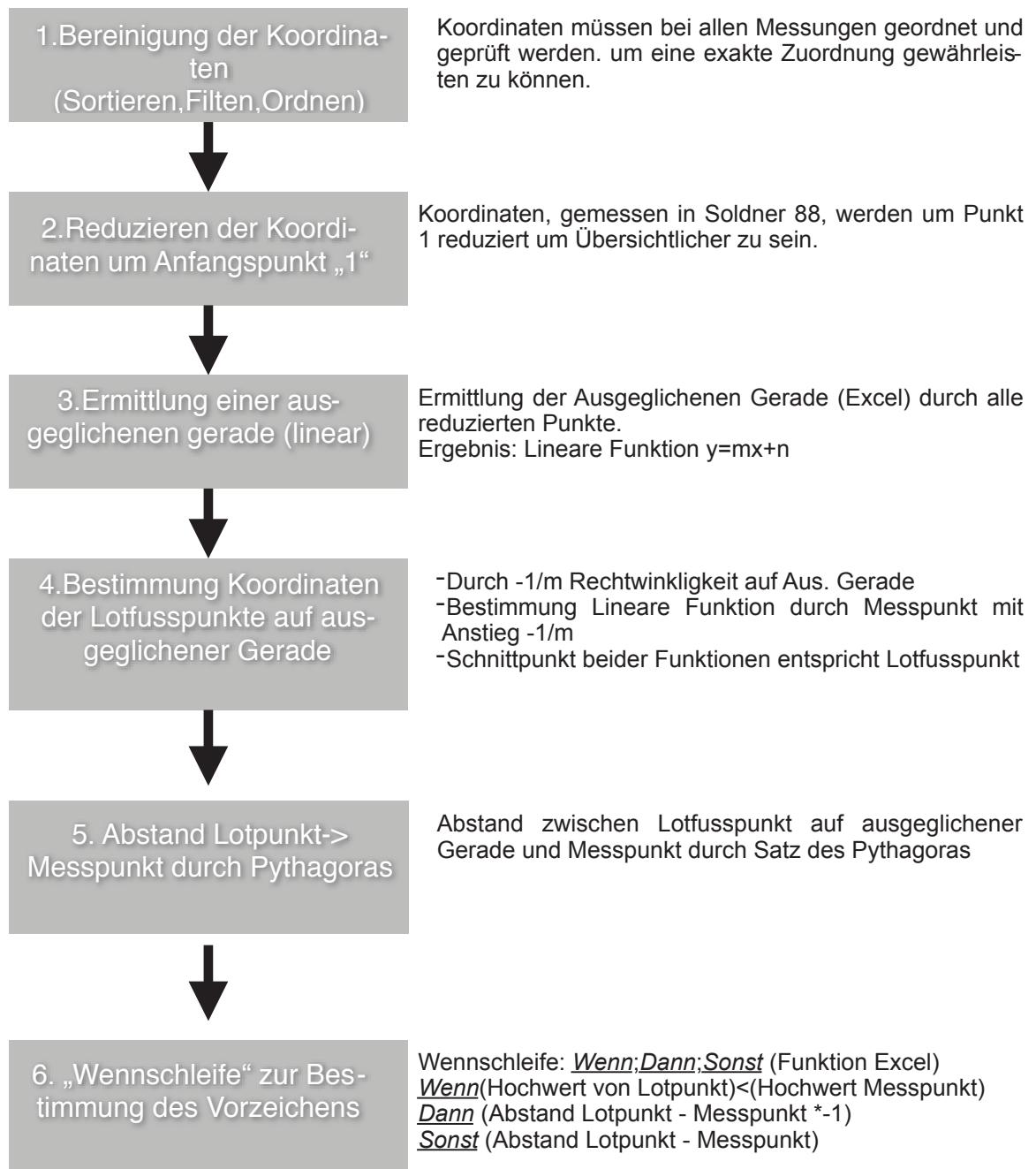
- Welche Maße sind messgleisbezogen?
- Wichtig ist die Messung der Wagenkastenhöhe.
 - Die Wagenkupplungen werden nach der Geradlinigkeit des Messgleises eingestellt.
- Messung der Wagenkastenhöhe?
- Beruht auf der Annahme, dass beide Schienen des Gleises gleich hoch sind.
 - Richtscheit über beide Schienen.
 - Messung mit geeichtem Gliedermaßstab zur Markierung am Zug.
- Wo sind diese Markierungen?
- Bohrung auf Höhe jedes Drehgestells beidseitig des Zuges.
 - Dort befinden sich die Federn zur Höheneinstellung der Wagenkästen
- Gibt es eine Toleranz für den Höhenunterschied der beiden Zugseiten?
- +/- 1 mm also 2mm Toleranzbereich.
 - aus fahrdynamischen Gründen.
- Was wird an den Kupplungen geprüft?
- Geprüft wird die Geradlinigkeit des gesamten Zuges
 - auch wenn Drehgestelle eines Wagens gegenseitig verdreht oder versetzt sind fällt das an den Kupplungen auf.
 - Angenommen wird das dass Gleis gerade verläuft.
 - an den Kupplungen bestehen Justiereinrichtungen um den Zug auf Solllage zu bringen.
 - Fahrdynamische Gründe.

A2: Festpunktnetz Halle 4

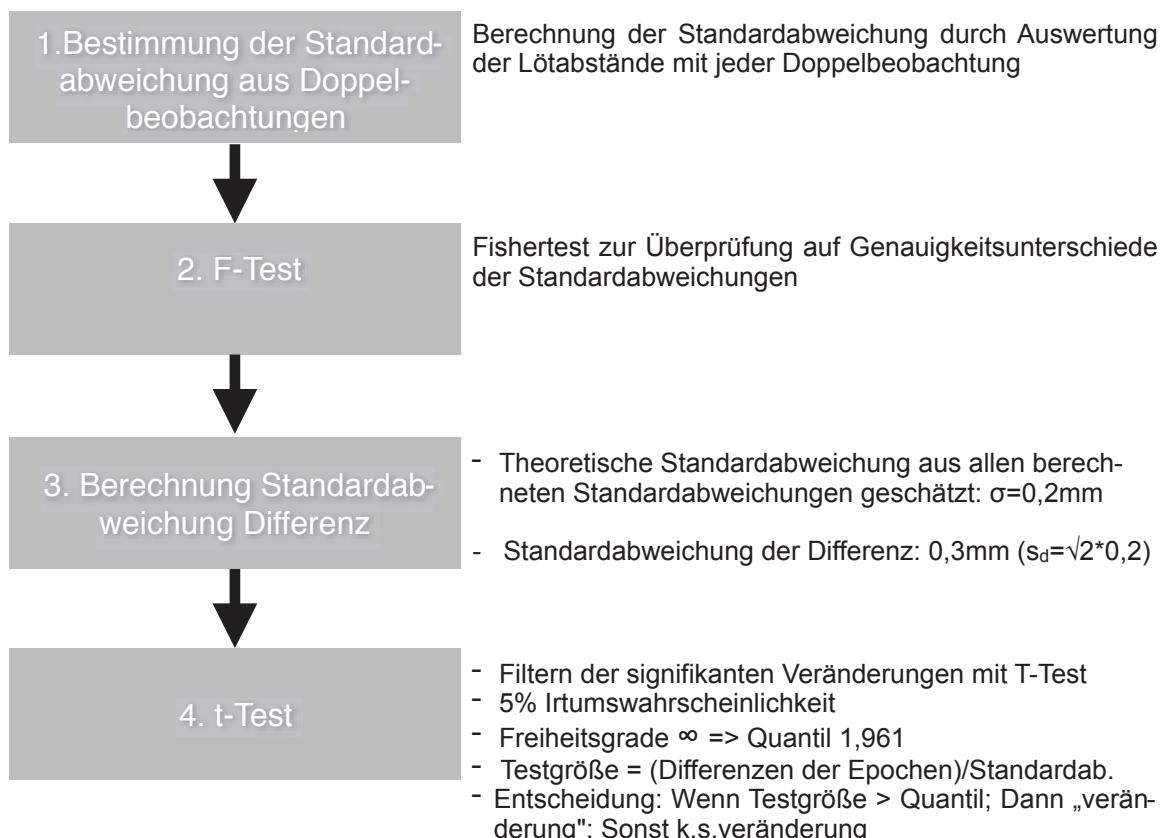


A3: Programmablaufplan der Auswertung

I. Allgemeiner Programmablaufplan



II. Spurweitenbestimmung Gleismesswinkel

III. Epochenvergleich Einzelwert (Standardabweichung)

A4: Auszug Datenblatt Tachymeter Trimble S8

© 2007-2010, Trimble Navigation Limited. Alle Rechte vorbehalten. Trimble, das Globus-und-Dreieck-Logo und Autolock sind in den USA und in anderen Ländern eingetragene Marken von Trimble Navigation Limited. 4D Control, Access, FinLock, MagDrive, MultiTrack, SurePoint, und VISION sind Marken von Trimble Navigation Limited. Die Bluetooth-Wortmarke und das Bluetooth-Logo sind Eigentum der Bluetooth SIG, Inc. Die Verwendung dieser Marken durch Prismatec ist eine Lizenz unter Lizenz. Alle anderen Marken sind Eigentum der entsprechenden Inhaber. Prismatec 232-51_11-05 D 09/2010

ÖRTLICHE TRIMBLE-VERTRETUNG ODER -HÄNDLER

NORDAMERIK

NORDAMERIKA
 Trimble Engineering &
 Construction Group
 5475 Kellenburger Road
 Dayton, Ohio 45424-1099 • USA
 (Gebührenfrei in den USA)
 800-538-7800
 Tel.: +1-937-245-5154
 Fax: +1-937-233-9441

EUROPA

EUROPA
Trimble Germany GmbH
Am Prime Parc 11
65479 Raunheim • DEUTSCHLAND
Tel.: +49-6142-2100-0
Fax: +49-6142-2100-550

ASIEN & SÜDRAZIEN

ASIEN & SÜDPAZIFIK
Trimble Navigation
Singapore PTE Limited
80 Marine Parade Road
#22-06, Parkway Parade
Singapore 449269 • SINGAPUR
Tel.: +65-6348-2212
Fax: +65-6348-2232



www.trimble.com

A5: Messergebnisse der Gleismesswaage

Spurweite						Überhöhung					
Nr.	Spur	Nr.	Spur	Nr.	Spur	Nr.	Über.	Nr.	Über.	Nr.	Über.
1	1,4350	60	1,4340	119	1,4355	1	0,00	60	1,00	119	0,00
2	1,4350	61	1,4350	120	1,4360	2	0,00	61	0,00	120	0,50
3	1,4350	62	1,4350	121	1,4360	3	0,00	62	-0,50	121	0,00
4	1,4350	63	1,4360	122	1,4355	4	-0,50	63	0,00	122	0,00
5	1,4355	64	1,4355	123	1,4355	5	0,00	64	-0,50	123	0,50
6	1,4350	65	1,4345	124	1,4355	6	0,00	65	-0,50	124	0,50
7	1,4370	66	1,4350	125	1,4355	7	2,00	66	-0,50	125	1,00
8	1,4375	67	1,4355	126	1,4360	8	1,00	67	0,00	126	0,50
9	1,4360	68	1,4355	127	1,4355	9	0,00	68	0,50	127	0,00
10	1,4360	69	1,4360	128	1,4350	10	0,00	69	0,50	128	0,00
11	1,4365	70	1,4360	129	1,4360	11	0,50	70	0,00	129	0,00
12	1,4365	71	1,4360	130	1,4360	12	0,00	71	0,00	130	0,00
13	1,4360	72	1,4355	131	1,4360	13	0,50	72	0,00	131	0,50
14	1,4360	73	1,4355	132	1,4365	14	0,00	73	0,00	132	1,50
15	1,4360	74	1,4360	133	1,4365	15	0,00	74	1,00	133	1,00
16	1,4355	75	1,4360	134	1,4350	16	0,00	75	1,00	134	0,00
17	1,4350	76	1,4360	135	1,4355	17	0,00	76	0,50	135	0,00
18	1,4350	77	1,4350	136	1,4355	18	-0,50	77	0,00	136	0,00
19	1,4355	78	1,4345	137	1,4355	19	-0,50	78	0,00	137	0,00
20	1,4360	79	1,4350	138	1,4355	20	0,00	79	0,00	138	0,00
21	1,4355	80	1,4350	139	1,4350	21	-0,50	80	0,00	139	0,50
22	1,4355	81	1,4350	140	1,4355	22	0,00	81	0,50	140	0,50
23	1,4355	82	1,4350	141	1,4355	23	-0,50	82	1,00	141	0,50
24	1,4360	83	1,4350	142	1,4355	24	0,00	83	1,00	142	0,00
25	1,4360	84	1,4365	143	1,4360	25	0,50	84	0,00	143	0,50
26	1,4360	85	1,4365	144	1,4360	26	0,50	85	0,00	144	0,00
27	1,4360	86	1,4350	145	1,4360	27	0,00	86	1,00	145	0,00
28	1,4355	87	1,4360	146	1,4350	28	-1,00	87	1,00	146	0,50
29	1,4360	88	1,4360	147	1,4350	29	-0,50	88	1,00	147	0,50
30	1,4350	89	1,4360	148	1,4355	30	-0,50	89	1,00	148	0,00
31	1,4370	90	1,4360	149	1,4355	31	0,50	90	0,00	149	0,00
32	1,4360	91	1,4350	150	1,4360	32	0,00	91	0,00	150	0,00
33	1,4345	92	1,4350	151	1,4350	33	0,00	92	0,00	151	0,00
34	1,4350	93	1,4350	152	1,4355	34	0,00	93	0,00	152	0,00
35	1,4350	94	1,4355	153	1,4350	35	0,00	94	0,00	153	0,00
36	1,4350	95	1,4355	154	1,4350	36	0,50	95	0,00	154	0,00
37	1,4355	96	1,4355	155	1,4350	37	0,50	96	0,00	155	0,00
38	1,4350	97	1,4360	156	1,4355	38	1,00	97	0,00	156	0,00
39	1,4350	98	1,4355	157	1,4360	39	0,00	98	0,00	157	0,50
40	1,4345	99	1,4350	158	1,4345	40	0,50	99	0,00	158	0,00
41	1,4350	100	1,4355	159	1,4350	41	0,00	100	0,00	159	0,50
42	1,4350	101	1,4355	160	1,4350	42	0,00	101	-0,50	160	0,00
43	1,4350	102	1,4360	161	1,4350	43	0,00	102	0,00	161	0,50
44	1,4340	103	1,4355	162	1,4350	44	0,00	103	0,00	162	0,50
45	1,4350	104	1,4355	163	1,4350	45	0,00	104	-0,50	163	0,00
46	1,4350	105	1,4350	164	1,4350	46	0,00	105	-0,50	164	0,50
47	1,4350	106	1,4355	165	1,4350	47	0,00	106	0,00	165	0,50
48	1,4350	107	1,4360	166	1,4350	48	0,00	107	0,00	166	0,50
49	1,4360	108	1,4365	167	1,4345	49	0,00	108	1,00	167	0,50
50	1,4360	109	1,4370	168	1,4350	50	0,50	109	0,00	168	0,50
51	1,4355	110	1,4360	169	1,4355	51	0,50	110	0,00	169	0,50
52	1,4355	111	1,4360	170	1,4350	52	0,50	111	0,00	170	0,00
53	1,4355	112	1,4350	171	1,4350	53	0,50	112	0,00	171	0,00
54	1,4360	113	1,4350	172	1,4350	54	1,00	113	0,00	172	0,00
55	1,4360	114	1,4355	173	1,4350	55	0,50	114	0,00	173	0,00
56	1,4360	115	1,4355	174	1,4355	56	0,50	115	0,00	174	0,00
57	1,4360	116	1,4360			57	0,50	116	0,50		
58	1,4345	117	1,4355			58	0,00	117	0,50		[mm]
59	1,4345	118	1,4350			59	1,00	118	0,50		

A6: Arbeitsablaufplan der Messung

Zeit	Tätigkeit
Messtagbeginn u. Ankunft BW-Gru 06:00	
06:15 - 07:45	Reinigung des Messgleises 410
08:00 - 10:00	Messung Gleismesslatte
10:00 - 16:00	Einzelpunktmessung Gleismesswagen
16:00 - 17:00	Kontinuierliche Messung Gleismesswagen
17:00 - 18:30	Pfeilhöhenmessung
18:30 - 19:15	Messung m. Gleismesswaage
19:15 - 20:30	Überprüfungsmessung auf Refraktionseinflüsse

Messtagende u. Abfahrt BW-Gru 21:30

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer, als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken habe ich, als solche kenntlich gemacht.

Berlin, 26.02.2016

Peter Gerndt