

Bernburg
Dessau
Köthen



Hochschule Anhalt (FH)
Anhalt University of Applied Sciences

emw

Fachbereich
Elektrotechnik, Maschinenbau
und Wirtschaftsingenieurwesen

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering (B. Eng.)

Vorname Name

Wei Shi

Elektro- und Informationstechnik, 2009, 4053581

Studiengang, Matrikel, Matrikelnummer

Thema:

**Prognosemodelle der Zustandsent-
wicklung des Gleisoberbaus zur Gleis-
instandhaltung gemäß EN 13848**

Prof. Dr. Igor Merfert

Vorsitzende(r) der Bachelorprüfungskommission

Prof. Dr. Igor Merfert

1. Prüfer(in)

Prof. Dr. Otto Kersten

2. Prüfer(in)

26. 04. 2013

Abgabe am

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst, in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht in einem anderen Studiengang als Prüfungsleistung vorgelegt wurde und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen, einschließlich der angegebenen oder beschriebenen Software, verwendet wurden.

Köthen, den 25.04.2013

Ort, Datum

Unterschrift des Studierenden

Sperrvermerk

Sperrvermerk: ja

nein

wenn ja:

Der Inhalt der Arbeit darf Dritten ohne Genehmigung der/des (Bezeichnung des Unternehmens) nicht zugänglich gemacht werden. Dieser Sperrvermerk gilt für die Dauer von 5 Jahren.

Köthen, den 25.04.2013

Ort, Datum

Unterschrift des Studierenden

Inhaltsverzeichnis

Selbstständigkeitserklärung.....	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
1 Einführung	1
1.1 Aufgabenstellung und Motivation.....	1
1.2 Aufbau der Arbeit.....	1
2 Grundlagen.....	2
2.1 Grundlagen des Gleises	2
2.2 Europäische Norm 13848.....	5
2.3 Instandhaltung	10
3 Statistische Methoden zu Prognosemodellen.....	13
3.1 Streuungsmaße, Varianz und Standardabweichung	13
3.2 Regressionsanalyse.....	14
3.3 Zeitreihenanalyse.....	17
4 Prognosemodelle.....	19
4.1 Einführung und Anwendungen von Matlab	19
4.2 Der Prozess der Erstellung von Prognosemodellen mithilfe der Software Matlab	19
5 Analyse der Qualität der Gleisgeometrie aufgrund der Prognosemodelle	42
5.1 Vergleich der Qualität der verschiedenen Gleisabschnitte.....	43
5.2 Vergleich der verschiedenen Einzelfehler.....	48
6 Zusammenfassung.....	50
6.1 Fazit.....	50
6.2 Abgrenzung	51
6.3 Ausblick.....	51
Literaturverzeichnis.....	52
Abbildungsverzeichnis	53
Tabellenverzeichnis	54
Anhang	55
Skript 13	55
Skript 14	56

1 Einführung

1.1 Aufgabenstellung und Motivation

Die Deutsche Bahn investiert jährlich über eine Milliarde Euro in die Instandhaltung von Schienennetz und Anlagen. Zur Sicherstellung der Leistungsfähigkeit der hochwertigen Schieneninfrastruktur setzt die DB Netz AG auf eine präventive Instandhaltung. Das ist eine wesentliche Voraussetzung für die hohe Betriebsqualität des Personen- und Güterverkehrs. Sie umfasst die Inspektion, Wartung, Entstörung und Instandsetzung der Schieneninfrastruktur. Die Inspektion umfasst eine regelmäßige Überwachung des Oberbaus. Dabei wird beurteilt, ob der derzeitige Zustand der Schieneninfrastruktur definierten Soll-Kriterien entspricht. Dafür werden in regelmäßigen Zyklen die Systemelemente wie z. B. der Oberbau (Schienen, Schwellen, Schotter usw.) kontrolliert. Die wesentlichen Maßnahmen der Inspektion sind Messungen und Prüfungen, bei denen zur objektiven Beurteilung spezielle Mess- und Prüffahrzeuge eingesetzt werden. Aus den ausgewerteten Ergebnissen der Inspektion werden notwendige Instandhaltungsmaßnahmen abgeleitet. [1]

Das Institut für Verkehrssystemtechnik im DLR e.V. (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) beschäftigt sich mit der Optimierung der Instandhaltung auf stark belasteten Güterverkehrsstrecken. Durch eine Erhöhung der Verfügbarkeit sollen eine Steigerung der Attraktivität und zusätzliche Kapazitäten für die Verlagerung des Personen- und Güterverkehrs auf die Schiene erreicht werden. [2]

Wegen des gleichen Ziels und Verantwortung kooperiert die Deutsche Bahn AG mit dem DLR und sie haben ein Projekt ausgearbeitet.

Das Problem ist, wie entwickelt sich der Zustand des Gleises und wann sind Fehler am Gleis aufgetreten. Die Aufgabe dieser Bachelorarbeit besteht in der Erstellung von Prognosemodellen zur Zustandsentwicklung des Gleisoberbaus. Die Motivation ist es, zu untersuchen, welche Veränderungen in den Zeitreihen von charakteristischen Messdatenmustern zu erwarten sind. Im Rahmen der Instandhaltungsplanung werden die Ergebnisse verwendet, um die optimale Instandhaltungszeit und -Position festzulegen. Dadurch kann die überflüssige Regelinspektion entsprechend abgebaut werden. Dadurch können Zeit und Geld eingespart werden.

1.2 Aufbau der Arbeit

Das Thema dieser Arbeit ist interdisziplinär und umfasst das Bahnwesen, die Statistik sowie Informationstechnik (Matlab-Programmierung).

Kapitel 2 besteht aus drei Teilen. Es werden Grundlagen des Gleises, Aufgaben und Aufbau des Gleises, speziell der Schotteroberbau und der wichtigste Einflussfaktor auf die Gleisqualität vorgestellt. Darüber hinaus erfolgt ein Überblick über die EN (Europäische Norm) 13848, gemäß dieser die Prognosemodelle gebildet werden, und es werden Instandhaltungsmaßnahmen der Gleise erläutert.

Kapitel 3 beschreibt die Grundlagen der statistischen Methoden zu Prognosemodellen. Dieses Kapitel umfasst vier Teile: Streuungsmaße, Varianz und Standardabweichung, Regressionsanalyse sowie Zeit-

reihenanalyse. Mit den statistischen Methoden werden die Messdaten erarbeitet und die Prognosemodelle erstellt.

Kapitel 4 schildert das Verfahren der Prognosemodellerstellung mit Skripten und Bildern. Zwei Prognosemodelle werden erstellt. Anhand des ersten Modells kann man prognostizieren, wann der Zustand des Gleisoberbaus den Grenzwert erreichen wird und wann eine Instandhaltung geplant werden muss. Mithilfe des zweiten Prognosemodells ist es möglich, Einzelfehler des Gleisoberbaus herauszufinden. Diese werden beobachtet, wie sie sich entwickelt.

Kapitel 5 veranschaulicht Analyse und Vergleich der Qualitäten von verschiedenen Gleisabschnitten aufgrund der Modelle.

Kapitel 6 gibt eine Zusammenfassung, das Fazit, eine Abgrenzung und einen Ausblick enthält.

2 Grundlagen

2.1 Grundlagen des Gleises

2.1.1 Aufgaben und Aufbau des Gleises

Die Qualität des Gleises kann mithilfe der Messdaten aus dem Messfahrzeug ermittelt werden. Die Aufgaben und der Aufbau des Gleises bieten die Grundlagen für die Theorie für die Erstellung der Prognosemodelle.

Die Aufgaben des Gleises sind folgende, die vertikalen und horizontalen Fahrzeugkräfte aufzunehmen, einen guten Fahrkomfort sicherzustellen, Entgleisung der Fahrzeuge zu vermeiden und eine hohe Verfügbarkeit für den Transport zu gewährleisten. Wegen dieser hohen Anforderungen spielt die Beobachtung der Zustandsentwicklung des Gleises eine ganz wichtige Rolle. [3]

Wie in Abbildung 1 dargestellt wird, besteht das Gleis aus drei Teilen: dem Oberbau, dem Unterbau und dem Untergrund. In dieser Arbeit wurde nur der Oberbau analysiert. Der Oberbau besteht aus verschiedenen Komponenten, zum Beispiel Schienen, Schwellen, Befestigungsmittel und Schotter. Die Untersuchung des Schotters ist wesentlichster Bestandteil dieser Arbeit. Die Qualität des Oberbaus hängt von der Oberbaukonstruktion, dem Schottermaterial, der Bettungsstärke, dem Unterbauplanum und der Planumsschutzschicht ab. [4] [5]

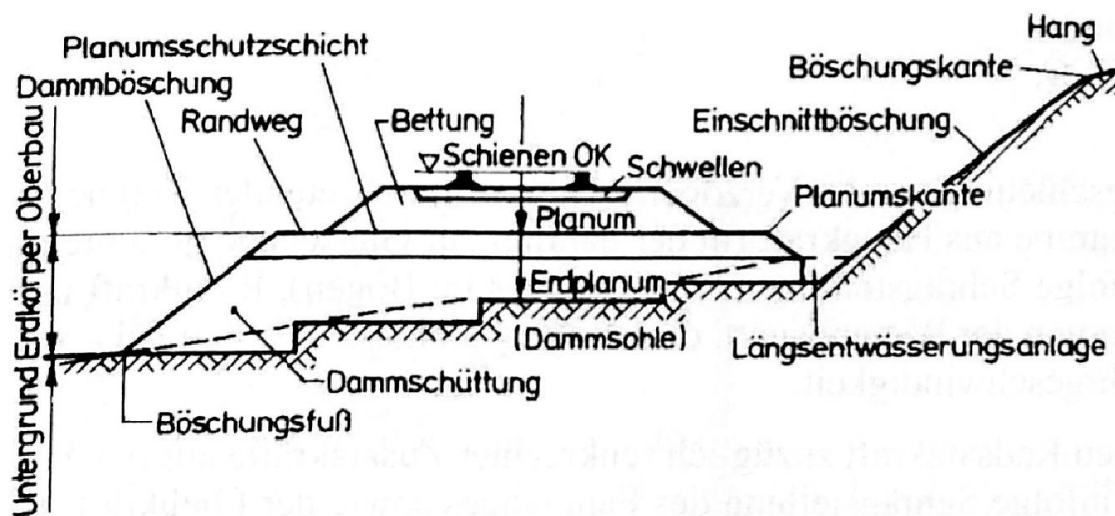


Abbildung 1: Aufbau des Gleises [4]

Die Schienen nehmen alle auftretenden vertikalen und horizontalen, statischen und dynamischen Kräfte auf und leiten sie in die untergelegten Querschwellen. Eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Schienen und Schwellen unter Verwendung von Schienenbefestigungsmitteln ist erforderlich. Die großen Auflageflächen der Schwellen reduzieren die Flächenpressungen, so dass diese vom Schotterbett aufgenommen, weiter verringert und in den Unterbau übertragen werden. Die horizontalen Längskräfte werden in der Auflagerfläche der Schwellen durch Reibung und von den Schwellenseiten auf den Schotter unmittelbar übertragen. Die Bettung trägt die gesamten Kräfte des betrieblichen Fahrzeuges. Dabei wird das System Schiene/Schwelle/Bettung als Ganzes elastisch wirksam. [4] Es muss eine sichere Betriebsabwicklung gewährleisten und die immer größeren Achslasten und höheren Geschwindigkeiten tragen. Nur die hohe Qualität jeder Komponente sowie die gute Verbindung und das Zusammenwirken der Komponenten ergeben ein dauerhaftes instandhaltungsarmes Gleis.

2.1.2 Schotteroberbau: Der größte Einflussfaktor auf die Gleisqualität

Der Oberbauzustand ist ein ganz wichtiger Faktor, der die Messdaten und die Ergebnisse der Prognosemodelle beeinflusst. Nur ein guter Zustand des Oberbaus gewährleistet einen hohen Fahrkomfort und die Realisierung hoher Geschwindigkeiten und Achslasten.

In diesem Abschnitt werden der Schotteroberbau in seinem Aufbau und seiner Funktion, sowie die größte Ursache der Entstehung des Gleiseinzelfehlers Hohllage beschrieben. Der Schotteroberbau besteht aus Schwelle, Schotterbett, Planum und Schutzschicht. Die Bettungsschicht zwischen Schwellenunterkante und Planum beträgt üblicherweise 30cm. Bei einer Erhöhung der Schotterschicht wird die Elastizität des Oberbaus vergrößert und damit wird die Lastverteilung auf das Planum und über die

Schienen verbessert. (Abbildung 2). Das Schotterbett erfüllt verschiedene Funktionen: die vertikalen Schwellenbewegungen zu beschränken und die Sicherung des Fahrzeugs zu gewährleisten; die Last von den Schwellen zum Untergrund zu verteilen; die Einfederung und Dämpfung der Fahrzeugüberfahrt zu ermöglichen; Drainage und Frostsicherheit des Oberbaus zu gewährleisten. [6] [7]

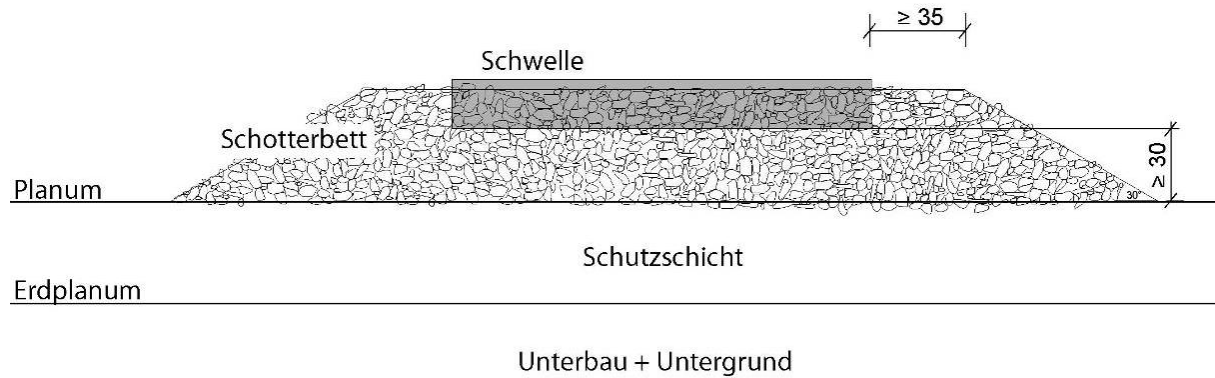


Abbildung 2: Der Aufbau des Schotteroberbaus [8]

Anschließend wird die Hohllage, die die Gleislagefehler verursacht, erläutert. Aber zuvor wird die Verformung des Schotters dargestellt. Schotter ist gebrochenes Gestein, das eine hohe Druck- und Abriebfestigkeit sowie Verwitterungsbeständigkeit haben muss. Durch Materialeintrag aus anderen Schichten kann es zu einer Füllung der Poren kommen und durch das Abrunden der Kanten die Festigkeit abgebaut werden. Durch Abrieb und Verwitterung entstehen kleinere Körner. Die Verformung des Schotters wird in Abbildung 3 verdeutlicht. [8]

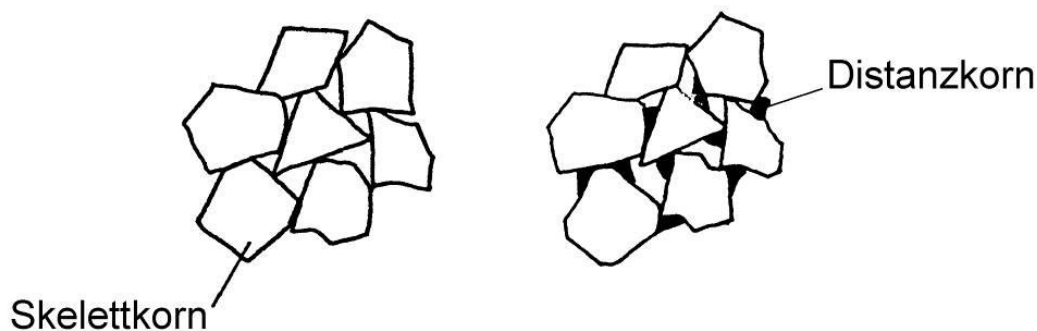


Abbildung 3: Verformung des Schotters [9]

Durch die Verformung von großflächigen Schotter tritt eine Hohllage, auf die ein Gleislagefehler zurückgeführt wird. In Abbildung 4 ist es deutlich zu sehen, dass es eine Lücke zwischen der Schwelle und Schotterschicht entsteht. Bei der Messfahrzeugüberfahrt rüttelt das Fahrzeug und der Zustand wird durch den Sensor, mit dem das Fahrzeug ausgestattet ist, erfasst und in Form von Messwerten aufgenommen. Die Längshöhe von Messdaten äußert im Wesentlichen die Lücke zwischen der

Schwelle und der Schotterschicht, nämlich der Abstand der Hohllage. Die Relation zwischen dem Abstand und der Zeitveränderung ist wahrscheinlich die direkte Proportion, und die Annahme wird im Prognosemodell der Einzelfehleranalyse (im Kapitel 5) verifiziert. [8]

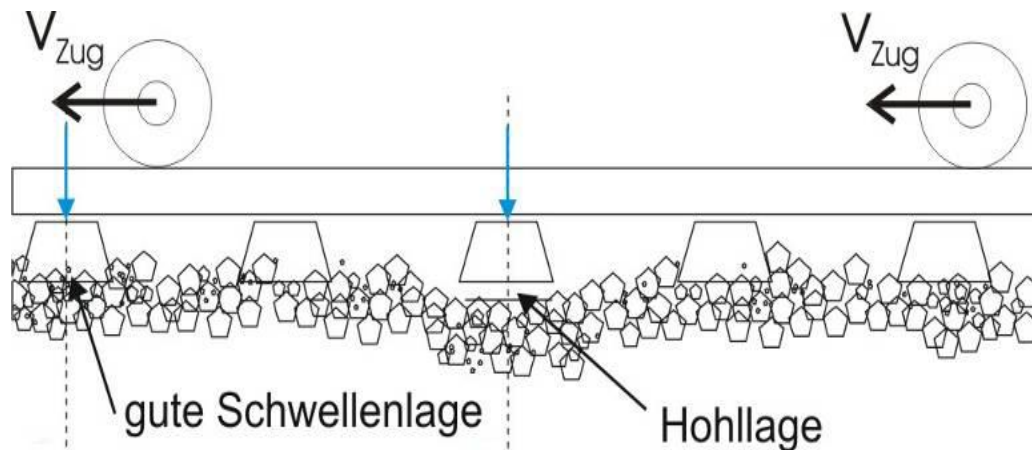


Abbildung 4: Vergleich einer guten Schwellenlage mit einer Hohllage [8]

2.2 Europäische Norm 13848

2.2.1 Überblick über die Norm

Die Europäische Norm 13848 bildet Grundlagen für weitere Argumentationen. Die Norm wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 256 am 7. Februar 2008 angenommen. Sie wurde nach Zusammenfassung von Erfahrungswerten durch jahrelange Entwicklung am Gleis erstellt. Mithilfe der Europäischen Norm wird die Qualität des Gleiszustandes beurteilt. Sie legt die Mindestanforderungen für die Beurteilungsmaßstäbe der Qualität der Gleisgeometrie fest und definiert die Sicherheitsgrenzen für verschiedene Parameter. [10]

2.2.2 Beurteilungsmaßstäbe der Qualitätsstufen und Sicherheitsgrenzen

Die Norm unterscheidet im Wesentlichen drei verschiedenen Grenzwerte: Aufmerksamkeitsgrenze (AL), Eingriffsgrenze (IL) und Sicherheitsgrenze (IAL). Im Einzelnen sind diese Werte folgendermaßen zu verstehen. Die Aufmerksamkeitsgrenze (AL) bedeutet, wird der Wert überschritten, ist die Analyse des Gleiszustandes durchzuführen und eine Instandhaltungsplanung zu berücksichtigen. Eingriffsgrenze (IL) bedeutet, wird der Wert überschritten, müssen Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden, damit die Sicherheitsgrenze nicht vor der nächsten Inspektion erreicht wird. Sicherheitsgrenze (IAL) bedeutet, wird der Wert überschritten, sind Maßnahmen dringend erforderlich, um das Risiko einer Entgleisung zu reduzieren. Die Maßnahmen können z. B. Sperren des Gleises, Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit und Korrektur der Gleisgeometrie sein. [10]

- Beurteilungsmaßstäbe für die allgemeine Gleislage (Standardabweichung)

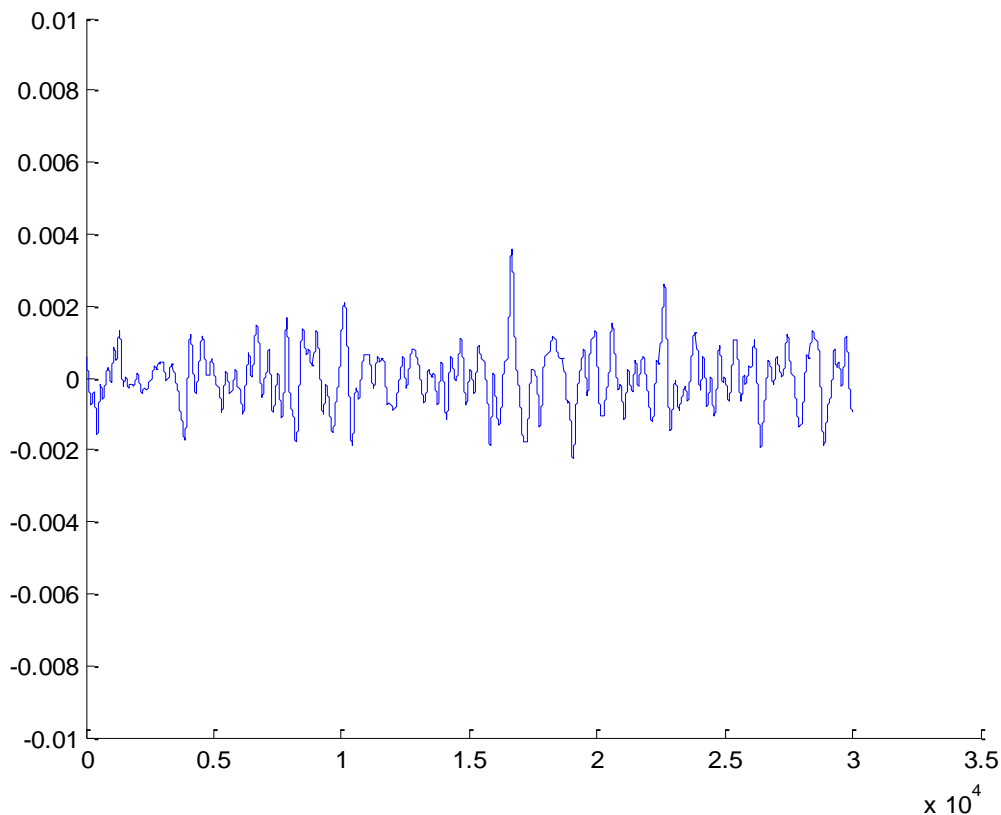


Abbildung 5: Erklärung für die allgemeine Gleislage

Diese Beurteilung wird gibt eine grundsätzlich Indikation über den allgemeinen Zustand des Gleises. Beurteilung für die allgemeine Gleislage basiert auf die Qualität einer Gleisstrecke. Warum ist Standardabweichung ein gutes Maß für die allgemeine Gleislage, wird in nächstem Kapitel erklärt.

Die EN 13848 gibt Grenzwerte für zahlreiche Messparameter, wie Spurweite, Längshöhe, Verschwindung oder Überhöhung vor. Weil sich meine Bachelorarbeit auf die Längshöhe bezieht, werden im Folgenden nur diejenigen Tabellen, die mit den Prognosemodellen in Zusammenhang stehen, eingeführt.

Die Werte sind abhängig von der Geschwindigkeit gegeben. Nach den Tabellen unten sind zu sehen, dass je größer die Geschwindigkeit ist, desto größer die Grenzwerten sind, weil je größer die Geschwindigkeit die Fahrtgeschwindigkeit ist, desto die Risiko von Entgleisung und höhere Anforderung an der Gleisqualität ist.

Die Beurteilungsmaßstäbe sind in

Tabelle 1 dargestellt:

Geschwindigkeit in km/h	Standardabweichung in mm
	D1
$v \leq 80$	2,3 bis 3,0
$80 < v \leq 120$	1,8 bis 2,7
$120 < v \leq 160$	1,4 bis 2,4
$160 < v \leq 230$	1,2 bis 1,9
$230 < v \leq 300$	1,0 bis 1,5

Tabelle 1: Längshöhe - AL – Standardabweichung nach EN 13848 [10]

Geschwindigkeit km/h	Standardabweichung mm
$v \leq 80$	3,1
$80 < v \leq 120$	2,7
$120 < v \leq 160$	2,2
$160 < v \leq 230$	2,0
$230 < v \leq 300$	1,6

Tabelle 2: Längshöhe – SRA - Standardabweichung nach Richtlinie 821 [9]

Tabelle 2 ist ein Vergleich nach Richtlinie 821 aus Konzern DB 821. Der Beurteilungsmaßstab SRA entspricht AL. Nach dem Vergleich der beiden Tabellen gibt es nur geringe Unterschiede zwischen den beiden Normen. Die Grenzwerte gemäß EN 13848 sind Grenzwerte und gemäß Richtlinie 821 sind eigene Werte. Ein Unterschied, der betrachtet werden muss, ist folgender, gemäß EN 13848 ist die Standardabweichung von einer 200m Gleisstrecke berechnet und damit die Gleisqualität beurteilt, aber gemäß Richtlinie 821 wird sie von einer 50m Gleisstrecke berechnet.

- Beurteilungsmaßstäbe für Einzelfehler

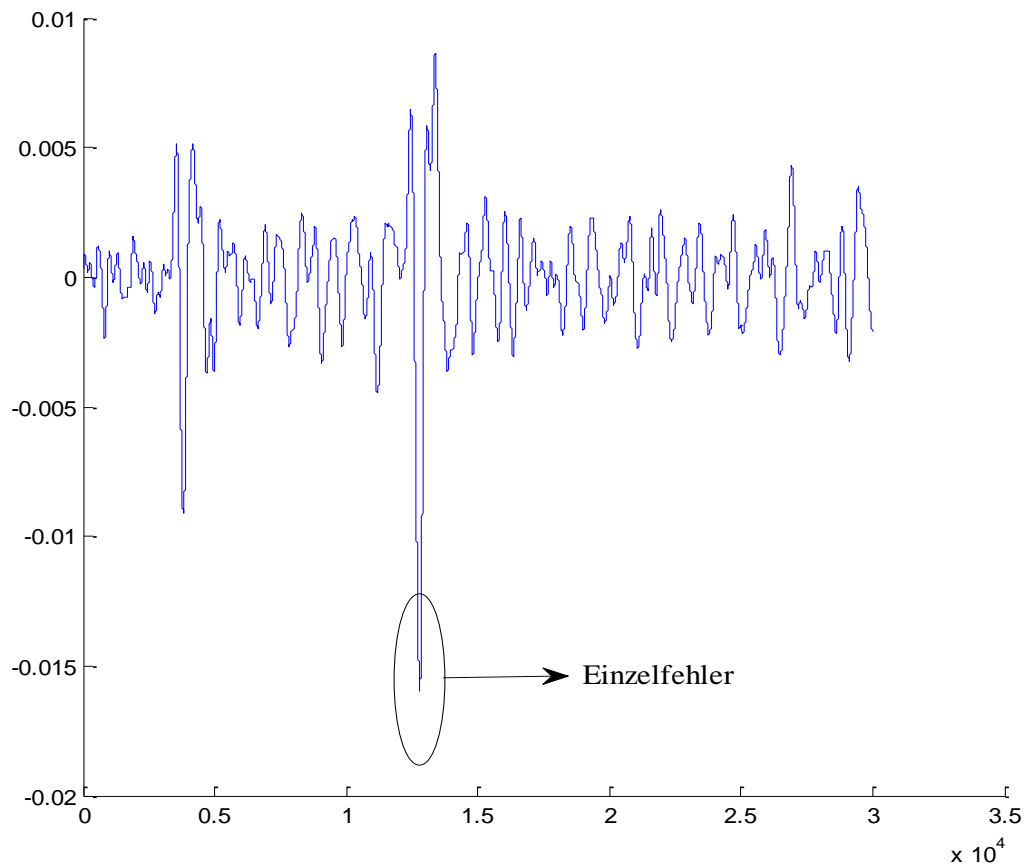


Abbildung 6: Darstellung eines Einzelfehlers

Ein Einzelfehler ist anhand der Abbildung 6 gut dargestellt. Eine Beurteilung eines Einzelfehlers basiert auf der Betrachtung des Maximums der Einzelamplitude. Die Ursache der Entstehung von Einzelfehlern wird im letzten Kapitel erklärt. Das Fahrzeug rüttelt bei einem Einzelfehler sehr stark. Das ist sehr gefährlich und stellt ein hohes Entgleisungsrisiko dar. Die Beseitigung von Einzelfehlern ist wirtschaftlich teurer als die Instandhaltung der allgemeinen Gleislage.

Die Beurteilungsmaßstäbe sind in nachfolgender

Tabelle 3 ersichtlich:

Geschwindigkeit km/h	Mittelwert Spitze mm AL		Mittelwert Spitze mm IL		Mittelwert Spitze mm IAL	
	Wellenlängenbereich		Wellenlängenbereich		Wellenlängenbereich	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2
$v \leq 80$	12 bis 18	N/A	17 bis 21	N/A	28	N/A
$80 < v \leq 120$	10 bis 16	N/A	13 bis 19	N/A	26	N/A
$120 < v \leq 160$	8 bis 15	N/A	10 bis 17	N/A	23	N/A
$160 < v \leq 230$	7 bis 12	14 bis 20	9 bis 17	18 bis 23	20	33
$230 < v \leq 300$	6 bis 10	12 bis 18	8 bis 12	16 bis 20	16	28

Tabelle 3: Längshöhe - AL & IL & IAL - Einzelfehler - Mittelwert Spitze [10]

Geschwindigkeit km/h	SRA	SR100	SRLim
$v \leq 80$	12	15	21
$80 < v \leq 120$	10	13	17
$120 < v \leq 160$	8	11	14
$160 < v \leq 230$	6	9	11
$v > 230$	5	7	9

Tabelle 4: Beurteilungsmaßstäbe für Einzelfehler nach Richtlinie 821 [11]

Tabelle 4 ist wieder ein Vergleich nach Richtlinie 821. Die Grenzwerte SRA, SR100 und SR100 entsprechen jeweils AL, IL und IAL von EN 13848.

Wenn die Grenzwerte für die Instandhaltung überschritten werden, müssen die notwendigen Arbeiten geplant und durchgeführt werden. Wenn der Gefahrgrenzwert überschritten wird, dann muss die Fehlerstelle entweder sofort behoben werden oder aber es muss eine Langsamfahrstelle eingerichtet werden. [10]

2.3 Instandhaltung

2.3.1 Instandhaltung des Oberbaus

Nachdem der Grenzwert erreicht wurde, muss eine Instandhaltung dieses Gleisabschnitts geplant werden. Wie im Kapitel 2 erwähnt, übt der Zustand des Oberbaus einen großen Einfluss auf die Gleisqualität aus, dabei spielt die Instandhaltung des Oberbaus eine große Rolle.

Instandhaltung bedeutet Maßnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung des Soll-Zustandes sowie zur Feststellung und Beurteilung des Zustandes von technischen Mitteln eines Systems. Instandhaltung beinhaltet im Wesentlichen drei Teile: Wartung, Inspektion und Instandhaltung.

- Wartung bedeutet Wahrung des Soll-Zustandes, was die Pflege der Vegetation, Entwässerung, Reinigung der Schienenoberflächen, Schmieren von Weichen betrifft.
- Inspektion bedeutet Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustandes und umfasst Messfahrten, Handmessungen, Streckenfahrten und Begehungen.
- Instandhaltung bedeutet Maßnahmen zur Wiederherstellung des Soll-Zustandes und umfasst die Beseitigung von Einzelfehlern, maschinelle Stopfarbeiten, Schleifen, Umbau von Gleisen und Weichen (Wechsel von Schwellen und/oder Schienen), Reinigung, Austausch oder Ergänzung der Bettung. [4]

2.3.2 Stopfung und Einzelfehlerbeseitigung

Die Instandhaltungsmaßnahmen, im Wesentlichen Stopfung ist sehr wichtig und eine übliche Maßnahme, um die Gleislageveränderung zu korrigieren. Beim Stopfen des Gleises werden Schotterkörner in waagrechter Richtung unter die Schwelle gedrückt. Dadurch wird die korrigierte Gleislage in richtige Höhe gebracht. [12] Bei ausreichender Hebung werden unter dem Gleisrost definierte Auflager hergestellt. Die Hohllage unter der Schwelle wird durch Stopfung verfüllt, und bei einer Hebung wird die Schwellenauflage verdichtet. Bei diesem Vorgang kommt es zu einer Umlagerung der Schotterkörner und nur zu geringfügigen Absplitterung. [5]

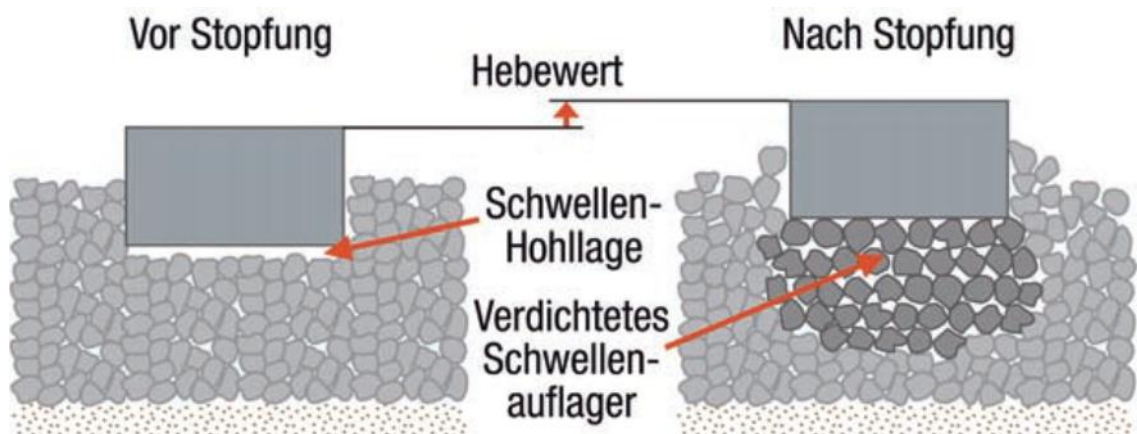


Abbildung 7: Wirkung der Stopfung [5]

Abbildung 8 erklärt das Durchführen einer Stopfung.



Abbildung 8: Stopfung [13]

Wenn ein Einzelfehler vorhanden ist, muss dieser beseitigt werden, andernfalls ist die Geschwindigkeit auf mindestens $0,7 \times$ zulässige v (Geschwindigkeit) zu reduzieren. Ist bei einer Überschreitung des Grenzwertes die Instandsetzung der Gleislage bis zur nächsten Regelinspektion nicht möglich, muss die Geschwindigkeit soweit reduziert werden, dass der Messwert für diese Geschwindigkeit eingehalten wird. Je früher Einzelfehler an Störstellen beseitigt werden, umso geringer sind die Betriebsbehinderungen. [14]

Einzelfehlerbehebung umfasst manuelle und maschinelle Arten. Die manuelle Einzelfehlerbehebung findet im gesperrten Gleis statt. Üblicherweise erfolgt die Umsetzung des Personals zur Einsatzstelle mittels Straßenfahrzeug oder, wenn dies nicht möglich ist, mit Schienenkleinwagen. Entsprechend der Fehlerlänge und den betrieblichen Verhältnissen werden acht bis neun Arbeitskräfte eingesetzt, um die Einzelfehler zu beseitigen. [14]

Die maschinelle Beseitigung der Einzelfehler in der Gleislage ist viel effizienter und wirtschaftlicher gegenüber manueller Technik. Das Fachpersonal wird durch Spezialmaschinen zur automatisierten Einzelfehlerbehebung ersetzt. Positive Auswirkungen der maschinellen Einzelfehlerbeseitigung gegenüber der manuellen Einzelfehlerbeseitigung ergeben sich z. B. durch die Reduzierung der Instandsetzungskosten, Verringerung des Zeitaufwandes und Personalressourcen sowie Anhebung des Qualitätsniveaus. [14]

2.3.3 Andere Einflussfaktoren auf Gleisqualität und Instandhaltungsarbeiten

Instandhaltung ist eine Gegenmaßnahme, um Fehler zu beseitigen. Die Häufigkeit der Instandhaltung gibt Aufschluss über Auftreten und Vorkommen der Fehler. Daher lohnt hier eine nähere Betrachtung. Neben dem Zustand des Oberbaus beeinflussen auch viele andere Faktoren die Geschwindigkeit, die Kapazität des Fahrzeugs und die Qualität des Gleises. Daraus ergeben sich die Instandhaltungsarbeiten. In dieser Arbeit werden noch zwei wichtige Faktoren kurz vorgestellt.

Nach den unterschiedlichen Höchstgeschwindigkeiten ist der Regelinspektionsabstand auch unterschiedlich.

Tabelle 5 verdeutlicht die Beziehung zwischen Regelinspektionsabstand und der Höchstgeschwindigkeit.

Hg ≤ 80 km/h	80 km/h ≤ Hg ≤ 120 km/h	120 km/h ≤ Hg ≤ 160 km/h	160 km/h ≤ Hg ≤ 230 km/h	Hg ≥ 230 km/h
Alle 18 Monate	Alle 12 Monate	Alle 6 Monate	Alle 3 Monate	Alle 3 Monate

Tabelle 5: Regelinspektionsabstand nach verschiedenen Höchstgeschwindigkeiten (Hg) [11]

Nach verschiedenen Kapazitäten sind Instandhaltungszyklen und -maßnahmen unterschiedlich.

Tabelle 6 verdeutlicht die Beziehung zwischen Instandhaltungszyklen und -maßnahmen mit Kapazitäten.

Kapazität (Mio. t)	Instandhaltungszyklen (Jahre)	Instandhaltungsmaßnahmen
20-30	1-3	Schleifen
40-70	4-5	Stopfen
100-500	10-30	Befestigungsmittel
150-300	12-15	Reinigung
200-500	20-30	Schottererneuerung
250-600	20-30	Holzschwellenerneuerung
300-1000	10-15	Schienenenerneuerung
350-700	30-40	Betonschwellenerneuerung
>500	>40	Sanierung Untergrund

Tabelle 6: Beziehung zwischen Instandhaltungszyklen und -maßnahmen mit Kapazitäten [3]

3 Statistische Methoden zu Prognosemodellen

3.1 Streuungsmaße, Varianz und Standardabweichung

Die Standardabweichung ist ein Beurteilungsmaßstab der Qualität der allgemeinen Gleisgeometrie, und in diesem Kapitel wird der Streuungsmaßstab Standardabweichung mathematisch erklärt.

Das Lagemaß zum Beispiel der Mittelwert gibt nur eine Tendenz einer Verteilung an, aber das Ausmaß der Streuung einer Verteilung kann nicht ausgedrückt werden. Daraus ergeben sich Streuungsmaße. Die nachfolgende Abbildung beschreibt Verteilungen mit verschiedenen Streuungen.

Das am Häufigsten verwendete Streuungsmaß ist die Varianz. Varianz bedeutet die mittlere quadratische Abweichung einer beobachteten statistischen Reihe X vom arithmetischen Mittel. [15].

$$\sigma^2 := \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x - \bar{x})^2$$

(1)

Die Definition der Standardabweichung ergibt sich aus der Varianz und bedeutet die positive Wurzel aus der Varianz:

$$\sigma := +\sqrt{\sigma^2} \quad (2)$$

[16]

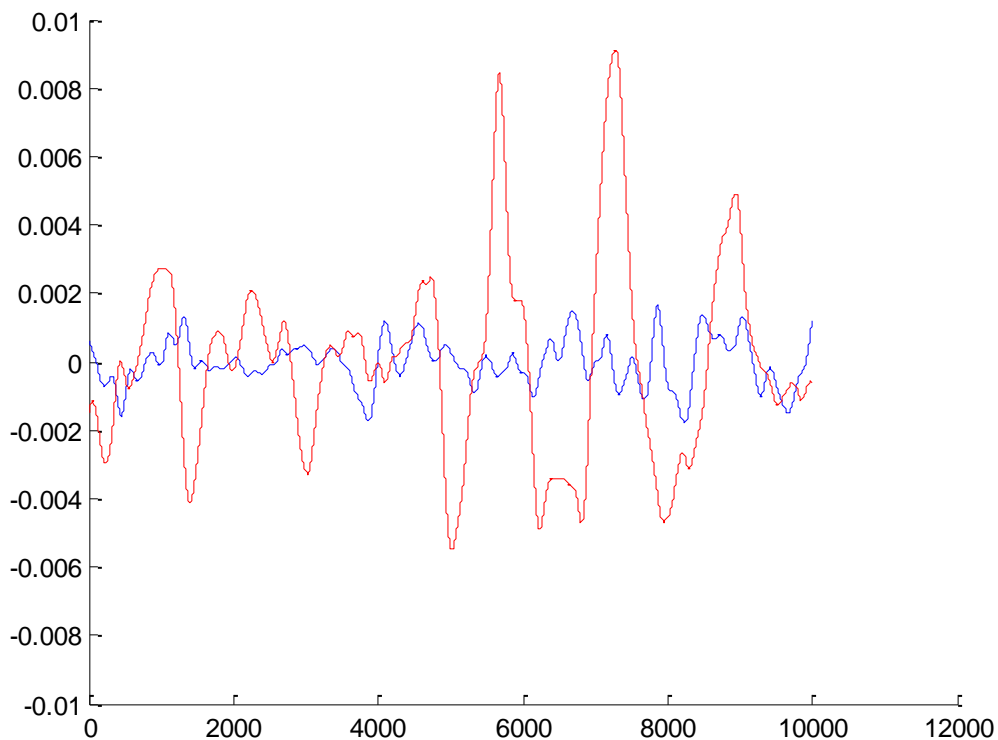


Abbildung 9: Vergleich von zwei Gleisabschnitten mit verschiedenen Standardabweichungen

Mithilfe der Streuungsmaße wird dargestellt, wie groß die durchschnittliche Abweichung vom Mittelwert ist, über welchen Bereich sich die Messdaten erstrecken und wie stark die Messdaten schwanken. Abbildung 9 zeigt einen Vergleich von zwei Gleisabschnitten mit verschiedenen Standardabweichungen. Die Standardabweichung von Längshöhen eines Gleisabschnitts in blauer farbiger Linie ist deutlich viel kleiner als die in roter farbiger Linie. Das bedeutet auch, die Fahrt auf Gleisabschnitt in blauer farbiger Linie ist relativ ruhiger als auf Gleisabschnitt in roter farbiger Linie. Und das Fahrzeug schwankt vergleichsweise stärker auf Gleisabschnitt in roter farbiger Linie. Wegen dieser Vorteile der Streuungsmaße ist die Standardabweichung gemäß EN 13848 ein wichtiger Beurteilungsmaßstab über die Qualität der allgemeinen Gleisgeometrie.

3.2 Regressionsanalyse

In den Prognosemodellen werden zwei wichtige statistische Analysemethoden angewendet, die Regressionsanalyse und die Zeitreihenanalyse. Die Zeitreihenanalyse wird im nachfolgenden Teil behandelt.

Die Regressionsanalyse ist eines der flexibelsten und am häufigsten eingesetzten statistischen Analysemethoden. Mithilfe der Regressionsanalyse kann herausgefunden werden, ob eine Beziehung zwischen den verschiedenen Variablen besteht, und diese dann analysieren. [17] Sie wird in dieser Arbeit eingesetzt, um Zusammenhänge zwischen Messdaten und der Zeit beschreiben und erklären zu können, sowie die Messdaten zu schätzen bzw. zu prognostizieren.

Die primäre Anwendung der Regressionsanalyse besteht darin, die Kausalbeziehungen zwischen der Variablen zu untersuchen. Im einfachsten Fall lässt sich eine solche Beziehung wie folgt ausdrücken: [17]

$$Y = f(X)$$

Zur Schätzung der abhängigen Variablen Y wird folgende Funktion geschrieben:

Regressionsfunktion

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X \quad (3)$$

mit \hat{Y} = Schätzung der abhängigen Variablen Y

b_0 = konstantes Glied

b_1 = Regressionskoeffizient

X = unabhängige Variable

Für einzelne Werte von \hat{Y} und X werden geschrieben:

$$\hat{y}_k = b_0 + b_1 x_k \quad (k = 1, 2, 3 \dots, K) \quad (4)$$

x_k ist Messwert, und \hat{y}_k ist Schätzwert. Die Funktion bildet eine Gerade und wird daher auch als Regressionsgerade bezeichnet. Abbildung 10 zeigt den Verlauf der gesuchten Geraden. Eine Gerade wird generell durch zwei Parameter bestimmt, das konstante Glied b_0 und den Regressionskoeffizienten b_1 . Wenn $X = 0$ ist, beträgt \hat{Y} b_0 und markiert den Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der Y-Achse

des Koordinatensystems. Abbildung 10 ist ein Beispiel, die Regressionsgerade schneidet hier die Y-Achse am Wert b_0 und b_0 beträgt 0,25. Dieses Modell ist ein Prototyp der Prognosemodelle in Kapitel 4. [17]

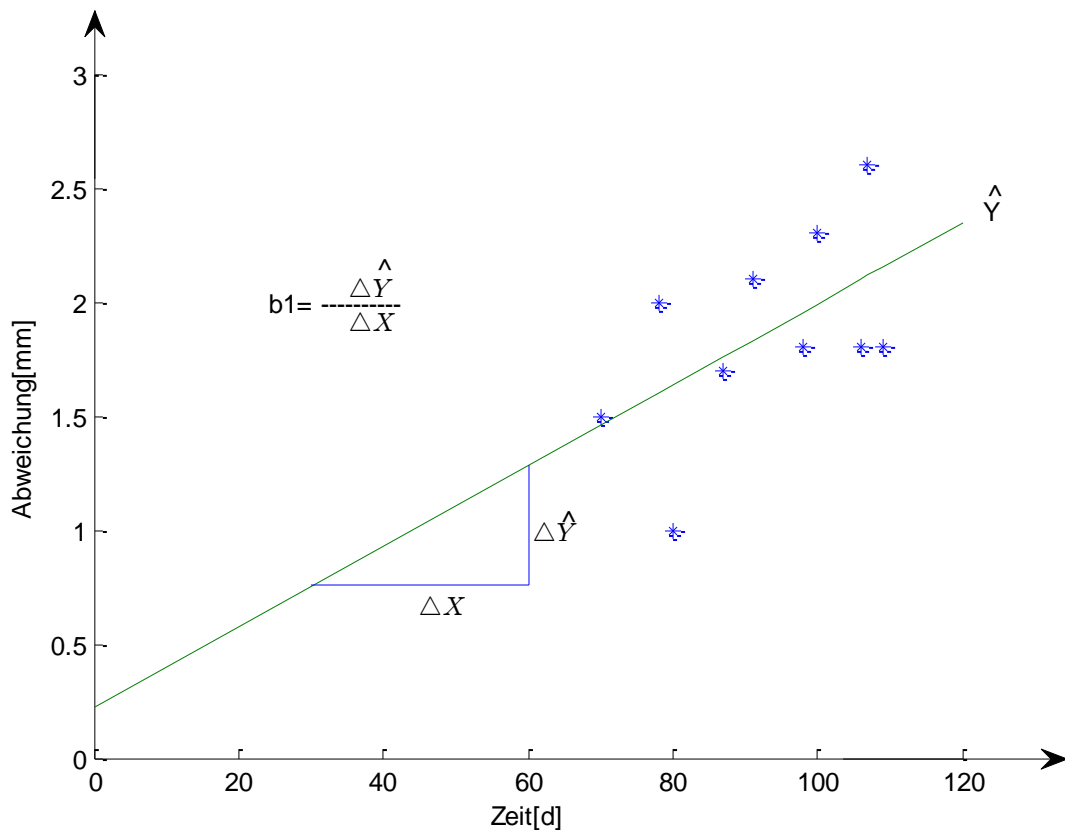


Abbildung 10: Regressionsgerade und -funktion (Skript siehe Anhang Skript 13)

Der Regressionskoeffizient b_1 gibt die Steigung oder Neigung der Regressionsgeraden an. Es gilt [17]:

$$b_1 = \frac{\Delta \hat{Y}}{\Delta X} \quad (5)$$

Der Regressionskoeffizient hat eine wichtige Bedeutung, denn er gibt an, um wie viele Einheiten sich Y vermutlich ändert, wenn sich X um eine Einheit ändert. Er bildet somit ein Maß für die Wirkung von X zu Y .

Wie in Abbildung 10 dargestellt, bestehen Abweichungen zwischen der Regressionsgeraden und den Messwerten. Es existiert keine Gerade, auf der alle beobachteten Werte liegen. Bei der Regressionsanalyse geht es darum, einen Verlauf der gesuchten Geraden zu finden, der sich der empirischen Punkterverteilung möglichst gut anpasst, d. h. der die Abweichung minimiert. Die Abweichungen lassen sich durch eine Variable e repräsentieren, deren Werte e_k als Residuen bezeichnet werden.

Residualgröße (siehe Abbildung 11)

$$e_k = y_k - \hat{y}_k \quad (k = 1, 2, 3, \dots, K) \quad (6)$$

mit

y_k = Messwert der abhängigen Variablen Y für x_k

\hat{y}_k = ermittelter Schätzwert von Y für x_k

e_k = Abweichung des Schätzwertes vom Messwert

K = Zahl der Messwerte

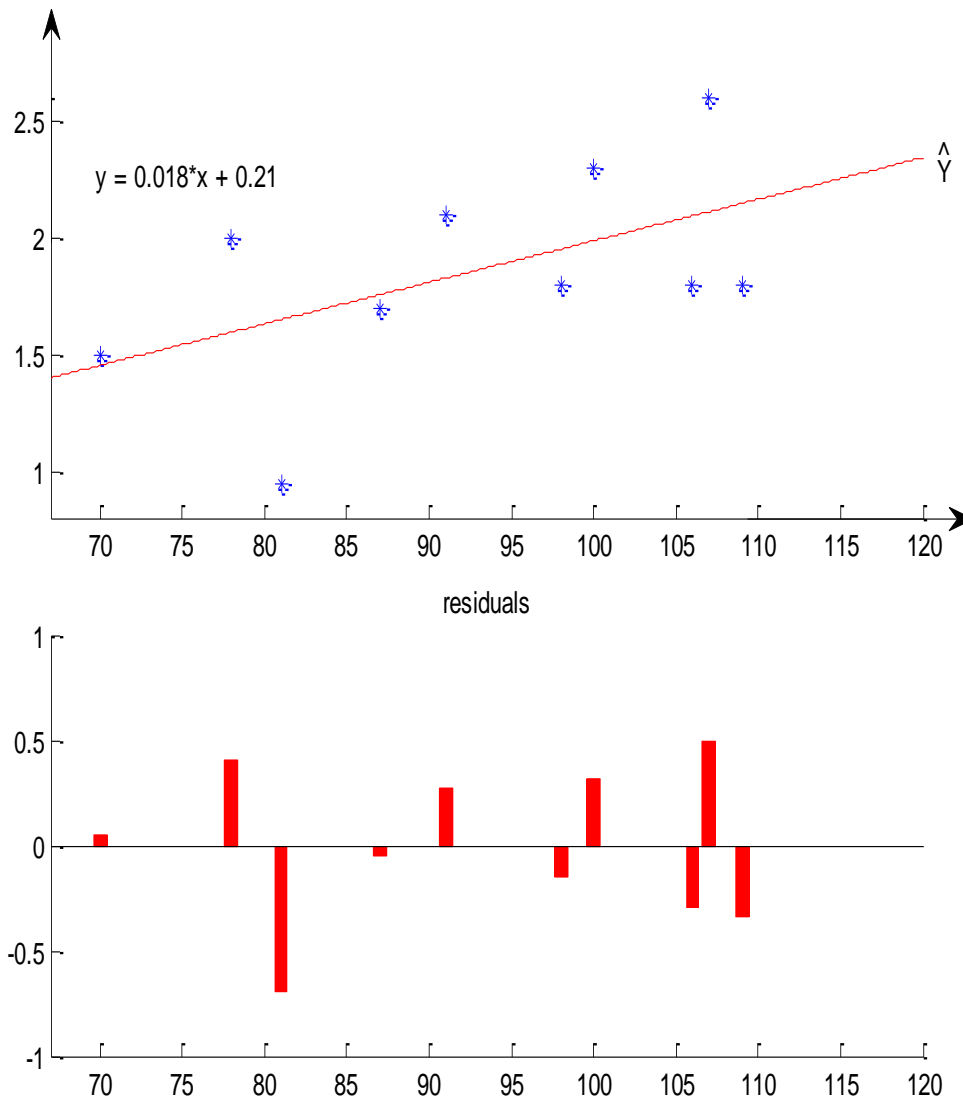


Abbildung 11: Beispiel der Residualgröße

Durch Umformung von (6) und Einsatz von (3) ergibt sich folgende Funktion:

$$Y = \hat{Y} + e$$

$$= b_0 + b_1 X + e$$

Für die einzelnen Messwerte gilt:

$$y_k = b_0 + b_1 x_k + e_k \quad (k = 1, 2, 3 \dots, K)$$

Mithilfe der Regressionsanalyse ist es möglich, eine lineare Funktion zu finden, für die die Abweichungen zwischen Schätzwerten und Messwerten möglichst klein sind. Wie in den Abbildungen dargestellt, ist diese eine Gerade, die so verläuft, dass die Punkte möglichst nahe an dieser Geraden liegen. Dieses Ziel lässt sich durch folgende Funktion präsentieren [17]:

Zielfunktion der Regressionsanalyse

$$\sum_{k=1}^K e_k^2 = \sum_{k=1}^K [y_k - (b_0 + b_1 x_k)]^2 \rightarrow \min!$$

(7)

Die unbekannt Parameter b_0 und b_1 sind so zu bestimmen, dass die Summe der quadrierten Residuen minimal wird. Diese Art der Schätzung wird als die „Methode der kleinsten Quadrate“ bezeichnet. Diese Methode gehört zu den wichtigsten statistischen Schätzverfahren. Durch die Quadrierung der Abweichungen der Messwerte von den Schätzwerten werden größere Abweichungen stärker gewichtet, und es wird vermieden, die positiven und negativen Abweichungen sich zu kompensieren. [17]
Durch die Ableitung von den Variablen b_0 und b_1 ermittelt man das Minimum.

Die Lösung lautet:

$$b_1 = \frac{(\sum_{k=1}^K x_k y_k) - K \bar{x} \bar{y}}{(\sum_{k=1}^K x_k^2) - K (\bar{x})^2}$$

(8)

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} \quad (9)$$

Dabei ist $\bar{x} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_k$ das arithmetische Mittel der x -Werte, \bar{y} entsprechend.

Die Regressionsgleichung basiert auf der „Methode der kleinsten Quadrate“. Mithilfe der Software Matlab ist die Regressionsgleichung viel einfacher zu lösen und man spart einen umfangreichen Rechenprozess.

3.3 Zeitreihenanalyse

Ein Spezialfall der Regressionsanalyse ist die Zeitreihenanalyse, die in den Prognosemodellen angewendet wird. Sie untersucht die Abhängigkeit einer Variablen der Zeit.

Die Zeitreihenanalyse dient neben der Beschreibung und Erklärung der zeitlichen Entwicklung einer Variablen Y insbesondere auch deren Prognose, d. h. der Schätzung von Werten dieser Variablen für

zukünftige Zeitpunkte oder Perioden. Jede Entscheidung basiert auf Prognosen. Die Zeitreihenanalyse ist daher für die Stützung von Entscheidungsproblemen von großer Wichtigkeit. [17]

Eine Zeitreihe stellt formal eine Menge von Werten einer Variablen Y dar, z. B. Spurweite, gegenseitige Höhenlage, Verwindung und Längshöhe vom Messfahrzeug aus, die im Zeitlauf abgemessen wurden und gemäß der Zeit geordnet sind. Sie lässt sich durch die Funktion:

$$Y = f(t)$$

ausdrücken, wobei t einen Zeitindex bezeichnet. Die diskreten Zeitreihen bezeichnen in diesem Fall äquidistante Zeitpunkte oder Perioden, in die die Zeit eingeteilt wird (z. B. Tage, Wochen, Monate). Aber viele Zeitperioden, wie Tage, Monate, und Jahre sind nicht wirklich äquidistant. Zum Beispiel ein Monat kann zwischen 28 bis 31 Tagen dauern. [17] Wie können die Zeitreihen in richtigen Distanzen in der Abbildung dargestellt werden? Mithilfe des Befehls ‚datenum‘ von Matlab kann dieses Problem genau gelöst werden. Dieser Befehl wird im nächsten Kapitel ausführlicher erläutert.

Die Grundrichtung einer Zeitreihe wird durch den Trend charakterisiert, der die langfristige Entwicklungsrichtung der Reihe angibt. Dies können sowohl ein Wachstums- als auch ein Schrumpfungsprozess sein. [18]

Die Trendberechnung hat das Ziel, eine Kurve zu finden, die sich dem Verlauf einer Zeitreihe optimal anpasst. Bei der Berechnung der linearen Trendfunktion gehen wir grundsätzlich wie bei der Regressionsanalyse von folgender Funktion aus:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 * t$$

wie die Regressionsanalyse, wobei:

\hat{Y} = Schätzung der abhängigen Variablen Y

b_0 = konstantes Glied

b_1 = Steigung der Trendfunktion

t = unabhängige Variable, die in der Zeitreihenanalyse der Zeit t zu bestimmten Zeitpunkten entspricht. [18]

Ähnlich wie im letzten Kapitel, mit der „Methode der kleinsten Quadrate“, können die beiden unbekannt Parameter b_0 und b_1 berechnet werden. Diese Formel wird im Wesentlichen in den Prognosemodellen dieser Arbeit verwendet. Abbildung 12 zeigt die Erklärung eines Prognosemodells. Wenn ein Schnittpunkt von der Linie des Grenzwertes und der Trendgleichung vorhanden ist, ist die Instandhaltungszeit zu erkennen.

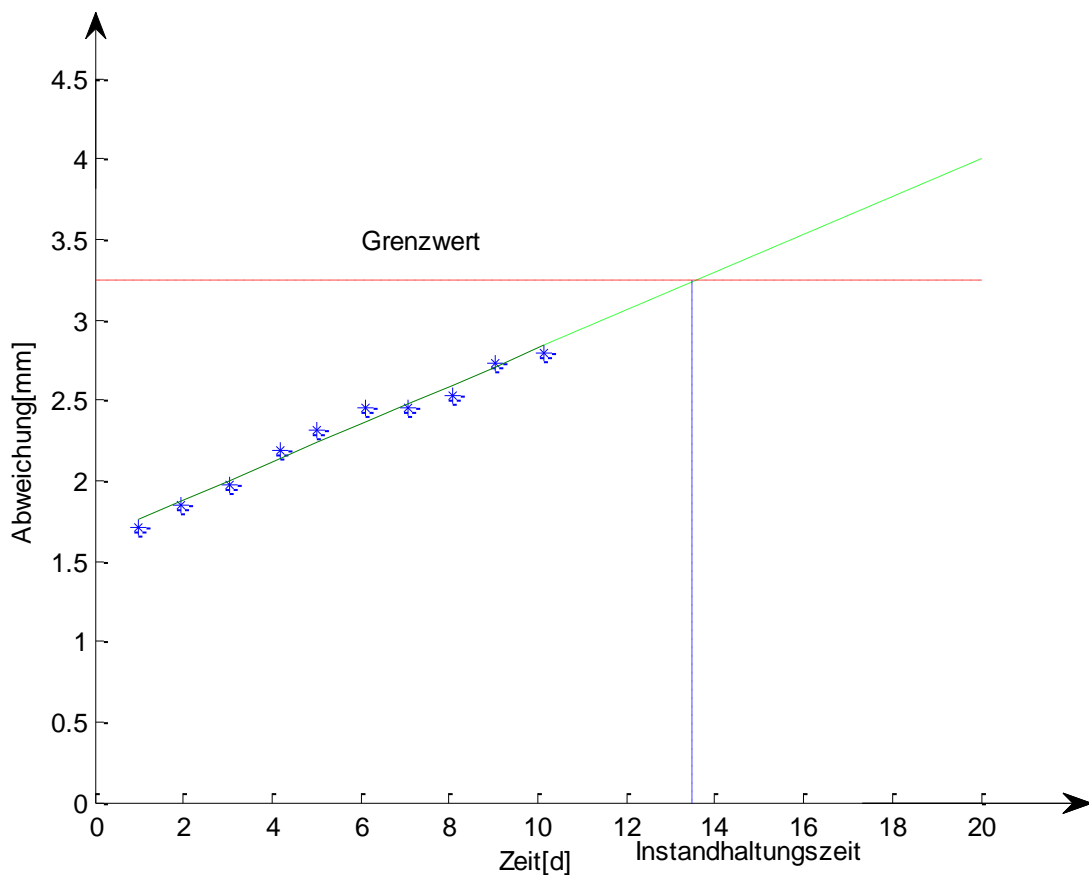


Abbildung 12: Erklärung des Prognosemodells (Skript siehe Anhang Skript 14)

4 Prognosemodelle

4.1 Einführung und Anwendungen von Matlab

Die Prognosemodelle wurden auf der Grundlage der Software Matlab erstellt. Matlab ist ein leistungsfähiges Softwaresystem für numerische Berechnungen und die Visualisierung von Daten. Matlab ist derzeit weltweit die Standardsoftware zur Modellierung, Berechnung und Simulation technischer Systeme. Typische Anwendungen sind zum Beispiel: Mathematische Berechnungen, Datenerfassung und -analyse sowie Modellierung und Simulation technischer Probleme. [19] Um Prognosemodelle für die Analyse des Gleiszustandes erstellen zu können, sind diese Anwendungen sehr nützlich. Im Erstellungsprozess der Prognosemodelle sind die Messdaten analysiert, Standardabweichung und Regressionsgleichung automatisch berechnet, sowie die Trendgleichung simuliert.

4.2 Der Prozess der Erstellung von Prognosemodellen mithilfe der Software Matlab

4.2.1 Messdatenbeschreibung

Eine Güterlokomotive BR 189 der Deutschen Bahn AG ist mit einem Messsystem ausgestattet, das den Gleiszustand kontinuierlich misst. Die Messdaten werden durch einen Beschleunigungssensor in

vertikaler Richtung erfasst und dann an das DLR weitergeleitet. Daraus sind die Prognosemodelle des Gleiszustands zu erstellen. Zu sehen ist die betreffende Lok in Abbildung 13.



Abbildung 13: BR 189 [20]

Die Messdaten wurden als ‚Datei.mat‘ gespeichert. Diese Messdaten wurden jeweils links und rechts der Gleise an 13 verschiedenen Tagen gemessen und daraus wurden 26 Unterdateien erzeugt. Jede Datei umfasst 10 Variablen. Sie heißen: ‚Originalstream‘, ‚integratedStream‘, ‚integratedStreamWithoutOffsets‘, ‚KilometerPoints‘, ‚d0‘, ‚d1‘, ‚d2‘, ‚d3‘, ‚dataOfRecord‘, ‚source‘. Die Datei ‚Originalstream‘ beschreibt die Beschleunigungssignale des Gleises. Mit doppelter Integration werden Nutzsignale von Längshöhen erfasst und unter der Datei ‚integratedStream‘ gespeichert. Die Nutzsignale werden durch digitale Filter ‚d0‘, ‚d1‘, ‚d2‘, ‚d3‘ herausgefiltert und in entsprechenden Dateien gespeichert. Diese Filter sind alle Bandpassfilter. Nach Filtern werden die anomalen und unerwarteten Signale gedämpft und untergedrückt. Nach der europäischen Norm umfasst der d1 Filter einen Wellenlängenbereich von 3m bis 25m, der d2 Filter einen Wellenlängenbereich von 25m bis 70m, der d3 Filter einen Wellenlängenbereich von 70m bis 150m. Der Wellenlängenbereich d3 wird nicht berücksichtigt, weil er nicht direkt mit Sicherheit, sondern mehr mit Fahrzeugkomfort zusammenhängt. [10] ‚KilometerPoints‘ enthält die absoluten Positionen des Messwagens. Mithilfe von ‚dataOfRecord‘ werden die Messdaten auf das Messdatum, zum Beispiel ‚12-01-2009‘, hingewiesen. Die Messdaten beginnen am 12-01-2009 und enden am 03-04-2009. ‚source‘ ist die Quelle der Messdaten.

4.2.2 Skripte der Prognosemodelle und Ergebnisse

Um den Bedarf der Kapazitäten für die Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene decken und die Sicherheit des Transportes durch das Bahnsystem gewährleisten zu können, spielt der Gleisqualitätsverlauf eine immer größere Rolle, und er bildet ein immer bedeutenderes Forschungsthema. Nach einer viermonatigen Forschungsarbeit wurden vier Prognosemodelle erstellt, die hier ausführlich beschrieben wurden.

Skript 1:

```
plot(weisData(1).d1.kilometerIndex,weisData(1).d1.data);  
title('Daten am 12-01-2009');  
xlabel('Strecke(km)');  
ylabel('Längshöhe(m)');  
box off;
```

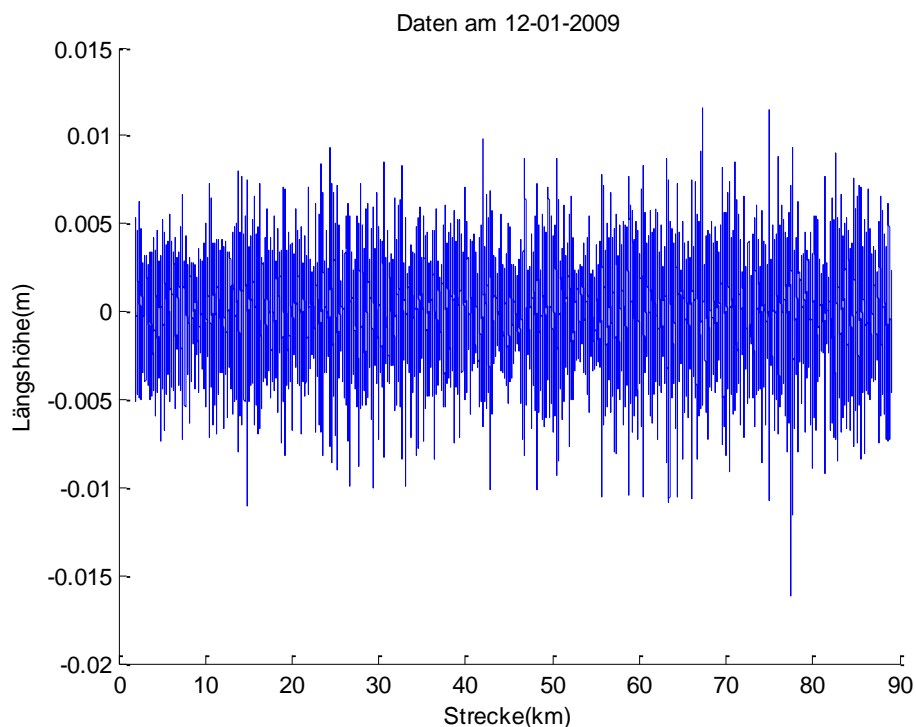


Abbildung 14: Daten der Längshöhen am 12-01-2009

Hier ist ein Beispiel der Messdaten am ersten Tag 12.01.2009 dargestellt. Durch ‚plot‘ sind die Daten deutlich zu lesen. [21]

Prognose 1 ist die lineare Regression der Standardabweichung eines Streckenabschnitts zwischen zwei benachbarten Weichen, die Abstände sind nicht äquidistant. Prognose 2 ist die

exponentielle Regression – eine Fortsetzung basierend auf Prognose 1. Prognose 3 beschreibt die lineare Regression von jeden 200 Metern Gleisstrecke, und der Abstand ist äquidistant. Prognose 4 ist die lineare Regression von Einzelfehlern.

1 Prognosemodell – Lineare Regression von Standardabweichung bei Weichen

Durch diesen Befehl wird die Datei ‚switches.mat‘ heruntergeladen und als ‚switchesDirection1‘ bezeichnet.

```
>> load('switches.mat')
```

1	14,834	160	'stumpf'	'EW-60-0500-	37881	14,796
1	14,841	160	'spitz'	'EW-60-0760-	46703	14,888
1	15,659	160	'stumpf'	'IBW-60-0500-	37881	15,621
1	15,671	160	'spitz'	'EW-60-0500-	37881	15,709
1	23,298	130	'spitz'	'ABW-60-0500-	37881	23,336
1	23,494	130	'stumpf'	'ABW-60-0500-	37881	23,456
1	23,502	130	'spitz'	'IBW-60-0500-	37881	23,54
1	24,37	130	'stumpf'	'EW-60-0300-	29343	24,341
1	24,41	130	'stumpf'	'EW-60-0300-	29343	24,381
1	36,166	160	'stumpf'	'EW-60-0500-	37881	35,128

Tabelle 7: Ausschnitt der Daten der Weichen

Ein Teil der Datei wird entnommen. Die Daten in der 7. Spalte sind die wichtigsten. Sie bezeichnen die Strecke des Gleises, wo sich eine Weiche befindet. 'spitz' und 'stumpf' bezeichnen die Arten der Weichen.

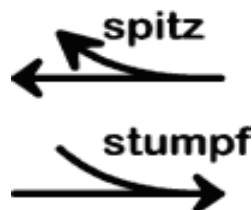


Abbildung 15: Stumpf- und Spitzweiche [22]

Dieses Bild veranschaulicht das stumpfe und spitze Befahren einer Weiche. Stumpfweichen sind die einfachste Art von Weichen und benötigen keinerlei weitere Einstellungen. Eine Weiche wird stumpf

befahren, wenn die Richtung für das Fahrzeug schon eindeutig festgelegt ist. Befährt ein Zug eine Stumpfweiche spitz (das Gegenteil von stumpf), so fährt er geradeaus. [22]

Um die Qualität der Gleisgeometrie der Weichen bewerten zu können, wurden nachfolgende Skripte erstellt.

Skript 2:

```
clear standardDeviation;
for i = 1:length(weisData);

    for j = 1:length(switchesDirection1) - 1

        subselect = weisData(i).d1.kilometerIndex > switchesDirection1{j,7} &
weisData(i).d1.kilometerIndex < switchesDirection1{j+1,7};
        standardDeviation(i,j) = std(weisData(i).d1.data(subselect));

    clear subselect;
    end
end
```

,i' ist eine Schleife von Tagen. Durch die Funktion length(A) ist die größere der beiden Dimensionen von A zurückgegeben, hier ist length(weisData) 13, weil ,weisData' 13 Daten enthält. Jede gehört zu einem Messdatum. ,j' ist eine Schleife von Zahlen der Weichen. Es gibt insgesamt 35 Weichen, also erhält man durch den Befehl: length (switchesDirection1) auch 35 Weichen. Der Befehl ,std' berechnet die Standardabweichung. Mithilfe dieses Programms wurde die Standardabweichung jeder Weiche berechnet. Die Daten der Standardabweichung sind unter der Datei standardDeviation gespeichert. Ein Teil wurde entnommen, wie man nachfolgend ersehen kann. 13 Reihen sind 13 Tage, und 10 Spalten bedeuten, dass die Daten von den ersten 10 Weichen entnommen wurden.

0,00349007	0,0014748	0,00194747	0,00144873	0,00136464	0,00235195	0,0015277	0,00273672	0,00163249	0,00221254
0,00366605	0,0014519	0,00210925	0,0015947	0,00150503	0,00253746	0,00142831	0,00288434	0,00172487	0,00239679
0,00350482	0,00150997	0,00209175	0,00135747	0,00125618	0,00227638	0,0012259	0,00260225	0,00163575	0,00229909
0,00382607	0,00154561	0,00210458	0,00148501	0,0012102	0,00237545	0,00145646	0,00283989	0,00176542	0,00249091
0,00419144	0,00177928	0,00214714	0,00162797	0,00129568	0,00268658	0,00145651	0,00267401	0,0017413	0,0020641
0,0038522	0,00172309	0,0020999	0,00160481	0,00130313	0,00269742	0,00148408	0,00281281	0,00173519	0,00232461
0,00353111	0,00177821	0,00219413	0,00168368	0,00114595	0,00292205	0,00142291	0,00271777	0,00172039	0,00209407
0,00340813	0,00183112	0,00206073	0,0017381	0,00118245	0,00271306	0,00150251	0,00305791	0,00178233	0,00238236
0,00364813	0,00205383	0,0021431	0,00175887	0,001331	0,00324922	0,00156778	0,00305647	0,00184385	0,00234268
0,00346113	0,00209369	0,00232877	0,00177265	0,00152311	0,00298481	0,00156876	0,00295522	0,00180001	0,00238017
0,00358823	0,00229106	0,00208081	0,00215572	0,00137231	0,00281192	0,00158554	0,00294945	0,00176867	0,00232957
0,0038851	0,00215642	0,00237985	0,00167364	0,00096075	0,00181377	0,00112408	0,00110619	0,00187305	0,00222123
0,00366527	0,0021471	0,00232353	0,00185688	0,0014506	0,00279834	0,00150888	0,00298871	0,00186828	0,00248808

Tabelle 8: Standardabweichung bei Weichen

Skript 3:

```

m(i) = datenum(weisData(i).dateOfRecord, 'dd-mm-yyyy');
tm{i} = datestr(m(i), 'dd-mm-yy');
p = polyfit(m, standardDeviation(:,3), 1); % '3' is variable
f = polyval(p, m);
p = [p(1), p(2)];
y1 = 0.0027;
r = [y1 - p(2)] / p(1);
A = p(1) * m + p(2);
fprintf('\ndie Gleichung des Prognosemodells lautet y = %.9fx + %.9f\n', p(1), p(2));
data = datestr(r);
data

```

Dieses Skript ist der wichtigste Teil, der die Regressionsgleichung realisiert. Der Befehl ‚datenum‘ konvertiert die Uhrzeit der now-Darstellung in String-Form, und ‚datestr‘ konvertiert die Uhrzeit der String-Form in die now-Darstellung. [23]. In diesem Programm ist es möglich, die Daten in Nummern umzuwandeln. Die Nummern werden in die Regressionsgleichung eingesetzt und berechnet. Danach werden die Nummern in Daten umgewandelt und damit kann die nachfolgende Darstellung gezeigt werden. ‚m‘ ist eine Matrix, die wie folgt aussieht.

733785	733789	733790	733791	733795	733797	733798	733802	733833	733855	733858	733863	733866
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Tabelle 9: Umgewandelte Nummer aller 13 Daten

Davon entspricht ‚733785‘ Tag 12-01-2009, und nach der Reihe folgen die anderen Tage.

‚polyfit‘ ermöglicht die Regression und ‚1‘ in Klammern bedeutet die lineare Regression. m und standardDeviation sind Vektoren der x- bzw. y-Koordinaten von Punkten. ‚polyfit‘ erzeugt ein fittendes Polynom n-ter Ordnung p. Sei p ein Polynom und m ein Vektor. Bei ‚polyval‘, dessen Elemente sollen Auswertestellen des Polynoms sein: f ist ein Vektor, der die Werte des Polynoms enthält. Durch ‚plot‘ wird dann ein Plot des Polynoms erzeugt. [24]. Das Polynom wird von höchster Ordnung bis niedrigster Ordnung in Reihenfolgen geordnet. ‚y1‘ ist Grenzwert(AL) nach Tabelle 1 2,7mm, weil der Messwagen immer mit einer Geschwindigkeit von 80 bis 120km/h fährt [10]. Und mithilfe der Gleichung $r=[y1-p(2)]/p(1)$ wird das Datum, an dem der Prognosewert nach der Regressionsgleichung den Grenzwert erreicht, als eine Nummer berechnet und zurückgegeben. Die Umwandlung vom Datum zur Nummer ermöglicht, die Tage später in richtige Distanzen in der X-Achse darzustellen. Danach wird die Nummer wieder in das Datum umgewandelt und als richtiges Datum bezeichnet. [25] Nimmt man nun die Daten der dritten Weiche als Beispiel. Das Ergebnis im Kommandofenster lautet: ‚die Gleichung des Prognosemodells heißt, $y=0.000002771x+(-2.031065163)$. A= 0.0021. (‚A‘ ist der Schnittpunkt der Regressionsgrade mit der Y-Achse, nämlich der Anfangswert am ersten Tag.)

data = 28-Aug-2009 21:15:37‘. Das heißt, am 28.08.2009 wird der Prognosemesswert den Grenzwert erreichen und die geplanten Instandhaltungsarbeiten werden berücksichtigt.

Skript 4:

```
x=m;
y=standardDeviation(:,3);
n=length(x);
xb=mean(x);
yb=mean(y);
x2b=sum(x.^2)/n;

xyb=x*y/n;
b=(xb*yb-xyb)/(xb^2-x2b);
a=yb-b*xb;
fprintf('\ndie Regressionsgerade lautet: y=%.9fx+%.9f\n', b, a);
y1=a+b*x;
Smin=sum((y'-y1).^2);
```

Nach den Formeln (8) und (9) ist nämlich aufgrund der „Methode der kleinsten Quadrate“ Skript 4 erledigt. \bar{x} ist das arithmetische Mittel der x -Werte, \bar{y} entsprechend. S_{\min} ist das Minimum der Residualgröße, die e_k in Formel (6) entspricht. Nimmt man die Standardabweichungen an der dritten Weiche wieder als Beispiel: Nach Durchlaufen von Skript 3 und 4 ist das Ergebnis zu sehen: die Regressionsgerade lautet: $y=0.000002771x+(-2.031065051)$. Dieses Ergebnis ist gleich wie das Ergebnis oben. Davon geht aus, dass Befehl `polyfit` auch gemäß „Methode der kleinsten Quadrate“ programmiert und `polyfit` vereinfacht die Rechnung und das Programm.

Skript 5:

```
m1=datetime(weisData(1).dateOfRecord, 'dd-mm-yyyy');
mn=datetime(weisData(length(weisData)).dateOfRecord, 'dd-mm-yyyy');

set(gca,'xtick',m);
set(gca,'xticklabel',tm);

axis([m1,mn,0,0.004]);
title('standardDiviation');
xlabel('days');
ylabel('standardDiviation(m)');
text(733784,0.0027,'AL=2.7');

hold on
plot(m,f,'r');
line([m1,mn],[0.0027,0.0027]);
scatter(m,standardDeviation(:,3)); %'3' is variable
```

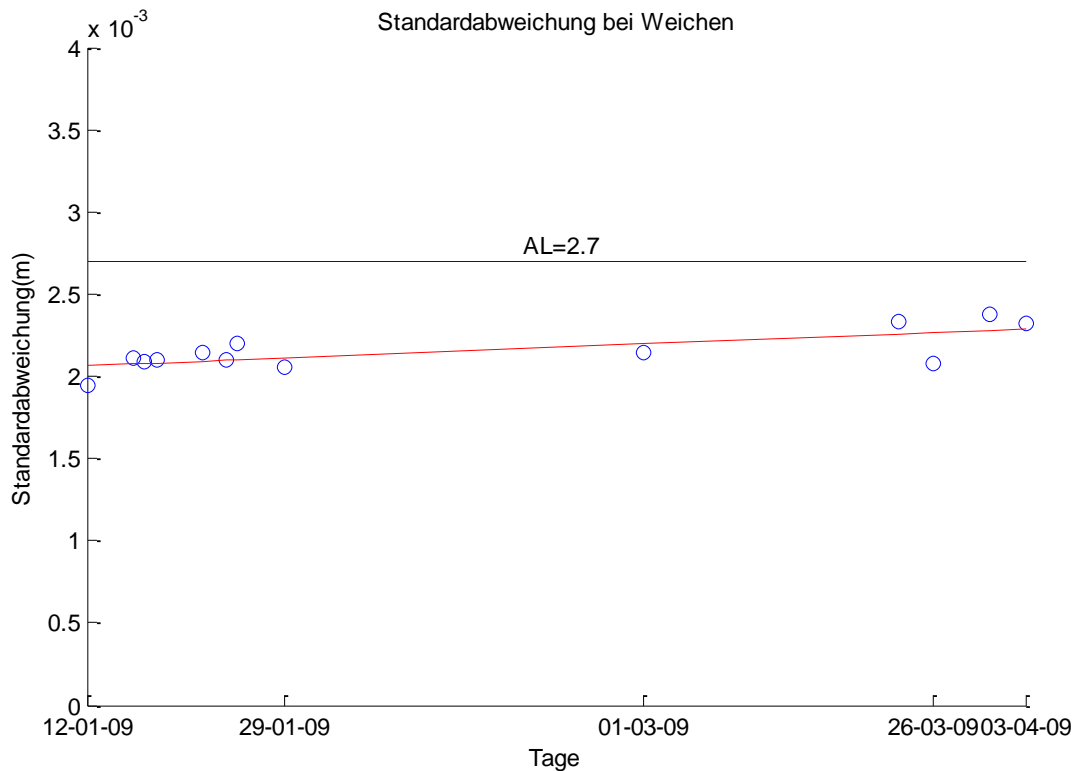


Abbildung 16: Prognosemodell der Standardabweichung an der dritten Weiche

Mithilfe des oben dargestellten Programms ergibt sich diese Darstellung. Der Titel heißt ‚Standardabweichung bei Weichen‘. Die Werte in der y-Achse sind Standardabweichungen, und die x-Achse zeigt Daten, die in richtige Intervalle angeordnet sind. Die blaue Gerade ist der Grenzwert ‚AL‘, die blauen Punkte sind die Werte der Standardabweichung, und die rote Gerade ist die Regressionsgleichung.

2 Fortsetzung des Prognosemodells – Exponentielle Regression der Standardabweichung bei Weichen

Wenn Skript 3 durch Skript 6 ersetzt wird, ergibt sich die exponentielle Regression.

Skript 6:

```

z = log(standardDeviation);
p = polyfit(m,z(:,3),1);  %'3' is variable
f1 = polyval(p,m);
A = exp(p(1)*m1+p(2));
a = p(1);
y1= log(0.0027);
p = [p(1), p(2)];
r = [y1-p(2)]/p(1);
f2 = exp(f1);

```

```

hold on
plot(m,f2,'r');
fprintf('\ndie Gleichung des Prognosemodells lautet Y=%0.5ge^{%0.5gx} \n ', A,a);
data=datestr(r);
data

```



Abbildung 17: Exponentielle Regressionslinie der Standardabweichung bei der dritten Weiche

Das bedeutet, dass auch bei der dritten Weiche das Ergebnis im Kommandofenster lautet: die Gleichung des Prognosemodells heißt $Y=0.0020662e^{(0.0012612x)}$

data = 12-Aug-2009 02:58:42.

Die Regressionslinie ist mit den Augen gesehen fast eine Gerade, und das Datumsergebnis hat eine kleine Abweichung mit dem aus der linearen Regression.

3 Prognosemodell – Lineare Regression von Standardabweichung je nach 200m

Nach der Europäischen Norm 13848-5 wird die Qualität der Gleisgeometrie nach der Standardabweichung über eine definierte Länge typischerweise 200m bewertet. [10]

Ersetzt man nun Skript 2 durch Skript 7, ergibt sich folgendes Modell:

Skript 7:

```
for i = 1:5 % loop of sections

    epsilon = 0.2; % 200m is a section

    for j = 1:length(weisData) % loop of days

        filter = weisData(j).d1.kilometerIndex < 2;
        % select the kilometerIndex < 2km
        weisData(j).d1.kilometerIndex(filter)=0;
        % kilometerIndex < 2km must be filtered

        [x, startIndex(i,j)] = min(abs(weisData(j).d1.kilometerIndex - 2));
        % find the nearest position of 2km, and defined as startIndex

        [x, endIndex(i,j)] = min(abs((weisData(j).d1.kilometerIndex -
        (weisData(j).d1.kilometerIndex(startIndex(i,j)) + epsilon)));
        % find the nearest position of 2.2km, and defined as endIndex

        standardDeviation(i,j) = std(weisData(j).d1.data(startIndex(i,j):endIndex(i,j)));
        % compute the standard deviation

        weisData(j).d1.kilometerIndex(startIndex(i,j):endIndex(i,j))=0;
        weisData(j).d1.data(startIndex(i,j):endIndex(i,j))=0;
        % cut the section away through setting the content to zero then begins the new
        loop

        m(j) = datenum(weisData(j).dateOfRecord, 'dd-mm-yyyy');
        % transform the date to number

        tm{j}=datestr(m(j),'dd-mm-yy');
        % transform the number back to date

    clear filter;
end
end
```


Wie die mit grün geschriebenen Kommentare erklären, besteht dieses Skript aus zwei Schleifen. ‚i‘ ist die Schleife der Streckenabschnitte, und ‚j‘ ist die Schleife der Tage. Die Messdaten beginnen normalerweise bei 2km. Nur eine Ausnahme bilden die Messdaten, die vom dritten Tag an bei 1km beginnen. Die Daten, die kleiner als 2km sind, wurden in ‚filter‘ gespeichert und als ‚0‘ eingestellt. Die Messpunkte sind nicht ganz kontinuierlich und auch nicht ganz gleich. Deshalb wurden die, die 2km am nächsten liegen und an 13 unterschiedlichen Tagen gefunden wurden sowie der kilometerIndex in den startIndex gespeichert. ‚epsilon‘ ist auf 200m eingestellt, bei der ersten Schleife wurden die Punkte am nächsten von 2km und 2,2km gefunden und jeweils in den start- und endIndex gespeichert. Dann werden die Messwerte gelöscht und das Programm springt zur nächsten Schleife bis zum Ende. Im oberen Script wird ‚i‘ auf 5 eingestellt, und die Standardabweichung der Streckenabschnitte wird von 2km bis 2,2km, 2,2km bis 2,4km, 2,4km bis 2,6km, 2,6km bis 2,8km, 2,8km bis 3,0km berechnet. Die Daten in startIndex und endIndex sehen wie folgt aus. Diese Reihe entspricht in Abschnitt und Spalte einem Tag.

1	1	56550	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11890	12262	67619	12056	11231	11930	11210	12041	11028	11370	12068	10670	11245
23833	24465	77998	23742	22398	23771	22772	23854	22381	22643	24026	21009	22511
35726	36643	88619	34985	33615	35659	34152	35263	33534	33904	35774	31216	33726
47615	48825	98531	46576	44609	47433	45437	46645	44665	45145	47301	41218	45038

Tabelle 10: startIndex von fünf Gleisabschnitten

11889	12261	67618	12055	11230	11929	11209	12040	11027	11369	12067	10669	11244
23832	24464	77997	23741	22397	23770	22771	23853	22380	22642	24025	21008	22510
35725	36642	88618	34984	33614	35658	34151	35262	33533	33903	35773	31215	33725
47614	48824	98530	46575	44608	47432	45436	46644	44664	45144	47300	41217	45037
59562	60875	108550	57676	55688	59048	56858	57996	55790	56347	58832	51195	56068

Tabelle 11: endIndex von fünf Gleisabschnitten

Skript 8:

```
scatter(m,standardDeviation(2,:));
```

```
set(gca,'xtick',m);
```

```
set(gca,'xticklabel',tm);
```

```
m1=datenum(weisData(1).dateOfRecord, 'dd-mm-yyyy');
```

```
mn=datenum(weisData(length(weisData)).dateOfRecord, 'dd-mm-yyyy');
```

```

axis([m1,mn,0,0.004]);

hold on
line([m1,mn],[0.0027,0.0027]);
title('Standardabweichung von je 200m');
xlabel('Tage');
ylabel('Standardabweichung(m)');
text(733781,0.0027,'AL=2.7');

p=polyfit(m,standardDeviation(2,:),1);
f = polyval(p,m);
y1=0.0027;
p=[p(1), p(2)];
r=[y1-p(2)]/p(1);
A=p(1)*m1+p(2)
hold on
plot(m,f,'r');
fprintf('\ndie Gleichung des Prognosemodells lautet y=%.9fx+%.9f\n', p(1), p(2));
data=datestr(r);
data

```

Danach ist Skript 8 durchgelaufen, und es ergibt sich das neue Prognosemodell:

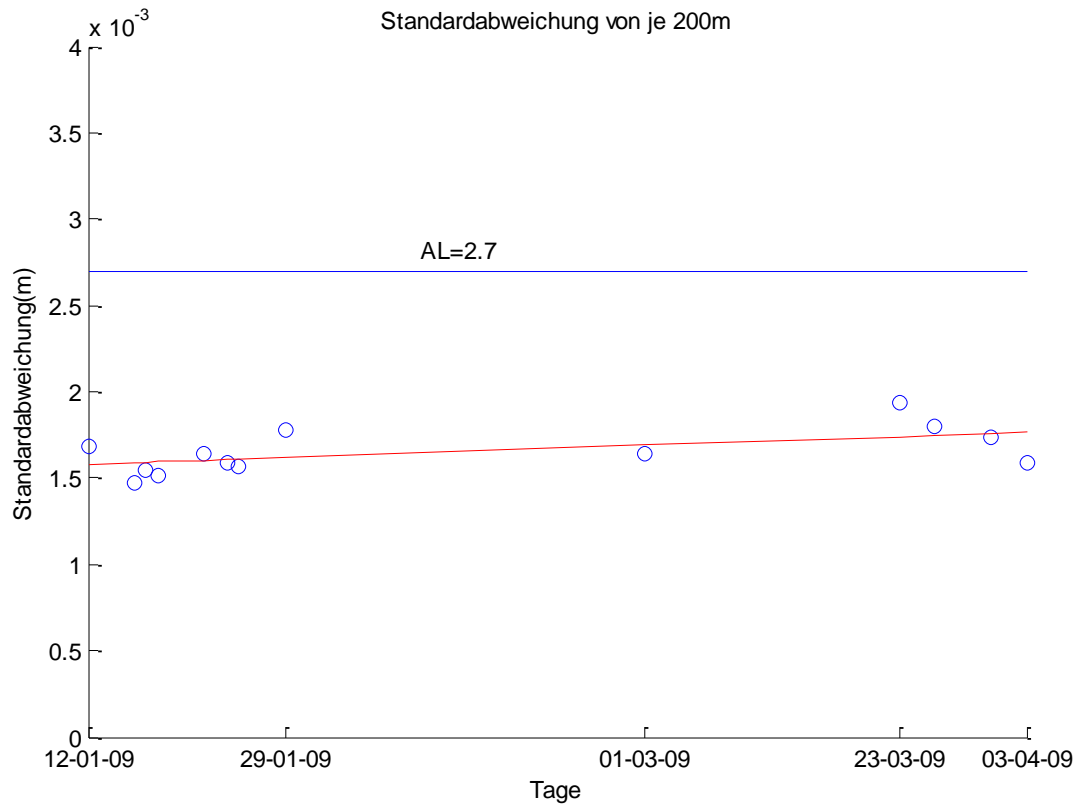


Abbildung 18: Prognosemodell der Standardabweichung von 2,2km bis 2,4km

Das Diagramm oben stellt den Entwicklungstrend vom 2. Streckenabschnitt, nämlich 2,2km bis 2,4km dar. Die Gleichung des Prognosemodells lautet $y = 0.000002252x + (-1.651066817)$, und die Aufmerksamkeitszeit ist der 23-May-2010 12:54:30. $A = 0.0016$.

4 Prognosemodell – Lineare Regression des Einzelfehlers

Um die Einzelfehler des Gleises finden und beobachten zu können, und um zu sehen, wie sie sich entwickeln und um eine Prognose zu erstellen, wurde dieses Modell erstellt.

Skript 9

```
for i = 1:5 % sections
```

```
    filter = weisData(end).d1.kilometerIndex < 40;
```

```
    [max_data(i),index(i)] = max(weisData(end).d1.data(filter));
```

```
    Position(i) = weisData(end).d1.kilometerIndex(index(i));
```

```

epsilon = 0.015; % kilometers
clear filter;

for j = 1:length(weisData) % days

[x, startIndex(i,j)] = min(abs(weisData(j).d1.kilometerIndex - (Position(i) - epsilon)));
[x, endIndex(i,j)] = min(abs(weisData(j).d1.kilometerIndex - (Position(i) + epsilon)));

figure(i);
hold all;

plot(weisData(j).d1.kilometerIndex(startIndex(i,j):endIndex(i,j)),
weisData(j).d1.data(startIndex(i,j):endIndex(i,j)));
title('Einzelfehler von 13 Tagen');
xlabel('Strecke(km)');
ylabel('Längshöhe(mm)');
str{j}=[weisData(j).dateOfRecord];
legend(str,-1);
parameter(i,j) = max(weisData(j).d1.data(startIndex(i,j):endIndex(i,j)));
weisData(j).d1.data(startIndex(i,j):endIndex(i,j))=0;

end
end

```

Zuerst sind die Messdaten, die bei kilometerIndex kleiner als 40km gemessen werden, filtriert. Durch ‚max‘ kann die größte Längshöhe gefunden werden, weil nach europäischer Norm die Qualität der Gleisgeometrie durch Extremwerte von Einzelfehlern bewertet wird. [10] Dann werden die genaue Position und der entsprechende Index der größten Längshöhe am letzten Tag jeweils unter ‚Position‘ und ‚Index‘ gespeichert. ‚epsilon‘ ist 15m eingestellt, weil die absoluten Positionen während der Fahrt durch den Einsatz vom GPS bestimmt werden, und die Genauigkeit der Lagebestimmung ist 3 bis 5m. Also ist ein Abschnitt von 2 mal 15m passend. Dieser Abschnitt von 30m ist ausgeschnitten und bewertet, im Zentrum des Abschnitts ist die größte Längshöhe. ‚j‘ ist die Schleife von Tagen. durch ‚min‘ wird die gleiche Position an allen Tagen gefunden und die 30m langen Abschnitte werden verglichen. Der ‚kilometerIndex‘ vom Anfang und Ende des Abschnitts werden jeweils unter ‚startIndex‘ und ‚endIndex‘ gespeichert. Die Abschnitte von allen Tagen werden in einer Figur gezeichnet. Die Längshöhen von dieser genauen Position an allen Tagen werden berechnet unter ‚Parameter‘ gespeichert. Zum Schluss werden die Abschnitte gelöscht und es springt zu der neuen Schleife. ‚i‘ wird

auf 5 eingestellt, das heißt, das Programm läuft fünfmal. Die Positionen der größten bis fünf größten Längshöhen am letzten Tag werden angegeben und alle Längshöhen werden unter ‚Parameter‘ gespeichert. Die Parameter lauten:

0,0080	0,0080	0,0073	0,0083	0,0101	0,0096	0,0095	0,0105	0,0088	0,0100	0,0094	0,0107	0,0107
0,0071	0,0090	0,0079	0,0055	0,0099	0,0082	0,0063	0,0067	0,0090	0,0083	0,0077	0,0107	0,0105
0,0031	0,0033	0,0036	0,0033	0,0033	0,0030	0,0030	0,0035	0,0096	0,0092	0,0098	0,0104	0,0103
0,0085	0,0095	0,0094	0,0083	0,0096	0,0091	0,0087	0,0088	0,0093	0,0093	0,0089	0,0113	0,0103
0,0070	0,0073	0,0052	0,0064	0,0086	0,0079	0,0085	0,0096	0,0086	0,0083	0,0088	0,0095	0,0101

Tabelle 12: Parameter von fünf Gleisabschnitten

Die ersten fünf größten Längshöhen (mm) am letzten Tag lauten:

0,01067057	0,01048682	0,01032338	0,01029796	0,01006172
------------	------------	------------	------------	------------

Tabelle 13: Die fünf größten Längshöhen

Und die entsprechenden Positionen (km) lauten:

13,7801963	14,1518558	6,86266054	30,6334255	19,2494532
------------	------------	------------	------------	------------

Tabelle 14: Positionen der entsprechenden Einzelfehler

Die Messdaten der ersten fünf Abschnitte an allen 13 Tagen sehen wie folgt aus:

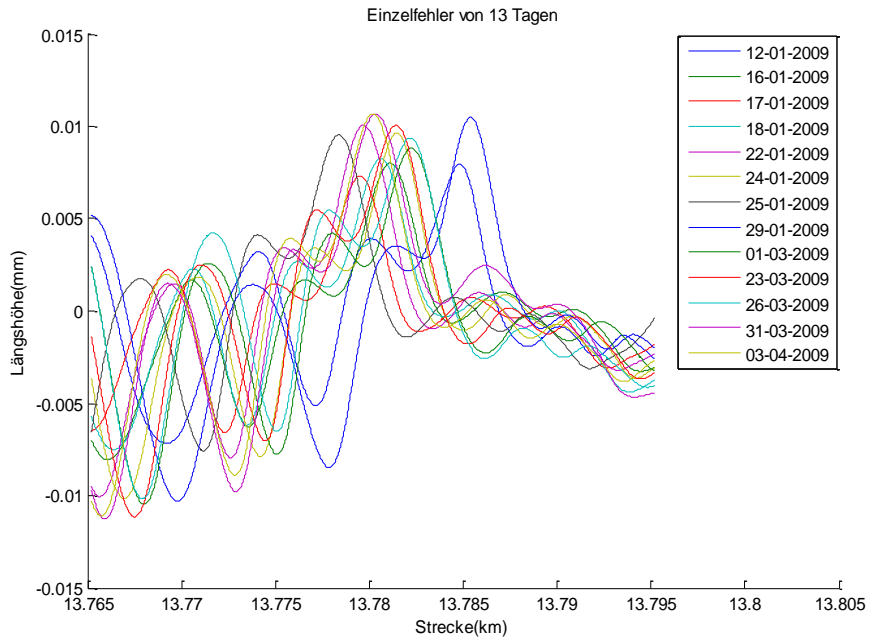


Abbildung 19: Einzelfehler bei Position 13,78km

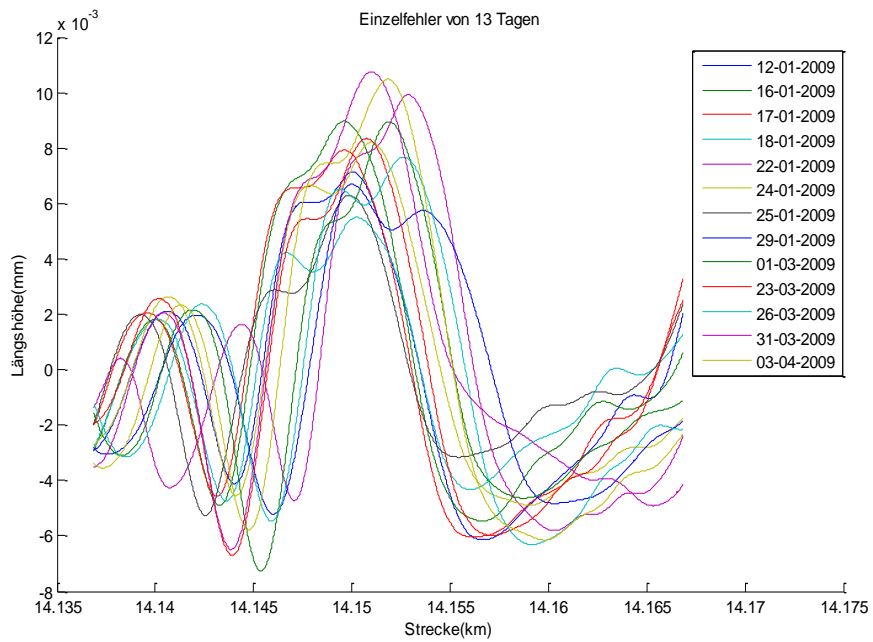


Abbildung 20: Einzelfehler bei Position 14,15km

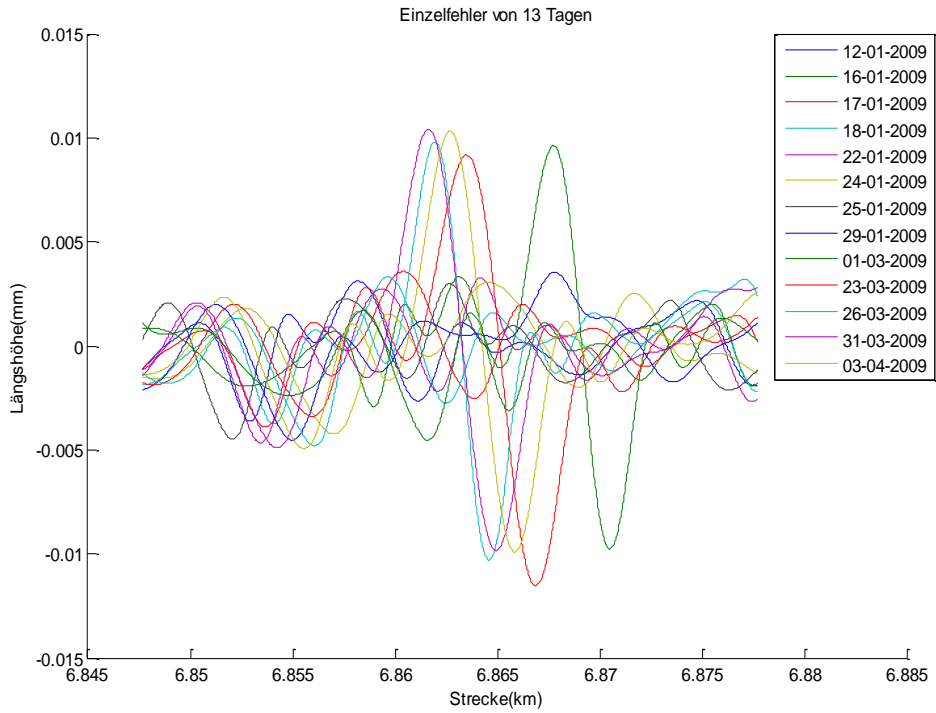


Abbildung 21: Einzelfehler bei Position 6,86km

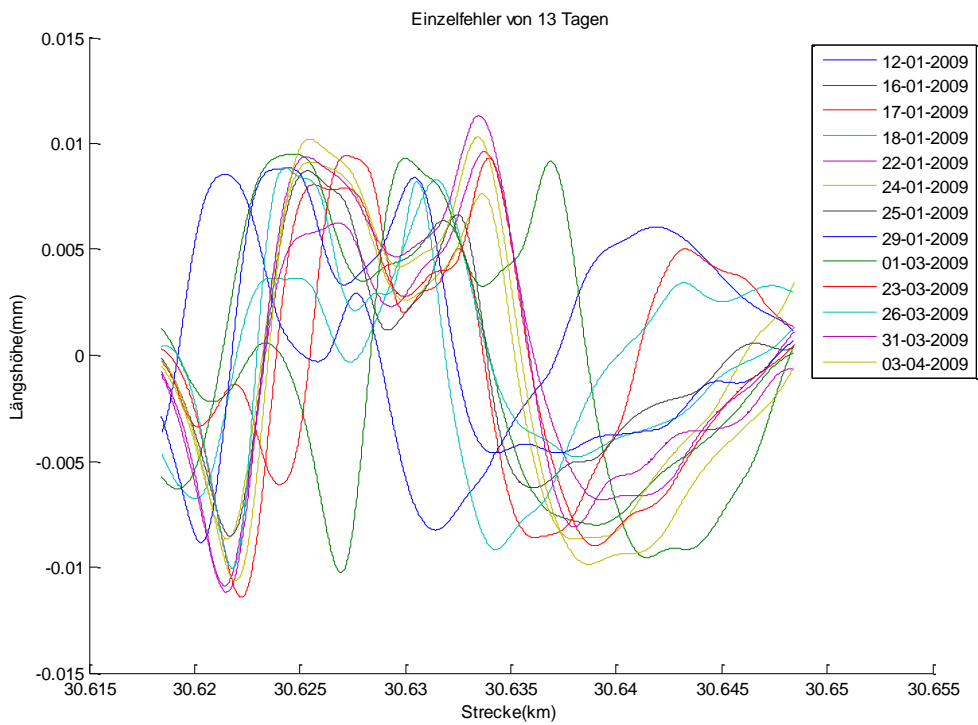


Abbildung 22: Einzelfehler bei Position 30,63km

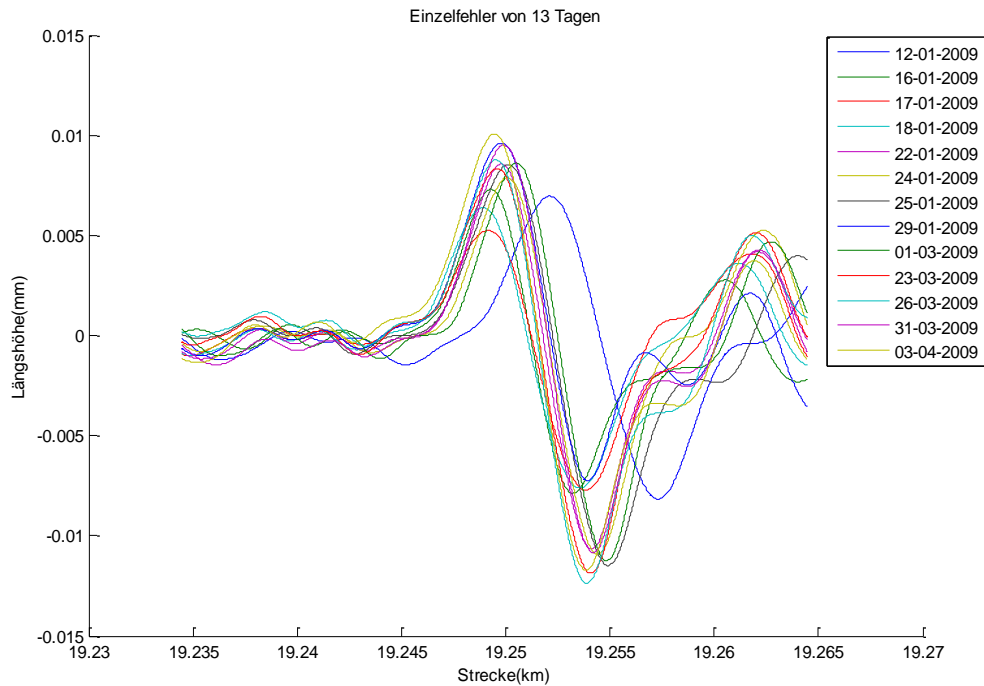


Abbildung 23: Einzelfehler bei Position 19,25km

Skript 10:

```

for j = 1:length(weisData)
    m(j) = datenum(weisData(j).dateOfRecord, 'dd-mm-yyyy');
    tm{j}=datestr(m(j),'dd-mm-yy');
end

p = polyfit(m,parameter(1,:),1); % '1' is variable
f = polyval(p,m);
p = [p(1), p(2)];
b = p(1)*m(1)+p(2);
A = p(1)*m(1)+p(2)
y1=0.013;
r=[y1-p(2)]/p(1);
fprintf('\ndie Gleichung des Prognosemodells lautet y=%.9fx+%.9f\n', p(1), p(2));

hold all;
set(gca,'xtick',m);
set(gca,'xticklabel',tm);

m1=datenum(weisData(1).dateOfRecord, 'dd-mm-yyyy');
mn=datenum(weisData(length(weisData)).dateOfRecord, 'dd-mm-yyyy');

```



```

axis([m1,mn,0,0.016]);
scatter(m,parameter(1,:)); % '1' is variable
line([m1,mn],[0.010,0.010]);
plot(m,f)

title('Regressionsanalyse von den Parametern');
xlabel('Datum');
ylabel('Längshöhe(m)');
text(733781,0.013,'AL=0,013');

if A>y1,
fprintf('\ndieser Abschnitt ist unsicher');
elseif A<y1 & p(1)<0,
fprintf('\ndieser Abschnitt ist sicher');
else
data=datestr(r);
fprintf('\ndieser Abschnitt wird in der Zukunft den Grenzwert erreichen\n');
data
end

```

Die Regressionsanalyse bei Einzelfehlern ist ähnlich wie die der Standardabweichung. Der größte Unterschied ist, dass nach der Norm AL 13mm ist, im Skript entspricht das ‚y1‘. Um mögliche Ausnahmen beheben zu können, wird der Satz ‚if-elseif-else‘ hinzugefügt. Die drei Fälle werden anhand der unteren Abbildungen näher erläutert.

- Falls die Längshöhe am ersten Tag AL überschreitet, entweder die Steigung der Regressionsgerade positiv oder negativ ist, ist dieser Abschnitt unsicher (Fall 1);
- Falls die Längshöhe am ersten Tag kleiner als AL ist, und gleichzeitig die Steigung der Regressionsgerade negativ ist, ist dieser Abschnitt sowieso sicher (Fall 2);
- Falls nur die Längshöhe am ersten Tag AL überschreitet, und gleichzeitig die Steigung positiv ist, wird diese in Zukunft den Grenzwert erreichen (Fall 3), und der Schnittpunkt wird herausgefunden, und die entsprechende Zeit wird gerechnet.

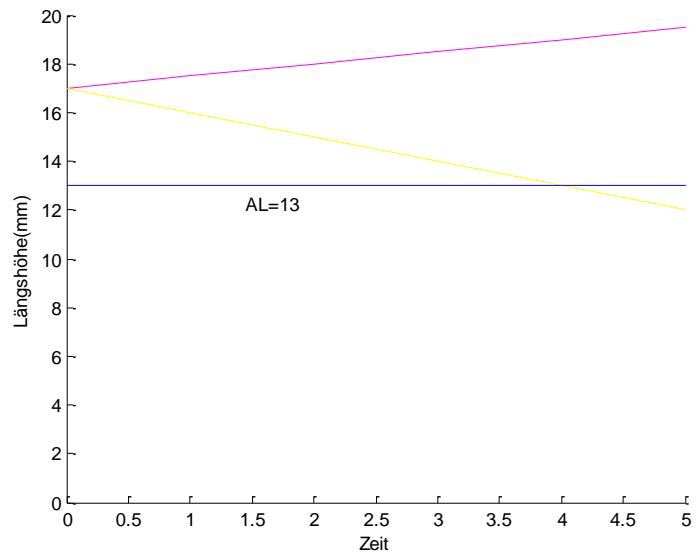


Abbildung 24: Fall 1

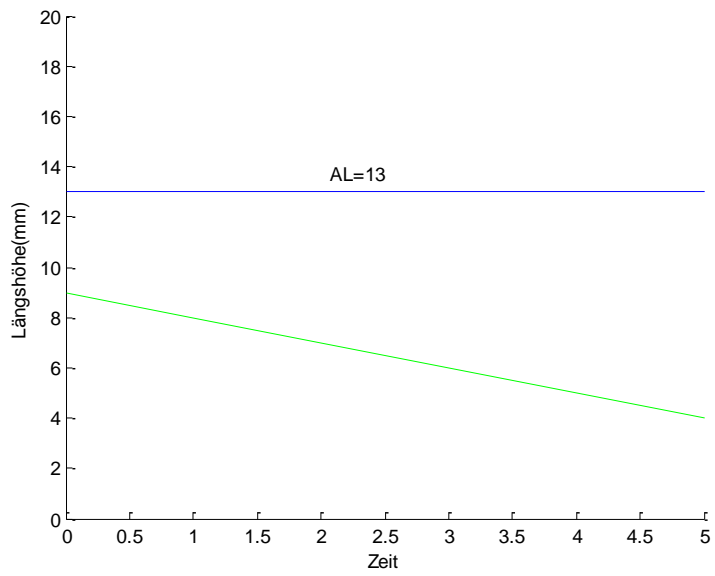


Abbildung 25: Fall 2

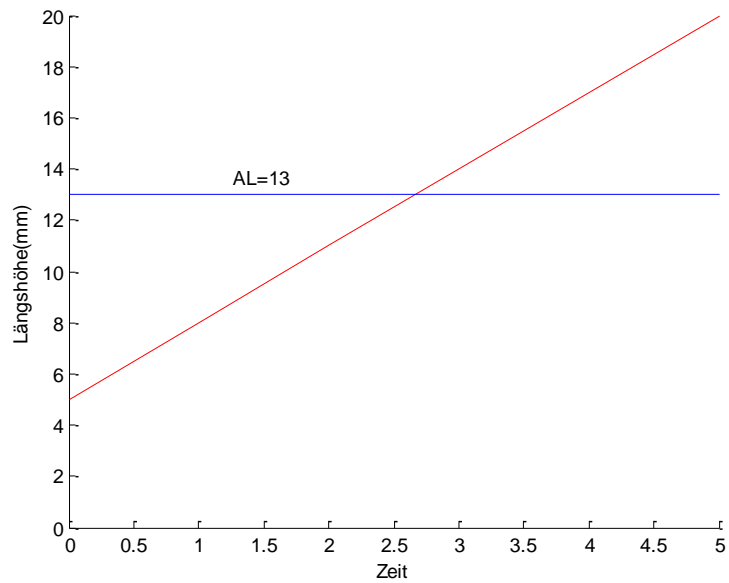


Abbildung 26: Fall 3

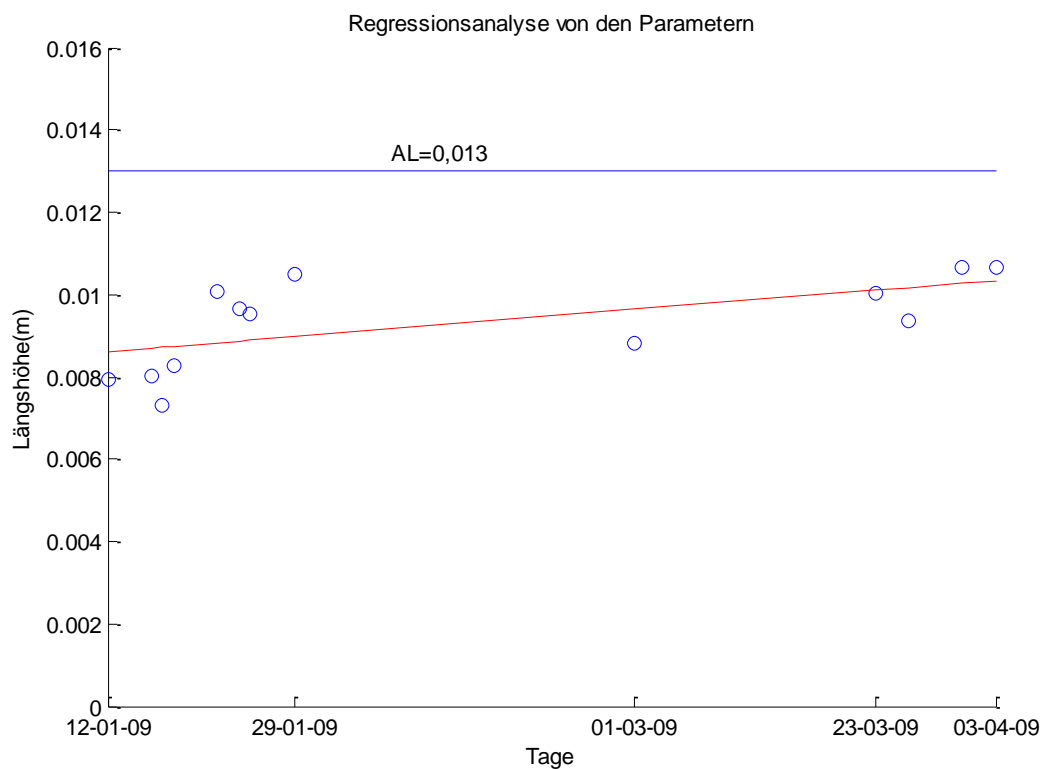


Abbildung 27: Prognosemodell des Einzelfehlers bei Position 13,78km

Das Diagramm zeigt das Prognosemodell vom ersten Abschnitt, die Gleichung des Prognosemodells lautet $y=0.000021297x+(-15.618977374)$. Dieser Abschnitt wird in Zukunft den Grenzwert erreichen, data = 05-Aug-2009 20:14:21. A = 0.0086. Die Position liegt bei 13,780km.

Ersetzt ‚min‘ den Befehl ‚max‘ in Skript 9, ergeben sich die Einzelfehler mit negativen Längshöhen. Zwei Abschnitte sind ausgenommen und deren Bilder sehen wie folgt aus.

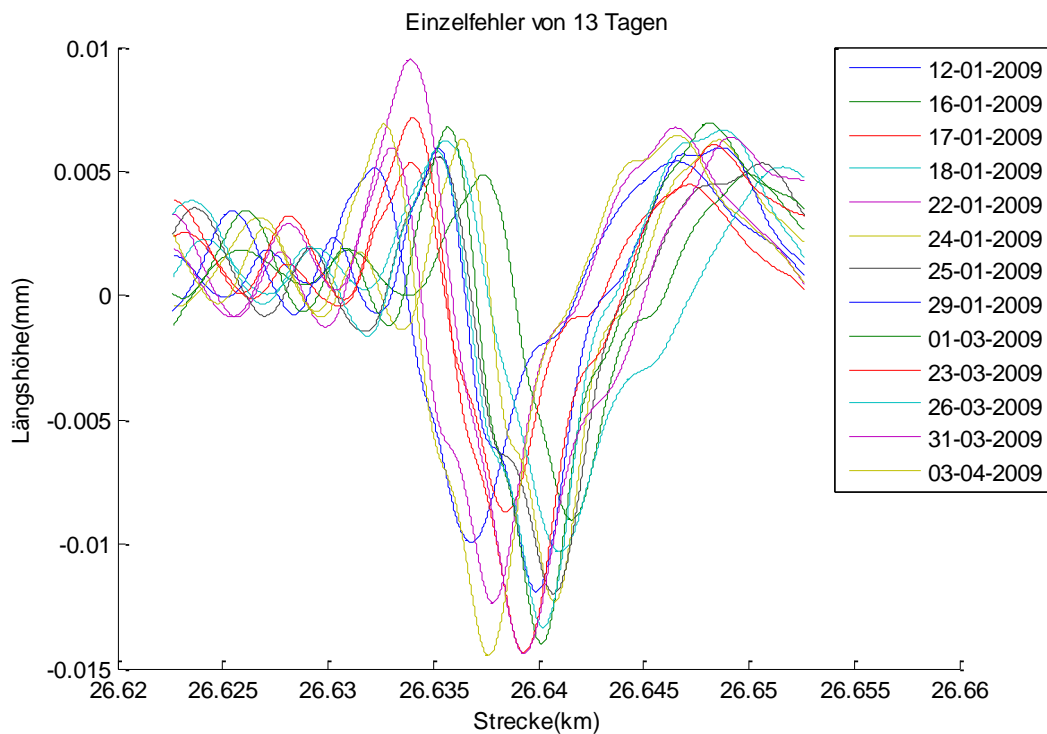


Abbildung 28: Größter Einzelfehler

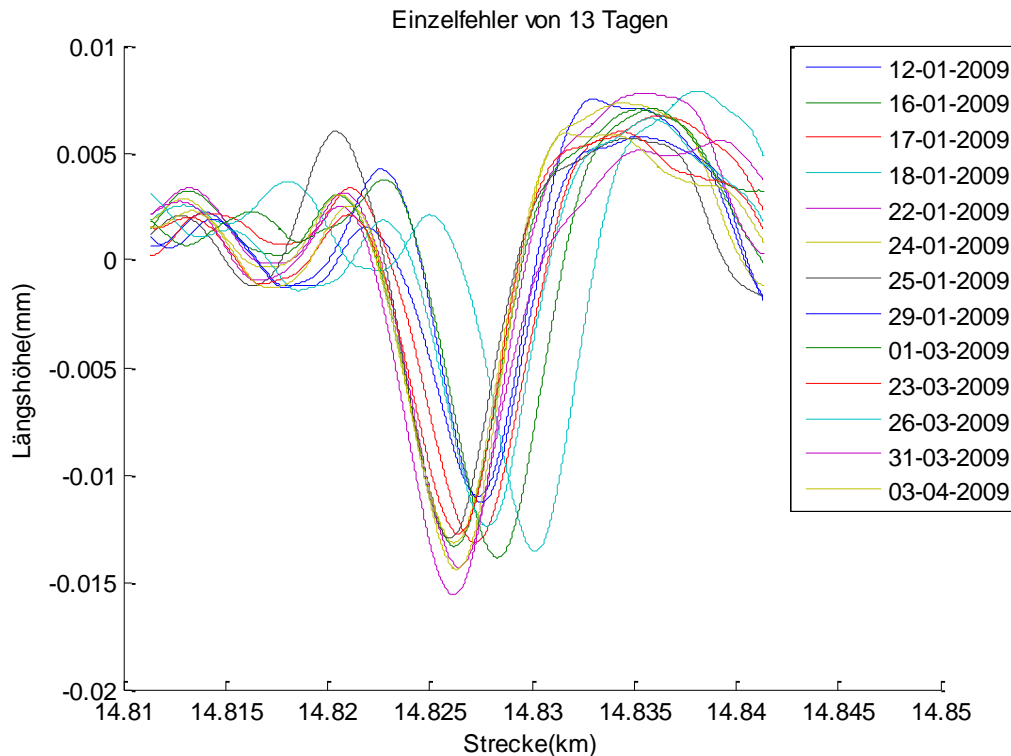


Abbildung 29: Der zweite größte Einzelfehler

Die Positionen liegen jeweils bei 26,64km und 14,83km. Die beiden Einzelfehler haben bereits am letzten Tag der Messungen, 03-04-2009, den Grenzwert 13mm überschritten, und sie sind unsichere Anschnitte.

5 Analyse der Qualität der Gleisgeometrie aufgrund der Prognosemodelle

Basierend auf den statistischen Kenntnissen im Kapitel 3 wurden die Prognosemodelle erstellt. Die Gleichung des ersten Prognosemodells lautet:

$$Y = A + k * T$$

A ist erreichte Anfangsqualität,

k ist die Steigung und Verschlechterungsrate,

T ist Zeit. [26]

Durch A ist die Anfangsqualität des Gleises vor dem Messen als Zahl darzustellen.

Die Verschlechterungsrate der Gleisqualität entspricht der Steigung der Kurve. Je flacher die Steigung verläuft, umso größer ist die Instandhaltungsperiode, bis der Schätzwert den Grenzwert erreicht.

k hat drei Fälle:

- Falls $k > 0$ ist, wird die Qualität des Gleises immer schlechter in Zukunft den Grenzwert erreichen.
- Falls $k \approx 0$ ist, entwickelt sich die Qualität sehr flach und die Verschlechterung ist unkritisch.
- Falls $k < 0$ ist, wird die Qualität immer besser, aber in der Tat ist dieser Fall nicht vorkommen.

5.1 Vergleich der Qualität der verschiedenen Gleisabschnitte

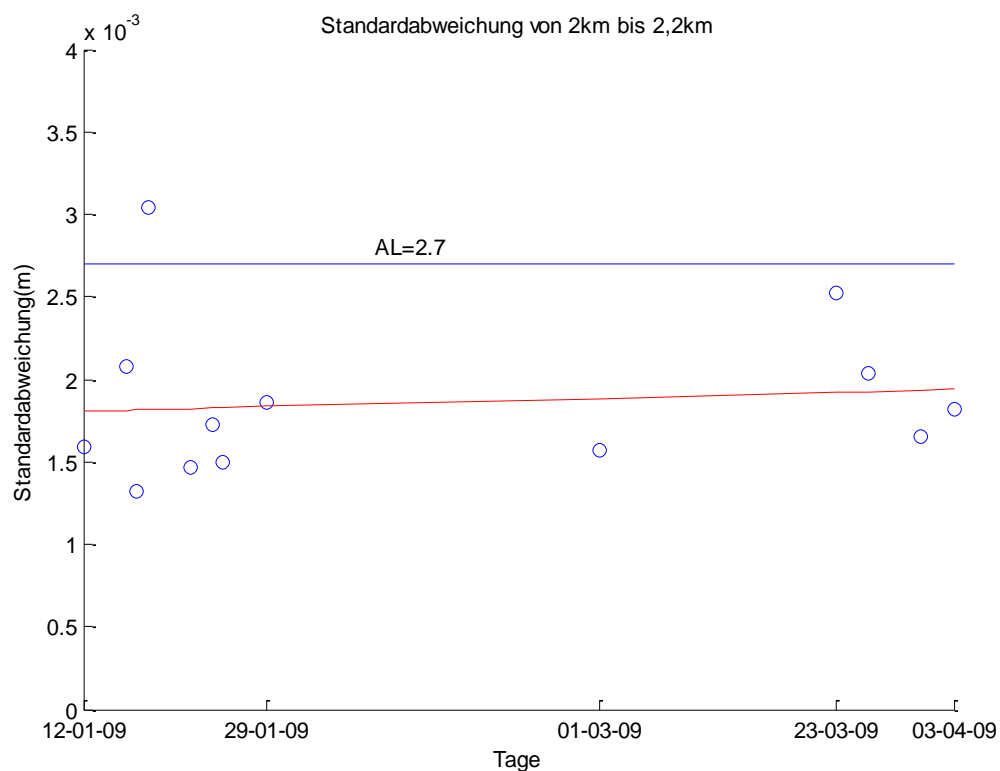


Abbildung 30: Prognosemodell der Standardabweichung von 2km bis 2,2km

Diese Abbildung zeigt die Standardabweichung von 2km bis 2,2km.

Das Ergebnis im Kommandofenster lautet: „die Gleichung des Prognosemodells heißt $y=0.000001627x+(-1.191929217)$, $A = 0.0018$, data = 15-Jul-2010 01:37:48“.

Skript 11:

```
for i = 1:5
```

```
epsilon = 0.2;
```

```
for j = 1:length(weisData)
```

```

filter = weisData(j).d1.kilometerIndex < 10;
weisData(j).d1.kilometerIndex(filter)=0;

[x, startIndex(i,j)] = min(abs(weisData(j).d1.kilometerIndex - 10));
[x,      endIndex(i,j)]      =      min(abs((weisData(j).d1.kilometerIndex      -
(weisData(j).d1.kilometerIndex(startIndex(i,j)) + epsilon)));
standardDeviation(i,j) = std(weisData(j).d1.data(startIndex(i,j):endIndex(i,j)));
weisData(j).d1.kilometerIndex(startIndex(i,j):endIndex(i,j))=0;
weisData(j).d1.data(startIndex(i,j):endIndex(i,j))=0;

m(j) = datenum(weisData(j).dateOfRecord, 'dd-mm-yyyy')
tm{j}=datestr(m(j),'dd-mm-yy');
clear filter;
end
end

scatter(m,standardDeviation(1,:));
set(gca,'xtick',m);
set(gca,'xticklabel',tm);
m1=datenum(weisData(1).dateOfRecord, 'dd-mm-yyyy');
mn=datenum(weisData(length(weisData)).dateOfRecord, 'dd-mm-yyyy');
axis([m1,mn,0,0.004]);

hold on
line([m1,mn],[0.0027,0.0027]);
title('Standardabweichung von 10km bis 10,2km');
xlabel('Tage');
ylabel('Standardabweichung(m)');
text(733781,0.0027,'AL=2.7');
p = polyfit(m,standardDeviation(1,:),1);
f = polyval(p,m);
y1 = 0.0027;
p=[p(1), p(2)];
r=[y1-p(2)]/p(1);
A=p(1)*m1+p(2)

hold on

```

```

plot(m,f,'r');
fprintf('\ndie Gleichung des Prognosemodells lautet y=%.9fx+%.9f\n', p(1), p(2));
data=datestr(r);
data

```

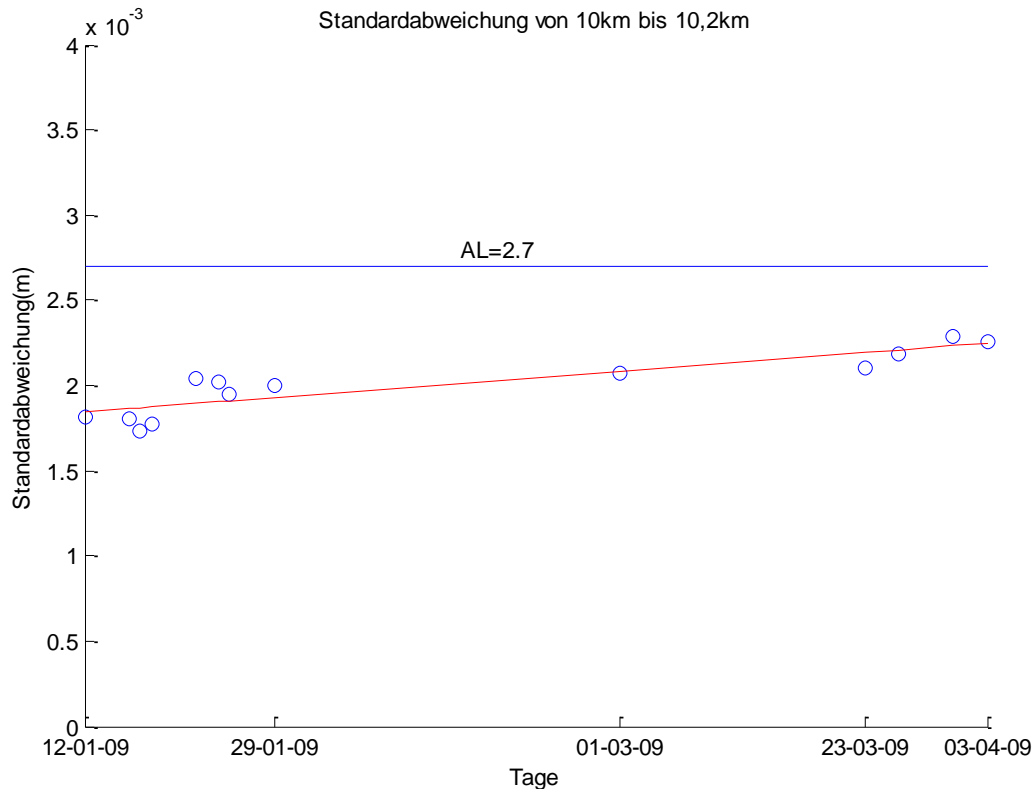


Abbildung 31: Prognosemodell der Standardabweichung von 10km bis 10,2km

Mit diesem Diagramm ist die Standardabweichung von 10km bis 10,2km dargestellt.

Die Gleichung des Prognosemodells lautet $y=0.000004985x+(-3.656053728)$ und ‚data‘ = 02-Jul-2009 22:56:53. $A = 0.00184$.

Vergleicht man dieses Modell mit dem letzten, so kann man feststellen, dass A und k größer sind als bei der letzten Gleichung. Aus diesem Grund wird der Gleisabschnitt beim zweiten Fall nämlich 10km bis 10,2km früher den Grenzwert erreichen. Das heißt, die Qualität des Gleisabschnitts von 2km bis 2,2km ist besser, als die von 10km bis 10,2km.

Um das Vergleichen der verschiedenen Gleisabschnitte zu vereinfachen, wurde Skript 12 für die Regressionsschleife geschrieben.

Skript 12:

```

for i = 1:6
epsilon = 0.2;

```



```

for j = 1:length(weisData)
filter = weisData(j).d1.kilometerIndex < 2;
weisData(j).d1.kilometerIndex(filter)=0;
[x, startIndex(i,j)] = min(abs(weisData(j).d1.kilometerIndex - 2));
[x, endIndex(i,j)] = min(abs((weisData(j).d1.kilometerIndex
(weisData(j).d1.kilometerIndex(startIndex(i,j)) + epsilon)));
standardDeviation(i,j) = std(weisData(j).d1.data(startIndex(i,j):endIndex(i,j)));
weisData(j).d1.kilometerIndex(startIndex(i,j):endIndex(i,j))=0;
weisData(j).d1.data(startIndex(i,j):endIndex(i,j))=0;

m(j) = datenum(weisData(j).dateOfRecord, 'dd-mm-yyyy');
tm{j}=datestr(m(j),'dd-mm-yy');
clear filter;
end
end

m1=datenum(weisData(1).dateOfRecord, 'dd-mm-yyyy');
mn=datenum(weisData(length(weisData)).dateOfRecord, 'dd-mm-yyyy');

figure;
hold on;
color={'r','y','k','g','c','m'};

for i=1:6
subplot(3,2,i)
hold on;
set(gca,'xtick',m);
set(gca,'xticklabel',tm);
ylabel('standardDiviation(m)');
text(733782,0.0027,'AL=2.7');
axis([m1,mn,0,0.004]);
line([m1,mn],[0.0027,0.0027]);
strcat('2+(',num2str(i),'-1)*0.2km~+0,2km')
p=polyfit(m,standardDeviation(i,:),1);
f(i,:) = polyval(p,m);
y1=0.0027;

```

```

p=[p(1), p(2)];

r=[y1-p(2)]/p(1);
scatter(m,standardDeviation(i,:));

plot(m,f(i,:),color{i});
xlabel(strcat('2+',num2str(i),'-1)*0.2km~+0,2km'));
fprintf('\ndie Gleichung des Prognosemodells lautet y=%0.9fx+%0.9f\n', p(1), p(2));
data=datestr(r);
data
end
hold off

```

Nach dem Ablauf des Skripts ergeben sich die folgende Abbildung und Ergebnisse.

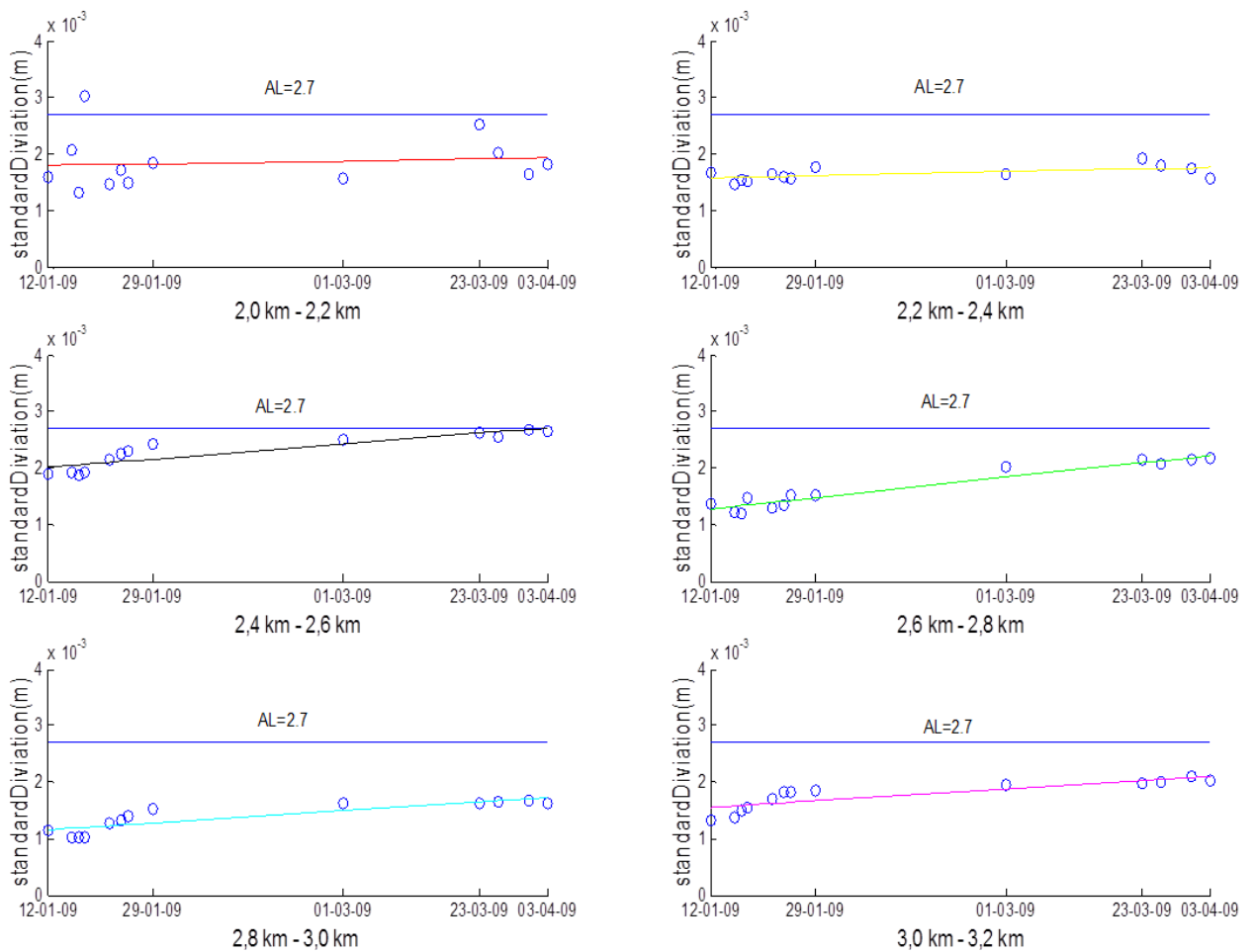


Abbildung 32: Vergleich der Prognosemodelle von 6 Gleisabschnitten

Abschnitt(km)	Gleichung des Prognosemodells	Anfangswert A(m)	Verschlechterungsrate k	Instandhaltungsdatum
2,0-2,2	$y=0.000001627x+(-1.191929217)$	0,0018	1,63e-6	15-Jul-2010
2,2-2,4	$y=0.000002252x+(-1.651066817)$	0,0016	2,25e-6	23-May-2010
2,4-2,6	$y=0.000008579x+(-6.292815996)$	0,0020	8,58e-6	01-Apr-2009
2,6-2,8	$y=0.000011641x+(-8.540416039)$	0,0013	11,64e-6	22-Aug-2009
2,8-3,0	$y=0.000006951x+(-5.099097396)$	0,0012	6,95e-6	22-Aug-2009
3,0-3.2	$y=0.000006723x+(-4.931974064)$	0,0016	6,72e-6	01-Jul-2009

Tabelle 15: Vergleich der Qualitäten von sechs Gleisabschnitten

Durch diese Tabelle wird der Vergleich zwischen den sechs Gleisabschnitten verdeutlicht. Der Abschnitt 2,0 bis 2,2km hat die beste Qualität, und am 15-Jul-2010 wird der Prognosewert den Grenzwert erreichen. Der Abschnitt 2,4 bis 2,6km ist von schlechter Qualität. Nach dem Prognosemodell muss man diesen Abschnitt am 01-Apr-2009 besonders aufmerksam beobachten.

5.2 Vergleich der verschiedenen Einzelfehler

Wie in Skript 12 sind verschiedene Einzelfehler zu vergleichen.

Die Prognosemodelle sind in folgenden Abbildungen dargestellt:

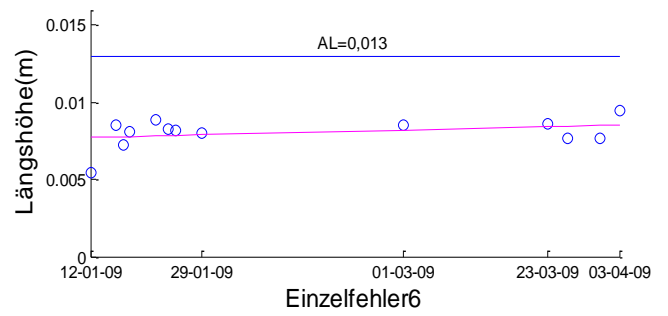
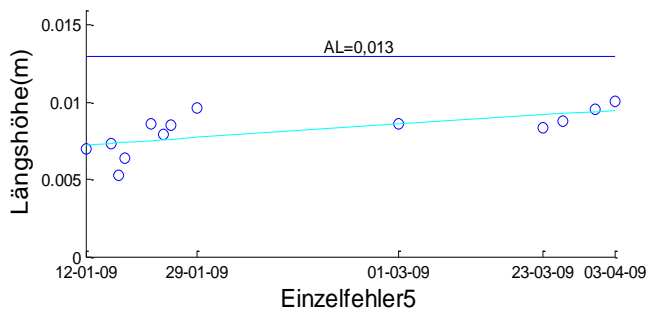
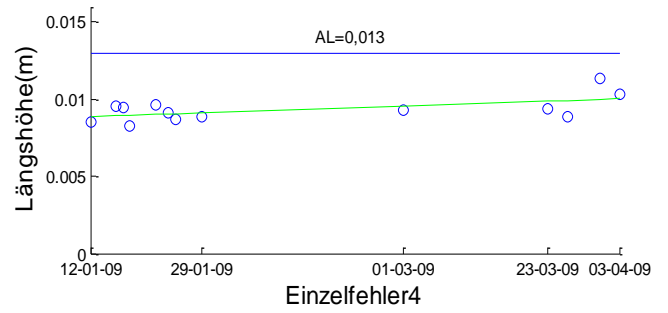
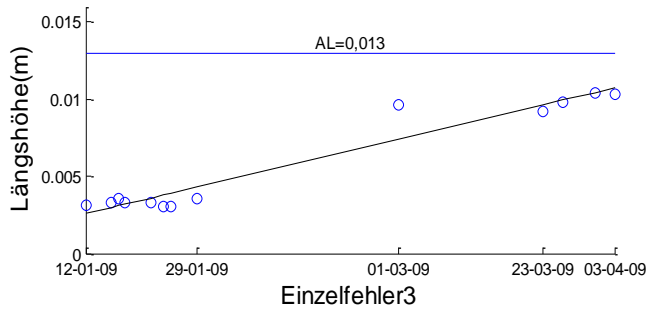
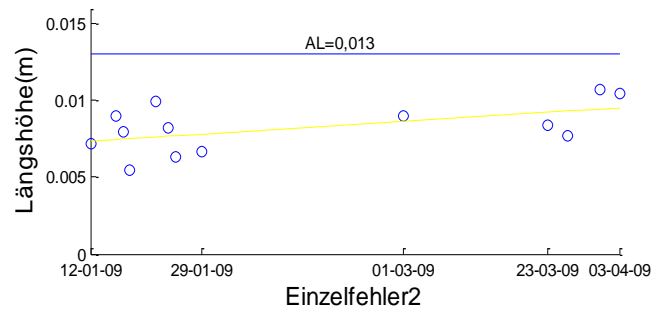
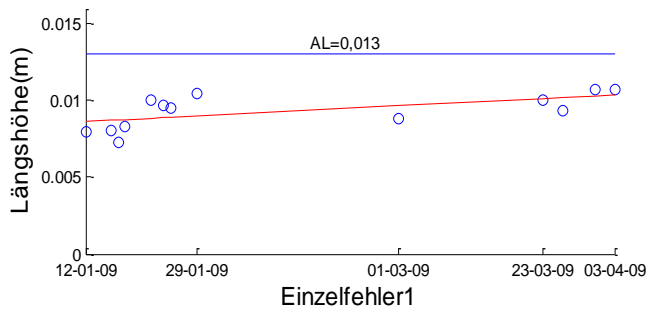


Abbildung 33: Vergleich der Prognosemodelle von Einzelfehlern

Die Ergebnisse lauten:

Position (km)	Gleichung des Prognosemodells	Anfangslängshöhe A(m)	Verschlechterungsrate k	Instandhaltungsdatum
13,78	$y=0.000021297x+(-15.618977374)$	0,0086	2,13e-5	05-Aug-2009
14,15	$y=0.000026716x+(-19.596231157)$	0,0074	2,67e-5	11-Aug-2009
6,86	$y=0.000100554x+(-73.782511667)$	0,0026	10,06e-5	25-Apr-2009
30,63	$y=0.000014436x+(-10.584413760)$	0,0089	1,44e-5	25-Oct-2009
19,25	$y=0.000027809x+(-20.398505302)$	0,0072	2,78e-5	07-Aug-2009
14,52	$y=0.000010387x+(-7.614267773)$	0,0077	1,04e-5	05-Jun-2010

Tabelle 16: Vergleich der Einzelfehler von sechs Gleisabschnitten

Anhand dieser Tabelle kann man deutlich erkennen, dass der Einzelfehler an der Position 6,86km von schlechtester Lage ist, und der Einzelfehler am 25-Apr-2009 den Grenzwert erreichen wird. Der Einzelfehler an der Position 14,52 entwickelt sich langsam, und am 05-Jun-2010 gebührt ihm seine größte Aufmerksamkeit.

6 Zusammenfassung

6.1 Fazit

Gemäß EN 13848, mithilfe der Software Matlab und basierend auf den statistischen Methoden und den Eigenschaften der Messdaten sind die Prognosemodelle erstellt und optimiert worden. Durch die Prognosemodelle ist übersichtlich zu erkennen, dass die Längshöhe und deren Standardabweichung proportional mit der Zeit sind. Das heißt, dass sich der Zustand des Gleisoberbaus mit der Zeit verschlechtert. Die Prognosemodelle machen es möglich, dass sowohl die Zustandsentwicklung der Gleisgeometrie verschiedener Gleisabschnitte, als auch Einzelfehler korrekt beobachtet werden können.

Die Prognosemodelle wurden im Wesentlichen nach linearen Regressions- und Zeitreihenanalysemethoden, gemäß der „Methode der kleinsten Quadrate“, mit der besten Annäherung an die Messdaten gebildet, sodass die Messdaten am meisten angenähert sind. Noch ein Vorteil besteht darin, dass der Parameter die Zeit ist. Damit ist die Beziehung zwischen der Verschlechterung der Gleislage und der Zeit übersichtlich dargestellt.

6.2 Abgrenzung

Die Messdaten kommen aus der DB AG. Die Qualität der Messdaten ist sehr unterschiedlich. Gibt es falsche Messpunkte, sind die Prognosemodelle nicht exakt.

Die mittlere Längshöhe eines Gleisabschnitts ist auch ein Beurteilungsmaßstab der Qualität der Gleisgeometrie. Aufgrund dieser Werte kann ein ähnliches Prognosemodell gebildet werden, aber der Beurteilungsmaßstab fehlt aus Zeitgründen in dieser Arbeit. In dieser Arbeit wurden im Wesentlichen die lineare Regressionsanalyse und auch die exponentielle Regressionsanalyse benutzt. Wenn die Zeit unbegrenzt wäre, könnten andere, nicht Regressionsanalysemethoden, z. B. logarithmische oder quadratische Methoden angewendet werden.

Bei der Einzelfehleranalyse fehlen genügend Beurteilungsmaßstäbe, nach denen man forschen könnte. Und die genaue Lage der Einzelfehler ist nicht ermittelbar. Damit können die Ursachen von Einzelfehlern nicht analysiert und in der Welt verifiziert werden. Wenn es die Bedingungen erfordern, dass die Messdaten an gleichen Strecken weitergehend verfolgt und mit den Prognosemodellen verglichen werden, könnten daraus die Abweichungen zwischen den Realwerten und den Prognosewerten berechnet, und damit die Prognosemodelle optimiert werden.

6.3 Ausblick

Momentan basiert die Darstellung auf Regelinspektionen und damit auf einem zeitlichen Intervall. Das heißt, die Reparatur wird immer durchlaufen, nachdem eine bestimmte Zeit abgelaufen ist, auch wenn der Gleiszustand in Ordnung ist. Bisher wird die Regelinspektion von dem Messfahrzeug, z. B. Railab, gemäß Richtlinie 821 alle sechs Monate durchlaufen. Wenn zwischen diesen Zeitabständen der Regelinspektion herausgefunden wird, dass eine Gleisstrecke reparaturbedürftig ist, dann erfolgt die Reparatur.

Diese Situation wurde verbessert. Die Messdaten kommen aus normalen Zügen, z. B. RB, IC oder S-Bahnen mit der Methode CTM (Continuous Track Monitoring). Dadurch wird die Reparatur nur durchlaufen, wenn es notwendig ist. Damit sind die Prognosemodelle für die zustandsorientierte Instandhaltung erstellt. Der unnötige Einsatz von Personal und Zeit entfällt.

Die Prognosemodelle der Zustandsentwicklung des Gleises dienen der Entscheidung der Planung der Instandsetzung. Mithilfe der Prognosemodelle wurde die Qualität des Gleises analysiert und prognostiziert. Damit kann die Verschlechterung des Gleises beobachtet und kontrolliert werden. Somit kann eine Reparatur eingeplant werden.

Literaturverzeichnis

- [1] „https://www.deutschebahn.com/de/konzern/bauen_bahn/bauen_bestehendes_netz/instandhaltung.html,“ [Online]
- [2] „http://www.dlr.de/fs/desktopdefault.aspx/tabid-1221/1665_read-3070/,“ [Online]
- [3] B. Lichtberger, Handbuch Gleis, 2010
- [4] Fiedler und Scherz, *Bahnwesen*, Werner Verlag, 2012
- [5] D. -I. E. Klotzinger, „Der Oberbauschotter,“ Wien , 2007
- [6] T. DAHLBERG, Some Railroad Settlement Laws – A Critical Review. Proc. Inst., 2000
- [7] P. Veit, „Qualität im Gleis,“ TU Graz, 2006.
- [8] D.-I. M. Baeßler, „Lageveränderungen des Schottergleises durch zyklische und dynamische Beanspruchungen,“ Berlin, 2008.
- [9] R. GULDENFELS, Die Alterung von Bahnschotter aus bodenmechanischer Sicht, 1996
- [10] E. K. F. N. (CEN), *EN 13848 - 5*, 2010
- [11] K. D. AG, „Richtlinie 821“
- [12] H. Fabian, „Qualitätspreis Gleisbau,“ TU Graz, 2011
- [13] „<http://www.plassertheurer.com/de/maschinen-systeme/stopfung.html>,“ [Online]
- [14] D. -I. F. Pech und D. -I. D. T. B. Lichtberger, „Automatische Einzelfehlerbehebung,“ Hestra Verlag, Darmstadt, 2000
- [15] J. Schira, Statistische Methoden der VWL und BWL, 2003
- [16] G. Merziger, g. Mühlbach, D. Wille und T. Wirth, Formeln und Hilfen zur Höheren Mathematik, Hannover
- [17] E. Backhaus, Multivariate Analysemethoden, Springer, 2010
- [18] P. D. H. Holland und P. D. K. Scharnbacher, Grundlagen der Statistik, Springer, 2010
- [19] D. M. Franz-Joseph Barthold, „Einführung in die Programmierung unter Verwendung von MATLAB,“ 2010
- [20] D. G. Baumann, „AutoMain“
- [21] D. Engster, „Matlab Tutorial,“ 2004
- [22] „<http://florin.omegaspace.de/bw/index.php5?title=Stumpfweiche>,“ [Online]
- [23] W. Vogt, „Algorithmen und Programmierung,“ 2011
- [24] P. Weber, „Einführung in Matlab 5.3,“ 1999
- [25] P. Hertel, „Einführung in Matlab,“ 2005
- [26] B. Lichtberger, „Schottergleisverhalten und Einflussparameter,“ 2002

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau des Gleises [4]	3
Abbildung 2: Der Aufbau des Schotteroberbaus [8].....	4
Abbildung 3: Verformung des Schotters [9].....	4
Abbildung 4: Vergleich einer guten Schwellenlage mit einer Hohlage [8].....	5
Abbildung 5: Erklärung für die allgemeine Gleislage	6
Abbildung 6: Darstellung eines Einzelfehlers	8
Abbildung 7: Wirkung der Stopfung [5].....	10
Abbildung 8: Stopfung [13].....	11
Abbildung 9: Vergleich von zwei Gleisabschnitten mit verschiedenen Standardabweichungen.....	13
Abbildung 10: Regressionsgerade und -funktion	15
Abbildung 11: Beispiel der Residualgröße.....	16
Abbildung 12: Erklärung des Prognosemodells	19
Abbildung 13: BR 189 [20]	20
Abbildung 14: Daten der Längshöhen am 12-01-2009.....	21
Abbildung 15: Stumpf- und Spitzweiche [22]	22
Abbildung 16: Prognosemodell der Standardabweichung an der dritten Weiche	27
Abbildung 17: Exponentielle Regressionslinie der Standardabweichung bei der dritten Weiche.....	28
Abbildung 18: Prognosemodell der Standardabweichung von 2,2km bis 2,4km	32
Abbildung 19: Einzelfehler bei Position 13,78km.....	35
Abbildung 20: Einzelfehler bei Position 14,15km.....	35
Abbildung 21: Einzelfehler bei Position 6,86km.....	36
Abbildung 22: Einzelfehler bei Position 30,63km.....	36
Abbildung 23: Einzelfehler bei Position 19,25km.....	37
Abbildung 24: Fall 1	39
Abbildung 25: Fall 2.....	39
Abbildung 26: Fall 3.....	40
Abbildung 27: Prognosemodell des Einzelfehlers bei Position 13,78km	40
Abbildung 28: Größter Einzelfehler	41
Abbildung 29: Der zweite größte Einzelfehler	42
Abbildung 30: Prognosemodell der Standardabweichung von 2km bis 2,2km	43
Abbildung 31: Prognosemodell der Standardabweichung von 10km bis 10,2km	45
Abbildung 32: Vergleich der Prognosemodelle von sechs Gleisabschnitten.....	47
Abbildung 33: Vergleich der Prognosemodelle von Einzelfehlern	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Längshöhe - AL – Standardabweichung nach EN 13848 [10].....	7
Tabelle 2:	Längshöhe – SRA - Standardabweichung nach Richtlinie 821 [9].....	7
Tabelle 3:	Längshöhe - AL & IL & IAL - Einzelfehler - Mittelwert Spitze [10]	9
Tabelle 4:	Beurteilungsmaßstäbe für Einzelfehler nach Richtlinie 821 [11]	9
Tabelle 5:	Regelinspektionsabstand nach verschiedenen Höchstgeschwindigkeiten (Hg) [11]	12
Tabelle 6:	Beziehung zwischen Instandhaltungszyklen und -maßnahmen mit Kapazitäten [3]	12
Tabelle 7:	Ausschnitt der Daten der Weichen.....	22
Tabelle 8:	Standardabweichung bei Weichen	24
Tabelle 9:	Umgewandelte Nummer aller 13 Daten.....	25
Tabelle 10:	startIndex von fünf Gleisabschnitten.....	30
Tabelle 11:	endIndex von fünf Gleisabschnitten.....	30
Tabelle 12:	Parameter von fünf Gleisabschnitten	34
Tabelle 13:	Die fünf größten Längshöhen.....	34
Tabelle 14:	Positionen der entsprechenden Einzelfehler.....	34
Tabelle 15:	Vergleich der Qualitäten von sechs Gleisabschnitten	48
Tabelle 16:	Vergleich der Einzelfehler von sechs Gleisabschnitten	50

Anhang

Skript 13 (für Abbildung 10)

```
x=[70 78 80 87 91 98 100 106 107 109];
y=[1.5 2 1 1.7 2.1 1.8 2.3 1.8 2.6 1.8 ];
n=length(x);
xb=mean(x);
yb=mean(y);
x2b=sum(x.^2)/n;
xyb=x*y/n;
b=(xb*yb-xyb)/(xb^2-x2b);
a=yb-b*xb;
y1=a+b.*x;
x2= [0 70 78 80 87 91 98 100 106 107 109 120];
y2=a+b.*x2;
plot(x, y, '*',x2,y2);
hold on;
y2= a+b.*30;
y3= a+b.*60;
line([30 60],[y2 y2]);
line([60 60 ],[y2 y3]);
hold on;
axis([0 120 0 3.0])
text(123.6, 2.48, '^');
text(123,2.4, 'Y');
z1= text(45, 0.7, '$$\triangle{X}$$');
set(z1,'Interpreter','latex');
text(64.2, 1.09, '^');
z2= text(59.8, 1.0, '$$\triangle{Y}$$');
set(z2,'Interpreter','latex');
text(23, 2.0, 'b1= ----- ');
text(39.5,2.15, '^');
z3=text(35,1.90, '$$\triangle{X}$$') ;
set(z3,'Interpreter','latex');
z4=text(35,2.05, '$$\triangle{Y}$$');
set(z4,'Interpreter','latex');
annotation('arrow',[0.13 0.13],[0.8 1]);
annotation('arrow',[0.8 1],[0.108 0.108]);
```

```
box off ;
xlabel(' Zeit [d] ');
ylabel(' Abweichung[mm] ');
```

Skript 14 (für Abbildung 12)

```
x=[0.97 1.94 3.06 4.17 5 6.11 7.08 8.06 9.03 10.14];
y=[1.70455 1.84091 1.97727 2.18182 2.31819 2.45455 2.45455 2.52273 2.72727 2.79545];
n=length(x);
xb=mean(x);
yb=mean(y);
x2b=sum(x.^2)/n;
xyb=x*y/n;
b=(xb*yb-xyb)/(xb^2-x2b);
a=yb-b*xb;
y1=a+b.*x;
plot(x,y,'*',x,y1);
axis([0 20 0 4.500]);
y2=a+b.*20; y10=a+b.*10.14;
line ([10.14 20],[y10 y2] , 'linestyle','--', 'color', 'g');
annotation('arrow',[0.13 0.13],[0.8 1]);
annotation('arrow',[0.8 1],[0.108 0.108]);
line ([0 20],[3.25 3.25] , 'linestyle','--', 'color', 'r');
line ([13.5 13.5],[0 3.25] , 'linestyle','--', 'color', 'b');
text(6,3.5, 'Grenzwert');
text(12,-0.3, ' Instandhaltungszeit');
box off;
xlabel(' Zeit[d] ');
ylabel(' Abweichung[mm] ');
```