

Innovative Messdatenanalyse –
ein Beitrag für ein nachhaltiges Anlagenmanagement Gleis

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grads

Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

von

Dipl.-Ing. Fabian Hansmann

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Veit

Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft (TU Graz)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein

Lehrstuhl und Prüfamf für Verkehrswegebau (TU München)

Danksagung

Ganz besonders danke ich all jenen, die mich im Rahmen der Erstellung dieser Arbeit unterstützt und gefördert haben.

Besonders hervorgehoben sei an dieser Stelle Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Veit, der mir die Möglichkeit gab am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft im Rahmen meiner Tätigkeit als Universitätsprojektassistent diese Dissertation zu erstellen. Geduldig stand er mir mit Rat und Tat zur Seite, gewährte mir den nötigen wissenschaftlichen Freiraum und förderte mich in allen Belangen. Außerdem sei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein sein Aufwand als Zweitgutachter und Prüfer dieser Arbeit vielmals verdankt. Nicht unerwähnt bleiben soll an dieser Stelle auch mein ehemaliger Professor Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf, der mir den Weg in die Wissenschaft gezeigt hat.

Ohne Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Marschnig hätte mich mein Weg wohl nie an das Institut geführt und den zahlreichen Diskussionen mit ihm habe ich es zu verdanken, dass die bestehende Arbeit nun vor mir liegt.

Mit meinen Kollegen Markus Enzi und Matthias Landgraf hat sich über die letzten Jahre eine Bürogemeinschaft entwickelt, die ich nach meiner Zeit am Institut besonders vermissen werde. Weit über das Berufliche hinaus schenkten sie mir jederzeit ihr offenes Ohr und gaben mir stets wertvolle Anregungen. Ohne ihr Zutun, die motivierenden und aufrichtigen Worte wäre mir der Weg zum Ziel weitaus schwerer gefallen.

Frau Claudia Kaufmann war mir oftmals eine große Hilfe die administrativen Hürden des universitären Alltags zu meistern und hatte stets ein offenes Ohr für meine Anliegen.

Die Möglichkeit zu studieren ist nicht selbstverständlich. Meinen Eltern Christine und Gerhard Hansmann gilt nicht nur der Dank, dass sie mir mein Studium finanziell ermöglicht haben, sondern auch dass sie mir im Laufe dessen eine verlässliche Stütze waren. Die zahlreichen Stunden, in denen sie die Arbeit Korrektur gelesen haben, lassen sich wohl kaum in Dankesworte aufwiegen. Meinem Bruder Daniel Hansmann danke ich für seine Anregungen und seinen brüderlichen Rat in manch ausweglos erscheinender Situation.

Meiner Lebensgefährtin Marion Mußbacher danke ich, dass sie mir jederzeit beistand. Durch ihren fachfremden Zugang half sie mir Problemstellungen von einer anderen Seite zu betrachten und so manchen Sachverhalt dadurch klarer zu erfassen.

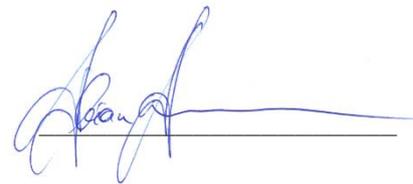
Leider läßt sich eine wahrhafte Dankbarkeit mit Worten nicht ausdrücken.

Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832)

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

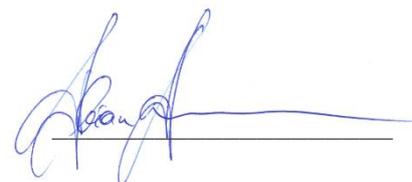
Graz, am 16.01.2015



Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, 01/16/2015



Kurzfassung

Die in den Eisenbahnoberbau eingebrachten Lasten führen zu einem wachsenden Verschleiß unterschiedlichen Komponenten. Dieser Versagensmechanismus limitiert die Nutzungsdauer der einzelnen Komponenten und folglich jene des Gesamtsystems. Die Planung von zustandsabhängigen und verursachungsorientierten Maßnahmen erfordert eine reproduzierbare und kontinuierliche Erfassung des Anlagenzustands. Ein Anlagenmanagement, basierend auf der Auswertung von Messdaten, bildet dafür die mögliche Entscheidungsgrundlage. Es ermöglicht dem Infrastrukturbetreiber die Evaluierung des Netzzustandes und eine langfristige Planung seines Mitteleinsatzes.

Die Planung von Maschineneinsätzen erfolgt in Österreich durch den Infrastrukturbetreiber und beruht auf Erfahrungen, Gleisbegehungen, zeitlichen Intervallen und der Auswertung von Messsignalen. Die nationale Normung erwähnte bislang lediglich Schwellenwerte zur reaktiven Planung von Maßnahmen. Erst die kürzlich aktualisierte Fassung der EN 13848-4 erlaubt es zum ersten Mal Messsignale in Qualitätsklassen einzustufen, legt das Hauptaugenmerk jedoch auf die Betrachtung der Gleislage.

Die vorliegende Forschungsarbeit verfolgt das Ziel die Gleislage unter Berücksichtigung ihrer zeitlichen Entwicklung über die Nutzungsdauer hinsichtlich ihrer Qualität zu klassifizieren. Darüber hinaus wird die Messsignalanalyse durch eine komponentenspezifische Zustandsbeschreibung erweitert, wobei versucht wird einzelne Signalcharakteristika eindeutig auftretenden Schadensbildern zuzuordnen. Die Herausforderung besteht in einer kontinuierlichen Beschreibung des Anlagenzustands, sowie der Interpretation der historischen Entwicklung zur Abschätzung zukünftiger Aufwände. Als Datengrundlage für die vorliegende Forschungsarbeit dient eine am Institut entwickelte Datenbank, welche 3.800 Gleiskilometern umfasst und sowohl Mess- als auch Oberbaudaten enthält.

Die aus der Berechnung der statistischen Kennziffern gewonnenen Erkenntnisse erlauben es dem Infrastrukturbetreiber so den Anlagenzustand zu erfassen und zu bewerten. Vor-Ort-Untersuchungen bestätigen die Korrelation zwischen unterschiedliche Versagensmechanismen und unterschiedlichen Signalen bzw. in deren Charakteristik. Die zeitliche Entwicklung der statistischen Kennziffern erlaubt somit die komponentenspezifische Erfassung des Anlagenzustandes und dessen Bewertung hinsichtlich seiner vorhandenen Restsubstanz für Schwelle und Schotter. Diese bildet die Grundvoraussetzung für lebenszykluskostenbasierte Entscheidungen und erlauben eine mittelfristige Budgetplanung.

Summary

Various stresses within the railway track lead to a continuous wear of track components. Consequently, this process causes a limitation of single components service life and finally of the whole system. Analysis of measurement data achieves a classification of current asset condition and thus delivers essential input data for preventive and condition-based maintenance planning. Hence, this knowledge about current asset condition and its expected development over time allows long-term budget planning and provides a solid basis for sustainable asset management.

Currently, planning of maintenance actions is mainly reactive and bases on the experience of local track engineers as well as on fixed time intervals. Nevertheless in the last years a shift from expensive reactive maintenance planning to a preventive and more sustainable one can be recognized. For years different types of recording cars have collected a huge amount of various measurement signals. These signals could be helpful input parameters for a continuous track monitoring system, although up to now they are mainly used to detect cross-sections exceeding defined thresholds. Until recently, national and international standards have delivered different intervention levels for different measurement signals. The 2014 updated version of the European standard EN13848-4 is the first one that distinguishes between different quality levels.

Therefore the main challenge of this thesis is to identify options for an asset management based on the evaluation of existing measurement signals. Calculated key numbers simplify the interpretation of measurement signals and quantify their significant signal characteristics. The new developed evaluation establishes on the one hand a load-based classification of track geometry and on the other hand a component-specific condition monitoring. Accordingly this quantification enables an objective condition monitoring based on the proven correlation between measurement signals and track deterioration. All investigations are based on a database of 3,800 track kilometers including measurement data and additional asset information of the main Austrian network. The established condition monitoring estimates remaining service life of each component focusing on ballast and sleeper. Finally, time series analyses of different key numbers enable to both, forecast component-specific deterioration and classify the current condition.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Anlagenmanagement.....	2
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	3
2	Berechnung der kumulierten Belastung	7
2.1	Zielsetzung	7
2.2	Belastungsdaten	8
2.2.1	Datengrundlage	8
2.2.2	Die Betriebsstellenbelastung als Grundlage für die Abschätzung der Verkehrsentwicklung	11
2.3	Die Schätzfunktion	15
2.4	Validierungsprozess.....	21
3	Gleisgeometrie	23
3.1	Einleitung.....	24
3.2	Über den Zusammenhang der Gleislagequalität und der Stopfmenge.....	25
3.2.1	Die zeitliche Entwicklung der Standardabweichung Höhe	27
3.2.2	Die zeitliche Entwicklung der Standardabweichung Richtung	28
3.2.3	Die zeitliche Entwicklung der MDZ-a Ziffer	30
3.3	Einbauqualität und Ausbauqualität	30
3.4	Über den Zusammenhang zwischen Gleislage und kumulierten Lasttonnen.....	37
3.4.1	Begriffsdefinition	37
3.4.2	Der Zusammenhang zwischen der Q_n , b_n und Q_{ult}	39
3.4.3	Aufbau der Abfragen	41
3.4.4	Entwicklung der Gleislage in geraden ($R > 600m$) Abschnitten	43
3.4.5	Raumzusammenhang.....	60
3.4.6	Sensitivitätsanalyse	62
3.5	Klassifizierungsalgorithmus Zusammenfassung	64
3.5.1	Modellaufbau	64
3.5.2	Primärklassifizierung	66
3.5.3	Sekundärklassifizierung.....	67
3.5.4	Vergleich zwischen einer voll- und teillogarithmischen Bewertung.....	68
3.5.5	Anwendung der Klassifizierung auf das TUG-Netz	69

3.5.6	Zusammenfassung und Ergebnisdiskussion.....	73
3.6	Der Zusammenhang zwischen Wellenlängen und Schadenscharakteristika	75
3.6.1	Historische Entwicklung der Fraktalanalyse	78
3.6.2	Umsetzung der Fraktalanalyse auf die Gleislage im TUG-Netz	81
3.6.3	Netzauswertung	86
3.6.4	Einwirkung der Schotterbettreinigung auf die Dimensionen der Fraktalanalyse	91
3.6.5	Theorie trifft Praxis – Gleisbegehung.....	94
3.6.6	Aufbau eines Regressionsmodells und seine Möglichkeiten.....	100
3.6.7	Zusammenfassung und Ausblick.....	107
4	Dem Schwellenzustand auf der Spur	109
4.1	Einleitung.....	110
4.2	Die Rauigkeit der Spur.....	112
4.2.1	Der Störstellenalgorithmus	114
4.2.2	Werteverteilung	117
4.2.3	Einbauqualität und Ausbauqualität.....	121
4.3	Prognosemodell ProgMod	122
4.3.1	Algorithmusaufbau	123
4.3.2	Ergebnisse des Regressionsmodells	124
4.4	Auswirkungen von Maßnahmen und spezifischen Oberbaukombinationen auf die Qualitätssignale	127
4.5	Entwicklung der Standardabweichung über die kumulierte Belastung.....	132
4.6	Netzweite Auswertung	136
4.7	Zusammenfassung	137
5	Epilog.....	138
6	Literaturverzeichnis	141
A1.	Einblicke in die TUG-Datenbank.....	145
A1.1	Aufbau der TUG-Datenbank.....	145
A1.2	Messsignale, Qualitätssignal und Qualitätswerte.....	146
A2.	Vom Ursprung der Messsignale – der Messwagen	146
A2.1	Messung der Gleisgeometrie.....	146
A2.2	Messung von Schienenprofil und Abnutzung	149

1 Einleitung

Im Jahr 2013 stand der deutschen Bahn Netz AG für den Gesamt-Instandhaltungsaufwand eine Summe von 1,48 Milliarden Euro zur Verfügung. Betrachtet man die gewerkespezifische Aufteilung dieser Summe so sind davon allein 720 Millionen Euro dem Oberbau zuzurechnen. Die Investitionen in das Bestandsnetz kosteten dem deutschen Steuerzahler im Bereich des Oberbaus 1,3 Milliarden Euro. [Hempe 2014]

Die ÖBB Infrastruktur AG investierte im Jahr 2013 laut Rahmenplan 487,5 Millionen Euro in die Instandhaltung ihrer Anlagen, wobei eine genaue Zuschreibung der Kosten auf die einzelnen Gewerke nicht angegeben wurde, weshalb an dieser Stelle auf die Angabe der Investitionsquoten an dieser Stelle verzichtet wird. [Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr 2013]

Im Geschäftsjahr 2009/10 wandte Network Rail 464 Millionen Pfund für die Instandhaltung ihrer Gleise auf und weitere 698 Millionen Pfund für die Neulage von Streckenabschnitten. [Audley, Andrews 2013]

Das Betreiben von Eisenbahninfrastrukturen erfordert die Bindung von großen Kapitalmengen. Ein wesentlicher Bestandteil der Aufgaben eines Eisenbahninfrastrukturbetreibers ist die Entwicklung einer ausbalancierten Instandhaltungs- und Re-Investitionsstrategie, um einerseits mögliche Sicherheits- und Verfügbarkeitsrisiken zu vermeiden und andererseits den wachsenden Kostendruck zu reduzieren. Um eine solche Planung zu ermöglichen, ist es notwendig den momentanen Streckenstatus bestmöglich zu beschreiben, um aus diesem Audit entsprechende Maßnahmen vorausschauend ableiten zu können. Die Planung von Maßnahmen kann präventiv oder auch korrektiv (reaktiv) erfolgen und zielt darauf ab den Zustand der Anlage zu verbessern, um die angestrebte Nutzungsdauer zu erreichen oder sogar zu übersteigen. Eine über ein aussagekräftiges Gleismonitoring abgeleitete, präventive Instandsetzungsplanung ermöglicht so, nicht nur eine nachhaltige Nutzung der Infrastruktur, sondern erlaubt unter anderem auch, eine Reduktion der Kosten gegenüber der korrektiven Instandsetzung. [Hansmann, Marschnig 2012]

Die DB-Netz-AG ermöglichte durch den Ausbau der präventiven Schienenbearbeitung (Schleifen, Hobeln, Fräsen) eine 47 prozentige Minimierung der Instandhaltungskosten der Schiene. Trotz der gestiegenen Kosten für die präventive Schienenbearbeitung überwiegen in diesem Falle die Einsparungen, die durch die reduzierte Anzahl von erforderlichen Schienenwechseln realisiert werden konnte. Die präventive Instandhaltung konnte die Ausprägung des Schadens verringern und so die Nutzungsdauer der Komponente Schiene nachhaltig verlängern. [Hempe 2014]

1.1 Anlagenmanagement

"Systematic and coordinated activities and practices through which an organization optimally manages its assets and their associated performance, risks and expenditures over their lifecycle for the purpose of delivering the organization's business objectives."

"coordinated activities of an organization to realize value from assets"

[Woodhouse 2014]

Der Internationale Eisenbahnverband UIC [UIC 2010] definiert die lebenszykluskosten-optimierte Entscheidungsfindung über Inspektion, Instandhaltung, Neulage und Verbesserung der Anlage als primäres Ziel eines Anlagenmanagements. Hierfür gliedert sich das Anlagenmanagement in:

- I Inspektionen
- I Instandhaltungs- und Neulagen-Eingriffsschwellen
- I Obsoleszenz-Management
- I technische Strategien
- I Redundanz
- I Kostenstruktur

Die Grundlage für ein nachhaltiges Anlagemanagement bildet die objektive Erfassung des Zustandes und die daraus abgeleitete Bewertung der Anlagenqualität. Basierend auf dieser Bewertung ist es möglich Entwicklungen zu erkennen und rechtzeitig Maßnahmen zum Erreichen der gesetzten Ziele zu setzen. Je früher der Zustand der Anlage erfasst werden kann, bzw. die Zustandsentwicklung über die Zeit es ermöglicht notwendige Maßnahmen langfristig abzuschätzen, desto eher ist eine effiziente nachhaltige Planung des Mitteleinsatzes möglich. Das Anlagenmanagement eines Eisenbahninfrastrukturbetreibers umfasst eine große Anzahl unterschiedlicher Anlagen mit stark streuenden Nutzungsdauern und divergierenden Anforderungen hinsichtlich Inspektion und Instandhaltung. Im Zentrum der nachfolgenden Arbeit steht der Fahrweg selbst. Der Fahrweg besteht aus unterschiedlichen Komponenten, die hohen Beanspruchungen ausgesetzt sind und miteinander agieren. Vereinfacht wird dabei in folgende Komponenten unterschieden:

- I Schiene
- I Befestigungssystem
- I Schwelle
- I Schotter
- I Unterbau

Das Versagen einzelner Komponenten birgt nicht nur die Gefahr der Beeinträchtigung der Verfügbarkeit des Gesamtsystems, sondern zieht auch Auswirkungen auf die Lebensdauer der gesamten Anlage „Fahrweg“ nach sich.

Wie das Beispiel der österreichischen Bundesbahnen zeigt (vgl. [ÖBB Infrastruktur AG 2012]) nutzen Eisenbahninfrastrukturbetreiber einerseits die Begehung durch fachkundiges Personal und andererseits die durchgängige Befahrung des Hauptgleises mit einem Messwagen um den Anlagenzustand zu erfassen. Beide Möglichkeiten weisen dabei Vor- und Nachteil auf, die an dieser Stelle lediglich stichprobenartige angeführt werden. Der Messwagen erlaubt in kurzer Zeit die flächendeckende Erfassung unterschiedlicher Messsignale.

Die Schwierigkeit in der Auswertung der Messsignale besteht in ihrer Zuordnung zu unterschiedlichen, komponentenspezifischen Verschleißzuständen. Eine Gleisbegehung hingegen ermöglicht unterschiedliche Verschleißzustände vor Ort zu betrachten und individuell zu bewerten. Begehungen sind allerdings nicht nur kosten- sondern auch zeitintensiv. Ihren positiven Nutzen erreichen sie nur, wenn sie durch fachlich geschultes Personal durchgeführt werden, wenngleich dennoch die Ergebnisse einer gewissen subjektiven Streuung unterliegen. Das gesamte Netz mehrmals im Jahr reproduzierbar zu erfassen, ist somit schwierig. Eine Kombination beider Möglichkeiten generiert den maximalen Nutzen für den Infrastrukturbetreiber.

Viele Bahnen reduzieren die Auswertungen einzelner Messsignale darauf, diese mit Schwellenwerten – normativ oder intern festgelegt – zu vergleichen und daraus etwaige Maßnahmen abzuleiten. Das Hauptaugenmerk liegt vielfach in der Betrachtung der Gleislage, andere Komponenten oder gar eine historische Zustandsentwicklung werden oftmals nicht weiter berücksichtigt (vgl. [Pace 2012]). Die Möglichkeiten des Messwagens hinsichtlich der Erfassung unterschiedlicher Messsignale gehen weit über die bloße Erfassung der Gleislage hinaus und bergen so Chance zusätzliche Informationen über den komponentenspezifischen Anlagenzustand zu generieren.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Forschungsarbeiten der letzten Jahre zeigen einen Zusammenhang zwischen Ausprägung unterschiedlicher Messsignale und dem im Gleis vorkommenden Schadensbild bzw. den daraus abzuleitenden Maßnahmen. (vgl. [Auer 2004], [Auer et al. 2007], [Auer 2013], [Bocciolone et al. 2007], [Selig et al. 2008], [Faiz, Singh 2009], [Matsuda et al. 2011]).

Unterschiedliche Ansätze nutzen dabei die Schnittstelle zwischen der Messsignalerfassung und dem Anlagenmanagement um mögliche IT-Lösungen zu entwickeln. Diese erleichtern die Auswertung der Messsignale und erlauben die Betrachtung der zeitlicher Entwicklung in Kombination mit zusätzlichen Informationen, wie Oberbaustoffen. (vgl. [Jovanovic 2003], [Pace 2012], [Auer 2004]).

Eine zentrale Aufgabe dieser Arbeit ist es zu prüfen, ob es möglich ist, über die Beschreibung der Charakteristik unterschiedlicher bestehender Messsignale eine Bewertung des Komponentenzustandes zu etablieren.

Eine derartige Bewertung würde nicht nur die Grundlage für die Argumentation unterschiedlicher Maßnahmen bilden, sondern erlaubt auch die Klassifizierung einzelner Strecken bzw. des Netzes hinsichtlich des Zustandes unterschiedlicher Komponenten. Dabei liegt der Fokus nicht auf der Auswertung der einzelnen Messsignale an sich (in ihrer „Rohform“), sondern vielmehr in der Fassung ihrer Charakteristika über statistische Kennziffern und unterschiedliche Qualitätswerte. Messsignale setzen sich aus unterschiedlichen Wellenlängen zusammen und lassen sich vereinfacht in einem ersten Schritt über ihre absolute Ausprägung und die Rauigkeit des Signales beschreiben. Es gilt daher diese beiden Attribute mit Hilfe unterschiedlicher statistischer Kennziffern wie z.B. Median oder Standardabweichung zu erfassen und ihre Entwicklung über die Nutzungsdauer zu beschreiben. Gelingt es anschließend, diesen statistischen Kennziffern unterschiedliche Schadensbilder bzw. Komponenten zuzuordnen, erlaubt dies eine Beschreibung der Verschleißentwicklung anhand der Entwicklung der statischen Kennziffern über die Zeit.

Im Gegensatz zu vielen bereits bestehender Lösungen zielt die vorliegende Arbeit nicht darauf ab nur zu visualisieren, sondern vielmehr zu klassifizieren und zu bewerten. So bedient man sich gemäß Stand der Technik im Falle der Gleislage zum Beispiel der Standardabweichung, um unterschiedliche Bereiche miteinander zu vergleichen. Die aus den Höhsignalen berechnete Standardabweichung erlaubt es die zeitliche Entwicklung ebenso zu betrachten, wie auch die Charakteristik des Signales auf eine bestimmte Art zu erfassen und daraus Schlüsse abzuleiten. Die oftmals vernachlässigte zeitliche Entwicklung gestattet die Abschätzung notwendiger Maßnahmen vor dem Erreichen gesetzter Schwellenwerte. Die Berechnung der Standardabweichung betrachtet das Signal in seiner Gesamtheit, unterscheidet jedoch nicht in unterschiedliche Frequenzbereiche. Eine solche Unterscheidung kann möglicherweise zusätzliche Informationen über das genaue Schadensbild liefern.

Dabei konzentriert sich der Algorithmus nicht auf die Überprüfung sicherheitskritischer Grenzwerte, sondern lediglich auf die Schaffung einer soliden Entscheidungsbasis für ein nachhaltiges Anlagenmanagement. Die Überschreitung sicherheitskritischer Schwellenwerte bedingt das Setzen einer Maßnahme und nimmt damit jegliche Wahlmöglichkeit. Eine strategisch-nachhaltige Maßnahmenplanung wird dadurch obsolet, da lediglich die Auswirkung der Maßnahme diskutiert werden kann, nicht jedoch deren Notwendigkeit.

Die Planung der Baumaßnahmen selbst erfolgt nicht durch den zu entwickelnden Algorithmus, da sowohl eisenbahn- als auch baubetriebliche Rahmenbedingungen unberücksichtigt bleiben. Die Klassifizierung des Anlagenzustandes liefert den Infrastrukturverantwortlichen eine Unterstützung, Maßnahmen zu argumentieren und Entwicklungen darzustellen, die Entscheidung über die getroffenen Maßnahmen und damit die Verantwortung selbst liegt nach wie vor beim Betreiber der Infrastruktur.

Eine exakte Definition der Schadensbilder gestaltet sich schwierig, da aufgrund der zahlreichen eingesetzten, unterschiedlichen Oberbaustoffe die Reaktionen auf die Einwirkungen variieren. Dennoch ist eine grobe Definition notwendig, da diesen spezifischen Schadensbildern in weiterer Folge jeweils eine Messsignalcharakteristik bzw. eine Kombination aus solchen zugeordnet werden soll. Die Beschreibungen des Zustandes der Schiene und des Unterbaus sind Teile anderer Dissertationen, die parallel zu dieser bzw. bereits im Vorfeld fertiggestellt wurden und deren Erkenntnisse im Rahmen des Forschungsprojektes GleisPROPHET [Hansmann, Marschnig 2012] vereint werden.

Die Schädigung der Schiene, angefangen von Schienenoberflächenfehlern bis zu Schienenverschleiß, können mehr oder weniger entkoppelt vom Gesamtsystem betrachtet werden, da der Tausch der Schiene mit wenigen Ausnahmen unabhängig vom übrigen System erfolgen kann. Lediglich im Falle der Erhöhung der eingebrachten Kräfte durch den Zustand der Schienenoberfläche (z.B. Riffelbildung) ist eine detailliertere Betrachtung dieser Interaktion notwendig [Hansmann, Marschnig & Veit 2011]. Diese Tatsache erlaubt es Messsignale, die die Komponente Schiene betreffen, in dieser Arbeit unberücksichtigt zu lassen.

Die Beschreibung des Unterbaus ist Teil einer Dissertation, die im Rahmen des Projektes GleisPROPHET von Matthias Landgraf [Landgraf 2016] erstellt wird. Zwischen dem Unterbau und dem Schotterbett kommt es infolge der Beanspruchung zu einer nicht vernachlässigbaren Wechselwirkung. Teile dieser Dissertation entstanden so fächerübergreifend und basieren auf gemeinsam gewonnenen Ergebnissen bzw. Auswertungsmethoden, die auch als solche gekennzeichnet sind.

Die Grundlage für die in weiterer Folge getätigten Auswertungen bilden unterschiedliche Messsignale aus dem Netz der österreichischen Bundesbahnen (siehe A1). Ohne Beschränkung der Allgemeinheit kann daher in Österreich die Auswertung auf folgendem mehrheitlich auftretende Schadensbilder beschränkt werden (vgl. [Auer 2010], [Zhang, Murray & Ferreira 1999]):

Schotterverschmutzung	Unterbau Schotterzerstörung Einbringung durch das Transportgut
Kraftschlussverlust	Versagen der Schienenbefestigung Verschleiß der Zwischenlage Einpressung der Rippenplatte horizontale/ vertikale Einarbeitung des Schienenfußes Zerstörung des Schwellenauflegers
Zerstörung der Schwelle	Riss Bruch

Tabelle 1 Definition der auftretenden Schadensbilder

Auf die genaue Abgrenzung der unterschiedlichen Schadensbilder folgt die Bestimmung der vorliegenden Lasteinwirkung, die Ausarbeitung der statistischen Kennziffern, die Analyse ihrer Entwicklung mit steigender Lasteinbringung und schlussendlich die Klassifizierung der Anlage. Als Validierung dienen dabei Informationen zu Großmaschineneinsätzen der letzten 13 Jahre, sowie detaillierte Gleisbegehungen zu insgesamt mehr als 25 Re-Investitionsprojekten. Diese Re-Investitionsprojekte wurden im Rahmen der letzten drei Jahre, gemeinsam mit den ÖBB hinsichtlich ihrer technischen und wirtschaftlichen Notwendigkeit untersucht.

In enger Zusammenarbeit mit den ÖBB, genau genommen mit der Regionalleitung der Region West, ist zur Validierung der Ergebnisse des Projektes GleisPROPHET zusätzlich eine Modellregion geschaffen worden. Im Rahmen dieser Modellregion ist es möglich, die aus der Messsignalauswertung gewonnenen Ergebnisse zusätzlich zu den Begehungen im Rahmen der Re-Investitionsprojekte vor Ort zu validieren.

2 Berechnung der kumulierten Belastung

2.1 Zielsetzung

Die auf das System einwirkenden unterschiedlichen Kräfte führen zu einem Verschleiß einzelner Systemkomponenten und schlussendlich zum Versagen des Gesamtsystems. Um die Verschlechterung der einzelnen Komponenten zu beschreiben, ist es notwendig deren unterschiedlich-fortgeschrittenen Verschleißzustände zu erfassen. Geht man prinzipiell davon aus, dass sich der Komponentenverschleiß über einzelne statistische Kennziffern beschreiben lässt, so ergibt sich vice versa die Beschreibung der Entwicklung der statistischen Kennziffern über die Nutzungsdauer der Anlage als erklärtes Ziel.

Eine Darstellung der rein zeitlichen Entwicklung der statistischen Kennziffern über z.B. das Oberbualter, ermöglicht eine derartige Beschreibung nur eingeschränkt. Denn eine derartige Gegenüberstellung ermöglicht nur eine teilweise Korrelation mit den eingebrachten Lasten und die Analyse der statischen Kennziffern unterläge folglich einer vermeidbaren Streuung. Zwei Anlagen mit gleichem Oberbualter, aber unterschiedlicher Verkehrsbelastung unterliegen einer deutlich unterschiedlichen kumulativen Belastung und folglich einem unterschiedlichem Anlagenzustand, sofern dieser von der Belastung getrieben wird.

Außer Acht gelassen werden durch unterschiedliche fahrzeugspezifische Geschwindigkeiten und Fahrzeugtypen hervorgerufene, stark divergierende, dynamische Beanspruchungen des Gleiskörpers. Einzelne Fahrzeuge mit unterschiedlichen Laufeigenschaften befahren den gleichen Streckenabschnitt mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und bringen folglich in das System stark streuende Kräfte ein. Nicht nur fehlende Informationen zur Beschreibung, sondern auch eine notwendige Vereinfachung der Problemstellung machen es notwendig diesen Effekt auf eine andere Art abzuschätzen bzw. anzunähern. Davon ausgenommen sind steigende Systembelastungen, die durch unterschiedliche Beanspruchungen aufgrund abweichender Trassierungsparameter entstehen und die über die Berücksichtigung des Radius näherungsweise abgebildet werden können. Unabhängig von den erwähnten Unterschieden in der Trassierung wird vereinfachend davon ausgegangen, dass sich das Fahrzeugkollektiv und die gefahrenen Geschwindigkeiten auf den untersuchten Streckenabschnitten gleich verteilen und so die Bruttotonnage die Beanspruchung hinlänglich genau beschreibt.

So wird beispielsweise angenommen, dass die Geschwindigkeitsspreizung auf geraden Streckenabschnitten in Österreich generell einer ähnlichen Verteilung folgt, unabhängig davon, wo dieser Streckenabschnitt geografisch auftritt, lediglich begrenzt durch die

zulässige Geschwindigkeit des Streckenabschnittes. Diese Annahme, wenngleich sie einer gewissen Unschärfe unterliegt, erlaubt es die zeitliche Entwicklung des Anlagenzustandes auf statische Krafteinbringungen zu reduzieren.

Die statische Krafteinbringung setzt sich aus unterschiedlichen Längs-, Quer- und Vertikalkräften zusammen. Die tägliche Streckenbelastung bildet die Grundlage diese Beanspruchung abzuschätzen. Unter Berücksichtigung unterschiedlicher Krümmungen lassen sich Rückschlüsse auf die wechselnden Querkräfte ziehen, während hingegen die Längskräfte nahezu unberücksichtigt bleiben. [Führer 1979]

Vereinzelte Einwirkungen, wie z.B. witterungsbedingte Einflüsse, lassen sich nur schwer fassen und können daher in netzweiten Auswertungen nicht berücksichtigt werden.

2.2 Belastungsdaten

Es gilt eine Möglichkeit zu schaffen, basierend auf den vorliegenden Belastungsdaten, Rückschlüsse auf die kumulierte Belastung querschnittsgenau zu ziehen. Die kumulierte Belastung repräsentiert näherungsweise die in das System eingebrachten Kräfte innerhalb eines bestimmten Zeitraumes. Dieser Zeitraum lässt sich frei definieren, wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit über das Einbaujahr der Schwelle und einen gewählten Bezugszeitpunkt eindeutig begrenzt. Im Falle einer Gleisaltlage führt diese Annahme zu irreführenden Aussagen. Bei einer Gleisaltlage werden zum Unterschied zu Gleisneulagen keine neuen Oberbaustoffe eingebaut, sondern bereits eingebaute Oberbaustoffe wiederverwendet. Auf Strecken des TUG-Netzes (siehe A1) stellen die Gleisaltlagen die Minderheit dar, weshalb dieser Effekt außer Acht gelassen werden kann.

2.2.1 Datengrundlage

Die vorliegenden Belastungsdaten umfassen unterschiedliche verkehrliche Kennzahlen, unterschiedliche Zeitperioden und stammen teilweise aus unterschiedlichen Quellen. Auf den ersten Blick betrachtet, ergibt sich so eine äußerst ungünstige Ausgangssituation, zur Abschätzung der kumulierten Belastung. Das nachstehende Kapitel soll daher in erster Linie einen Überblick über die vorliegenden Daten gewähren, mögliche Korrelation aufzeigen, sowie Plausibilität und Datengenauigkeit prüfen. Die Analyse der Belastungsdaten unterscheidet dabei innerhalb dieser Arbeit zwischen abschnittsspezifischen (abschnittsgetreu ermittelten) und netzweiten (netzweit ermittelten) Belastungsdaten.

Abschnittsspezifische Belastungsdaten in Gesamtbruttotonnen pro Tag und Gleis liegen netzweit aus den Jahren 1999-2002 und 2007-2013 vor. Die Jahre 1999 bis 2002 geben die tägliche Gleisbelastung für jede Streckenabschnittsnummer (DB776) des Bestandsnetzes an. Diese wurden basierend auf einer repräsentativen Woche ermittelt und

über das Jahr hochgerechnet. Die so ermittelten Gleisbelastungen werden an die Struktur der TUG-Datenbank angepasst und mit den vorliegenden Daten verknüpft.

In den Jahren 2007 bis 2013 wurden die Belastungen über das Jahr und das entrichtete Infrastrukturbenutzungsentgelt ermittelt. Die Zuordnung zur TUG-Datenbank erfolgt über Streckenkostenstellen, wobei diese das Netz noch weiter unterteilen und so spezifischere Informationen erlauben. Lediglich die Informationen aus dem Jahr 2007 wurden in die Datenbank inkludiert. Die Belastungen aus dem Jahr 2013 reflektieren die Auswirkungen der Weltwirtschaftskrise und bilden daher allein betrachtet keine sichere Eingangsgröße für ein Belastungsmodell.

Die in der Datenbank enthaltenen Belastungsinformationen aus dem Jahr 2010 beruhen auf realen, manuell aufgearbeiteten Zugzahlen über ein gesamtes Jahr.

Die **netzweiten Belastungsdaten** umfassen unterschiedliche, verkehrsspezifische Kennzahlen und lassen sich ganz allgemein hinsichtlich ihrer Datenherkunft in zwei Gruppen unterteilen. Die Daten von 1971 bis 2001 stammen aus der Eisenbahn- und Seilbahnstatistik der Republik Österreich, herausgegeben vom Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr [Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr 1971-2001]. Lediglich die Jahre 1992 und 1993 fehlen in dieser Zeitreihe unterschiedlicher Kennziffern, die sich in ihren Aussagen immer auf das gesamte in Österreich bestehende Eisenbahnnetz beziehen.

Nach 2001 wurden die Aufgaben des Ministeriums teilweise von der Schienenkontrollgesellschaft (SCG) übernommen und die Statistik in ähnlicher Form weitergeführt. Parallel dazu fungieren die Geschäftsberichte der österreichischen Bundesbahnen [ÖBB-Holding AG 2013] als zusätzliche exaktere Datengrundlagen, wobei die Aussagen dieser immer mit den Zahlen der SCG verglichen wurden [Röhler 2013]. Dabei gilt es allerdings zu beachten, dass sich die Aussagen der Geschäftsberichte nur auf das Netz der österreichischen Bundesbahnen beziehen bzw. in Teilbereichen sogar nur auf Teile der Aktiengesellschaft. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich die Reduktion der Netzlänge bzw. die Änderung des Bezugsnetzes vernachlässigbar gering auf die Entwicklung der Betriebsleistung auswirkt. Diese Annahmen kann getroffen werden, da naturgemäß in den letzten Jahrzehnten in erster Linie Strecken mit sehr geringem Verkehrsaufkommen stillgelegt wurden, und der Anteil der privaten Infrastrukturbetreiber in Österreich verhältnismäßig gering ist (siehe Abbildung 1). So mag es zwar sein, dass es eine Korrelation zwischen der Betriebsleistung der privaten Infrastrukturbetreiber und der des Gesamtnetzes gibt; eine wesentliche Beeinflussung der Entwicklung der globalen Betriebsleistung kann allerdings ausgeschlossen werden.

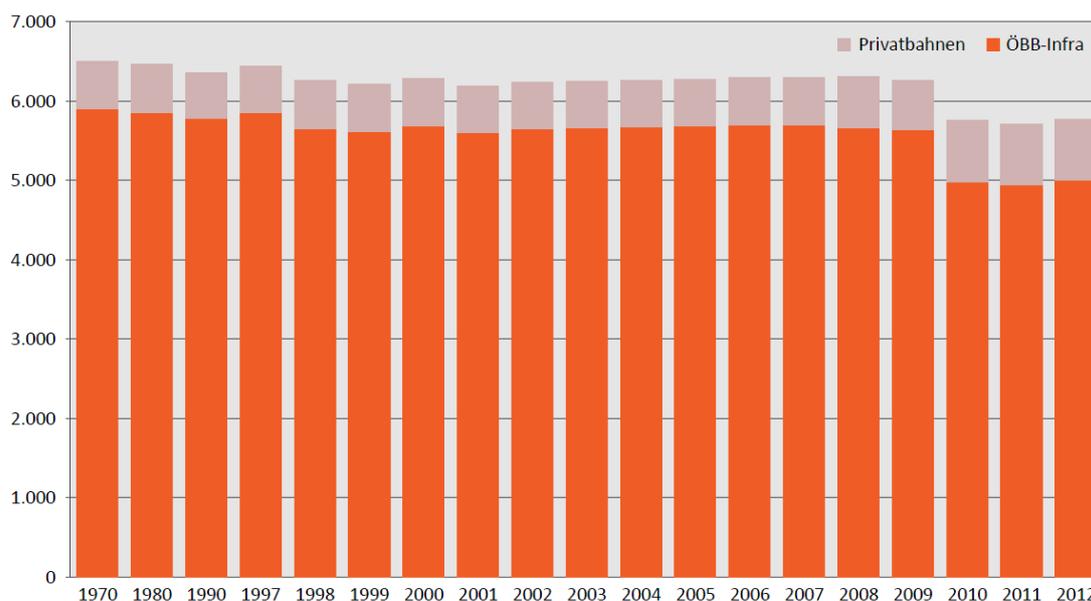


Abbildung 1 Entwicklung des Schienennetzes in Österreich (Baulänge in Kilometer) [Röhler 2013]

Anders gestaltet sich dieser Zusammenhang jedoch, betrachtet man die Entwicklung der transportierten Güter in den letzten 40 Jahren (siehe Abbildung 2). Eine detaillierte Analyse zeigt im Jahr 2009 einen plötzlichen Anstieg der transportierten Güter, der sich einzig und allein auf die Übernahme der MAV Cargo zurückführen lässt. Dieses Beispiel zeigt deutlich, dass bei der Interpretation der einzelnen Werte besonderes Augenmerk auf die Datenquelle zu legen ist.

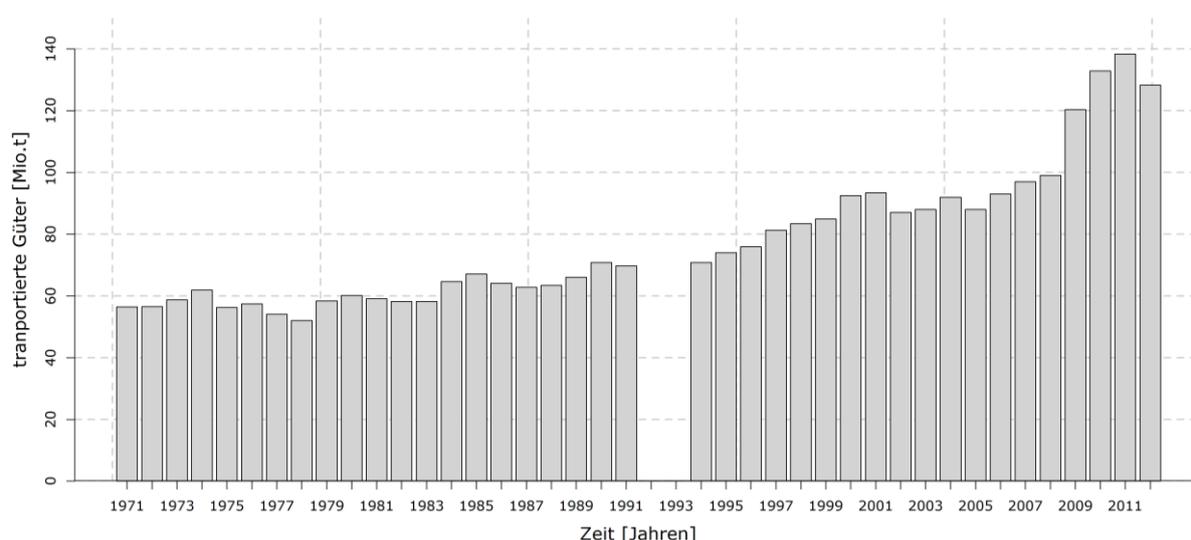


Abbildung 2 zeitliche Entwicklung der transportierten Güter

In einem ersten Schritt dienen die Belastungsdaten der Betriebsstellen des TUG-Streckennetzes aus den Jahren 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2007 und 2010 als Grundlage für die Berechnung der kumulierten Belastung. Es gilt die Möglichkeit zu prüfen aus den vorliegenden gleisspezifischen Belastungsdaten eine Belastungsfunktion zu entwickeln, die es erlaubt, über zumindest die mittlere Nutzungsdauer der Anlage die kumulierte

Belastung zu berechnen. Die Belastungsfunktion zielt dabei darauf ab die Entwicklung der Belastung der Anlage im Laufe der Nutzungsdauer abzuschätzen. Ihre Aufgabe ist es, weder die Belastungsentwicklung der nächsten Jahre zu bestimmen, noch jede Entwicklung detailgetreu abzubilden. Um einen Überblick über die vorliegenden Belastungsdaten der einzelnen Betriebsstellen zu erhalten, wird die zeitliche Entwicklung der durchschnittlichen täglichen Gleisbelastung betrachtet (siehe Abbildung 3).

2.2.2 Die Betriebsstellenbelastung als Grundlage für die Abschätzung der Verkehrsentwicklung

Die zeitliche Entwicklung der durchschnittlichen im TUG-Netz Betriebsstellenbelastung (siehe Abbildung 3) zeigt einen Anstieg der Verkehrsbelastung bis zum Jahr 2007. Die gesunkene Gleisbelastung im Jahr 2010 reflektiert die Auswirkung der Weltwirtschaftskrise, die allerdings geringer ausfällt als erwartet. Allein die Tatsache der sehr geringen Anzahl von abschnittsspezifischen Werten, macht es schwierig über eine Zeitreihenanalyse auf die Entwicklung der Gleisbelastung zu schließen. Die Wertekonzentration um 2000 würde eine mögliche Abschätzung der zeitlichen Entwicklung der Belastung über eine Regressionsanalyse sehr stark prägen und teilweise verzerren. Die Werte aus dem Jahr 2010 wären weiters in einer Zeitreihenanalyse auszuschließen, da diese die historische Belastungsentwicklung über die Nutzungsdauer der Anlagen nicht widerspiegeln. Die zeitliche Entwicklung der Betriebsstellenbelastung lässt sich somit nicht heranziehen um die Entwicklung der Belastung abzubilden, da auf der einen Seite zu wenige Werte vorhanden sind und auf der anderen Seite sich diese sehr stark auf einzelne Zeiträume reduzieren.

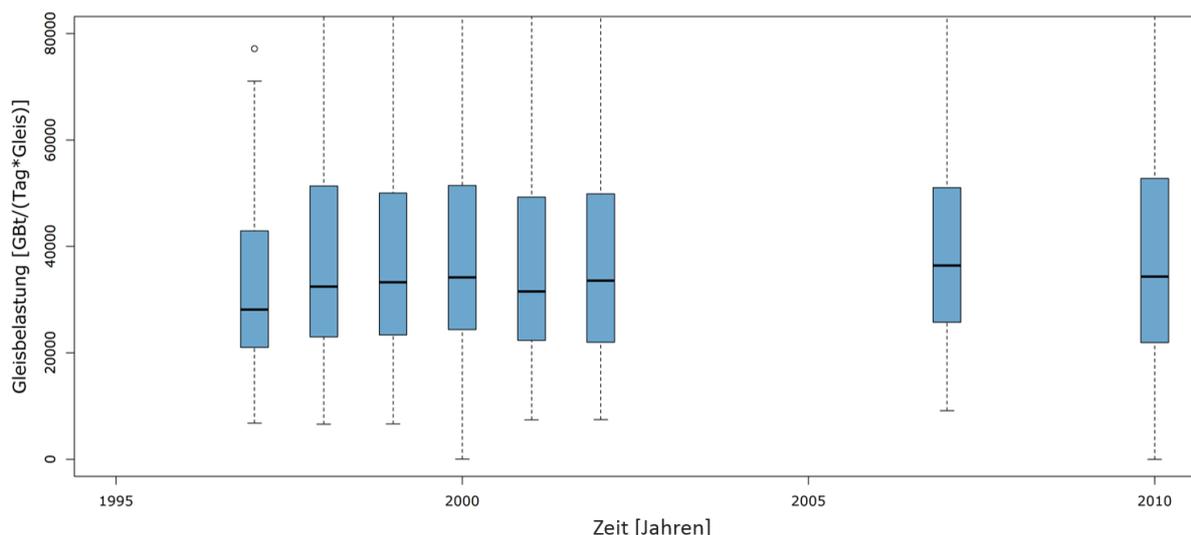


Abbildung 3 zeitliche Entwicklung der durchschnittlichen Gleisbelastung im TUG-Netz

Es ist daher notwendig auf anderem Wege stabilere Informationen über die Belastungsentwicklung zu erhalten. Die netzweite Entwicklung unterschiedlicher Kennzahlen erlaubt, bedingt durch den größeren Stichprobenumfang, eine weitaus stabilere Bestimmung

der Belastungszunahme. Die resultierende Regressionsfunktion beschreibt lediglich die zeitliche Entwicklung des Belastungszuwachses des gesamten Netzes. In weiterer Folge wird davon ausgegangen, dass sich diese Entwicklung im Mittel auf einzelne Strecken projizieren lässt. Die netzweite Belastungssteigerung wird so auf eine streckenspezifische Entwicklung umgelegt. Die so entstehende Unschärfe wird in Kauf genommen, wenngleich Belastungsumlagerungen über neu entstandene Alternativrouten oder streckenspezifische Besonderheiten über dieses Belastungsmodell nicht abgebildet werden. Die Belastungsentwicklung im Querschnitt wird so über die des Netzes abgeschätzt, da eine exakte Ermittlung ausgeschlossen ist.

Zur Abschätzung der Belastungsentwicklung können unterschiedliche Kennzahlen herangezogen werden. Eine Berechnung der kumulierten Belastung benötigt dabei eine Kennzahl, die auf der einen Seite das Gewicht des Zuges mit der Transportweite kombiniert. Die netzweite Entwicklung der Gesamtbruttotonnenkilometer könnte so als Basis für das Belastungsmodell dienen. In einem ersten Schritt werden unterschiedliche Eckdaten der vergangenen Jahre netzweit erhoben und gegenübergestellt. Eine solche Gegenüberstellung soll dabei eine Plausibilitätsprüfung der Daten untereinander ebenso realisieren, wie auch schlussendlich die Grundlage für die Entwicklung der Schätzfunktion bilden. Die Schätzfunktion bildet die netzweite Entwicklung der gewählten Kennziffer bestmöglich über ein berechnetes Regressionsmodell ab. Die Funktion repräsentiert dabei die netzweite Entwicklung und wird auf die Belastung in einzelnen Querschnitten referenziert. Die Umsetzung der Referenzierung erfolgt dabei über vorhandene Belastungsdaten in den einzelnen Streckenquerschnitten, die dabei als Stützpunkt der Schätzfunktion dienen und die netzweite Entwicklung so auf die querschnittsgetreue Analyse reduzieren.

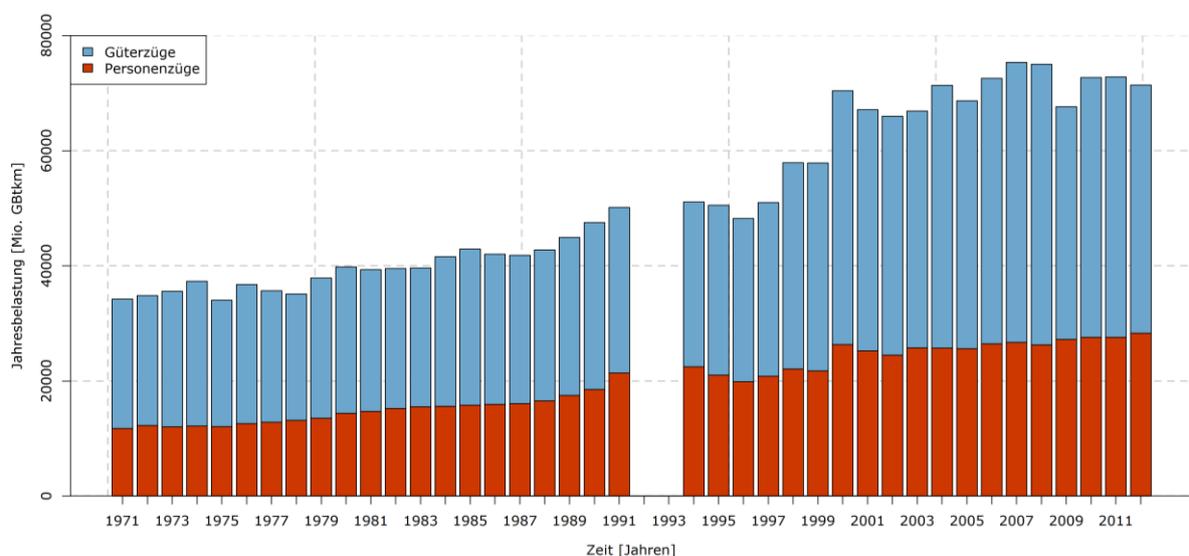


Abbildung 4 Netzweite Entwicklung der Bruttotonnenkilometer von 1971 bis 2012

Die Darstellung der Betriebsleistung in Gesamtbruttotonnen (siehe Abbildung 4) stellt das in den letzten Jahrzehnten gewachsene Transportaufkommen im österreichischen Eisenbahnnetz deutlich dar. Die Auswirkungen einzelner Wirtschaftskrisen, wie z.B. in den Jahren 1992 und 2007 lassen sich in den vorliegenden Daten ebenso erkennen, wie auch die maßgebliche Beeinflussung des Wachstums durch den Güterverkehr. Da die Informationen aus dem Jahr 2001 einerseits aus dem ÖBB Geschäftsbericht (66.400 Mio. Btkm) und andererseits aus der Eisenbahnstatistik (67.167 Mio. Btkm) vorliegen ist es hier möglich den Einfluss der unterschiedlichen Netzgrundlagen zu validieren. Ein Vergleich zeigt, dass beide Werte lediglich um rund 1% voneinander abweichen und daher mehr als 99% der Gesamtleistung im Netz der ÖBB erbracht wird. Diese geringe Abweichung unterliegt zwar einer gewissen statistischen sehr geringen Unschärfe, erlaubt jedoch den Unterschied im Bezugsnetz nachfolgend außer Acht zu lassen.

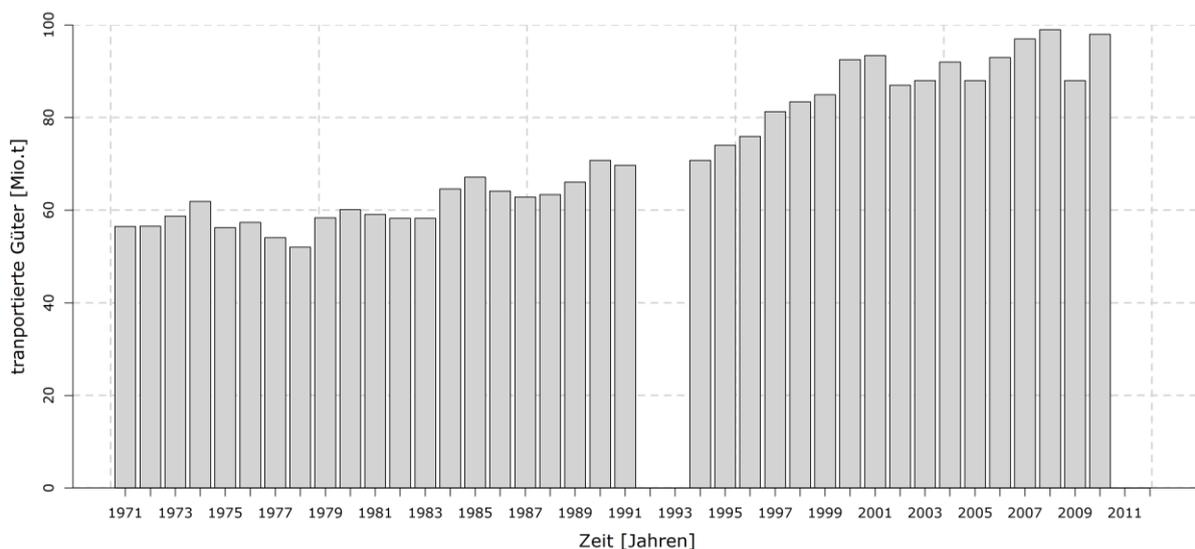


Abbildung 5 Anzahl der transportierten Güter

Bereinigt man die in Abbildung 2 dargestellten Zahlen und stellt ab 2001 nur die von der Rail Cargo erbrachten Gütertransporte dar, so ergeben sich die umgesetzten Güter in Tonnen wie in Abbildung 5 beschrieben. Auch wenn in dieser Darstellung zwei unterschiedliche Statistiken miteinander kombiniert werden, so zeigt sich doch sehr deutlich der Anstieg des Transportumfanges in den letzten Jahren. Die Interpretation dieser Abbildung ist jedoch mit Vorsicht vorzunehmen, da der Unterschied zwischen den Zahlen vor bzw. einschließlich 2001 (alle Transporte im österreichischen Eisenbahnnetz sind berücksichtigt) und danach (berücksichtigt sind alle Transporte der RailCargoAustria) größer ist, als er sich bei der Betriebsleistung ergibt. Durch den Wegfall der Kilometerinformation in der Bezugsgröße und der nicht Berücksichtigung von privaten Eisenbahnverkehrsunternehmen macht dieser Unterschied im Jahr 2001 nun nahezu 10% aus.

Die Liberalisierung des Marktes führte speziell im Bereich des Güterverkehrs, so zu einem drastischen Anstieg des Anteils privater Eisenbahnverkehrsunternehmen am Gesamtverkehrsaufkommen (siehe Abbildung 6).

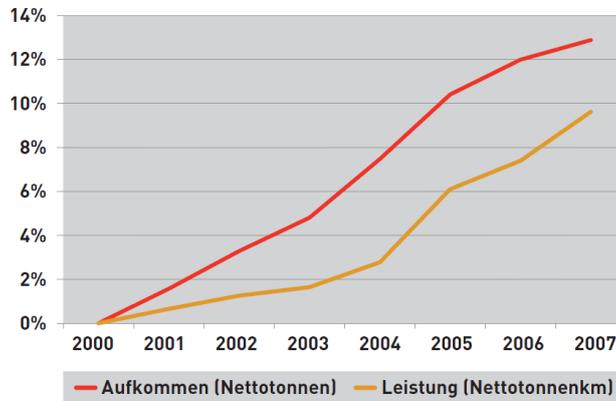


Abbildung 6 Marktanteil der privaten Eisenbahnverkehrsunternehmen am Güterverkehr im ÖBB-Netz [Röhler 2013]

Die Betrachtung der Zugkilometer spiegelt den äquivalenten Anstieg wider, wenn gleich sich in dieser Darstellung die Personenzüge als treibender Faktor präsentieren (siehe Abbildung 7). Gut zu erkennen ist die abrupte Angebotssteigerung mit der Einführung des neuen Austrotaktes im Jahre 1991 und die kurz darauffolgende Rücknahme desselben. Auch wenn durch die Skalierung der Achsen der Anschein entstehen könnte, dass der Güterverkehr nahezu keiner Steigerung unterliegt, so zeigt sich diese bei näherer Betrachtung.

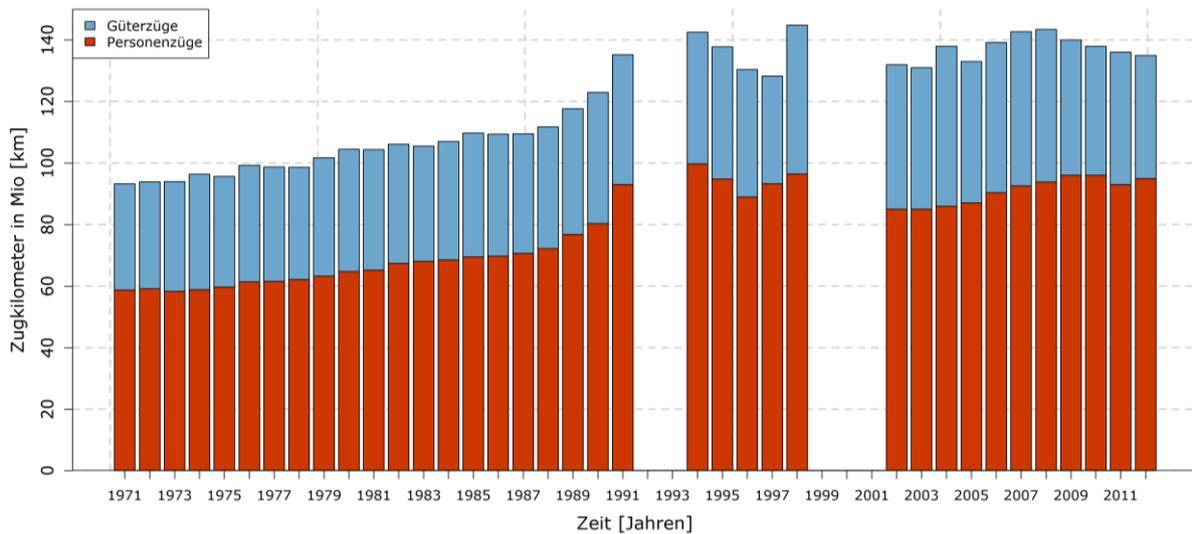


Abbildung 7 Zeitliche Entwicklung der Zugkilometer bis 2001 im gesamten österreichischen Eisenbahnnetz und danach im Netz der ÖBB

Die Entwicklung der Gesamtbruttotonnenkilometer über die letzten Jahre eignet sich am besten dazu, die Belastungszunahmen im Netz abzubilden. Die bereits dargestellte

geringfügige Beeinflussung außerhalb des ÖBB-Netzes liegender Strecken, sowie die Veränderung der Betriebslänge werden dabei außer Acht gelassen.

2.3 Die Schätzfunktion

Mit Hilfe einer Regressionsanalyse gilt es jene Funktion zu finden, die sich bestmöglich an die zeitliche Entwicklung der Betriebsleistung anpasst. Da sich das Modell danach richtet die Vergangenheit abzubilden, werden die Werte ab 2008 bis heute von der Berechnung in einer ersten Betrachtung ausgenommen. Diese Werte würden das Regressionsmodell verzerren, da sie sehr stark von den Auswirkungen der Wirtschaftskrise geprägt sind. Wenngleich die alleinige Betrachtung der Darstellung der Gesamtbruttotonnenkilometer über die Jahre einen überlinearen Verlauf nahe legt, wurden dennoch folgenden drei Modelle näher analysiert:

$$\text{lineares Modell: } Y(x) = C_1 \cdot x + C_2$$

$$\text{exponentielles Modell: } y(x) = e^{C_1 \cdot x + C_2}$$

$$\text{quadratische Modell: } y(x) = C_1 \cdot x^2 + C_2 \cdot x + C_3$$

Die Berechnung eines linearen Regressionsmodells erlaubt die Reihung dieser unterschiedlichen Modelle hinsichtlich ihrer Anpassung an die vorliegenden Belastungsdaten bzw. auch ihren möglichen, gänzlichen Ausschluss durch die Nichterfüllung einzelner Voraussetzungen. [Backhaus 2011]

Alle drei Modelle weisen ein korrigiertes Bestimmtheitsmaß von mindestens 90% auf, wobei das quadratische Modell mit 95,3% den höchsten Wert erreicht. In der grafischen Überprüfung der Ergebnisse hinsichtlich Autokorrelation, Homoskedastizität und Normalverteilung beschreibt das quadratische Modell den Zusammenhang am besten. Die Darstellungen der Ergebnisse zeigt deren Unterschiede hinsichtlich ihrer Anpassung (siehe Abbildung 8).

Die Auswertung spiegelt des Weiteren wider, wie sich die Residuen der einzelnen Messpunkte verteilen und sich hinsichtlich ihrer Größe ausprägen (Abbildung 9). Die zugeordneten Belastungswerte der Jahre 1985, 1996 und 2000 weichen am weitesten von der berechneten Regressionskurve ab. Da die Residuen als normalverteilt beurteilt werden können, spielt dieser Sachverhalt lediglich für die Wahl des Stützpunktes eine besondere Rolle.

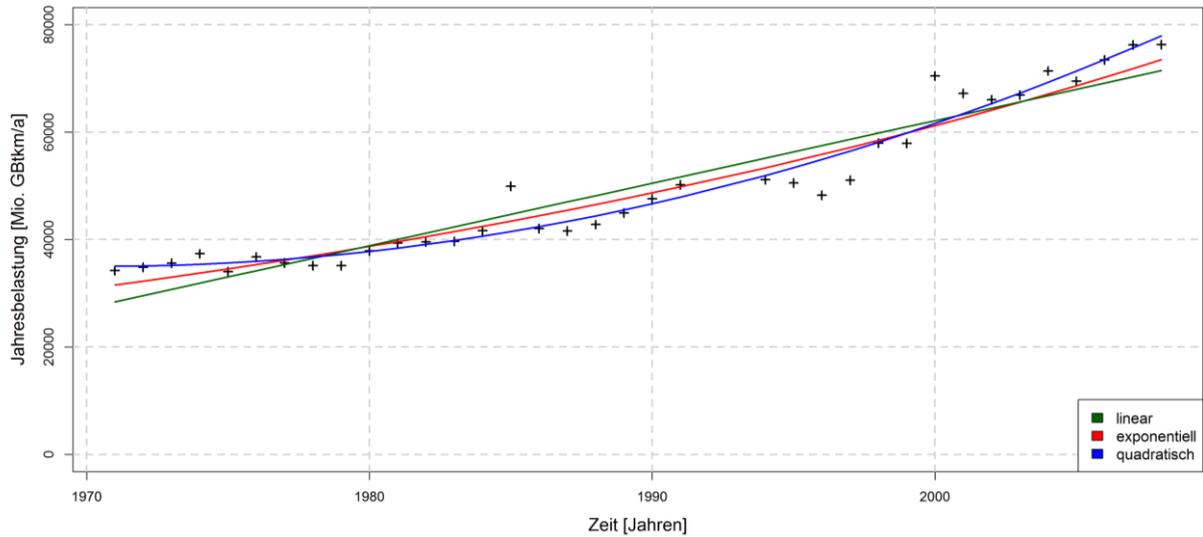


Abbildung 8 Ergebnisse der einzelnen Regressionsberechnungen im Überblick

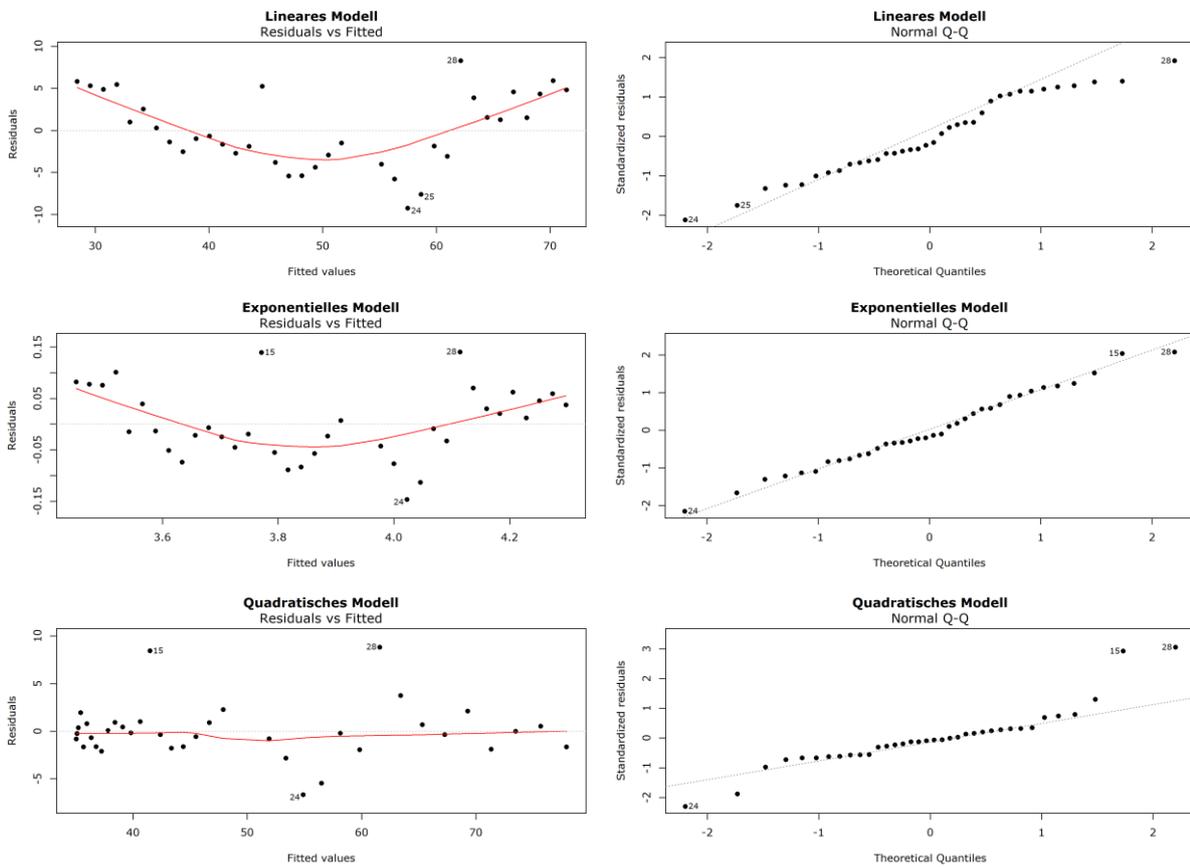


Abbildung 9 Grafische Auswertung der Ergebnisse des Regressionsmodelles für die Entwicklung der Betriebsleistung in Gesamtbruttotonnenkilometer

Nachdem es nun möglich ist, die Entwicklung der Betriebsleistung zu beschreiben, ist es notwendig, diesen Trend auf die einzelnen Querschnitte im TUG-Netz umzulegen. Diese Umlegung soll eine Abschätzung erlauben, wie sich die Belastung im Streckenquerschnitt in den letzten Jahren entwickelt hat. Um bei dieser Referenzierung auf die örtlichen

Belastungswerte eingehen zu können, ist es erforderlich, einen spezifischen Belastungswert als Stützpunkt für die Schätzfunktion heranzuziehen. Basierend auf diesem Stützpunkt werden schrittweise zeitlich versetzte Belastungswerte berechnet, deren relative Unterschiede der globalen Belastungsfunktion entsprechen. Angenommen es ergäbe sich aus der Regressionsfunktion eine 20%-ige Steigerung der Gesamtbruttotonnenkilometer zwischen dem berechneten Wert 2000 und 2007, so würde dieser relative Wert äquivalent für die querschnittsbezogene Belastungsfunktionsermittlung dienen.

\overline{B}_n ... aus der Regression berechneter globaler Belastungswerte im Jahr n

\overline{B}_0 ... aus der Regression berechneter globaler Belastungswerte im Jahr des Stützpunktes

b_0 ... abschnittsspezifischer-querschnittsbezogener Belastungswert

\overline{b}_n ... querschnittsbezogener berechneter Belastungswert

$$\overline{b}_n = b_0 \cdot \frac{\overline{B}_n}{\overline{B}_0}$$

Diese Vorgehensweise erlaubt die Umlegung der netzweiten Entwicklung auf den einzelnen Streckenquerschnitt, auch wenn sich die Betriebsleistung und die Streckenbelastung hinsichtlich ihrer Basiseinheiten voneinander unterscheiden. Unter der Annahme, dass ein Großteil der Betriebsleistung auf einem zeitlich nahezu unveränderten Netz erbracht wurde, änderte auch die Umlegung der Betriebsleistung auf eine durchschnittliche Gleisbelastung nichts am Ergebnis des Referenzierungsvorgangs.

Der Wahl des Stützpunktes kommt so eine entscheidende Bedeutung zu. Die Belastungswerte 2010 werden über die Schätzfunktion per Definition nicht abgebildet und scheiden so im Vorhinein als möglicher Stützpunkt aus. Übrig bleiben lediglich die Belastungswerte aus dem Jahr 2007 und die Wertesammlung um 2000. In einem ersten Schritt werden die Werte aus dem Jahr 1998 bis 2002 durch die Berechnung des Medians in einem Wert zusammengefasst. Dabei dient der berechnete Median als Stützpunkt der Schätzfunktion und imaginärer Belastungswert im Jahr 2000.

Der Median ist als robuster Schätzer besonders stabil hinsichtlich möglicher Ausreißer der Belastungswerte (Variante 1). Als zweite Variante dienen die Belastungswerte aus dem Jahr 2007 als mögliche Stützpunkte. Dabei ergibt sich der Nachteil, dass nur ein Belastungswert je Querschnitt als Stützpunkt dient (Variante 2). Die möglichen unterschiedlichen Ergebnisse beider Varianten werden in Abbildung 10 beispielhaft in einem Querschnitt verdeutlicht.

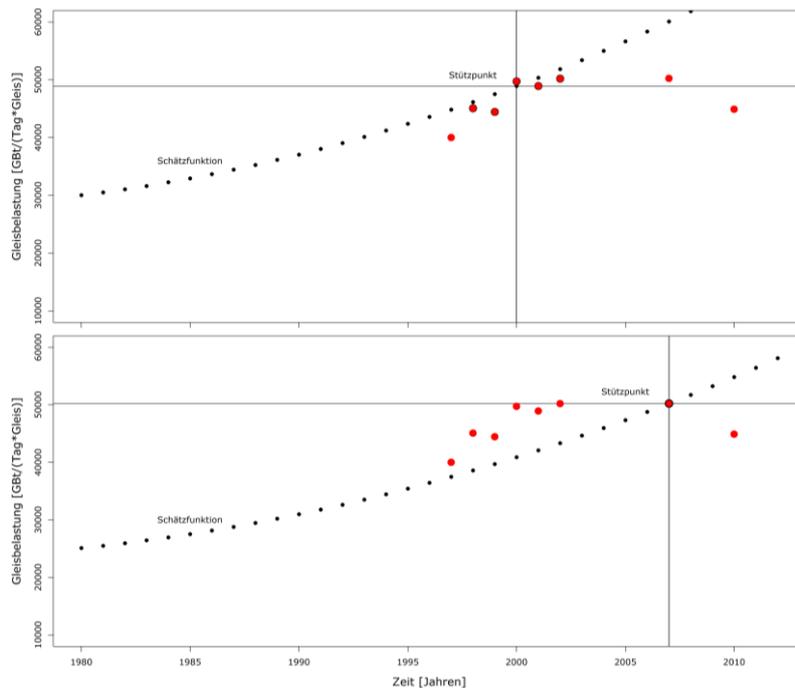


Abbildung 10 Berechnung der Schätzfunktion im gleichen Querschnitt; oben: Variante 1 unten: Variante 2

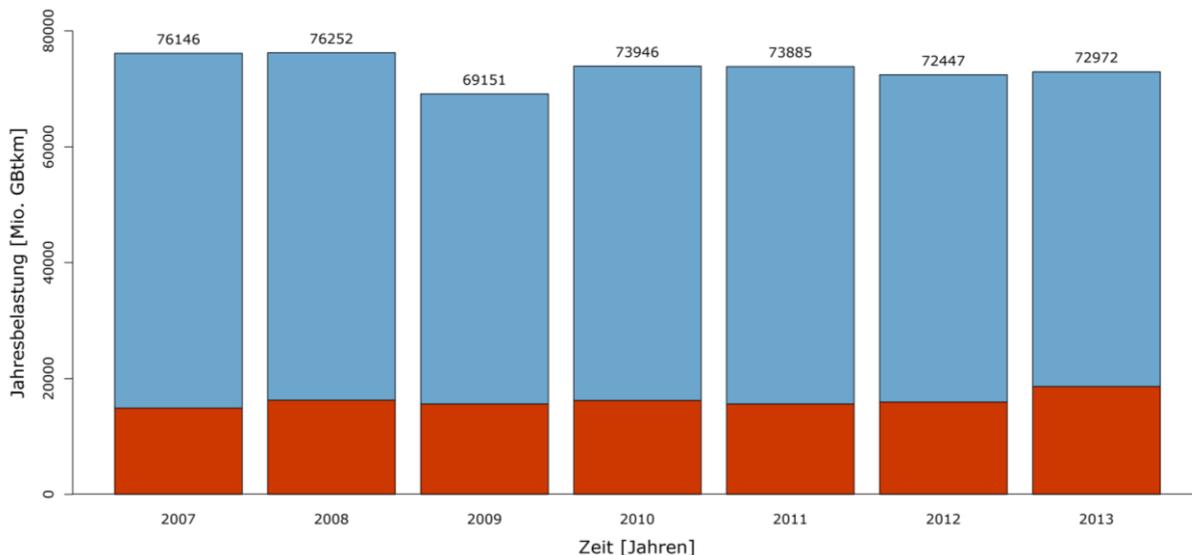


Abbildung 11 Anteil der Betriebsleistung des TUG-Netz [blau] am Gesamtnetz

Eine Validierung dieser Methoden erfolgt über die Berechnung der Betriebsleistung im TUG-Netz anhand der Schätzfunktion und dem nachstehenden Vergleich dieser Werte mit den Eingangswerten aus der zusammengefassten Statistik der Betriebsleistungen. Da das TUG-Netz jedoch nicht das gesamte ÖBB-Netz beinhaltet, ist es notwendig, vorab aus den Belastungsdaten 2007 bis 2013 den Anteil der Betriebsleistung des TUG-Netzes an der Gesamtbetriebsleistung zu ermitteln.

Um diese Berechnung durchzuführen wurden die Belastungsdaten einzelner Streckenkostenstellen den im Netz vorkommenden Streckenabschnitten zugeordnet. Die Anteile des TUG-Netzes an der Gesamtbetriebsbelastung ergeben sich wie in Abbildung 11

dargestellt zwischen 75% bis 80%. Es gilt zu beachten, dass die durchgeführte Zuordnung der vorhandenen Belastungswerte auf Streckenabschnitten basierend erfolgte. Eine gleichgenaue Zuordnung der Belastungswerte gestaltet sich vor allem in Knotenbereichen als schwierig, wodurch in der vorliegenden TUG-Datenbank diese Bereiche für die Belastungsdaten 2007 manuell überarbeitet, bzw. im Falle einer unmöglichen, eindeutigen Zuordnung als Fehlerwert gekennzeichnet wurden. Diese teilweise nicht mögliche Zuordnung von Gleisbelastung führt dazu, dass der Anteil der Betriebsleistung des TUG-Netzes weiter abgemindert werden musste und so zwischen 70% bis 75% liegt.

Bereits die stichprobenartig ausgeführte Gegenüberstellung beider Varianten zeigt, dass die in der Datenbank vorhandenen Belastungsdaten nur teilweise dem vorgeschlagenen Verlauf folgen, bzw. einer starken Streuung unterliegen (siehe Abbildung 10). Eine Netzauswertung soll folglich klären, welche Stützstelle eine bestmögliche Abschätzung liefert. Abbildung 12 zeigt den bereits bekannten Verlauf der Betriebsleistung in den vergangenen Jahren.

Der schraffierte Bereich zeigt die Spanne zwischen 70% bis 75% sowie 75% bis 80%. Die Spanne visualisiert den ermittelten Anteil des TUG-Netzes an der Gesamtbetriebsleistung. Die eingezeichneten Punkte repräsentieren, die aus der TUG-Datenbank berechneten Betriebsleistungen. Diese Gegenüberstellung verdeutlicht, dass die Belastungswerte zwischen 1997 und 1999 im Mittel augenscheinlich zu hoch ermittelt wurden. Folglich würde die Berechnung der Schätzfunktion über Variante 1 tendenziell zu überhöhten Belastungswerten führen. Die Belastungswerte zwischen 2000 und 2002 befinden sich zwar zwischen 75% bis 80% der Betriebsleistung, repräsentieren jedoch einen augenscheinlichen Hochpunkt im Belastungsverlauf, was wiederum zu erhöhten Belastungswerten führt.

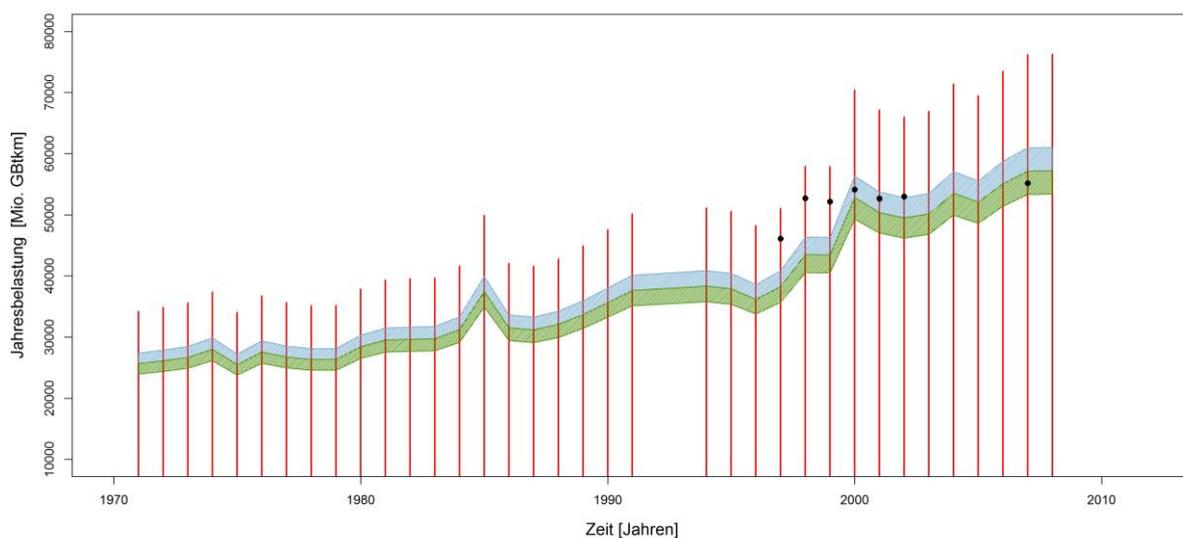


Abbildung 12 Anteil des TUG-Netzes an der Gesamtbetriebsleistung des Streckennetzes

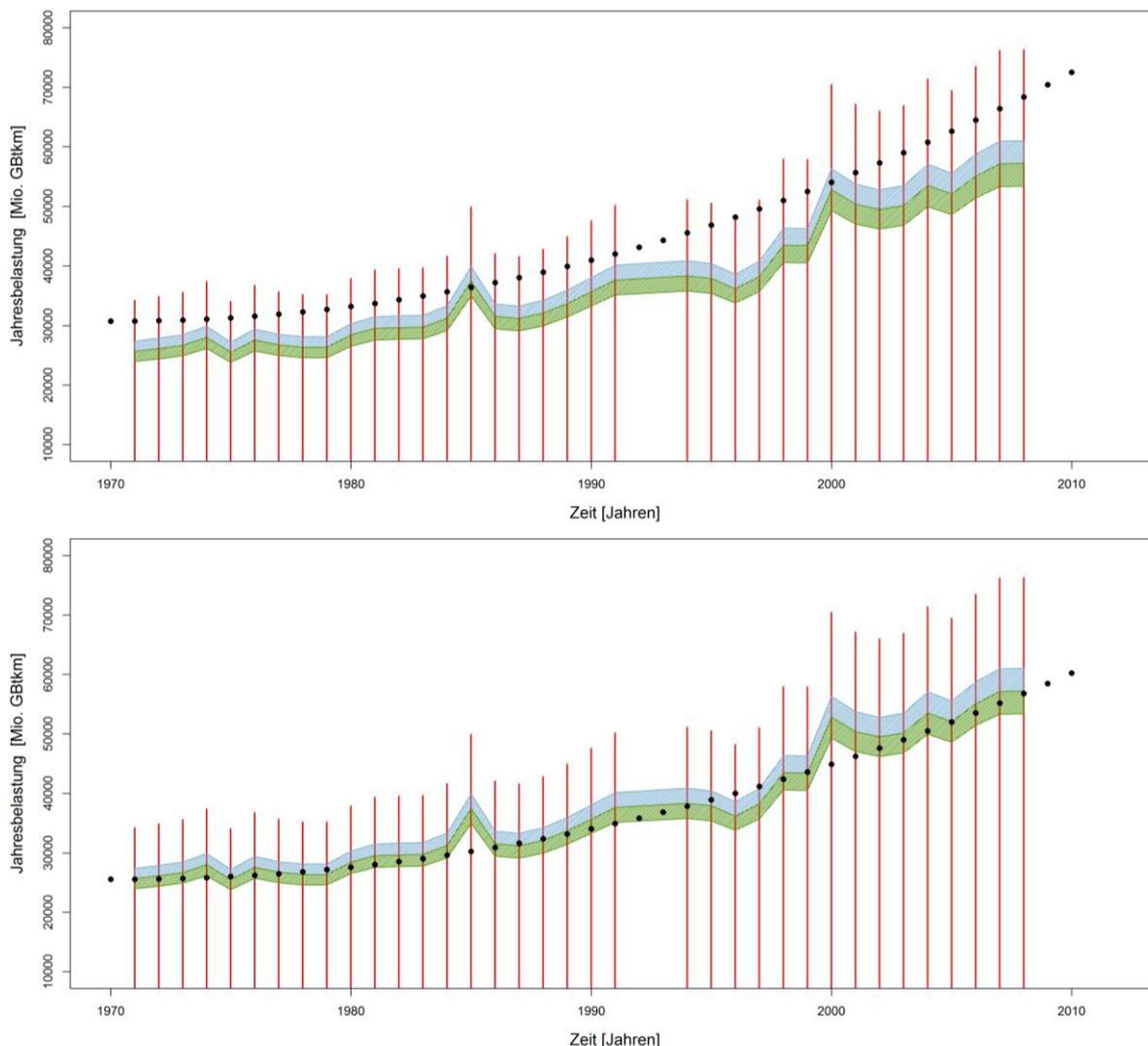


Abbildung 13 Vergleich zwischen den unterschiedlich ermittelten Schätzfunktionen

Aus der geschätzten, querschnittsgetreuen Belastungsentwicklung der TUG-Datenbank (sofern die Belastungswerte des Stützpunktes variantenabhängig eindeutig und fehlerfrei vorhanden sind) lassen sich die Betriebsleistungen des TUG-Netzes berechnen. Die so berechneten Betriebsleistungen der Variante 1 kommen über den angegebenen 80% der Gesamtbetriebsleistung zu liegen.

Die Betriebsleistungen der Variante 2 erreichen den angestrebten unteren Bereich des Schätzintervalls. Die Gegenüberstellung der unterschiedlichen Berechnungsvarianten legt dar, dass die Berechnung der eingebrachten Lasten über die Variante 1 zu augenscheinlich zu hohen Lasten führt und somit als nicht zulässig erachtet wird. In weiterer Folge werden so die kumulierten Belastungen über die Variante 2 und daher über die Belastungswerte 2007 als Stützpunkt für die quadratische Funktion berechnet.

2.4 Validierungsprozess

Die Berechnung der Schätzfunktion basiert bei Variante 2 auf den querschnittsgetreuen Belastungswerten 2007. Die Belastungswerte 2007 zeigen sich, basierend auf den vorangegangenen Auswertungen, zwar im Mittel als geeignete Möglichkeit die Belastungsentwicklung im Netz abzuschätzen, dennoch unterliegen sie als singuläre Erhebung einer gewissen Unsicherheit. Um diese Unsicherheit einzugrenzen und so auch die Modellstabilität zu erhöhen, ist es notwendig zusätzliche Überprüfungen vorzunehmen. Diese Validierungen zielen dabei in erster Linie darauf ab, die Belastungsdaten 2007 zu überprüfen, und in einem zweiten Schritt das generelle Verkehrswachstum im Einzelquerschnitt zu bewerten. Zeigt sich so eine in diesem Wachstum nicht vernachlässigbare Schwankung zwischen den Belastungsdaten (z.B. Verkehrsumleitungen in Folge von Baustellen), so gilt es diese im Zuge der weiteren Betrachtung unberücksichtigt zu lassen.

Die Validierung erfolgt in einem dreistufigen in Abbildung 14 dargestellten Prozess. Im ersten Schritt werden die relativen Abweichungen zwischen den Belastungsdaten aus den Jahren 2007 und 2010 berechnet. Trotz der Wirtschaftskrise ergibt sich die Betriebsleistung in beiden Jahren annähernd gleich, wodurch davon ausgegangen wird, dass sich dieser Trend auch in den querschnittsgetreuen Belastungswerten widerspiegelt. Im Fall der maximalen Abweichung beider Werte um $\pm 10\%$ voneinander, ergibt sich der Belastungswert 2007 als Stützpunkt der Schätzfunktion. Alle Querschnitte, die diesem Kriterium nicht entsprechen, werden nacheinander mit dem Median der Belastungswerte 2000-2002 verglichen. Die Betriebsleistungen der Jahre 2000 bis 2002 ergeben sich annähernd gleich, wodurch angenommen wurde, dass auch die Gleisbelastungen in diesen Jahren annähernd konstant blieben. Je nach Stufe des Validierungsprozesses werden die Werte mit den unterschiedlichen Kriterien verglichen und anschließend die Belastungsdaten gewählt, die sich am besten als Stützpunkt für die Berechnung der Schätzfunktion eignen.

Die Belastungsdaten aus dem Jahr 2010 liegen außerhalb des zeitlichen Anwendungsgebietes der Schätzfunktion und dienen dennoch nicht zur bloßen Validierung. Teilweise fungieren sie ebenfalls als Stützpunkt der Schätzfunktion. In diesem Fall werden die Belastungsdaten aus dem Jahr 2007 durch die Belastungsdaten aus dem Jahr 2010 ersetzt und in das Jahr 2007 rückdatiert. Denn nach wie vor gilt per Definition das Jahr 2007 als Stützpunkt der Berechnung. Die Belastungsdaten 2010 werden in diesem Fall mit dem Faktor 1,03 multipliziert, um den Unterschied in den Betriebsleistungen der beiden Jahre auszugleichen. Der Validierungsprozess ergibt, dass in 65% der Fälle die Belastungsdaten aus dem Jahr 2007 als Grundlage dienen und lediglich in 20% der Fälle diese durch die Belastungsdaten aus dem Jahr 2010 ersetzt werden müssen.

In knapp 15% der Fälle lässt sich die Schätzfunktion – basierend auf den gewählten Kriterien des Validierungsprozesses – nicht heranziehen um die kumulierte Belastung im Einzelquerschnitt zu berechnen.

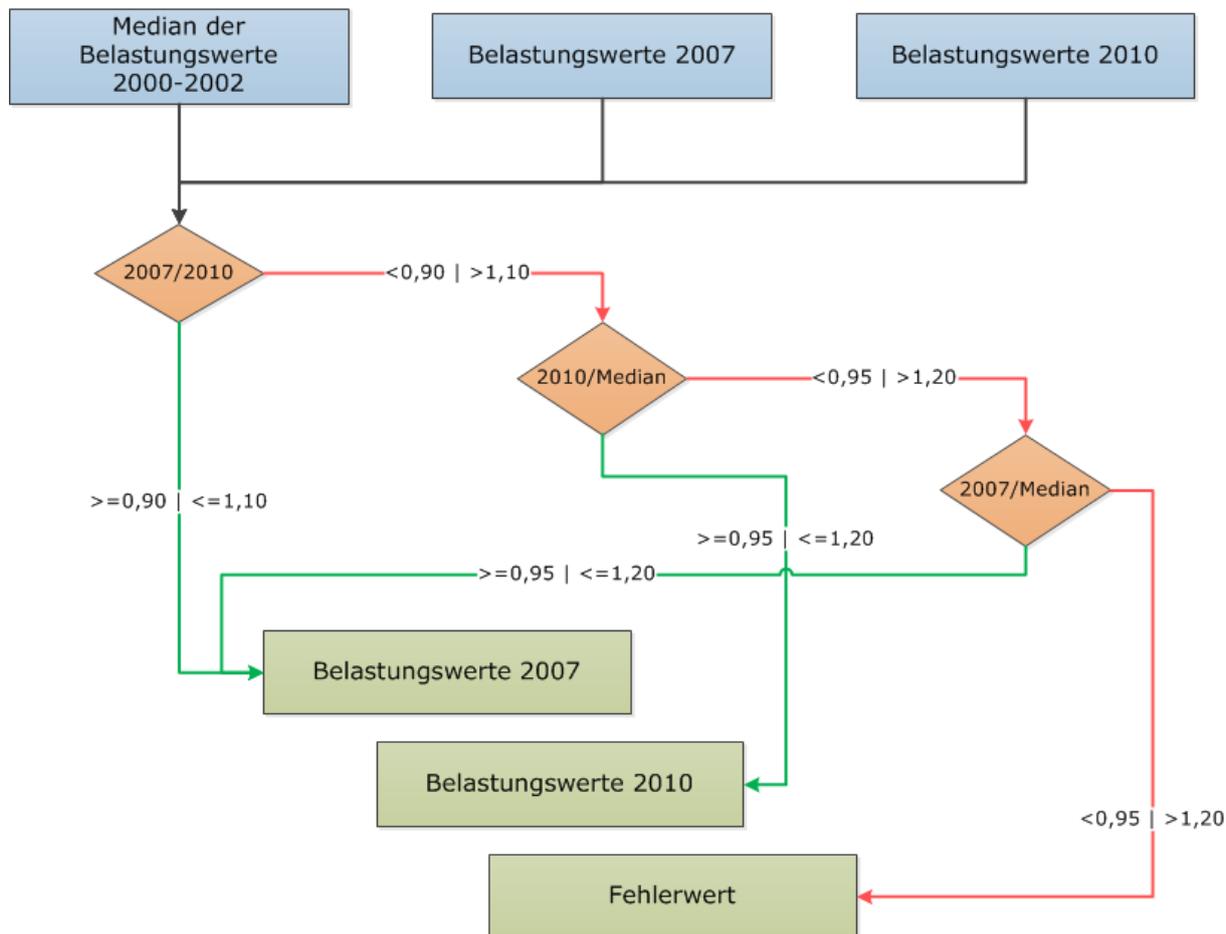


Abbildung 14 Ablaufdiagramm zur Wahl des geeigneten Stützpunktes

Das nachfolgende Beispiel dient der Veranschaulichung des Validierungsprozesses anhand eines ausgewählten Streckenquerschnitts. Dieser Streckenquerschnitt weist 2007 eine Belastung von 43.531 GBt/t auf. Die Gegenüberstellung mit aktuellen Belastungsdaten aus dem Jahr 2010 (53.475 GBt/t) ergibt einen Unterschied von knapp 20%. Der Belastungswert 2007 kann nicht bestätigt werden, da der Unterschied zwischen den Belastungswerten aus dem Jahr 2010 und 2007 über den geforderten 10% zu liegen kommt. Der Vergleich zwischen dem Belastungswert von 2010 und dem Median der Belastungswerte 2000 bis 2002 (48.116 GBt/t) ergibt eine Belastungssteigerung von knapp 11%, die innerhalb der angegebenen Toleranzen zu liegen kommt. Somit gilt in Folge der Belastungswert aus dem Jahr 2010 als Bezugsgröße für die Schätzfunktion. Er wird als solcher, um 3% erhöht und in das Jahr 2007 rückdatiert.

3 Gleisgeometrie

Das nachfolgende Kapitel zielt im Wesentlichen darauf ab eine Möglichkeit zu schaffen die Gleislage eines Gleisabschnittes hinsichtlich dessen Qualität zu bewerten. Eine derartige Bewertung der Anlage soll eine nachhaltige Planung von Instandsetzungsmaßnahmen, basierend auf einer messdatengestützten Kategorisierung, ermöglichen und unterschiedliche Signale in der Betrachtung vereinen. Die Beschreibung der Auswirkungen möglicher Schotterzerstörung auf die Gleislage steht dabei genauso im Mittelpunkt der Auswertungen, wie die möglichen Auswirkungen eines nicht tragfähigen Untergrundes. Die nachfolgenden Auswertungen beruhen auf unterschiedlichen Messsignalen, Qualitätssignalen und Qualitätswerten. Eine genaue Definition hinsichtlich der Herkunft dieser unterschiedlichen Signalkanäle ist notwendig, um die Aussagekraft und Möglichkeiten einzelner Auswertungen genau voneinander abzugrenzen.

Messsignal	sind vom Messwagen aufgenommene Signale, die lediglich gefiltert und nachstationiert für weitere Auswertungen herangezogen werden.
Qualitätssignale	sind aus Messsignalen, entweder direkt am Messwagen, oder nach der Messung berechnete Kennziffern.
Qualitätswerte	sind Werte, die aus einer Regressionsanalyse von Messsignalen oder Qualitätssignalen folgen.

Mögliche Störstellen, wie Eisenbahnkreuzungen, Weichenbereiche oder Brücken beeinflussen die Entwicklung der Gleislage. Es ist das zentrale Ziel dieser Arbeit das Gleis in seiner Allgemeinheit zu beschreiben. Daher ist es notwendig die Datengrundgesamtheit vor jeglicher Analyse zu filtern. Störstellen würden das Ergebnis verzerren und eine Bewertung von homogenen Abschnitten nahezu unmöglich machen.

Die Analyse der Gleislage im TUG-Netz soll es ermöglichen nähere Informationen auf folgende Fragestellungen zu liefern:

- I Welche Korrelation besteht zwischen den Qualitätssignalen der Gleislage und der umgesetzten Stopfmenge bzw. Gleisneulagen?
- I Wie entwickelt sich die Gleislage über die Nutzungsdauer einer Anlage unter Berücksichtigung des eingesetzten Schwellentyps?
- I Welche durchschnittliche Gleislagequalität wiesen die in den letzten fünf Jahren umgesetzten Neulagenprojekte vor und nach der Neulage auf?

- I Gibt es eine Möglichkeit, aus dem Messsignal der Gleislage nähere Informationen über die genaue Herkunft des Gleislagefehlers zu bekommen und wenn möglich diese dem Schotter oder Untergrund zuzuordnen?

3.1 Einleitung

In einem ersten Schritt gilt es im TUG-Netz (A1) die Entwicklung der Gleislage über die letzten Jahre zu analysieren, und die möglichen Auswirkungen reduzierter oder auch erhöhter Instandsetzung darzustellen. Diese Auswertung bezieht sich auf folgende drei unterschiedliche Qualitätssignale:

Standardabweichung Höhe (SigmaH) (vgl. [Auer 2004])

Standardabweichung Richtung (SigmaR)

MDZ-a Ziffer (MDZ) (vgl. [Rießberger 1997] [Hanreich 2004])

Die nachfolgenden Abbildungen sollen einen Überblick über die einzelnen Qualitätssignale geben und zielen in erster Linie darauf ab die Grundstruktur der einzelnen Parameter darzustellen. Die Abbildungen erfassen die Struktur der Parameter wie z.B. die Streuweiten und verzichten hier darauf, unterschiedliche Korrelationen zwischen den Oberbaustoffen und den Signalen zu berücksichtigen. Betrachtet man die Häufigkeitsverteilungen der Qualitätssignale aus dem Jahr 2012, so lassen sich deutlich die unterschiedlichen Streuungen erkennen. Die Werte von SigmaR unterliegen dabei einer weitaus geringeren Streuung als jene von SigmaH und unterscheiden sich auch deutlich im absoluten Niveau ihrer Ausprägung.

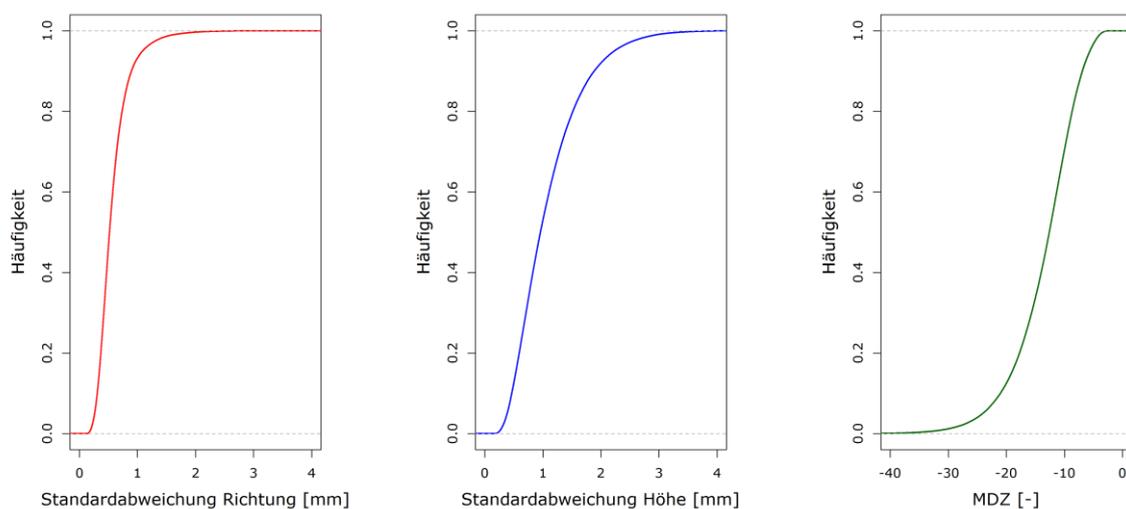


Abbildung 15 Häufigkeitsverteilungen der Qualitätssignale der ersten Messfahrt im Jahr 2012

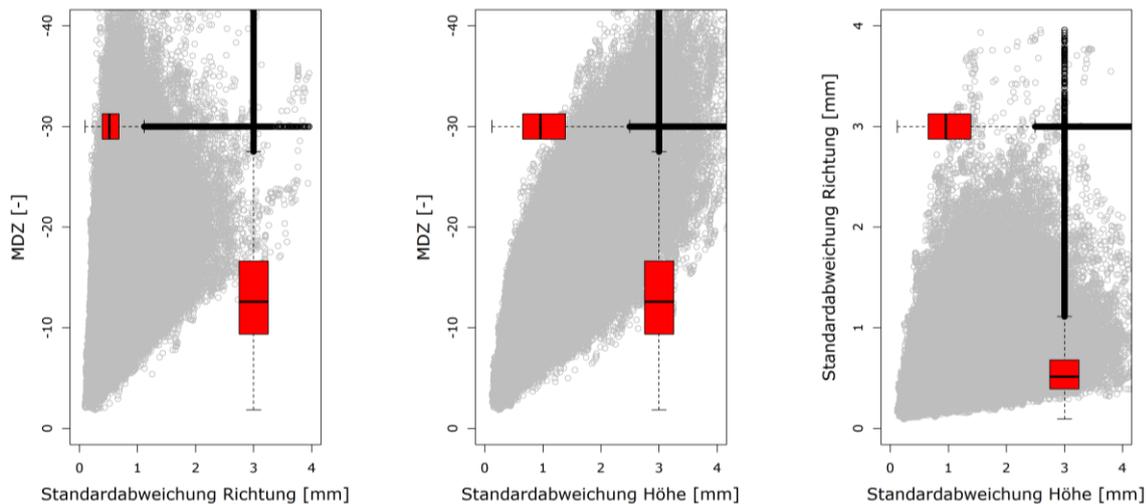


Abbildung 16 Gegenüberstellung der Abhängigkeiten zwischen den drei Qualitätssignalen

Eine Betrachtung der Abhängigkeiten zwischen den unterschiedlichen Qualitätssignalen (erste Messfahrt im Jahr 2012) gibt weitere Aufschlüsse über die Werteverteilung und die Korrelation zwischen den einzelnen Qualitätssignalen. Während SigmaR im Median Werte um 0,50 erreicht, liegen die Werte von SigmaH nahezu doppelt so hoch. Die MDZ-Werte ergeben sich aus der Berechnung negativ, wobei absolut gesehen kleinere Werte für eine bessere Gleislage sprechen als größere. Im Median ergeben sich die MDZ zu -12,6 und weisen die höchste Streuung auf. Während offensichtlich zwischen den MDZ und SigmaH Werten (Siehe Abbildung 16 Mitte) ein nahezu linearer Zusammenhang existiert, lässt sich ein derartiger bei den übrigen Gegenüberstellungen nicht erkennen. Durch die tendenziell höheren Werte von SigmaH ergibt sich auch ein stärkerer Einfluss auf die resultierende MDZ. Gleislagefehler in vertikaler Richtung prägen sich durchschnittlich größer aus als in horizontaler Richtung. Berücksichtigt man außerdem den Geschwindigkeitseinfluss in der Berechnung, so darf nicht außer Acht gelassen werden, dass Richtungsfehler in erster Linie in Bögen entstehen, die naturgemäß mit niedriger Geschwindigkeit befahren werden. Anders ausgedrückt: Kommt es zu Richtungsfehlern, wird in der Berechnung der MDZ deren Auswirkung durch die geringere Geschwindigkeit zusätzlich zu ihrer generellen geringeren Ausprägung abgemindert. Dennoch zeigt sich, dass mit größer werdenden Richtungsfehlern berechnungsbedingt auch die MDZ-Werte an Größe gewinnen. Umgekehrt gilt dieser Effekt jedoch nicht. Zwischen Richtungs- und Höhenfehlern ergibt sich ein einseitiger Zusammenhang von zwei zu eins. Richtungsfehler bedingen damit auch das Auftreten eines Höhenfehlers, umgekehrt gilt dieser Zusammenhang allerdings nicht.

3.2 Über den Zusammenhang der Gleislagequalität und der Stopfmenge

Die Korrektur der Gleislage erfolgt über das Setzen von Maßnahmen, wie z.B. einer Stopfmaßnahme oder der Schotterbettreinigung. Um die Substanz der Anlage zu schonen,

erfolgt dieser Eingriff oftmals vor Erreichen sicherheitskritischer Schwellenwerte. Die Korrelation zwischen umgesetzter Stopfmenge und resultierender Gleislage ist zentrales Thema des nachfolgenden Kapitels. Eine Analyse von querschnittsgenauen, jährlichen Durchschnittswerten würde zu keinem aussagekräftigen Ergebnis führen. Im Falle einer Maßnahme steigt die Qualität im Laufe des Jahres sprunghaft und der jährliche Mittelwert würde weder die gestiegene Qualität noch die Qualität vor der Maßnahme in geeignetem Rahmen abbilden. Unter Berücksichtigung der nachfolgenden Ergebnisinterpretation ist es daher erforderlich, im Falle einer Instandhaltung entweder die Qualität vor oder nach dieser zu beziffern. Die Aufgabenstellung kann jedoch vereinfacht werden. Unter der Annahme, dass ein Großteil der gleislageverbessernden Maschineneinsätze einerseits zwischen den Monaten Mai und September und andererseits auch nach der ersten Messfahrt durchgeführt werden, wurde in der netzweiten Analyse jeweils die erste Messfahrt des Jahres querschnittsgetreu berücksichtigt und zwar unter der Voraussetzung, dass diese im Laufe der ersten fünf Monate durchgeführt wurde. In Abbildung 18 helfen ein Gitternetz und horizontal geführte schwarze Linien die unterschiedlichen Entwicklungen zu erkennen. Die Unterschiede in den einzelnen Jahreswerten sind teilweise sehr gering, weshalb es notwendig ist die Skalierung der einzelnen Darstellungen an die Gegebenheiten der Qualitätssignale anzupassen.

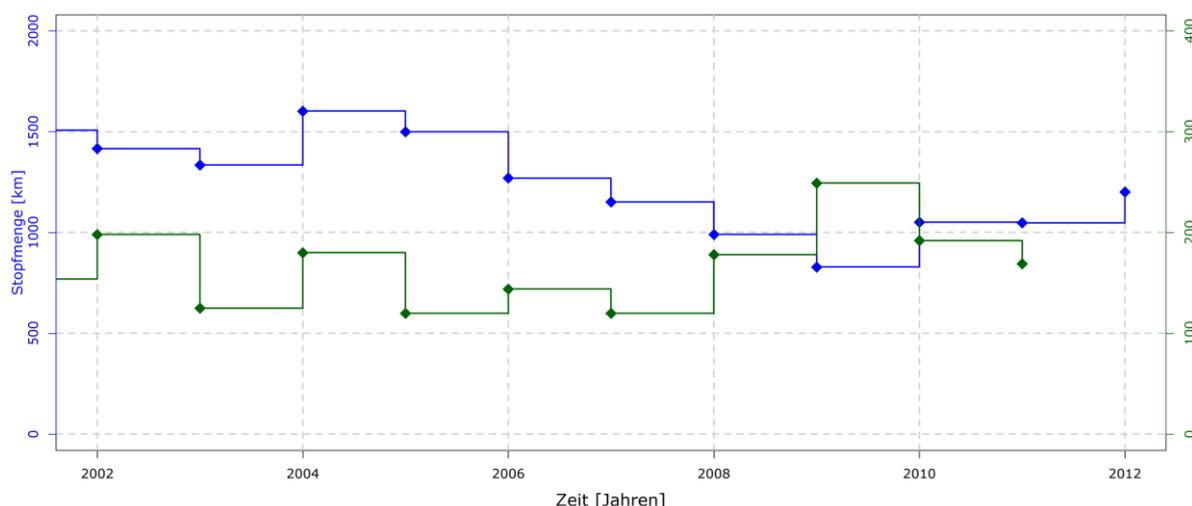


Abbildung 17 Entwicklung der Anzahl von Gleisneulagen und Gleisstopfungen in den letzten Jahren

Abbildung 17 zeigt die durchgeführte Menge von Stopfmaßnahmen (davon ausgenommen sind die Stopfungen im Zuge einer Gleisneulage und Einzelfehlerbehebungen) und Gleisneulagen in den letzten zehn Jahren bezogen auf das gesamte Streckennetz der ÖBB. Die Anzahl der Gleisneulagen im Jahr 2012 lag zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht vor und bleibt daher in der weiteren Analyse unberücksichtigt. Obwohl das TUG-Netz nur einen Teil des ÖBB-Netzes abbildet, kann dennoch davon ausgegangen werden, dass in beiden Netzen eine vergleichbare Entwicklung der umgesetzten Maschinenleistungen vorliegt. Schotterbettreinigungen ohne Neulage des Gleisrostes entsprechen

bei den ÖBB keiner Standardmaßnahme und werden nur in besonderen Fällen durchgeführt. Pro Jahr werden auf diese Art und Weise rund zehn Kilometer des Gleisschotters gereinigt und so die Gleislage signifikant verbessert. Lediglich in den Jahren 2003 und 2010 wurden mit rund 20 Gleiskilometern nahezu doppelt so viel Gleisschotter gereinigt, wie in den übrigen Jahren. Die Anzahl der durchgeführten Stopfeinsätze wurde in den letzten Jahren bis 2010 schrittweise reduziert und erreichte im Jahr 2009 mit rund 800 Kilometern den aktuell tiefsten Wert. Im selben Jahr stieg durch ein temporär begrenztes Strukturpaket die Reinvestitionsquote überdurchschnittlich an. Im Allgemeinen schwankte diese in den letzten Jahren zwischen 120 und 190 Kilometern und folgte so augenscheinlich keinem langfristigen Trend.

3.2.1 Die zeitliche Entwicklung der Standardabweichung Höhe

Abbildung 18 [rechts] präsentiert die zeitliche Entwicklung der Standardabweichung der Längshöhe über die letzten Jahre und zeigt dabei eine seit 2005 anhaltende konstante Verschlechterung derselben. Die sprunghafte Verbesserung 2005 lässt sich in erster Linie auf die im Jahr 2004 kurzweilig angehobenen Quoten für Neulagen- und Stopfmaßnahmen zurückführen (siehe Abbildung 17). Die getroffenen Einschränkungen führen dazu, dass nicht jeder Querschnitt des Netzes in dieser Auswertung über einen Messwert repräsentiert wird. Vor allem die Jahre 2002 bis 2004 weisen signifikant weniger Messwerte auf als die übrigen, weshalb die Interpretation der Ergebnisse aus diesen Jahren mit Vorsicht vorzunehmen ist und sich die nachfolgenden Auswertungen in erster Linie auf die Jahre nach 2004 beschränken.

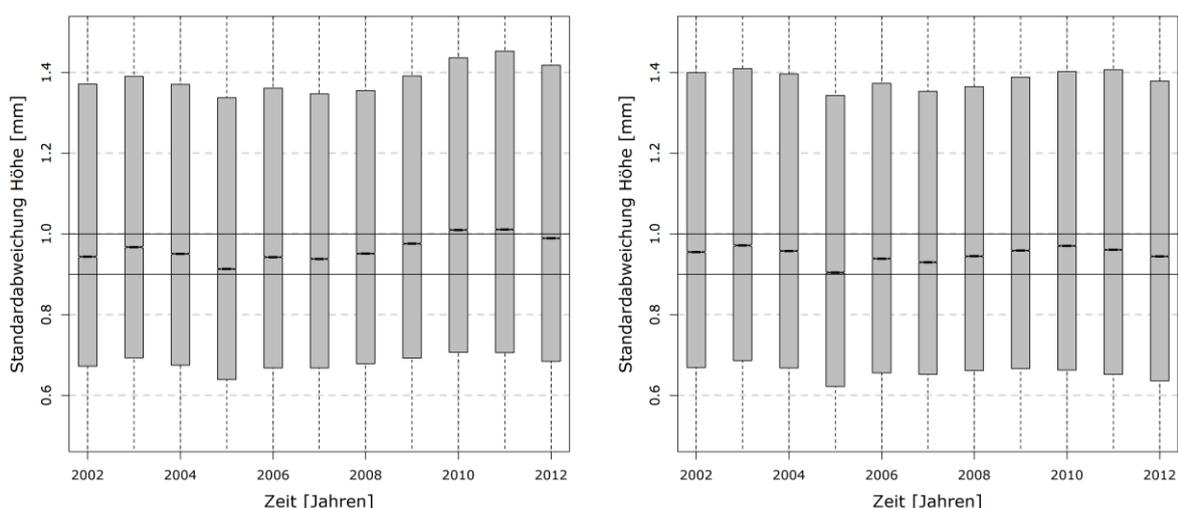


Abbildung 18 Zeitliche Entwicklung der Standardabweichung Höhe seit 2001 bis 2012 links: ohne Berücksichtigung rechts: mit Berücksichtigung von Neulagen

Die Gegenüberstellung legt nahe, dass sich eine fortwährende Reduktion des Stopfumfanges bei gleichbleibendem Neulagenumfang negativ auf die netzweite Gleislage

auswirkt. Jedoch repräsentiert sich der Zusammenhang zwischen der umgesetzten Stopfmenge und der resultierenden Gleislage in dieser Darstellung wesentlich geringer als vorab vermutet. Diese Tatsache lässt sich unter anderem auf die Mitberücksichtigung der Neulage zurückführen. Um diesen Effekt in weiterer Folge zumindest teilweise zu quantifizieren, gilt es die Entwicklung der Gleislage zu analysieren, ohne jedoch die direkte Gleislageverbesserung in Folge von Neulage zu berücksichtigen. Abbildung 18 [links] erlaubt einen derartigen Vergleich indem Qualitätssignale von Querschnitten, auf denen eine Neulage durchgeführt wurde, im Zeitraum von fünf Jahren nach dieser unberücksichtigt bleiben. Unterschiedliche Effekte wie neue Materialien, bessere Ausführungsqualität oder gestiegene Verkehrsbelastung lassen sich in dieser Auswertung nicht direkt quantifizieren. Jedoch korrelieren die Anzahl der Stopfeinsätze bzw. Neulagen deutlich mit der Gleislage. Eine kontinuierliche Reduktion der Stopfmenge führt bei konstanten Reinvestitionsquoten zu einer fortlaufenden Verschlechterung der Gleislage. Die Anhebung des Stopfumfanges im Jahr 2010 auf über 1000 Kilometer realisiert jedoch eine Umkehr des negativen Entwicklungstrends der Standardabweichung. Ob eine mittelfristige Reduktion der Instandhaltung zu einer nachhaltigen Zerstörung der Gleislagequalität führt, die durch das singuläre Anheben des Ausmaßes nicht vollständig rückgewonnen werden kann, wird die weitere Entwicklung der Gleislage zeigen.

3.2.2 Die zeitliche Entwicklung der Standardabweichung Richtung

Die Standardabweichung Richtung weist einen zur Standardabweichung Höhe gegenläufigen Trend auf. Im Gegensatz zu einer fortlaufenden Verschlechterung der Werte zeigt sich hier eine kontinuierliche Verbesserung der Richtungswerte über die vergangenen Jahre. Diese Verbesserung tritt in abgeschwächter Form auch auf, wenn Neulagenprojekte (äquivalent zur Vorgehensweise bei der Betrachtung der Standardabweichung Höhe) in der Auswertung unberücksichtigt bleiben (siehe Abbildung 19 [links]). Prinzipiell wird davon ausgegangen, dass sich die Standardabweichung Richtung mit ansteigender kumulierter Belastung über die Nutzungsdauer verschlechtert. Ein Grund für die Verbesserung dieser ist in den letzten Jahren in erster Linie in den eingesetzten Oberbaustoffen zu suchen.

Berücksichtigt man den in Abbildung 20 dargestellten Anteil unterschiedlicher Schwellenformen am jährlich umgesetzten Reinvestitionsumfang im TUG-Netz, so lässt sich eindeutig erkennen, dass in den letzten Jahren überwiegend Betonschwellen mit oder ohne Besohlung eingebaut wurden. Dies entspricht der Umsetzung der aktuellen Strategie der österreichischen Bundesbahnen, die (auf den Strecken des TUG-Netzes) lediglich in Radien unter 250 Metern und in besonderen Sonderfällen (z.B. Brückenbauwerken) einen möglichen Einsatz von Holzschwellen vorsieht [ÖBB Infrastruktur AG 2009]. Außerdem zeigt die Untersuchung der Re-Investitionsprojekte der letzten fünf Jahre im TUG-Netz

deutlich, dass in diesem Zeitraum Betonschwellen bzw. besohlte Betonschwellen im Wesentlichen Holzschwellengleise ersetzt (siehe Abbildung 20). Die so realisierte netzweite Erhöhung des Querverschiebewiderstandes durch den Einsatz schwererer Schwellenformen, mag zu einer kontinuierlichen Verbesserung von Richtungsfehlern und folglich der Standardabweichung beigetragen haben, wenngleich zusätzliche Effekte nicht ausgeschlossen werden können. Die genaue Ursache für die singuläre Verschlechterung im Jahr 2010 konnte nicht festgestellt werden.

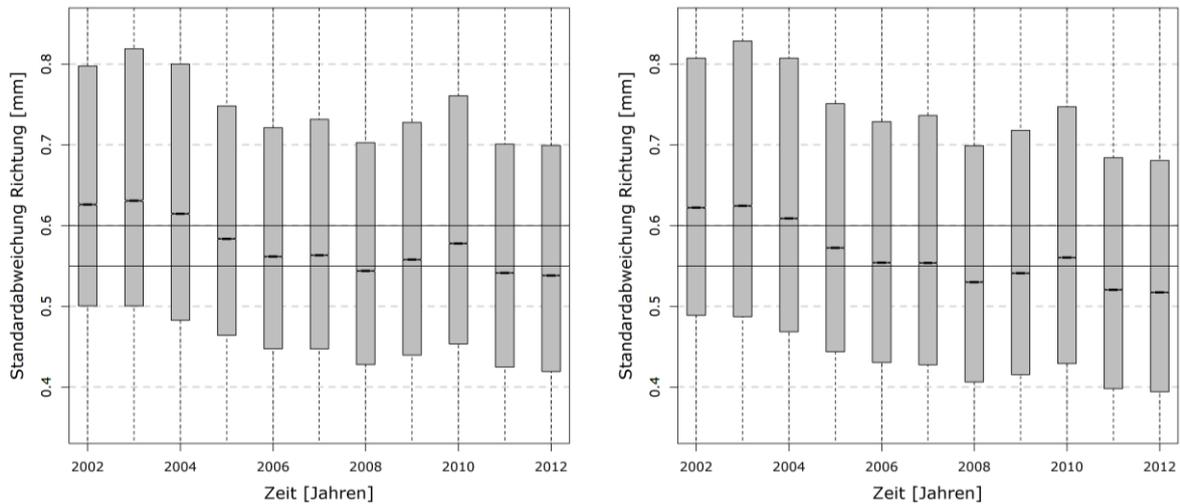


Abbildung 19 Zeitliche Entwicklung der Standardabweichung Richtung seit 2002 bis 2012 links: ohne Berücksichtigung rechts: mit Berücksichtigung von Neulagen

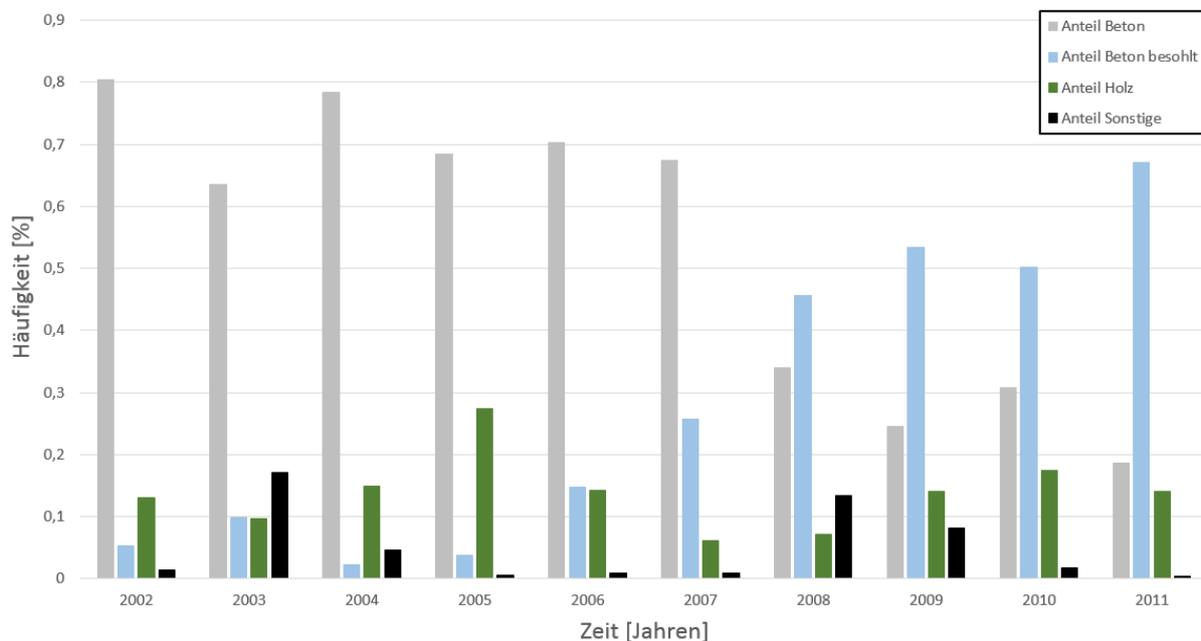


Abbildung 20 Prozentueller Anteil der eingesetzten Schwellenform im Rahmen der Re-Investitionsprojekte im TUG-Netz in den letzten Jahren

3.2.3 Die zeitliche Entwicklung der MDZ-a Ziffer

Die MDZ-a Ziffer berechnet sich aus der Interaktion eines vereinfachten Fahrzeugmodells mit der Gleislage. Sie kombiniert so die querschnittsspezifische Geschwindigkeit und die resultierende Gleislage aus Höhe und Richtung.

Damit überlagern sich die entgegengesetzten Entwicklungen beider Qualitätssignale. Dennoch führt die gleichzeitige Erhöhung des Stopfumfanges und der Reinvestitionsmenge 2004 zu einer signifikanten Verbesserung der netzweiten MDZ. Obwohl die positive Entwicklung der Standardabweichung Richtung die Ausprägung der negativen Qualitätsentwicklung in Folge der reduzierten Instandhaltung und Reinvestition verringert, ist diese dennoch deutlich bis zum Jahr 2010 auch in der berechneten MDZ-a Ziffer zu erkennen.

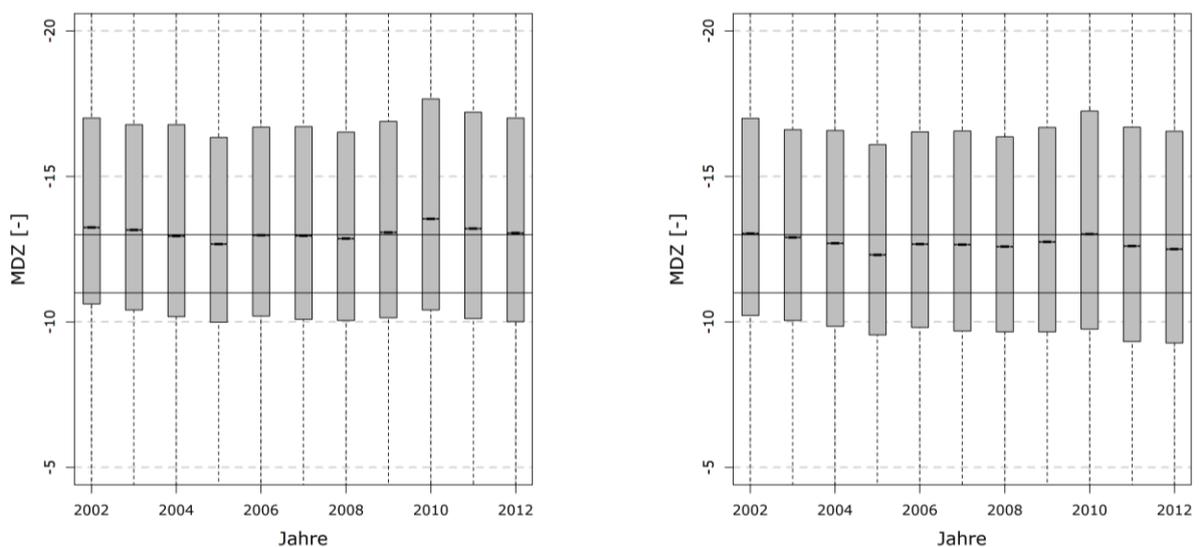


Abbildung 21 Zeitliche Entwicklung der MDZ-Ziffer seit 2002 bis 2012 links: ohne Berücksichtigung rechts: mit Berücksichtigung von Neulagen

3.3 Einbauqualität und Ausbauqualität

Während des Lebenszyklus des Gleises verschlechtert sich die Gleislage durch die einwirkenden Lasten und Umweltbedingungen. Die Verschlechterung der Gleislage führt zu einer Verschlechterung des Fahrkomforts und schlussendlich zu sicherheitskritischen Zuständen. Mithilfe von unterschiedlichen Instandhaltungsmaßnahmen, wie z.B. der Gleisstopfung ist es möglich, die Gleislage zu korrigieren. Ist durch die fortgeschrittene Zerstörung des Schotterbettes eine Verbesserung der Gleislage durch herkömmliche Verfahren nicht mehr möglich, ist ein Austausch des Schotterbettes durch eine Schotterbettreinigung unumgänglich um den sicheren Fahrbetrieb unter Aufrechterhaltung der zulässigen Geschwindigkeit zu gewährleisten. Das nachfolgende Kapitel nimmt sich dieses Umstandes an und untersucht die unterschiedlichen Ein- und Ausbauqualitäten. Als Basis für diese Auswertung dienen die Re-Investitionsprojekte zwischen den Jahren 2008 und 2011. Für

diese Re-Investitionsprojekte liegen die historischen Oberbaudaten vor, die nicht nur die aktuellen Oberbaudaten beinhalten, sondern auch jene Stoffe angeben, die vor der Neulage des Projektes eingebaut waren. Diese Gegenüberstellung erlaubt einen Vergleich der Aus- und Einbauqualitäten der Re-Investitionsprojekte in einem Zeitraum von vier Jahren. Betrachtet man diese Projekte ganz allgemein hinsichtlich ihrer erreichten Lebensdauer, so ergibt sich das unten angeführte Bild.

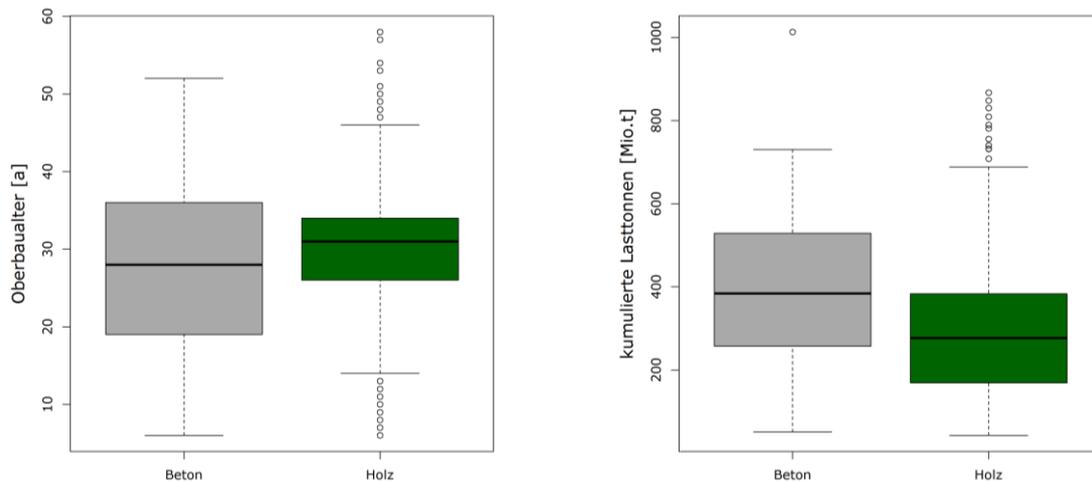


Abbildung 22 Erreichte Nutzungsdauern der Re-Investitionsprojekte zwischen 2008 und 2011 in Jahren und kumulierten Tonnen

Ein Vergleich zwischen den erreichbaren mittleren Nutzungsdauern von Holz- und Betonschwellen gestaltet sich schwierig. Vorhergehende Studien [Veit 2013] zeigen eine deutliche Abhängigkeit zwischen der Nutzungsdauer der Gleisanlage und unterschiedlichen Parametern wie u.a. Krümmung, Schienenprofil, tägliche Belastung. Unter der Annahme, dass sich all diese beeinflussenden Parameter gleich auf die unterschiedlichen Schwellentypen der Re-Investitionsprojekte verteilen, erlaubt die Gegenüberstellung der unterschiedlichen Nutzungsdauern dennoch fundamentale Erkenntnisse. Die alleinige Betrachtung des Oberbaualters würde zu Annahme verleiten, dass Betonschwellen tendenziell früher (zeitlich gesehen) ausgebaut werden als Holzschwellen.

Erst die Betrachtung der kumulierten Belastung unter Anwendung des Belastungsmodells weist Betonschwellen eine höhere Nutzungsdauer zu als Holzschwellen. Auffällig häufig erreichen Holzschwellen unabhängig von der Belastung eine Nutzungsdauer von 31 Jahren, während hingegen die Nutzungsdauer von Betonschwellen niedriger liegt und einer weitaus breitere Streuung aufweist. Holzschwellen werden somit augenscheinlich, unabhängig von ihrer kumulierten Belastung, in 50 Prozent aller Fälle zwischen 26 und 34 Jahren ausgebaut. Betonschwellen weisen eine nach Tonnen bewertete längere Nutzungsdauer auf, reagieren aber stärker auf Umgebungsparameter, wie z.B. schlechteren Unterbau und streuen daher stärker.

Ohne bereits näheren Aussagen über die Entwicklung der Gleislage über die Nutzungsdauer vorzugreifen, stellt sich vorweg in einem ersten Schritt die Frage, mit welchen Gleislagequalitäten unterschiedliche Schwellentypen aus- bzw. eingebaut werden. Als Grundlage für die Ermittlung der unterschiedlichen Ein- und Ausbauqualitäten fungieren die Qualitätssignale und das Datum der Schwellenneulage. Da im Standardbauverfahren der ÖBB eine Schwellenneulage nur in Kombination mit einer Schotterbettreinigung durchgeführt wird, muss sich zwischen beiden Qualitäten ein signifikanter Unterschied einstellen. Um mögliche Messausreißer so gut wie möglich zu eliminieren wird die Untersuchungsqualität jeweils aus einer Gruppe von drei Messfahrten als Mittelwert aus diesen ermittelt. Die Anzahl der berücksichtigten Messfahrten wird gering gehalten, um den möglichen positiven Einfluss von Stopfeinsätzen auszuschließen.

Die genaue Vorgehensweise soll mit Hilfe des nachfolgenden Beispiels näher beschrieben werden. Wird eine Schwellenneulage im Jahr 2009 untersucht, so umfasste die Ausbauqualität drei gültige Messfahrten mit einem Durchführungsdatum kleiner als 2009,0 und die Einbauqualität drei gültige Messfahrten größer als 2010,0. Der zeitliche Versatz im Zuge der Berechnung der Anfangsqualität soll die Anfangssetzungen (vgl. [Lichtberger 2010]) bewusst von der weiteren Bewertung ausnehmen und nur den konsolidierten Zustand berücksichtigen.

Die Auswertung erfolgt dabei in erster Linie über die MDZ-a Ziffer um Streckenabschnitte mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten gemeinsam betrachten zu können.

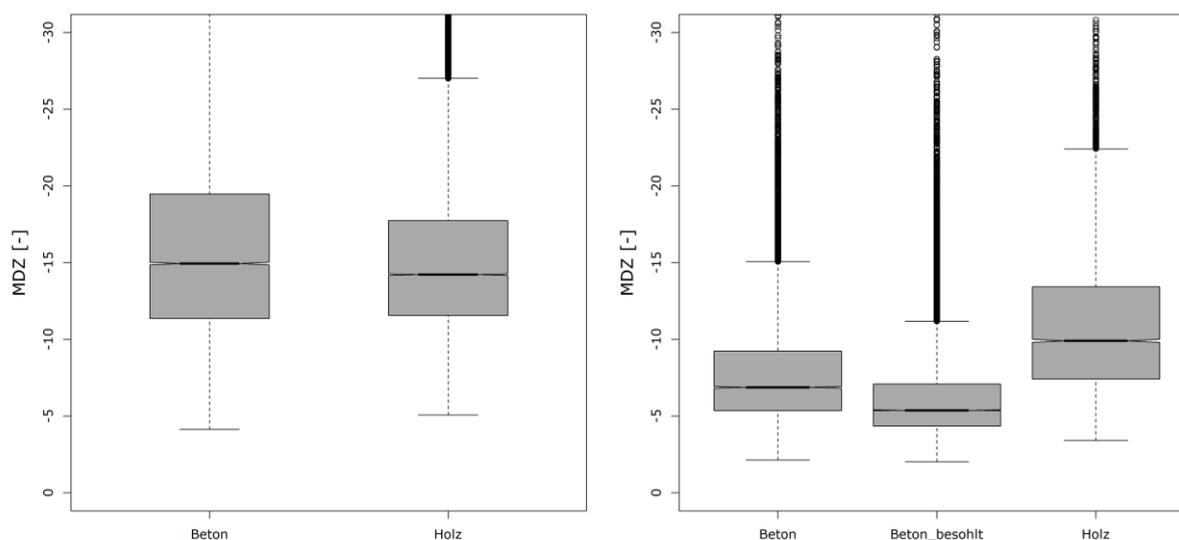


Abbildung 23 Gegenüberstellung der Gleislagequalitäten in MDZ-a der Re-Investitionsprojekte links: Ausbauqualitäten rechts: Einbauqualitäten

Der Vergleich der Ausbauqualitäten mit Hilfe von Boxplots in Abbildung 23 weist Holzschwellen kurz vor Ausbau nur eine geringfügig bessere Gleislagequalität zu. Dieser Unterschied gewinnt bei der alleinigen Betrachtung von geraden Streckenabschnitt kaum an Bedeutung. Gegensätzlich dazu präsentiert sich das Bild der Einbauqualitäten. Zusätzlich zu den bereits betrachteten Schwellentypen, weist diese Auswertung auch besohlte Betonschwellen auf, die in den letzten Jahren verstärkt eingebaut wurden (siehe Abbildung 20). Holzschwellen sind auf den im TUG-Netz vorkommenden Strecken keine Standardoberbauform mehr und werden nur mehr in Spezialfällen für den Einbau in Betracht gezogen. Diese Spezialfälle zeichnen sich in erster Linie durch besonders hohe Beanspruchungen aus, was sich auch in der resultierenden Einbauqualität widerspiegelt. Besohlte Betonschwellen zeichnen sich verglichen mit dem unbesohnten Fall durch eine um rund 25% bessere Anfangsqualität aus und bestätigen damit das Ergebnis vorhergehender Studien (vgl. [Marschnig, Berghold 2011]).

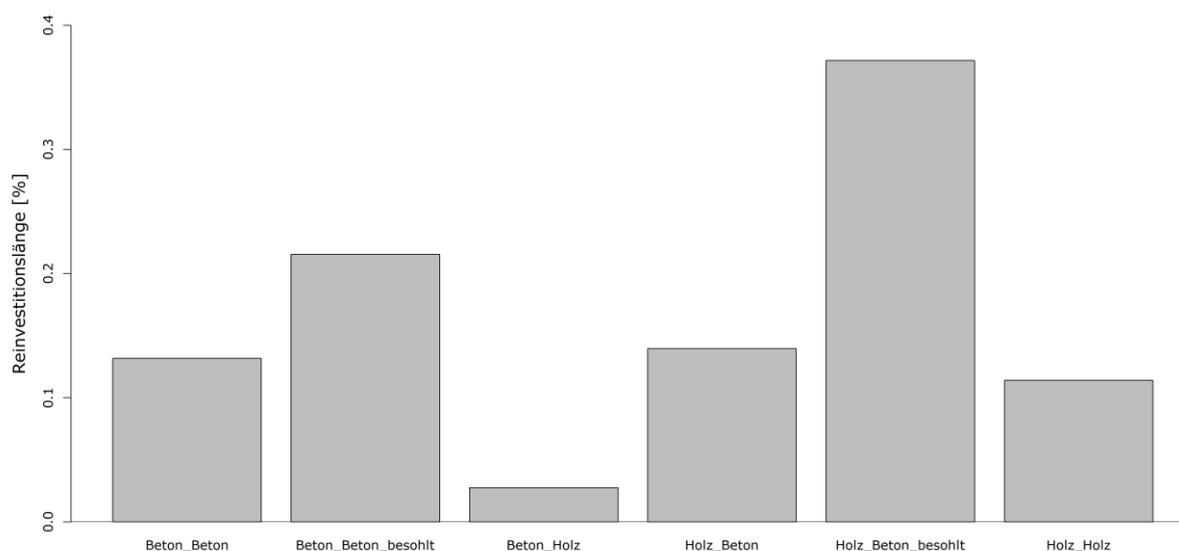


Abbildung 24 Übersicht über die relativen Anteile der einzelnen Oberbaustoffe der Re-Investitionsprojekte zwischen 2008 und 2011, dabei steht der erste genannte Oberbaustoff für den ausgebauten während hingegen der folgende Informationen über die Neulage enthält.

Erweitert man die Auswertungen auf zusätzliche Qualitätssignale, wie die Standardabweichung Höhe (Abbildung 25) und Richtung (Abbildung 28), gilt es den Einfluss der unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu berücksichtigen. Unterschiedliche Geschwindigkeiten bedingen unterschiedliche Eingriffsschwellen zur Planung von Stopfeinsätzen und beeinflussen so die Instandhaltungsstrategie und die akzeptierte Gleislagequalität (vgl. [Österreichisches Normungsinstitut 2014]).

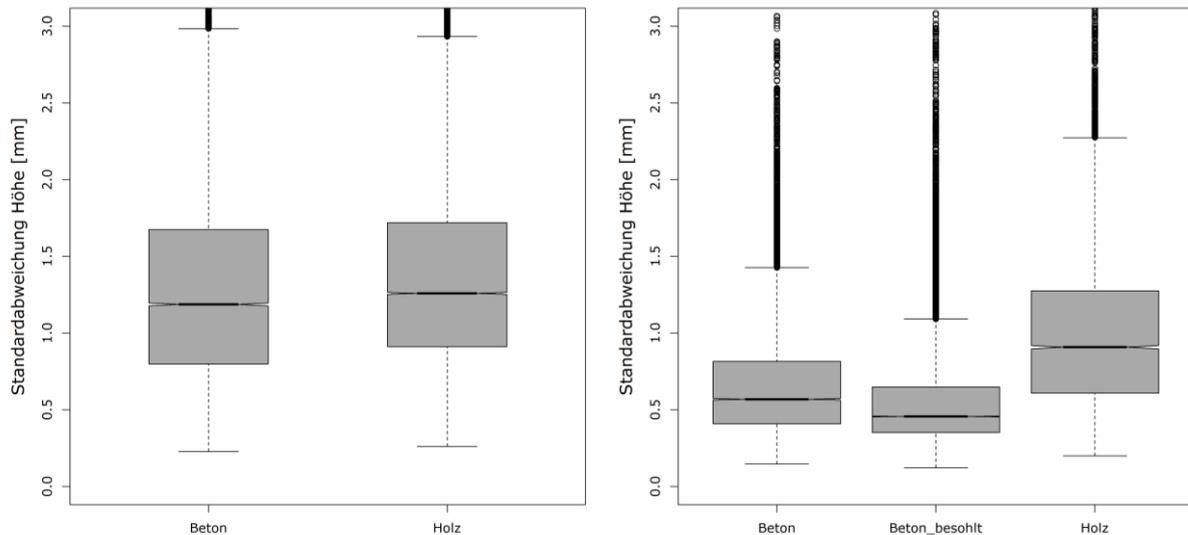


Abbildung 25 Gegenüberstellung der Standardabweichung Höhe der Re-Investitionsprojekte links: Ausbaugüten rechts: Einbaugüten

Betrachtet man die Oberbaumaterialien vor der Neulage so liegt die zulässige Geschwindigkeit im Falle von Holzschwellen im Schnitt um knapp 20 km/h niedriger als bei Betonschwellen (siehe Abbildung 26). Die höhere Standardabweichung Höhe lässt sich so über die höheren Eingriffsschwellen und die geringere Anforderung an die Strecke argumentieren. Um diesen Effekt zu verdeutlichen, wurde die gleiche Auswertung der Standardabweichung Höhe nur für Re-Investitionsprojekte durchgeführt, deren zulässige Geschwindigkeit zwischen 120 km/h und 160 km/h liegt (siehe Abbildung 27). In diesem Fall stellt sich die Ausbaugüte bei Holzschwellen besser dar, als bei Betonschwellen. Die geringfügigen Auswirkungen dieser Filterung auf die Neulagenqualität lassen sich in erster Linie durch den Wegfall potentieller Störstellen erklären, auf welche wird im Rahmen der Betrachtung von SigmaR näher eingegangen wird.

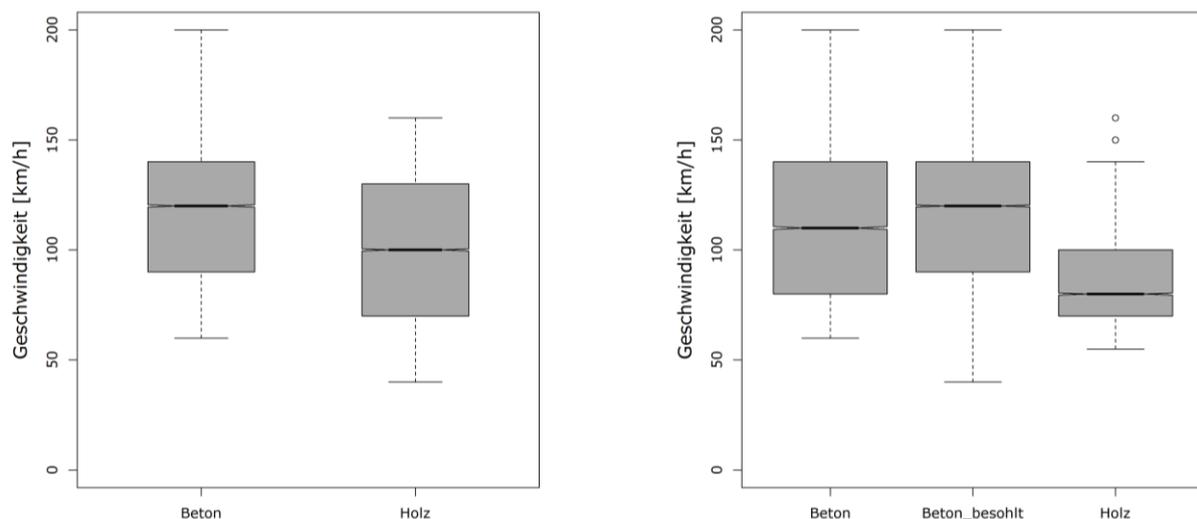


Abbildung 26 Geschwindigkeitsverteilung zwischen den Oberbaumaterialien vor (links) und nach (rechts) Neulage

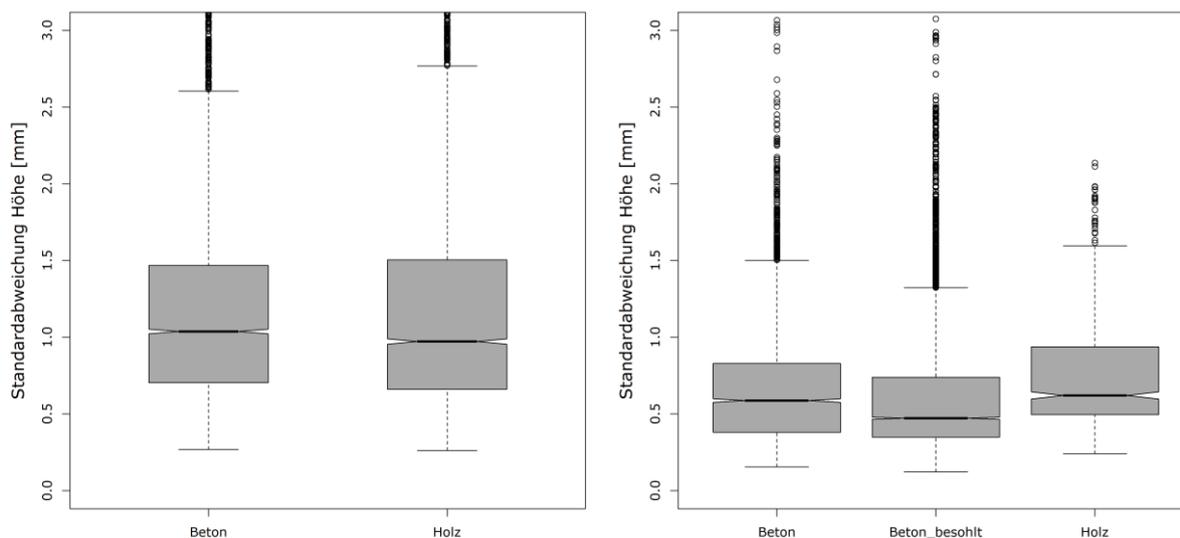


Abbildung 27 Gegenüberstellung der Standardabweichung Höhe der Re-Investitionsprojekte im Geschwindigkeitssegment von 120km/h bis 160km/h links: Ausbauqualitäten rechts: Einbauqualitäten

Die Medianwerte der Ausbauqualitäten sowohl bei Holz- als auch bei Betonschwellen liegen deutlich besser als die Aufmerksamkeitsgrenzwerte der aktuellen Normung (vgl. [Österreichisches Normungsinstitut 2014] und [ÖBB Infrastruktur AG 2012]). Dies weist darauf hin, dass Re-Investitionsprojekte nur teilweise von der Überschreitung dieser Werte beeinflusst werden, bzw. nicht alle Projekte ausschließlich über die Gleislage begründbar sind.

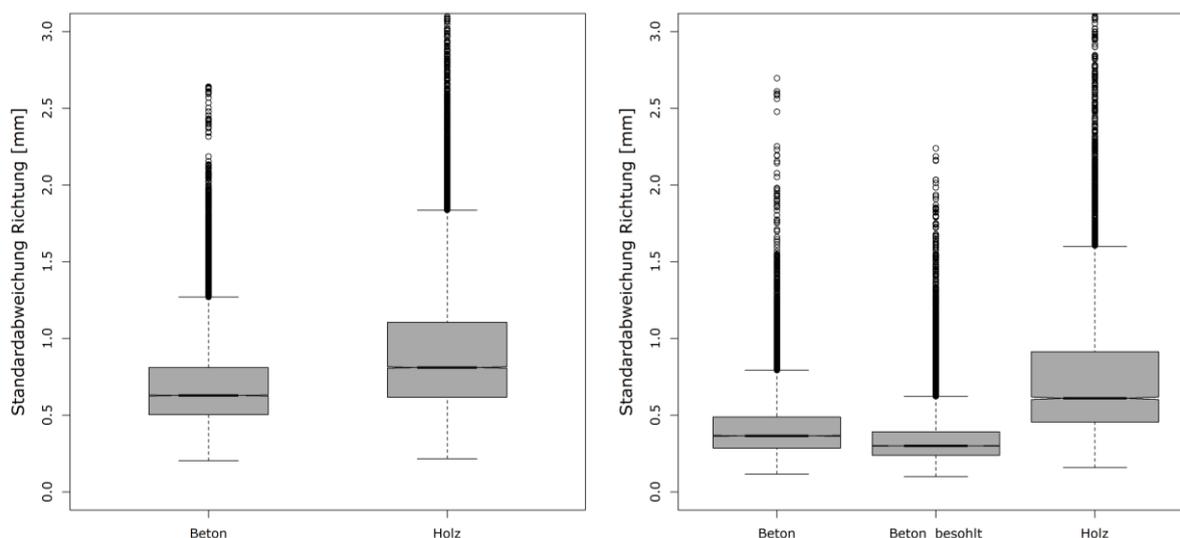


Abbildung 28 Gegenüberstellung der Standardabweichung Richtung der Re-Investitionsprojekte links: Ausbauqualitäten rechts: Einbauqualitäten

Die Auswertung der Standardabweichung Richtung zeigt ein bekanntes Bild. Die Werte der Holzschwelle liegen deutlich über den Werten der Betonschwelle, wobei sich dieser Unterschied in erster Linie auf den geringeren Querverschiebewiderstand von Holzschwellen zurückführen lässt [Iliev 2012].

Eliminiert man aus der Grundgesamtheit Querschnitte mit Radien kleiner als 600 Meter, so reduziert sich zwar für beide Schwellenarten die absolute Ausprägung dieser Werte, der Unterschied zwischen diesen bleibt jedoch bestehen. Erst eine alleinige Betrachtung von Querschnitten mit einer Geschwindigkeit höher als 100 km/h führt zu einem annähernd vergleichbaren Medianwert (siehe Abbildung 29). In beiden Fällen liegen dabei die erreichten Werte deutlich unter den definierten Aufmerksamkeitsschwellen aus dem aktuellen Instandhaltungsplan [ÖBB Infrastruktur AG 2012]. Der Schluss liegt somit nahe, dass mit Ausnahme von Sonderfällen die Instandhaltung in erster Linie von Höhenfehlern getrieben wird. Warum erst die Filterung nach höheren Geschwindigkeiten zu einer wahrnehmbaren Reduktion des Unterschiedes zwischen beiden Schwellenformen führt, lässt sich mit der Tatsache begründen, dass sich Streckenabschnitte mit niedriger Geschwindigkeit aber großem Radius in Bogenfolgen als Zwischengerade auftauchen. In diesen Bogenfolgen wird der Fahrzeuglauf und die entstehenden Führungskräfte allerdings wesentlich von den vorhergehenden Bögen beeinflusst und das Schotterbett unterliegt höheren Beanspruchungen. Unabhängig von der Ursache dieses Sachverhaltes bildet sich eine weitaus stärkere Korrelation zwischen Holzschwellen und der resultierenden Richtungslage als bei Betonschwellen aus. Dabei zeigt diese Auswertung einen aus vorhergehenden Studien bereits bekannten Sachverhalt (vgl. [Lichtberger 2007]). Weiters präsentiert die Betrachtung der Standardabweichung Richtung klar die Vorteile der beschlittenen Betonschwelle gegenüber der herkömmlichen Betonschwelle durch die zusätzliche Erhöhung des Querverschiebewiderstandes (vgl. [Iliev 2012]).

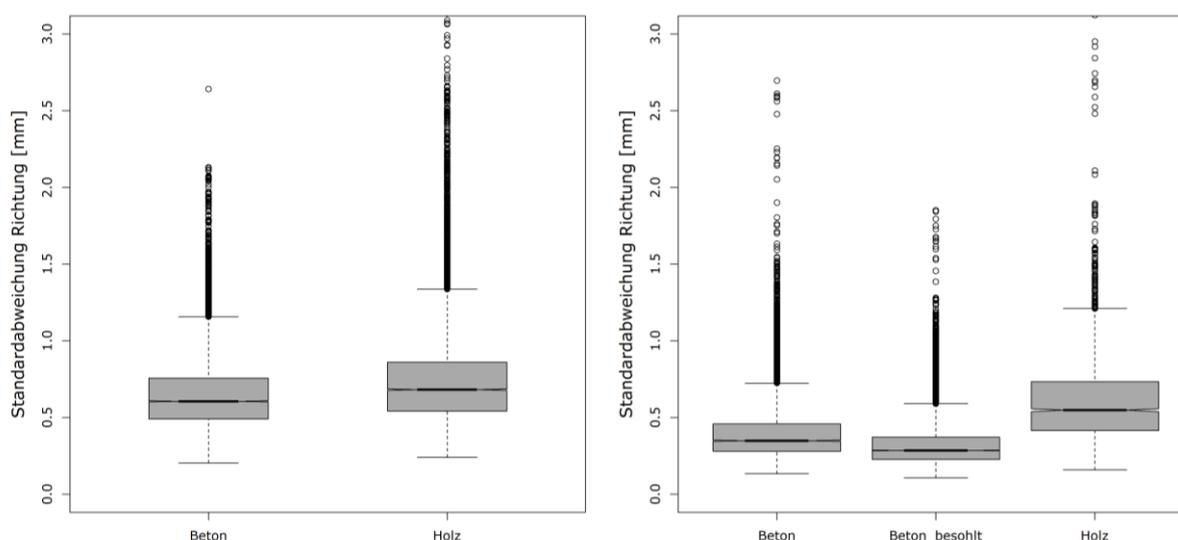


Abbildung 29 Gegenüberstellung der Standardabweichung Richtung der Re-Investitionsprojekte mit einer Geschwindigkeit höher als 100km/h links: Ausbauqualitäten rechts: Einbauqualitäten

3.4 Über den Zusammenhang zwischen Gleislage und kumulierten Lasttonnen

In den vorhergehenden Kapiteln wurden sich in erster Linie netzweite Entwicklungen und zeitlich-punktuellen Gleislagequalitäten abgehandelt. Nun gilt es, die zeitliche Entwicklung der Gleislage über die Nutzungsdauer des Fahrweges näher zu untersuchen. Qualitätssignale stellen eine singuläre Information zu einem bestimmten Zeitpunkt des Jahres dar. Betrachtet man im Zuge von netzweiten Auswertungen immer die erste Messfahrt des Jahres, so ist der zeitliche Abstand zwischen der Erfassung der Qualität und der zuletzt durchgeführten Instandhaltung dennoch für jeden Querschnitt unterschiedlich. Für die Betrachtung der netzweiten Gleislagequalität oder der Ein- und Ausbauqualitäten spielt dieser Umstand eine untergeordnete Rolle. Im Zuge einer gesamtheitlichen Darstellung der Gleislage über die Nutzungsdauer ist es jedoch essentiell die Qualitätssignale unabhängig ihrer zeitlichen Erfassung im Laufe des Jahres, allerdings abhängig von ihrem zeitlichen Abstand zur letzten Instandhaltungsmaßnahme, so z.B. die sich einstellende Qualität ein Jahr nach einer Stopfmaßnahme, zu betrachten. Eine genaue Beschreibung der Gleislageentwicklung über die Nutzungsdauer erfolgt daher vereinfacht über die Qualitätswerte. Ein Regressionsmodell, berechnet im gesamt TUG-Netz individuell für jeden Querschnitt, basierend auf Qualitätssignalen (MDZ-Ziffer und Standardabweichung), eine Verschlechterungsfunktion zwischen zwei Instandhaltungsmaßnahmen und gibt sie in unterschiedlichen Qualitätswerten wieder (siehe 3.4.1). Diese Berechnung erfolgt in Querschnitten alle fünf Meter und erlaubt eine Verknüpfung mit Oberbauinformationen und Maschineneinsätzen. So ist es möglich, immer den gleichen Punkt zwischen zwei Instandhaltungsmaßnahmen miteinander zu vergleichen. Nähere Informationen hinsichtlich des Aufbaus der TUG-Datenbank und des Regressionsmodells sind im Anhang der Arbeit zu finden (siehe A1 bzw. vgl. [Hummitsch 2009]).

3.4.1 Begriffsdefinition

Das netzweit angewandte Regressionsmodell erlaubt die Analyse unterschiedlicher Parameter, die eindeutig einem Zeitraum (Raum) des jeweiligen fünf Meter Querschnittes zugeordnet sind. Ein Zeitraum wird dabei von realen oder imaginären Maschineneinsätzen, auch als TUG-Einsätze bezeichnet, begrenzt. TUG-Einsätze bilden dabei unbekannte Maschineneinsätze genauso ab, wie auch unerklärliche sprunghafte Änderungen im zeitlichen Verlauf des Qualitätssignales. Aufeinanderfolgende Räume eines Querschnittes beschreiben so die Entwicklung der Gleislage über die Nutzungsdauer und die Auswirkung der einzelnen Stopfeinsätze auf die resultierende Qualität. Beginnend mit der Neulage des Oberbaus und dem Austausch bzw. der Reinigung des Schotters ist es möglich, die aufeinanderfolgenden Räume bis zum Ende der Nutzungsdauer zu nummerieren. Im Zuge dieser Auswertung werden allerdings lediglich einzelne Räume bzw. zwei aufeinander folgend

Räume betrachtet, wodurch es als ausreichend erachtet werden kann, im Falle einer Raumfolge von einem Raum eins und einem Raum zwei zu sprechen. Eine Raumfolge definiert somit eindeutig eine Raumanfangsqualität Q_1 und Q_2 sowie die zugeordneten Verschlechterungsraten b_1 und b_2 .

T_{1_1}	Anfangszeitpunkt des 1. Raums
T_{1_2}	Endzeitpunkt des 1. Raums
T_{2_1}	Anfangszeitpunkt des 2. Raums
wobei:	$T_{1_2} \equiv T_{2_1}$
T_{2_2}	Endzeitpunkt des 2. Raums
$ME[T]$	Maschineneinsatz zum Zeitpunkt T
Q_{1_ult}	Gleislagequalität zum Zeitpunkt T_{1_2} - Raumendqualität
Q_{2_ult}	Gleislagequalität zum Zeitpunkt T_{2_2} - Raumendqualität
DeltaSchnitt	Güte der Regressionsberechnung
Q_b	Bewertungsparameter

Jedem Querschnitt sind die in Kapitel 1 näher beschriebenen Belastungsdaten und Attribute der generierten Belastungsfunktion hinterlegt. Die bestimmte Integration der Belastungsfunktion erlaubt die querschnittsgetreue Berechnung der kumulierten Belastung für das TUG-Netz, unter den in Kapitel 1 festgelegten Bedingungen. Dabei ist die untere Grenze der Integration eindeutig mit dem Einbaujahr der Schwelle festgelegt, während hingegen als obere Grenze des Intervalls in einem ersten Schritt der Zeitpunkt in der Mitte des ersten Raumes dient.

Der Aufbau eines netzweiten Regressionsmodells unterliegt gewissen beschreibbaren und nicht beschreibbaren Unschärfen bzw. Streuungen. Neben grundlegenden Datenunsicherheiten, die sich teilweise auflösen lassen, dient das Regressionsmodell zur Beschreibung der Entwicklung der globalen Gleislage und wird dabei von einer großen Anzahl unterschiedlicher Faktoren beeinflusst. Der exponentielle Ansatz wird dabei als Grundlage für die Verschlechterung der Gleislage zwischen zwei Maschineneinsätzen herangezogen und es gilt die Entwicklung der Gleislage über die gesamte Nutzungsdauer der Anlage zu untersuchen. Eine Diskussion des Ansatzes mit der höchsten Anpassung ist kein Ziel dieser

Arbeit und wurde bereits ausführlich von anderen Forschungsarbeiten durchgeführt ([Hummitzsch 2009], [Guler, Jovanovic & Evren 2011], [Audley, Andrews 2013], [Rießberger 1997], [Rohim Boy Berawi 2013]). Eine exponentielle Regression gestaltet zwar die Interpretation der Ergebnisse komplexer, erlaubt aber eine breite Anpassung der Funktion als unterschiedliche Verschlechterung, ohne jedoch die mathematische Formulierung zu ändern.

3.4.2 Der Zusammenhang zwischen der Q_n , b_n und Q_{ult}

Die Raumendqualität stellt einen rein berechneten Wert aus der Raumanfangsqualität, der Verschlechterungsrate und des umgesetzten Stopfzykluses dar. Der exponentielle Zusammenhang erschwert die Quantifizierung der einzelnen Einflüsse, der Raumanfangsqualität und Verschlechterungsrate auf die berechnete Raumendqualität. Um nähere Aufschlüsse über die Entwicklung der Gleislage zu erhalten, ist es dennoch notwendig zu ergründen, wie sich die einzelnen Parameter auf die Raumendqualität auswirken. Ziel ist es daher, den Einfluss zu beschreiben, wie die resultierende Raumendqualität rechnerisch in erster Linie von der Raumanfangsqualität oder Verschlechterungsrate beeinflusst wird. Abbildung 30 stellt dabei drei unterschiedliche Fälle einer zeitlichen Entwicklung der Gleislage dar. Fall eins stellt den sogenannten Referenzfall ($Q_n = -8$ und $b_n = 0,1$) dar. Im Fall zwei wird die aus Fall eins bekannte Raumanfangsqualität um 50% herabgesetzt. Gleiches geschieht im Fall drei mit der Verschlechterungsrate. Deutlich lässt sich erkennen, dass bis zum Jahr vier die Auswirkungen der schlechteren Raumanfangsqualität überwiegen. Im Falle einer Eingriffsschwelle von minus 15 würde dieser Unterschied eine Verlängerung des Stopfintervalls um ein Jahr nach sich ziehen.

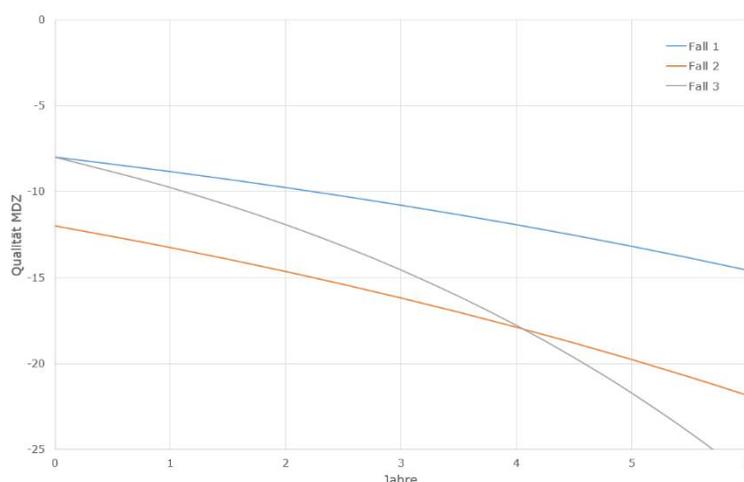


Abbildung 30 Einfluss der Raumanfangsqualität und der Verschlechterungsrate auf die Raumendqualität

Die folgende mathematische Gegenüberstellung hilft zu verstehen, wie sich die gleich hohe Veränderung der Raumanfangsqualität und der Verschlechterungsrate um den Faktor ξ auf die berechnete Raumendqualität auswirkt. Es wird der Schnittpunkt zwischen

beiden Kurven gesucht, also jener Punkt an dem beide Varianten die gleiche Raumendqualität erreichen.

$$Q_n * e^{\xi * b_n * t} = \xi * Q_n * e^{b_n * t}$$

$$e^{\xi * b_n * t} = \xi * e^{b_n * t}$$

$$\xi * b * t = \ln(\xi) + b * t$$

$$t = \frac{\ln(\xi)}{b(\xi - 1)}$$

Es zeigt sich deutlich, dass der Einfluss der relativen Veränderung der Raumanfangsqualität und der Verschlechterungsrate auf die Raumendqualität bei unterschiedlichen Raumanfangsqualitäten konstant bleibt, hingegen von der Ausprägung der Verschlechterungsrate maßgebend mitbeeinflusst wird. Versucht man diesen Zusammenhang darzustellen, so zeigt sich in Abbildung 31 deutlich, dass bei Verschlechterungsraten um 0,1 der Einfluss der Raumanfangsqualität maßgebend für die Ausprägung der Raumendqualität ist. Je höher die Verschlechterungsrate, desto geringer ist der Einfluss der Raumanfangsqualität. Voraussetzung dafür ist, dass die Raumanfangsqualität über möglichen Eingriffsschwellen zu liegen kommt und so ein Verschlechterungsprozess überhaupt erst starten kann.

Unabhängig davon gilt, dass die Raumendqualität von allen erwähnten Parametern abhängig ist und somit auch der absolute Unterschied der einzelnen Variationen. Es ist daher nicht erklärtes Ziel, die Instandhaltung lediglich auf die Raumanfangsqualität oder die Verschlechterungsrate zu fokussieren. Dieses Unterkapitel soll daher nicht den Schwerpunkt auf einen der Parameter legen, sondern lediglich ihre gegenseitige Abhängigkeit in Bezug auf die Berechnung der Raumanfangsqualität hervorheben.

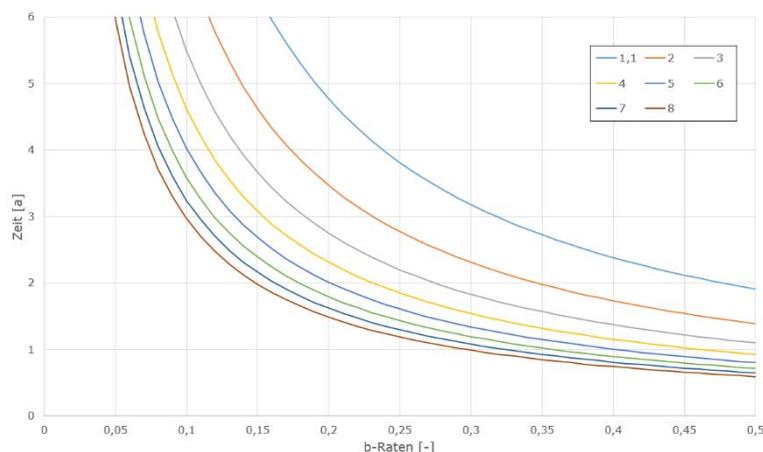


Abbildung 31 Grafische Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Verschlechterungsrate, des Stopfzyklus und des Faktors ξ

3.4.3 Aufbau der Abfragen

Über die Filterung unterschiedlicher Umgebungsparameter, wie z.B. Schwellentyp, Weichenbereiche etc. ist es möglich, die an sich heterogene Grundgesamtheit zu homogenisieren und über detaillierte Abfragen spezifische Parametersets auszuwählen. Die Parameter umfassen dabei bekannte Oberbaudaten genauso, wie auch Belastungsdaten und nähere Informationen zu den Qualitätswerten oder den Maschineneinsatz. Die Herausforderung besteht darin, die Abfragen so allgemein wie möglich, und so detailliert wie nötig zu formulieren. Wird die Grundgesamtheit zu sehr eingegrenzt, reduziert sich einerseits die Streuung der Werte und andererseits mit ihr gleichzeitig die Bandbreite der Auswertung – ja man läuft sogar Gefahr – spezifische Aussagen nur noch für ausgewählte Streckenabschnitte zu machen, jedoch als globale Entwicklung zu definieren. Im Fokus dieser Arbeit steht die ungestörte globale Entwicklung der Gleislage über die Nutzungsdauer, weshalb es notwendig wird, die Grundgesamtheit der Daten großzügig zu wählen und erst im Anschluss daran durch die Evaluierung der Entwicklung mögliche Ausreißer zu identifizieren. Dabei werden als eine Art Sensitivitätsanalyse die Ergebnisse zweier Auswertungen miteinander verglichen, die sich hinsichtlich ihrer Filterkriterien unterscheiden. Die Abfragen beruhen dabei in diesem Kapitel auf der Analyse der MDZ-a Ziffer, die es erlaubt, Querschnitte mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten hinsichtlich der Gleislage miteinander zu vergleichen. Außerdem ermöglicht die MDZ-a Ziffer eine gemeinsame Betrachtung von Höhen- und Richtungsfehlern durch die Darstellung der Auswirkung dieser auf ein virtuelles Fahrzeug [Rießberger 1997]. Trotz der Möglichkeit, geschwindigkeitsunabhängig auszuwerten und den Einfluss der Geschwindigkeit lediglich über die resultierende MDZ-a Ziffer abzubilden, wird die Geschwindigkeit in den Hauptauswertungen (Abfrage V1 und V2) auf den Bereich zwischen 80 und 160 km/h begrenzt. Die Abgrenzung gegenüber höheren Geschwindigkeiten erfolgt aufgrund der steigenden dynamischen Belastungen dieser Gleise, die zu einer unterschiedlichen Beanspruchung und somit Verschlechterung der Gleislage führt. Die höhere erforderliche Qualität und niedrigeren Eingriffsschwellen dieser Gleise spiegeln sich auch im aktuellen Instandhaltungsplan der ÖBB wider (vgl. [ÖBB Infrastruktur AG 2012]). Die ausschließliche Berücksichtigung von Geschwindigkeiten größer gleich 80 km/h soll dem Umstand vorbeugen, kurze Zwischengeraden zu berücksichtigen, die hinsichtlich ihrer Beanspruchung stark vom anschließenden Bogen dominiert werden und somit vom zu untersuchenden Verhalten abweichen. Der mögliche Einfluss von Richtungsfehlern ist zumindest in der Geraden zu vernachlässigen. Netzauswertungen aus Kapitel 3.2 zeigen außerdem keine Korrelation zwischen dem Richtungssignal und dem umgesetzten Stopfumfang, was den Schluss nahe legt, dass im TUG-Netz bestenfalls eine geringe Anzahl der Stopfeinsätze von vorliegenden Richtungsfehlern initiiert wird. Gleise, die nach 2010 eingebaut wurden, werden von sämtlichen Auswertungen ausgenommen, da für sie streng genommen das Belastungsmodell keine Gültigkeit besitzt.

Abfrage V1

Die Qualitätswerte beschränken sich auf Räume nach Stopfeinsätzen (MDZ) und werden am Raumendzeitpunkt nicht von TUG-Einsätzen begrenzt. Das erste Jahr nach der Neulage bis zum sogenannten vierten Stopfgang wird somit von der Betrachtung ausgenommen, ebenso wie Räume, die einem nicht kontinuierlich beschreibbaren Verhalten unterliegen. Das Einbaujahr der Schwelle liegt dabei vor dem Raumanfangszeitpunkt, um zu verhindern, dass das Verhalten einer falschen Oberbaukombination zugeordnet wird. Die durchschnittliche Abweichung der Qualitätssignale von der Funktion darf nicht über 0,75 MDZ-Punkten liegen. Sämtliche betrachtete Qualitätswerte erfüllen das Attribut gültige Länge (siehe A1.2 oder 4.2.1).

Abfrage V2

Die Einschränkung über den zweiten Maschineneinsatz wird aufgehoben. Somit sind auch TUG-Einsätzen in dieser Abfrage als am Raumende begrenzender Maschineneinsatz zugelassen.

Abfrage V3

Mit der Aufhebung des Attributes „gültige Länge“ erlaubt diese Abfrage auch die Betrachtung von Störstellen bzw. die Kombination dieser mit dem ungestörten Streckengleis. Im Gegenzug wird die Möglichkeit eines TUG-Einsatzes als am Raumende begrenzender Maschineneinsatz wieder aufgehoben. Diese Maßnahme zielt darauf ab, dass Qualitätsräume, die in ihrer Entwicklung diskontinuierlich verlaufen, durch verzerrte Qualitätswerte die Entwicklung der Gleislage über die Nutzungsdauer verzerren.

Abfrage V4

Dabei handelt es sich um die am allgemeinsten formulierte Abfrage. Bis auf den ersten Maschineneinsatz werden kaum Einschränkungen getroffen. Der erste Maschineneinsatz muss zwingend ein MDZ Einsatz sein.

	ME1	ME2	Gültige Länge	Delta Schnitt	Geschwindigkeitsbereich	erforderliche Werte	Einbaujahr Schwelle
V1	MDZ	<>TUG	WAHR	≤0,75	80-160	400	>100 & <2010
V2	MDZ	kE	WAHR	≤0,75	80-160	800	>100 & <2010
V3	MDZ	<>TUG	kE	≤0,75	80-160	800	>100 & <2010
V4	MDZ	kE	kE	≤0,75	80-160	800	>100 & <2010

kE ... Keine Einschränkung
100 ... Fehlerwert für Schwellen, deren Einbaujahr unbekannt ist

Tabelle 2 Übersicht der einzelnen getroffenen Filterkriterien

Die kumulierte Belastung wird, sofern bestimmbar (siehe 2.3), über die Schätzfunktion eindeutig berechnet und als Gruppierungsattribut (in Gruppen von 25 Mio.t) herangezogen, um die Entwicklung der Qualitätswerte über die Nutzungsdauer darzustellen. Als Tagesbelastung gilt der aus der Schätzfunktion im Jahr 2007 berechnete Wert.

3.4.4 Entwicklung der Gleislage in geraden ($R > 600\text{m}$) Abschnitten

Die gewählten Kriterien der Abfrage V1 reduzieren die Grundgesamtheit stark. Von den ausgegebenen 126.382 Qualitätswerten dominieren Betonschwellen die Darstellung der Entwicklung des globalen Gleislageverhaltens (siehe Abbildung 32). Unverkennbar ist im Falle von Betonschwellen der Qualitätsverlust mit Zunahme der kumulierten Lasttonnen. Die Interpretation der resultierenden Raumanfangsqualität von Holzschwellen gestaltet sich hingegen durch die geringe Anzahl von Querschnitten als schwierig. Belastungsgruppen die weniger als 400 Werte (siehe Tabelle 2) umfassen, werden im Rahmen dieser Auswertung nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass Gruppen mit einer derartig geringen Anzahl von Querschnitten nicht repräsentativ für das Globalverhalten sind, weshalb sie von der Betrachtung ausgeschlossen werden.

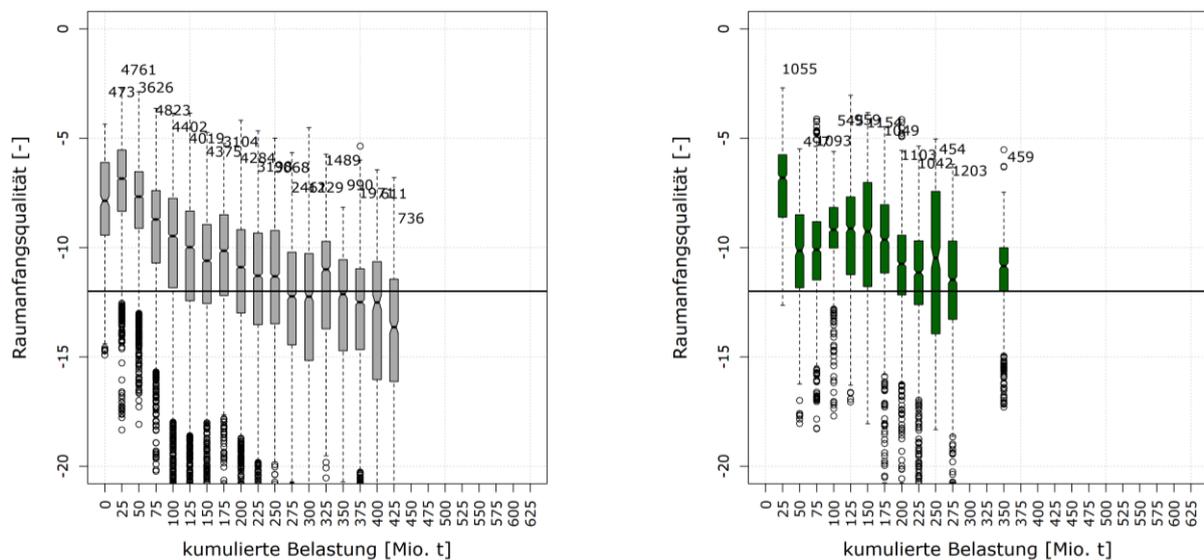


Abbildung 32 Entwicklung der Raumanfangsqualität über kumulierten Lasttonnen (Abfrage V1) links: Betonschwellen rechts: Holzschwellen

Auffallend unterscheiden sich die Grenzen der Nutzungsdauern, begrenzt durch den letzten vorhandenen Boxplot (siehe Abbildung 32). Auch wenn die Absolutwerte eine detailliertere Untersuchung erforderten, so lässt sich eine 25%-ige niedrigere Nutzungsdauer im Falle von Holzschwellen erkennen. Holzschwellen weisen einen den Betonschwellen ähnlichen Trend auf. Die Boxplots bei 25 und 50 Millionen Tonnen verzerren das Bild sehr und eine mögliche Regressionsanalyse liefert für Holzschwellen kaum befriedigende Ergebnisse.

Der Vergleich beider Entwicklungen folgt über die kumulierten Lasttonnen einem logarithmischen Verlauf, der sich bei Betonschwellen in besonderer Deutlichkeit ausprägt (siehe Abbildung 32). Lediglich der Median der Raumanfangsqualität kurz nach der Neulage und bei 325 Millionen Tonnen weicht im Falle von Betonschwellen vom globalen Trend ab, während hingegen bei Holzschwellen eine logarithmische Verschlechterung nur mit einem Bestimmtheitsmaß von knapp 80% ermittelt werden kann.

Im Zuge der Auswertungen wurden drei unterschiedliche Modellansätze zur Beschreibung der Entwicklung, sowohl für die Raumendqualität, als auch für die Raumanfangsqualität geprüft (siehe Abbildung 33).

Ein lineares Modell beschreibt den Zusammenhang zwischen den kumulierten Tonnen und der sich einstellenden Gleislagequalität in beiden Fällen unzureichend, während hingegen das quadratische und logarithmische Modell gute Ergebnisse liefert.

Das logarithmische Modell zeigt nicht nur geringfügig bessere Anpassungen (sowohl im Bestimmtheitsmaß als auch in der Verteilung der Residuen), sondern birgt auch zusätzliche anwendungsorientierte Vorteile. Eine Verbesserung der Gleislagequalität im Laufe der Nutzungsdauer ist durch den logarithmischen Ansatz ausgeschlossen, während diese hingegen beim quadratischen Ansatz, zumindest rein mathematisch möglich wäre.

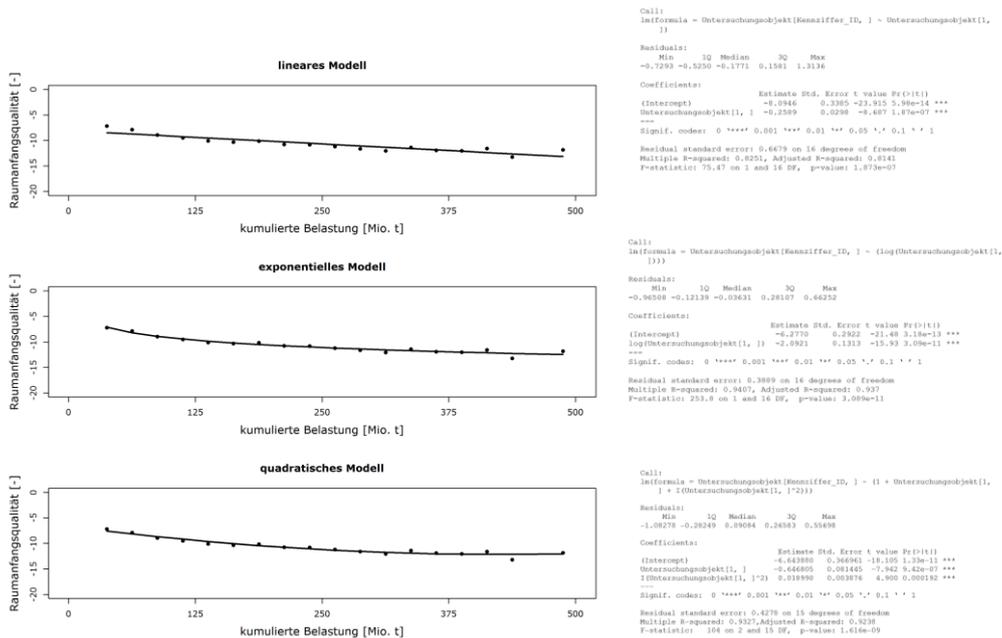


Abbildung 33 Auswertemethodik der Regressionsgüte am Beispiel der Medianwert der Raumanfangsqualitäten von Betonschwellen

Dadurch stellt sich der logarithmische Ansatz gegenüber Ausreißern weitaus stabiler dar, als der quadratische Ansatz. Ungeklärt ist noch, wie mit der mathematischen Unbe-

stimmtheit der logarithmischen Funktion an der Stelle Null umzugehen ist. Ziel der aufgestellten Funktion ist es, die Gleislageentwicklung über die Nutzungsdauer zu beschreiben, weshalb die außerhalb der generell gültigen Gesetzmäßigkeiten liegende Entwicklung der Anfangssetzung bis ca. 2 Millionen Tonnen außer Acht gelassen werden dürfen. Die untere Grenze der Funktion wird somit mit dem Abklingen der Anfangssetzungen bei 0,5 Millionen Tonnen begrenzt, was dazu führt, dass die logarithmische Funktion durchgehend bestimmt bleibt. Was den Anschein erweckte, eine rein mathematische Spielerei zu sein, hat zentrale Bedeutung für die programmtechnische Umsetzung des Klassifizierungsalgorithmus. Durch den Einfluss der Verschlechterungsrate und der dadurch entstehenden zusätzlichen Streuung liegt die Güte der Regression bei Raumendqualitäten tendenziell niedriger als bei Raumanfangsqualitäten, kann aber dennoch als hinreichend genau angesehen werden.

Wird die Verschlechterungsrate betrachtet, so zeigen sich beidseitig zu Beginn der Nutzungsdauer signifikant hohe Ausprägungen (siehe Abbildung 34). Die Verschlechterungsraten von Betonschwellen unterliegen augenscheinlich dabei nicht nur einer höheren Streuung, sondern prägen sich auch stärker aus, als jene von Holzschwellen. Sie folgen keinem erkennbaren Trend und unterliegen zusätzlich zwischen den Belastungsgruppen sprunghaften Veränderungen.

Im Gegensatz zu den Verschlechterungsraten von Betonschwellen wachsen die Verschlechterungsraten der Holzschwelle nach den ersten 100 Millionen Tonnen kontinuierlich an und nähern sich dem Niveau der Betonschwellen.

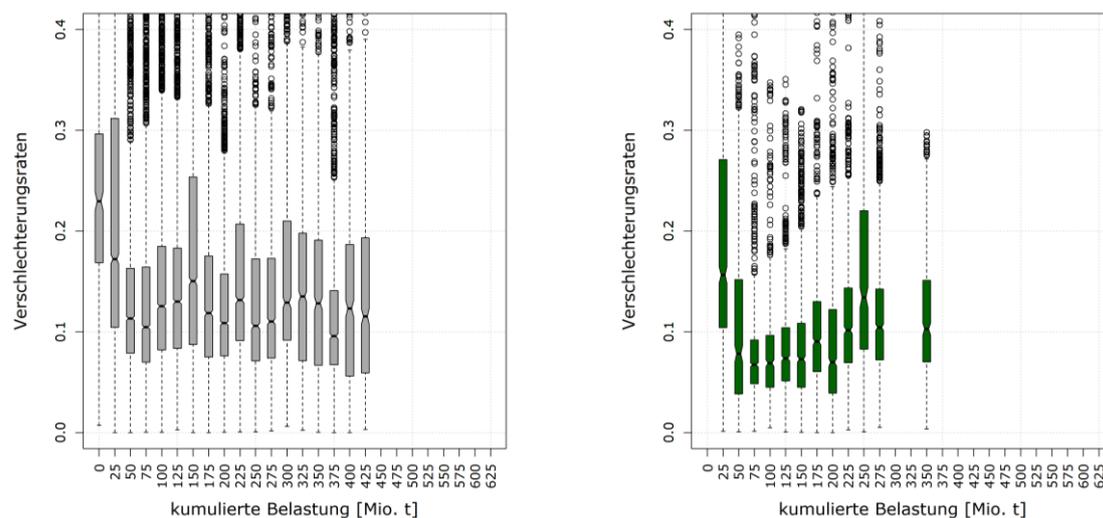


Abbildung 34 Entwicklung der Verschlechterungsraten über die kumulierten Lasttonnen links: Betonschwellen rechts: Holzschwellen

Aus den Raumanfangsqualitäten und den zugehörigen Verschlechterungsraten ergeben sich die Raumendqualitäten, also jene Qualitäten, die im Modell eine Instandhaltungsmaßnahme auslösen bzw. kurz vor diesen auftreten. Die Raumendqualitäten weisen

trotz der teilweise vorhandenen sprunghaften Änderungen der Verschlechterungsraten einen logarithmischen Verlauf auf, wie er bereits bei den Raumanfangsqualitäten identifiziert werden konnte.

Die Entwicklung der Raumendqualitäten unterscheidet sich abhängig von der eingesetzten Schwellenart und weist bei Holzschwellen ein tendenziell höheres Niveau auf. Demzufolge werden Holzschwellen bei einem höheren Qualitätsniveau instandgehalten als Betonschwellen.

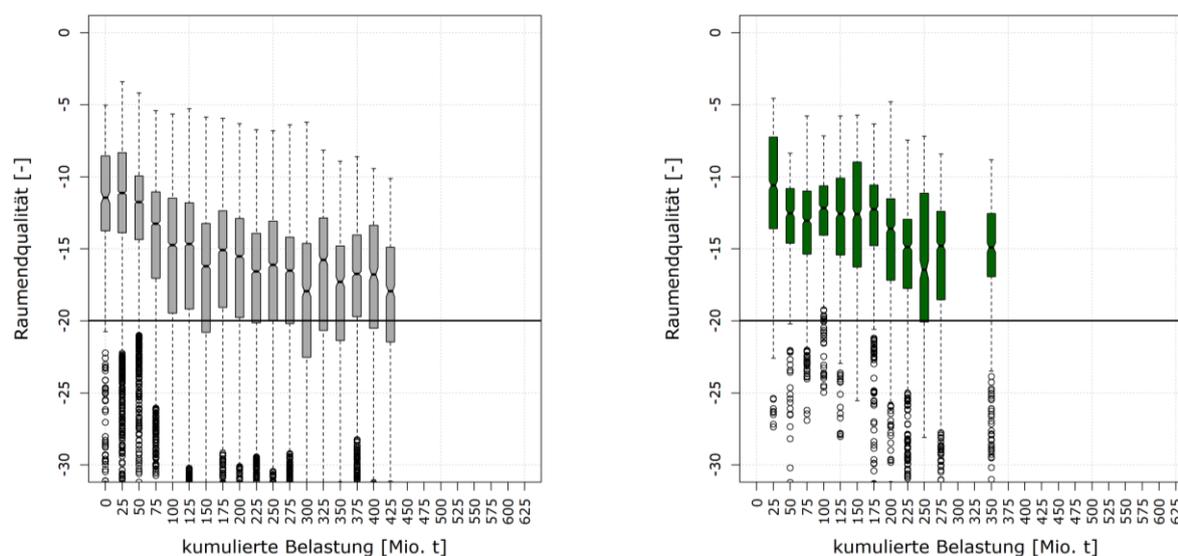


Abbildung 35 Entwicklung der Raumendqualitäten über die kumulierten Tonnen links: Betonschwellen rechts: Holzschwellen

Die bislang gewonnenen Erkenntnisse basieren auf den Auswertungen der Grundabfrage V1 und sollen im Anschluss mit den Ergebnissen weiterer Abfragen – in erster Linie mit jenen der Abfrage V2 – verglichen werden. Besonderes Augenmerk ist auf die Untersuchung der Verschlechterungsraten und die Entwicklung der Raumanfangsqualitäten von Holzschwellen zu legen. Die Abfrage V2 lockert die Einschränkungen der ursprünglichen Abfrage und lässt zusätzliche Qualitätswerte zu (siehe Tabelle 2). Dadurch vergrößert sich die Stichprobengröße bei Betonschwellen um 50% und im Falle von Holzschwellen sogar um 100%. Unter Verwendung der bereits bei V1 angewandten Auswertemethode ist es nun möglich, die Entwicklung der Raumanfangsqualitäten über die kumulierten Tonnen zu betrachten und die Regression der Medianwerte und Quartilswerte beider Varianten miteinander zu vergleichen (siehe Abbildung 36).

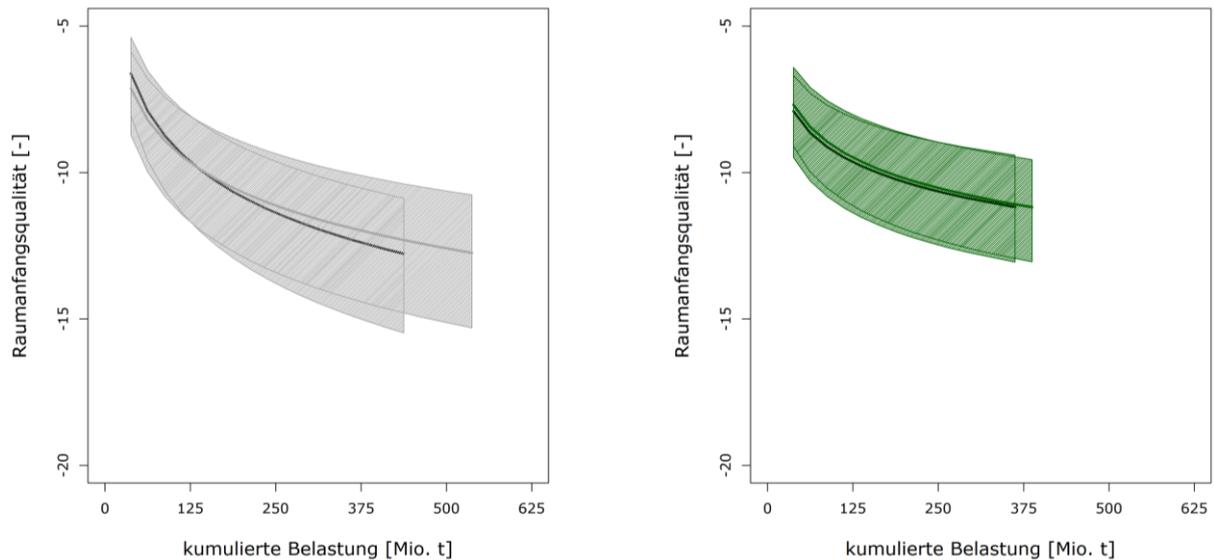


Abbildung 36 Gegenüberstellung der Raumanfangsqualitätsentwicklung der beiden Abfragen V1 [grauer Medianwert] und V2

Die obenstehende Darstellung erlaubt einen Vergleich der beiden Abfragen V1 und V2 hinsichtlich der unterschiedlichen Entwicklung der Raumanfangsqualitäten über die kumulierten Tonnen. Sie zeigt dabei die Entwicklung des Interquartilabstandes und dem Median und erlaubt einen direkten Vergleich zwischen Beton- und Holzschwellen.

Trotz der geringen Grundgesamtheit führen die zusätzlichen Querschnitte im Falle von Holzschwellen zu kaum merkbar Veränderungen des angenäherten Verhaltens, sie erhöhen jedoch das Bestimmtheitsmaß der Regression. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei Betonschwellen, wenngleich sich in diesem Fall eine kleine Verschiebung der Regressionskurve erkennen lässt. Auch wenn die Änderung der Kurve geringfügig ausfällt und vernachlässigt werden kann, zeigt sie dennoch die besondere Empfindlichkeit der Lagestabilität von Betonschwellen im Falle der Änderung von Umgebungsparametern.

Diese Erkenntnis und die Tatsache, dass sich auch in der Entwicklung der Verschlechterungsraten in Abbildung 37 kaum Änderung zeigen, erlauben es, die weiteren Auswertungen auf der Datengrundlage der Abfrage V2 durchzuführen, und die positiven Effekte der erweiterten Grundgesamtheit für eine weiterführende detaillierte Analyse zu nutzen. Die weiterführenden Untersuchungen stützen sich dabei in erster Linie auf die genauere Betrachtung von Betonschwellen. Der größere Stichprobenumfang erlaubt eine detailliertere Untersuchung und eine Unterteilung in unterschiedliche Gruppen, die bei Holzschwellen die Gefahr birgt, zu nicht repräsentativen Ergebnissen zu führen.

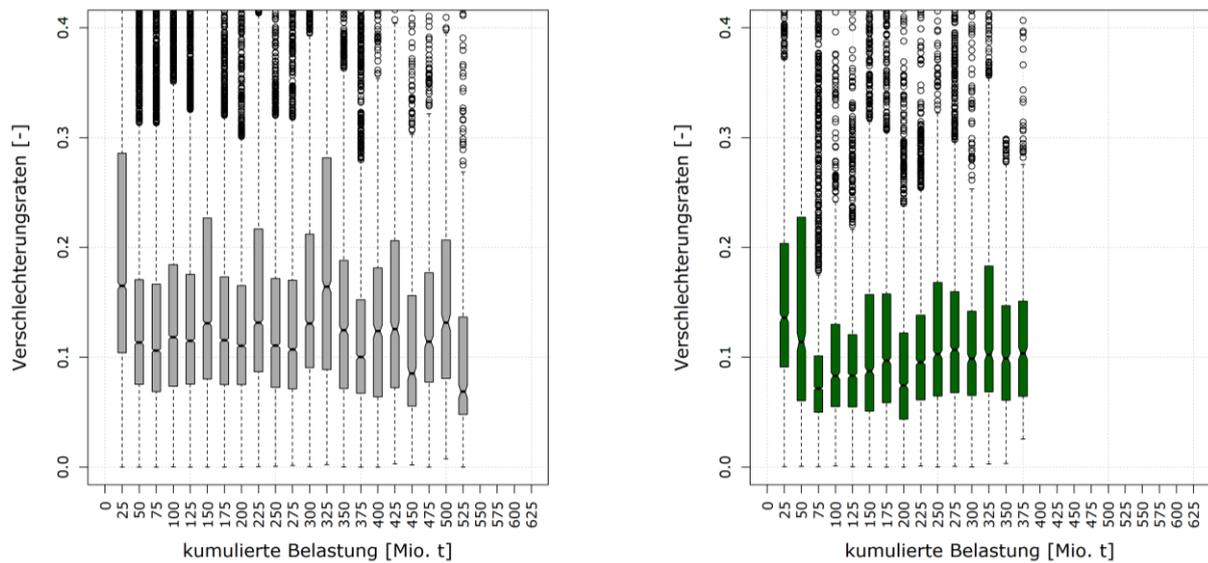


Abbildung 37 Entwicklung der Verschlechterungsraten über die kumulierten Lasttonnen links: Betonschwellen rechts: Holzschwellen

Mit der Berücksichtigung der MDZ-a Ziffer als Grundlage für die Auswertung ist es möglich, diese weitgehend von der Berücksichtigung unterschiedlicher Geschwindigkeitsintervalle zu entkoppeln. Die Planung gleislagekorrigierender Maßnahmen beruht in Österreich und damit im TUG-Netz prinzipiell auf der Anwendung der EN13848-6 und damit im Wesentlichen auf der Betrachtung der Standardabweichung der Längshöhe. Auch wenn in Österreich eine modifizierte Art der Standardabweichung mit anderer Einflusslänge verwendet wird, sind die definierten Schwellenwerte dennoch von der Geschwindigkeit abhängig [Auer 2004].

Die MDZ-a Ziffer gestaltet sich in ihrer Anwendung per Definition geschwindigkeitsunabhängig, jedoch ist eine Korrelation zwischen der Entwicklung über die Nutzungsdauer durch die geschwindigkeitsabhängigen Eingriffsschwellen nicht auszuschließen. Somit gilt es die Frage zu klären, in wie fern sich mögliche Geschwindigkeitsunterschiede auf die Entwicklung der Qualität über die Nutzungsdauer auswirken bzw. welche Auswirkung geschwindigkeitsabhängige Eingriffsschwellen auf die Entwicklung nach sich ziehen. Die Abfrage V2 umfasst hauptsächlich zwei Geschwindigkeitsbereiche, die sich hinsichtlich der vorgeschriebenen Instandhaltungsgrenzen voneinander unterscheiden [Österreichisches Normungsinstitut 2014].

Das Intervall A beschreibt dabei einen Geschwindigkeitsbereich von 80 km/h bis einschließlich 120 km/h, während Geschwindigkeiten von 120 km/h bis 160 km/h vom Intervall B abgedeckt werden. Beide Entwicklungen lassen sich über einen logarithmischen Ansatz beschreiben und zeigen dabei Unterschiede. Sowohl die Regressionsfunktionen des Intervalls A, als auch jene des Intervalls B nähern sich dem Wert -12 an und reduzieren

im Laufe dieser Annäherung den Unterschied zwischen den Geschwindigkeitsintervallen (siehe Abbildung 38).

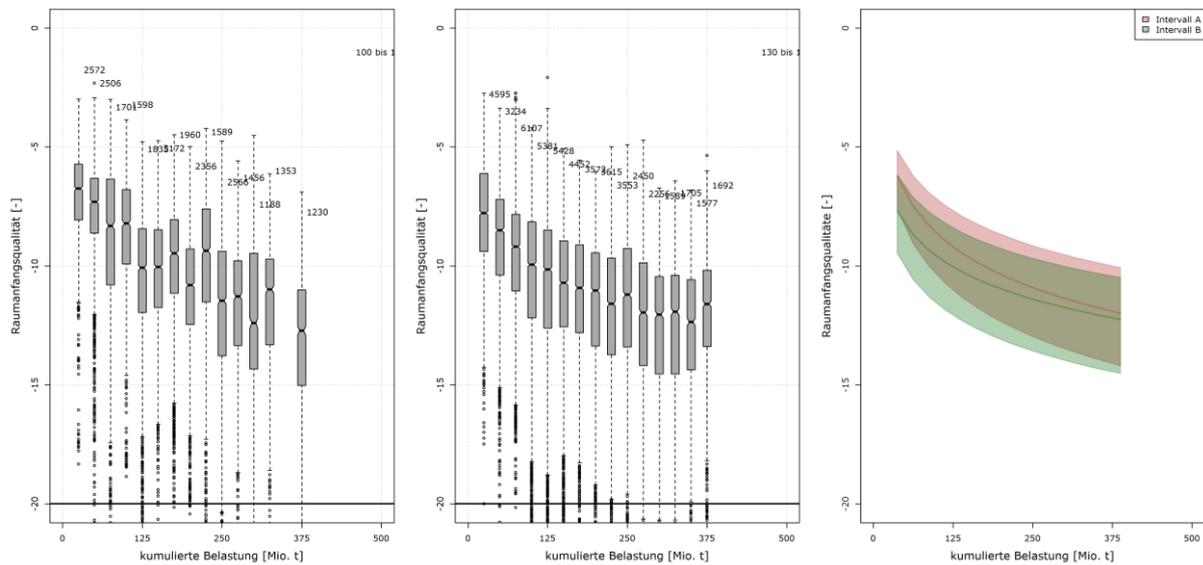


Abbildung 38 Entwicklung der Raumanfangsqualität in unterschiedliche Geschwindigkeitssegmenten

Bei einem Vergleich der Raumentqualitäten ähneln sich beide Entwicklungen zwar in ihrem Verlauf, weisen jedoch eine absolute Verschiebung zueinander auf (siehe Abbildung 39). Dabei zeigen Streckenabschnitte mit niedrigeren Geschwindigkeiten eine tendenziell bessere Gleislagequalität als Querschnitte mit Geschwindigkeiten aus dem Intervall B. Ziel der aktuellen Normung ist es jedoch, mit ansteigender Geschwindigkeit höhere Anforderungen an die Gleislagequalität zu definieren. Bevor weitere Aussagen über die genaue Herkunft dieses Unterschieds getätigt werden können, ist es notwendig, eine mögliche Korrelation zwischen der Geschwindigkeit und der resultierenden Verschlechterungsrate zu quantifizieren. Eine Betrachtung der Verschlechterungsrate in den einzelnen Intervallen lässt jedoch kein klares Muster feststellen, womit der Schluss nahe liegt, dass die Ausprägung der Verschlechterungsrate maßgebend von anderen Parametern und nur geringfügig von der zulässigen Geschwindigkeit beeinflusst wird. Somit lässt sich der Unterschied in der Raumentqualität in erster Linie auf unterschiedliche, geschwindigkeitsabhängige Instandhaltungsstrategien zurückführen. Die Vermutung liegt nahe, dass die Eingriffsschwellen für Gleisabschnitte mit niedrigen Geschwindigkeiten tendenziell zu hoch gewählt werden. Betrachtet man die Entwicklung der Raumentqualität über die Standardabweichung Höhe, so zeigt sich ein umgekehrter Verlauf und Streckenabschnitte mit niedriger Geschwindigkeit weisen eine schlechtere Gleislagequalität auf. Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass die unterschiedlichen Geschwindigkeiten im betrachteten Intervall nur einen geringfügigen Einfluss auf die sich einstellenden Raumanfangsqualitäten (in MDZ-a) nach sich ziehen. Die Raumentqualitäten präsentieren sich als Spiegelbild der Instandhaltungsstrategie.

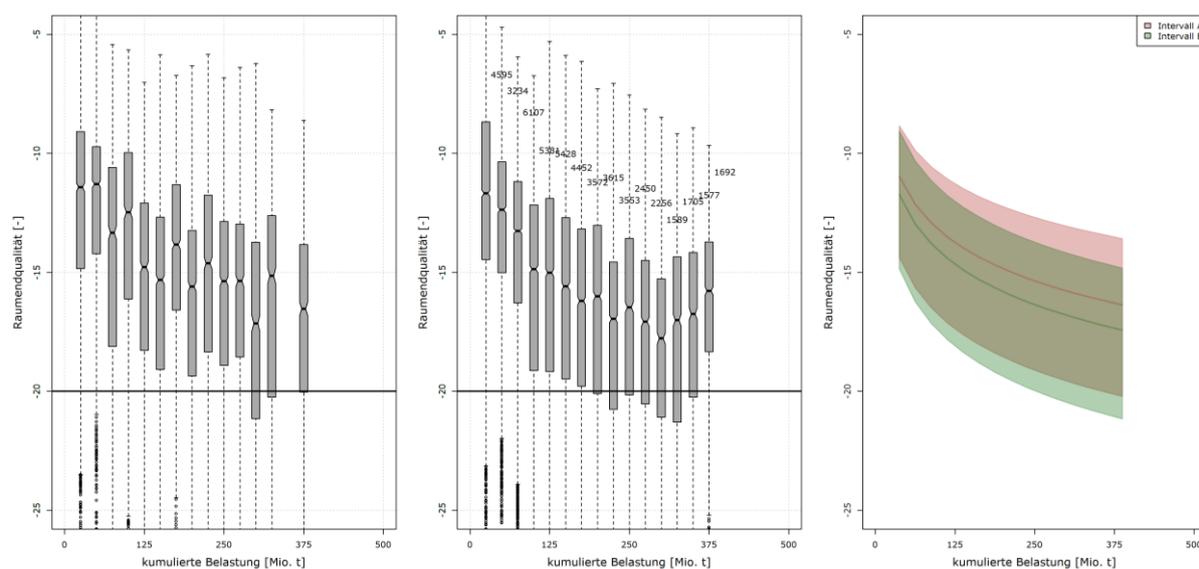


Abbildung 39 Entwicklung der Raumendqualität in unterschiedliche Geschwindigkeitssegmenten

Die unterschiedlichen Geschwindigkeiten beeinflussen zwar nicht die Entwicklung der Gleislagequalität an sich, sondern führen lediglich zu einem unterschiedlichen Level. Vertraut man der Theorie der MDZ-Ziffer, so ermöglicht diese eine geschwindigkeitsunabhängige Klassifizierung der Anlage, da sie die Geschwindigkeit bereits in der Berechnung berücksichtigt. Man kann dabei von einer einheitlichen Bewertung der Gleislage sprechen, die es ermöglicht, einzelne Schwellenwerte netzweit geschwindigkeitsunabhängig anzugeben.

Die Berücksichtigung der kumulierten Belastung realisiert eine Kombination des Oberbaualters mit der täglichen Belastung und etabliert auf diese Weise ein gemeinsames Gruppierungsattribut. Der neue Parameter „kumulierte Belastung“ ermöglicht eine maßgebliche Vergrößerung der Stichprobe und macht eine direkte Berücksichtigung der täglichen Belastung obsolet. Dennoch gilt es vorab zu klären welchen Einfluss die unterschiedliche Tagesbelastung auf die Entwicklung der Gleislage über die Nutzungsdauer besitzt. Augenscheinlich (siehe Abbildung 40) zeigt sich kein derartiger Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Tagesbelastungen und der Entwicklung der Gleislage über die kumulierten Lasttonnen. Der erkennbare Unterschied zwischen den Qualitätsverläufen der einzelnen Tagesbelastungen begründet sich vielmehr in der allgemeinen Streuung von Betonschwellen und lässt sich nicht auf die unterschiedliche Tagesbelastungen zurückführen. Für die Belastungsklasse >70.000 Tonnen pro Tag und Gleis konnten nicht genug Werte für eine repräsentative Darstellung über die Nutzungsdauer gefunden werden.

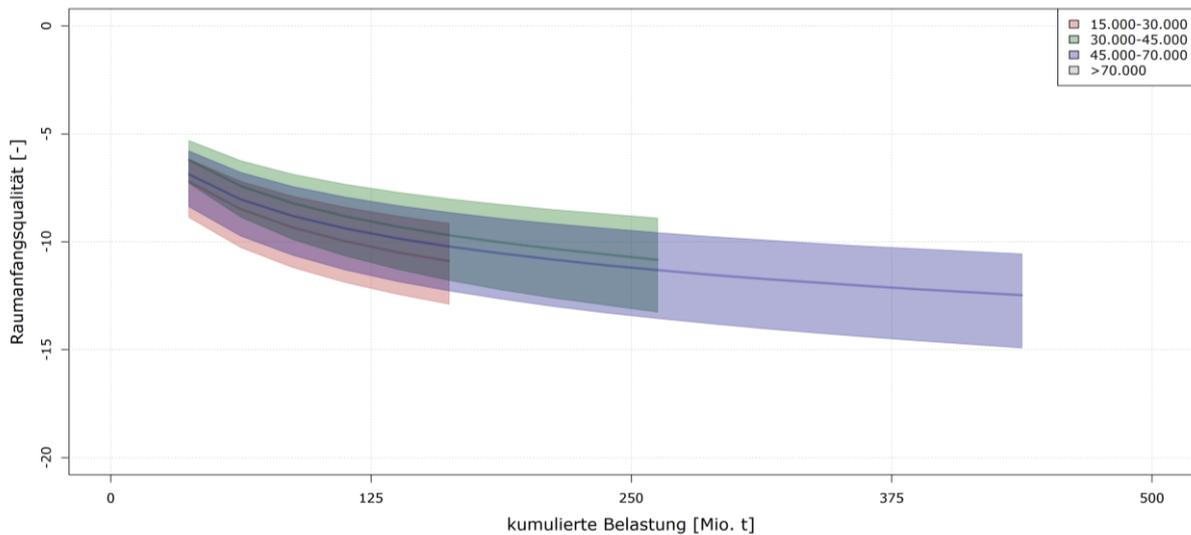


Abbildung 40 Entwicklung der Raumanfangsqualität bei unterschiedlichen Tagesbelastungen im Falle von Beton-schwellen

Gegensätzlich zur Entwicklung der Raumanfangsqualität zeigt sich bei der Betrachtung der Verschlechterungsraten (siehe Abbildung 41) ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Tagesbelastung und der Entwicklung der Verschlechterungsrate über die Nutzungsdauer. In allen untersuchten Belastungsklassen bilden sich in den ersten 25 Millionen Lasttonnen relativ zur restlichen Liegedauer besonders hohe Verschlechterungsraten aus, die im Laufe der Zeit abnehmen und sich auf unterschiedlichem Niveau ab ca. 125 Millionen Tonnen einpendeln. Die Höhe der Verschlechterungsrate nähert sich in den ersten zwei Belastungsklassen im Median dem Wert 0,09 und unterscheidet sich in erster Linie bis zur 125 Millionen Tonnen Grenze deutlich hinsichtlich ihrer Ausprägung.

In der Belastungsklasse 30.000-45.000 t/Tag und Gleis nimmt der Unterschied zwischen den anfänglichen Verschlechterungsraten und dem Konsolidierungsniveau deutlich zu. In der dritten betrachteten Belastungsklasse 45.000-70.000 bildet die Verschlechterungsrate deutlich höhere Werte über den gesamten Betrachtungsraum aus und zeigt besonders hohe Anfangsverschlechterungen. Die Schwierigkeit in der Analyse der Verschlechterungsrate ist es unterschiedliche Effekte voneinander zu entkoppeln. So beeinflussen sowohl Schienenprofil, als auch tägliche Belastung die Verschlechterungsrate. Tendenziell werden kleinere Schienenprofile im Bereich von niedrig belasteten Strecken eingesetzt, die somit auch einer unterschiedlichen Beanspruchung unterliegen. Dieser Umstand wurde ausführlich von Robert Hummitzsch [Hummitzsch 2009] untersucht und wird in dieser Arbeit nicht weiter ausgeführt.

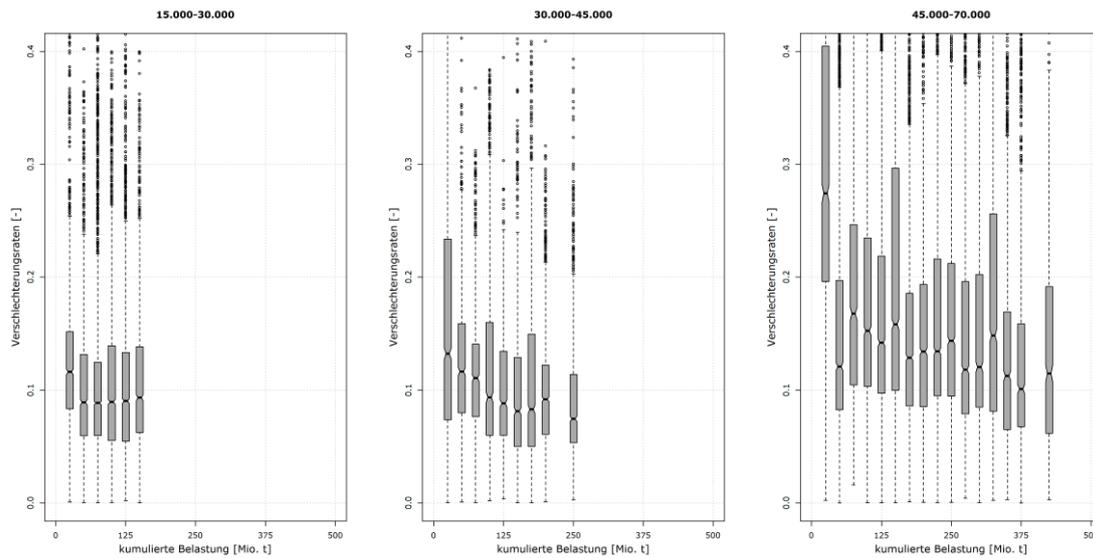


Abbildung 41 Entwicklung der Verschlechterungsraten über die kumulierte Belastung abhängig von unterschiedlichen Belastungsgruppen bei Betonschwellen

Eine derartig starke Ausprägung dieses Effektes konnte bei Holzschwellen nicht in der dargelegten Deutlichkeit nachgewiesen werden, wenngleich sich hier ein klarer Nachweis aufgrund der kleineren Grundgesamtheit als schwierig erweist (siehe Abbildung 42). Der Unterschied zwischen Beton- und Holzschwellen gestaltet sich aufgrund der geringen Stichproben und der nachgewiesenen Abhängigkeit zwischen der Tagesbelastung und der Verschlechterungsrate als schwierig. Tendenziell zeigen Holzschwellen verglichen mit Betonschwellen eine um rund 30% niedrigere Verschlechterungsrate. Der vorher festgestellte scheinbare Anstieg der Verschlechterungsrate von Holzschwellen über die kumulierte Belastung, lässt sich in erster Linie auf die charakteristische Verteilung der Querschnitte auf die einzelnen Belastungsgruppen zurückführen.

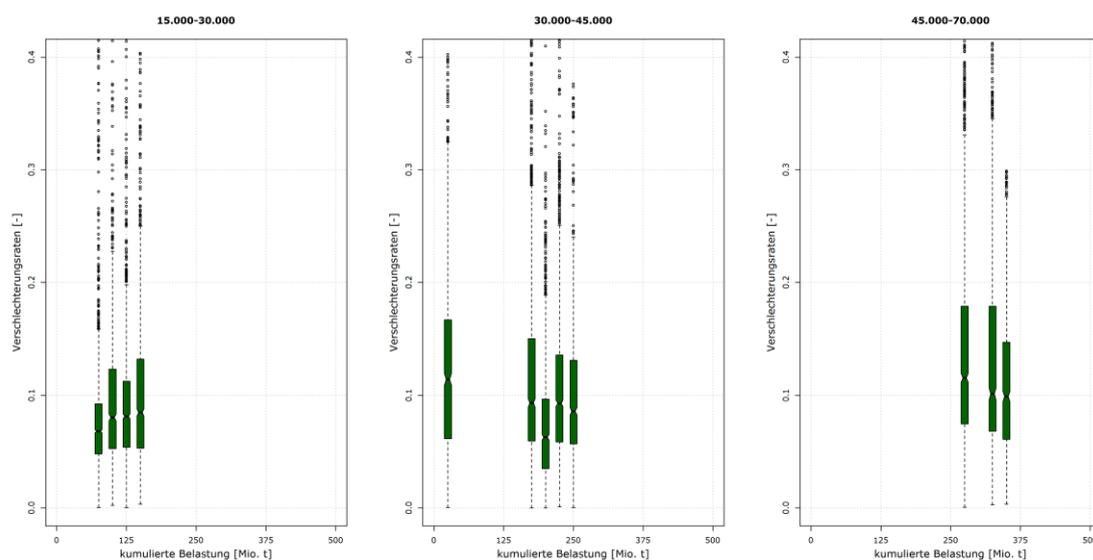


Abbildung 42 Entwicklung der Verschlechterungsraten über die kumulierte Belastung abhängig von unterschiedlichen Belastungsgruppen bei Holzschwellen

Eine genaue Bestimmung der Entwicklung der Verschlechterungsrate über die Nutzungsdauer ist nur eingeschränkt bzw. überhaupt nicht möglich. Der Abstand zwischen den Quartilsgrenzen der ersten und dritten Quartile umfasst in Teilbereichen nahezu den Faktor zwei. Die starke Streuung der Verschlechterungsrate erlaubt es so kaum, eine eindeutige Klassifizierung vorzunehmen. Anscheinend beeinflussen Parameter wie unterschiedliche Unterbaueigenschaften, Fahrzeugzusammensetzungen, Ausführungsqualitäten etc. die Verschlechterungsraten stärker als die Entwicklung der Raumanfangsqualitäten ([Landgraf et al. 2014]). Die Tagesbelastung spiegelt sich in der Ausprägung der Verschlechterungsrate in den vorliegenden Auswertungen wider. Für eine Klassifizierung des Anlagenzustandes wird auf die Normierung der Verschlechterungsrate (vgl. [Hummitzsch 2009]) verzichtet und lediglich zwischen sehr hohen und niedrigen Verschlechterungen tagesbelastungsabhängig unterschieden. Als primäres Klassifizierungsattribut dient so die Raumanfangsqualität bzw. Endqualität, während die Verschlechterungsrate nur der Sekundärklassifizierung dient.

Wesentlich für die gegenständliche Arbeit gestaltet sich jedoch die Fragestellung, inwiefern sich unterschiedliche Verschlechterungsraten auf die resultierende absolute (d.h. Raumanfangsqualität) Gleislage auswirken. Die Verschlechterungsraten werden anhand ihrer Verteilung in drei Klassen unterteilt, wobei das erste und dritte Quartil als Grenze dient. Die Unterteilung führt, wie in Abbildung 43 ersichtlich zu keiner erwähnenswerten Änderung der Entwicklung der Raumanfangsqualität. Es besteht daher augenscheinlich keinerlei Zusammenhang zwischen der Verschlechterungsrate und der Raumanfangsqualität des gleichen Raumes.

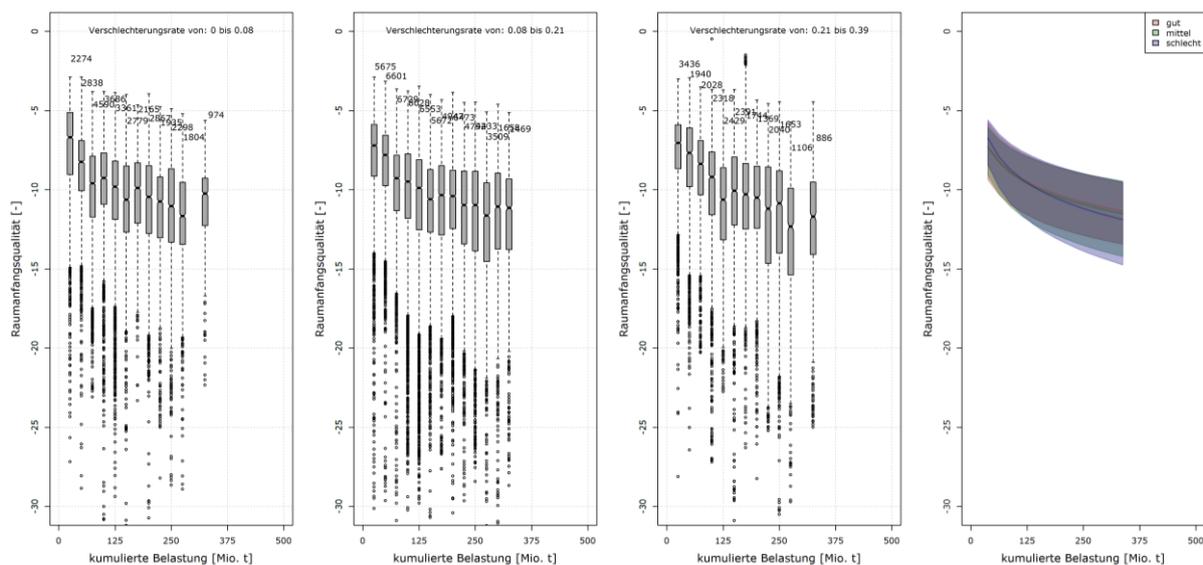


Abbildung 43 Auswirkung unterschiedlicher Verschlechterungsraten auf die Raumanfangsqualität

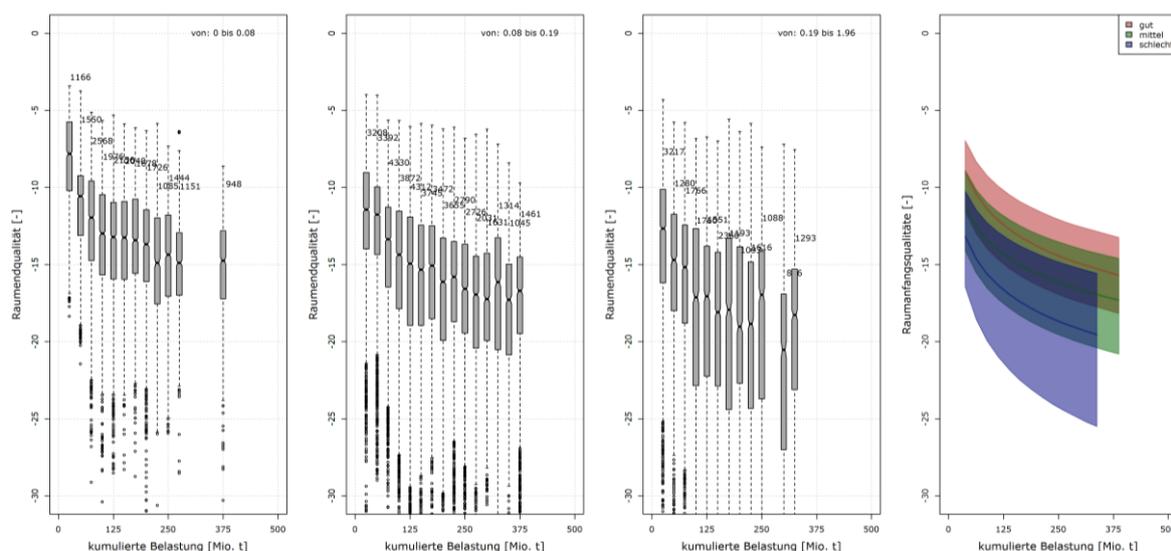


Abbildung 44 Auswirkung unterschiedlicher Verschlechterungsraten auf die Raumendqualität

Im Gegensatz zur Raumfangsqualität führt die Gruppierung der Verschlechterungsrate im Falle der Raumendqualität, wie in Abbildung 44 veranschaulicht, sehr wohl zu einer signifikanten Veränderung des Ergebnisses. Die Grenzen für die Gruppierung stammen aus der Verteilung der Verschlechterungsrate und entsprechen den 25% und 75% Quartilswerten. Die entsprechenden Grenzen der einzelnen Klassen sind in der Darstellung angeführt. Mit ansteigender Verschlechterungsrate zeigt sich eine höhere Raumendqualität. Dieser Zusammenhang ergibt sich als logische Folge der Berechnung der Raumendqualität. Folglich indiziert bei Gleisen mit einer hohen Verschlechterungsrate ein schlechteres absolutes Gleislageniveau die Instandhaltungsmaßnahme als bei Gleisen, mit besserer Verschlechterungsrate.

Es gilt somit die Frage zu klären, warum Gleise mit einer geringeren Verschlechterungsrate bei einer höheren Qualität gestopft werden. Für dieses Paradoxon existieren folgende zwei unterschiedliche Begründungen:

1. Die Planung von Stopfeinsätzen erfolgt mehr oder weniger unabhängig von der Gleislage und wird nur zeitabhängig durchgeführt.
2. Einzelne Streckenabschnitte werden zusammengefasst und bilden einen großen durchgängigen Bereich. Dadurch wird die Maschinenleistung maximiert und die Kosten minimiert. Folglich werden teilweise auch Bereiche gestopft, die ein weit höheres Qualitätsniveau aufweisen.

Um diese Fragestellung zu beantworten, ist es notwendig, die vor einem Stopfeinsatz auftretenden Qualitäten näher zu untersuchen. Die Herausforderung besteht dabei darin, dass es in diesem Fall nicht ausreicht, den Querschnitt bzw. die Raumqualitätsparameter einzeln zu betrachten. Es ist notwendig den Stopfeinsatz bzw. die ihm zugeordnete

Abschnittsqualität zu berücksichtigen. Diese Information liegt allerdings in der Datenbank nur indirekt vor, da zwar die Stopfeinsätze querschnittsgetreu gespeichert werden, allerdings ihr räumlicher Zusammenhang verloren geht. Um diese Korrelation wieder herzustellen, ist es notwendig Stopfeinsätze mit dem gleichen Einsatzzeitpunkt, die räumlich auf derselben Strecke und demselben Gleis auftreten, zu einem Abschnitt zusammenzufassen und den entsprechenden Qualitätsinformationen zuzuordnen. Diese Zusammenfassung einzelner Querschnitte erfolgt auf Basis, der in V3 definierten Einschränkungen. In den Auswertungen werden nur Stopfeinsätze berücksichtigt, die eine Länge von mindestens 100 Metern und höchstens 9000 Metern umfassen. Die Begrenzung wird verwendet, um einerseits mögliche besonders kurze Stopfeinsätze (Einzelfehlerbehebung) von der Auswertung bewusst auszunehmen und andererseits um mögliche Falschermittlungen von der Auswertung auszuschließen. Als Fehleinträge werden folglich Maschineneinsätze bezeichnet, die eine Einsatzlänge aufweisen, die über der maximalen Schichtleistung zu liegen kommt. Werden Streckenabschnitte mit schlechter und guter Gleislage zusammengefasst, um längere durchgehende Abschnitte zu bilden, so wirken sich die unterschiedlichen Abschnitte auf die resultierende Streckenabschnittsqualität aus. Als Streckenabschnittsqualität wird jene Raumendqualität bezeichnet, die ausschlaggebend für das Setzen der Instandhaltungsmaßnahme ist.

Es ist dabei von wesentlicher Bedeutung, welcher statistische Wert dem Abschnitt zugeordnet wird. Die einfachste Möglichkeit besteht darin, über den Abschnitt den Mittelwert über alle Qualitätswerte der Querschnitte, deren Raumendzeitpunkt eindeutig mit dem Einsatzzeitpunkt der Maschine zusammenfällt, zu bilden. Mittelwerte werden allerdings maßgeblich von Ausreißern beeinflusst, die im Falle von stark streuenden Abschnitten das Ergebnis verzerren. Quantilwerte sind als robuste Schätzer weitaus stabiler gegenüber Ausreißern und erfüllen daher die gestellten Anforderungen an die Auswertung. Ein Stopfeinsatz wird in dieser Abfrage eindeutig von einem Startkilometer und Endkilometer begrenzt. Erfüllt dieser Abschnitt die beschriebenen Attribute hinsichtlich der Länge, so ist es möglich aus den eindeutig zugeordneten Querschnittswerten die Raumendqualitäten vor dem Einsatz zu ermitteln.

Um dem Abschnitt aus dieser Sammlung von Raumendqualitäten einen eindeutigen Wert zuzuordnen zu können, wird der ermittelte Median verwendet. Jedem betrachtet Stopfeinsatz ist somit ein Medianwert zugeordnet, der eindeutig die Qualität des Streckenabschnittes kurz vor dem Stopfeinsatz beschreibt (Abschnittsqualität). Jedem Stopfeinsatz kann eine spezifische kumulierte Belastung bzw. Belastungsgruppe in ähnlicher Weise zugeordnet werden. Die Qualitäten der Stopfeinsätze unterliegen selbstverständlich einer gewissen Streuung, weisen aber sehr deutlich den bereits bekannten logarithmischen Trend über die kumulierten Lasttonnen auf (siehe Abbildung 45). Anhand der Verteilung der

Werte in den einzelnen Belastungsclustern bzw. über den eingeschriebenen Trend lässt sich so ermitteln, in wieviel Prozent der Fälle ein Stopfeinsatz, nachvollziehbar anhand des Regressionsmodelles, über die Gleislage durchgeführt wurde.

Betrachtet man die ermittelten Abschnittsqualitäten so unterliegen sie naturgemäß einer gewissen Streuung. Ähnlich wie die Vorgehensweise in den vorhergehenden Kapiteln, wird für die einzelnen Belastungscluster der Boxplot der zugeordneten Abschnittsqualität ermittelt, sofern mindestens 20 Stopfeinsätze im zugeordneten Belastungscluster vorhanden sind. Auch hier, gilt es mögliche Ausreißer mit dieser Maßnahmen zu identifizieren und für die nachfolgende Betrachtung außer Acht zu lassen. Deutlich zeigt sich auch in dieser Auswertung der für Raumqualitäten typische logarithmische Verlauf. In weiterer Folge dient die logarithmische Regression des Medians als Grundlage für den Vergleich mit den vorhergehenden Untersuchungen.

Im Zuge der Interpretation der Abbildung 45 ist zu bedenken, dass Gleise mit ungünstigen Randbedingungen tendenziell vor dem Erreichen hoher kumulierter Verkehrsbelastungen reinvestiert werden müssen. Umgekehrt weisen Gleise mit hohen kumulierten Verkehrsbelastungen oftmals sehr günstige Eigenschaften auf. Dies führt dazu, dass sie über dem eingeschriebenen Trend zu liegen kommen.

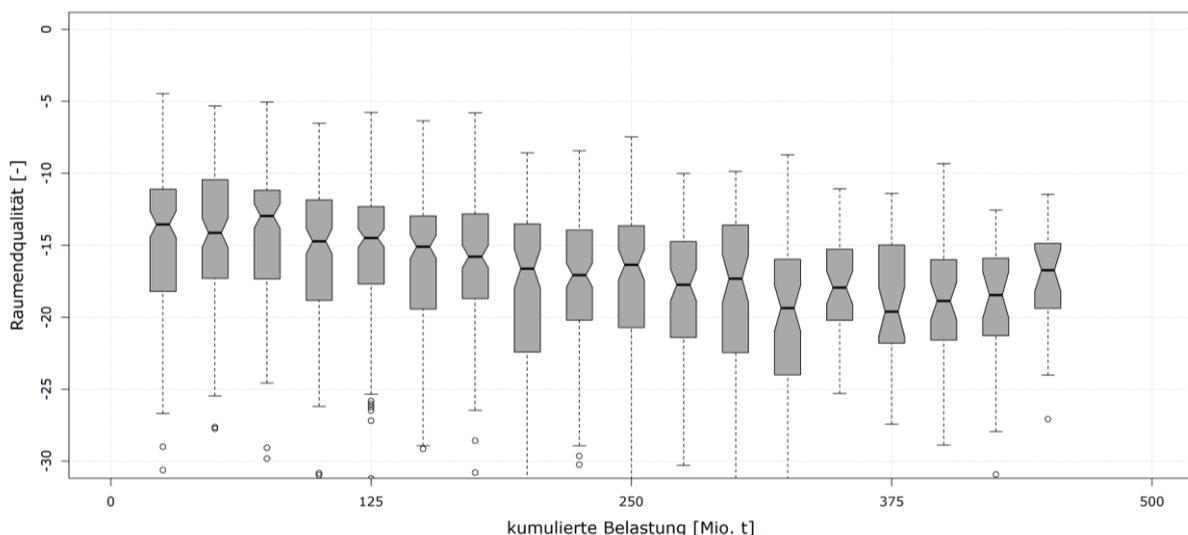


Abbildung 45 Entwicklung der 50% Abschnittsqualität über die kumulierten Tonnen

Bei der Betrachtung von Qult im Rahmen der Abfrage V3 gilt es zu berücksichtigen, dass in dieser Abfrage die Anforderungen an die Querschnitte reduziert wurden. Die Einschränkung der Auswertung auf Querschnitte mit gültiger Länge wurde um den Umfang der Stichprobe zu erhöhen fallen gelassen. Daher können die Raumendqualitäten weitaus stärker ausgeprägt sein, als in den vorhergehenden Abfragen, da einzelne Störstellen von der Betrachtung nicht ausgenommen werden. Diese Störstellen können sich hinsichtlich

ihres Verhaltens wesentlich von jenen der Grundgesamtheit unterscheiden. Der Vergleich der Abfragen zeigt diese Abweichung besonders im Falle von Holzschwellen.

Die Regression der Medianentwicklung der unterschiedlichen Abschnittsqualitäten spiegelt sich deutlich in den unterschiedlichen, sich einstellenden Verläufen wider. So liegt die 25% Abschnittsqualität deutlich außerhalb des Quartilbereichs der generellen Entwicklung von Betonschwellen und zeigt damit, dass in 50% aller betrachteten Stopfeinsätze 25% der Abschnittsqualität maßgeblich unter der generellen Entwicklung zu liegen kommen.

Unter anderem durch die geringere Tagesbelastung aber auch durch das unterschiedliche Verhalten prägen sich bei Holzschwellen in Kombination mit den besseren Raumanfangsqualitäten in Folge auch bessere Raumendqualitäten aus (siehe Abbildung 46). Dieser Unterschied bedeutet jedoch, dass Holzschwellen bei einem tendenziell höheren Qualitätsniveau gestopft werden als Betonschwellen. Holzschwellen werden mehrheitlich nur noch in niedriger belasteten Streckenabschnitten oder besonders engen Bögen eingesetzt, weisen jedoch offenbar eine bessere Raumendqualität auf. Technisch gesehen unterscheidet die aktuelle Norm bei der Definition von Schwellenwerten nicht zwischen unterschiedlichen Oberbaustoffen, sondern definiert diese lediglich abhängig von der Geschwindigkeit. Eine Auswertung der eingesetzten Oberbaustoffe hinsichtlich der zugeordneten zulässigen Geschwindigkeit macht deutlich, dass Holzschwellen tendenziell in Gleisen eingesetzt werden, die mit niedriger Geschwindigkeit befahren werden (siehe Abbildung 26). Daraus lässt sich der Unterschied zwischen Beton- und Holzschwellen über den vorliegenden Geschwindigkeitsunterschied und die daraus folgenden unterschiedlichen Schwellenwerte der Instandhaltungsstrategie begründen. Dennoch zieht der Unterschied zwischen den Raumendqualitäten von Holz- und Betonschwellen nur peripher Auswirkungen auf die Klassifizierung der Gleislage nach sich. Für diese Klassifizierung dienen unterschiedliche Raumendqualitäten als Grenzwerte, die es erlauben, die Gleislage in unterschiedliche Qualitätsgruppen zu unterscheiden. Die auftretenden Oberbaustoffe sind dabei im Falle der Gleislage von untergeordneter Bedeutung.

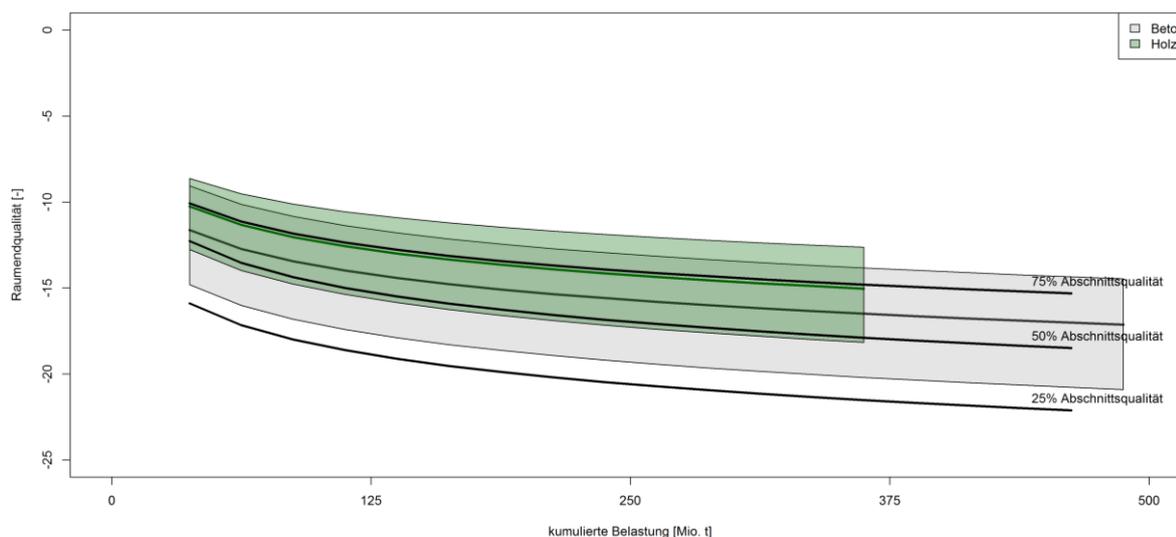


Abbildung 46 Vergleich der Streckenabschnittsqualitäten mit der Entwicklung der Raumendqualität unterschiedlicher Schwellentypen

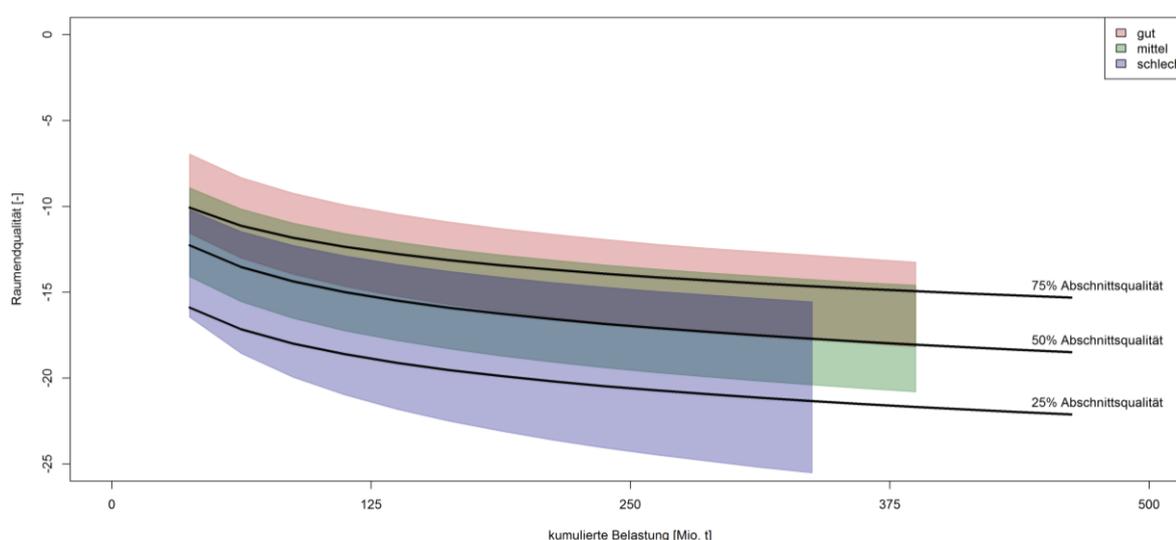


Abbildung 47 Vergleich der unterschiedlichen Streckenabschnittsqualitäten von Betonschwellen mit der Entwicklung der Raumendqualität über die kumulierte Belastung unter Berücksichtigung der vorliegenden Verschlechterungsrate

Ausschlaggebend für die Diskussion der Abschnittsqualität ist die Tatsache, dass unterschiedliche Verschlechterungsraten zu unterschiedlichen Raumendqualitäten führen, oder anders ausgedrückt, dass bei hohen Verschlechterungsraten augenscheinlich eine schlechtere Gleislagequalität toleriert wird als bei niedrigen Verschlechterungsraten.

Wird der unterschiedlichen Entwicklung der Raumendqualitäten die berechnete Abschnittsqualität hinterlegt, so zeigt sich der in Abbildung 47 dargestellte Vergleich. Die Abschnittsqualität kommt deutlich unter der 50% Qualität des generellen Verlaufes der Raumendqualität zu liegen. Dieser Umstand lässt sich über den Wegfall der einschränkenden Parameter wie z.B. gültige Länge erklären. Dadurch beeinflussen Störstellen mit besonders schlechter Gleislage den Medianwert zusätzlich und senken diesen ab. Trotz dieses

zusätzlichen Einflusses weisen die Raumendqualitäten den bereits in den vorhergehenden Abfragen erkennbaren, logarithmischen Verlauf auf.

In mehr als der Hälfte der Stopfeinsätze prägen singular schlecht Abschnitte, mit einem Ausmaß von mindestens 50% des Streckenabschnittes, den Stopfeinsatz. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Verteilung der Gleislagefehler im Netz nicht zufällig erfolgt, sondern sich nach Einwirkung und Widerstandsfähigkeit des Systems richtet. Diese nicht zufallsbedingte Verteilung der Werte erlaubt es festzuhalten, dass Stopfeinsätze im TUG-Netz mehrheitlich reaktiv aufgrund der partiell vorliegenden Qualität durchgeführt werden. Es zeigt sich deutlich, dass Stopfeinsätze zum Teil Abschnitte mit besonders schlechter Gleislage aufweisen, die mit Abschnitten besserer Gleislagequalität kombiniert werden. Eine ausschließlich zustandsbasierte Planung liegt allerdings nicht vor.

In Teilbereichen basiert diese Planung augenscheinlich auch auf einer zeitabhängigen bzw. belastungsabhängigen Instandhaltungsplanung. Um dieses Ergebnis zusätzlich zu untermauern, gilt es die aktuell umgesetzten Stopfintervalle näher zu betrachten.

Diese Betrachtung zielt darauf ab, die Unterschiede im Stopfintervall bei divergierenden Verschlechterungsraten zu erfassen, wobei besonderes Augenmerk darauf gelegt wird, die bekannten zusätzlichen Umgebungsparameter möglichst konstant zu halten. Es gilt dadurch die Annahme zu überprüfen, ob Querschnitte mit sich stark verschlechternder Gleislage öfter gestopft werden, als Querschnitte mit niedrigen Verschlechterungsraten. Umgekehrt wird diese Nachweisführung auch auf die Raumanfangsqualität erweitert. Berücksichtigt werden so nur Querschnitte mit einer täglichen Belastung von 45.000 bis 70.000 t/Tag und Gleis und einem Schienenprofil 60E1 auf Betonschwellen. Deutlich ergibt sich hier ein Unterschied im über die Nutzungsdauer durchschnittlichen Stopfintervall. Querschnitte mit einer hohen Verschlechterungsrate werden demzufolge öfter gestopft als Querschnitte mit einer niedrigeren Verschlechterungsrate (siehe Abbildung 48). Diese Nachweise bestätigen noch einmal die bereits vorab getätigte Vermutung, dass Querschnitte mehrheitlich einer zustandsabhängigen Instandhaltung unterliegen und lediglich zu größeren Abschnitten zusammengefasst werden.

Keinerlei signifikante Korrelation lässt sich zwischen der Raumanfangsqualität und dem umgesetzten Stopfzyklus erkennen (siehe Abbildung 49). Wie bereits die Entwicklung der Raumendqualität gezeigt hat, folgt das Instandhaltungsregime einer sich über die Nutzungsdauer entwickelnden Eingriffsschwelle (entsprechende einer konformen Eingriffsschwelle). Junge Gleise werden bei besserer Gleislagequalität gestopft als ältere Gleise. Demzufolge wird bei älteren Gleisen eine schlechtere Qualität toleriert.

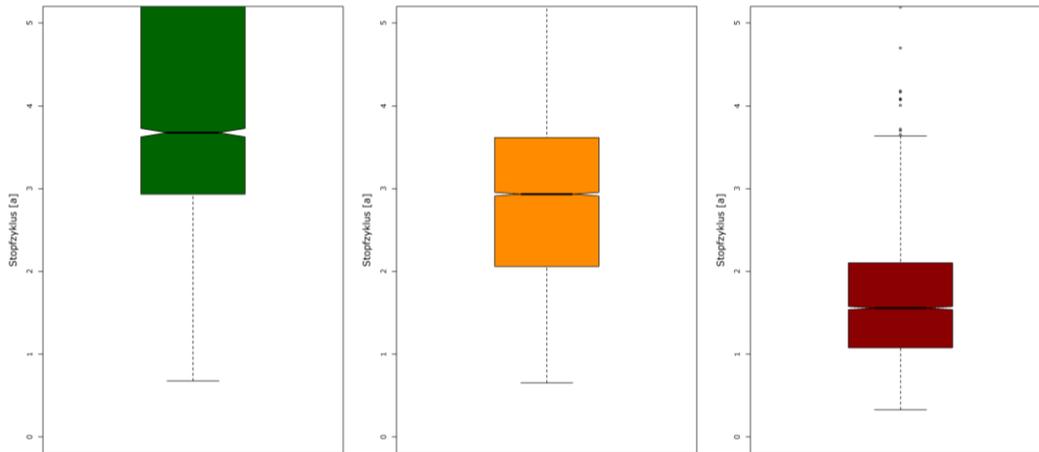


Abbildung 48 Durchschnittlicher Stopfzyklus gruppiert nach niedrigen bis hohen Verschlechterungsraten von links nach rechts

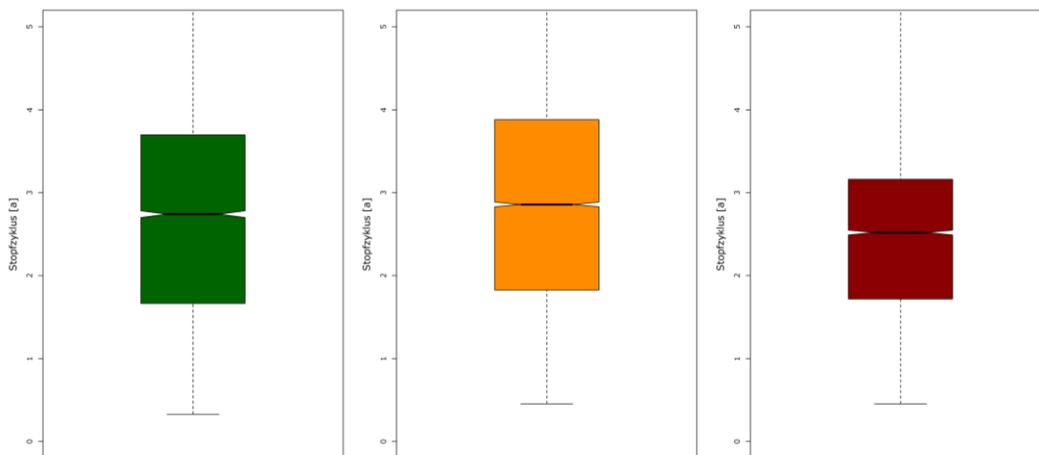


Abbildung 49 Durchschnittliches Stopfintervall gruppiert nach guten/ mittleren/ schlechten Raumanfangsqualitäten von links nach rechts

3.4.5 Raumzusammenhang

Eine detaillierte Auswertung des Zusammenhangs zweier aufeinanderfolgender Räume generiert zusätzliche Information zur Beschreibung der Gleislage über die Nutzungsdauer. In diesem Zusammenhang stellt sich unter anderem die Frage, wie sich schlechte Raumendqualität auf die Raumanfangsqualität des nachfolgenden Raumes auswirkt. Ist es zum Beispiel möglich, bei deutlich schlechterer Raumendqualität die gleiche nachfolgende Raumanfangsqualität zu erreichen, wie bei deutlich höherem Ausgangsniveau. Weiterführend gilt es zu klären, welche Auswirkungen unterschiedliche Verschlechterungsraten auf die Raumanfangsqualität des nachfolgenden Raumes besitzen. Basis für diese Auswertungen bildet eine auf der Abfrage V3 basierende, modifizierte Ausgabe von Qualitätswerten, die nicht nur zwei aufeinanderfolgende Räume berücksichtigt, sondern auch deren zugeordnete Qualitäten wiedergibt. Allgemein unterliegt die Abfrage V3 im Vergleich mit den bisher berücksichtigten Abfragen stärkeren Streuungen, die aber in Kauf

genommen werden müssen, um den gewünschten Stichprobenumfang für die folgenden Auswertungen zu erreichen. Unabhängig von den Gründen für die unterschiedlichen Eingriffswerte bei unterschiedlichen Verschlechterungsraten, stellt sich die Frage, wie sich diese auf die resultierende Raumanfangsqualität nach dem Stopfeinsatz auswirkt.

Abbildung 50 lässt, im Gegensatz zu Abbildung 43, einen geringen, aber klaren Zusammenhang zwischen der Raumanfangsqualität Q_2 und der Verschlechterungsrate b_1 feststellen. Umgekehrt beeinflussen allerdings lediglich sehr schlechte Q_1 Werte die Verschlechterungsrate des nachfolgenden Raumes. Ist jedoch die Raumanfangsqualität des nachfolgenden Raumes nur zu einem geringen Anteil von der Ausprägung der Verschlechterungsrate b_1 beeinflusst, so stellt sich die Frage welche Auswirkung der Eingriffswert Q_{1_ult} auf die nachfolgende Qualität besitzt.

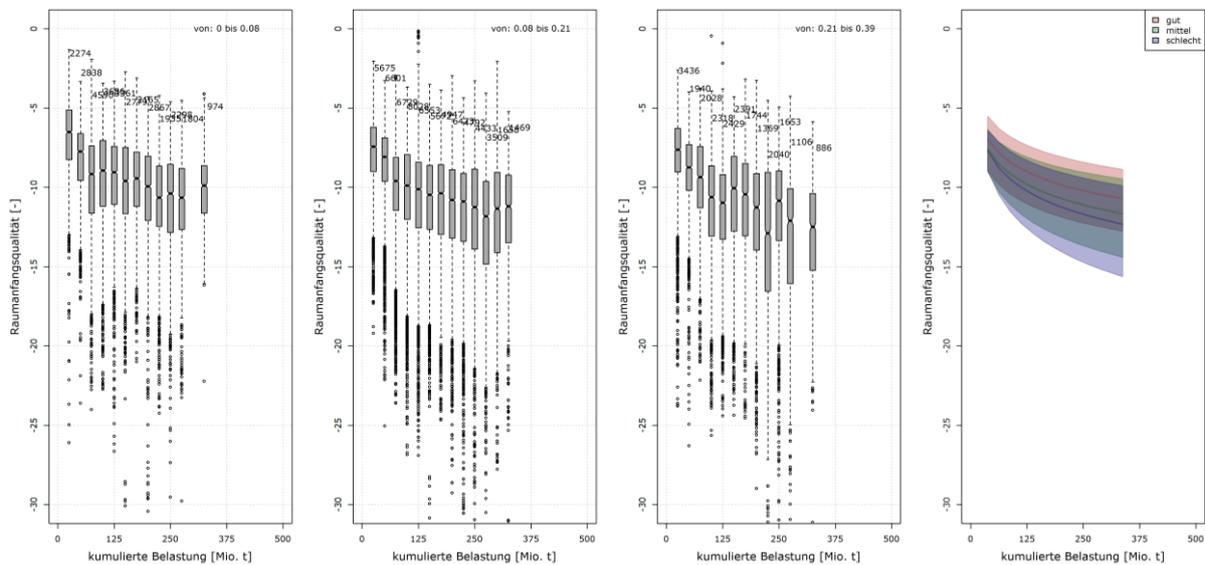


Abbildung 50 Entwicklung der Raumanfangsqualität Q_2 über die kumulierten Lasttonnen gruppiert nach b_1

Die Raumanfangsqualität Q_1 prägt wesentlich die Raumanfangsqualität des nachfolgenden Raumes, wenngleich sich dieser Zusammenhang in seiner Ausprägung über die Nutzungsdauer ändert. So besteht zwar immer eine Korrelation zwischen Q_1 und Q_2 , ob diese jedoch positiver oder negativer Natur ist, hängt maßgebend von Q_1 und der vorliegenden erreichten Nutzungsdauer der Anlage ab. Gute Raumanfangsqualitäten tendieren zu Beginn der Nutzungsdauer nach einem Stopfeinsatz dazu sich deutlich zu verschlechtern ($Q_2 > Q_1$), während Querschnitte mit schlechten Raumanfangsqualitäten in umgekehrter Weise reagieren. Dieser Umstand wurde bereits ausführlich in vorhergehenden Forschungsarbeiten [Hansmann 2011] untersucht und wird an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt. Unabhängig von der Ausprägung zeigt sich dennoch der deutliche Zusammenhang zwischen den aufeinander folgenden Raumanfangsqualitäten. Nachdem Q_2 deutlich von den zwei Parametern Q_1 und b_1 abhängig ist, zeigt sich die beschriebene Abhängigkeit auch zwischen der berechneten Raumendqualität. Auf einen separaten Nachweis wird an dieser

Stelle verzichtet. Die Ausprägung einer logarithmischen Entwicklung gilt dabei als Charakteristik für die Raumanfangs- und endqualität.

Die Betrachtung zweier aufeinanderfolgender Räume erlaubt es außerdem, die mögliche Hebung der Qualität nach dem Durchführen einer Instandhaltungsmaßnahmen (Richten-Heben-Stopfen) und die Veränderung der Verschlechterungsrate abzuschätzen. Diese Betrachtung wurde bereits in vorhergehenden Forschungsarbeiten näher ausgeführt [Hansmann 2011] und kann in der Klassifizierung in stark vereinfachter Form berücksichtigt werden.

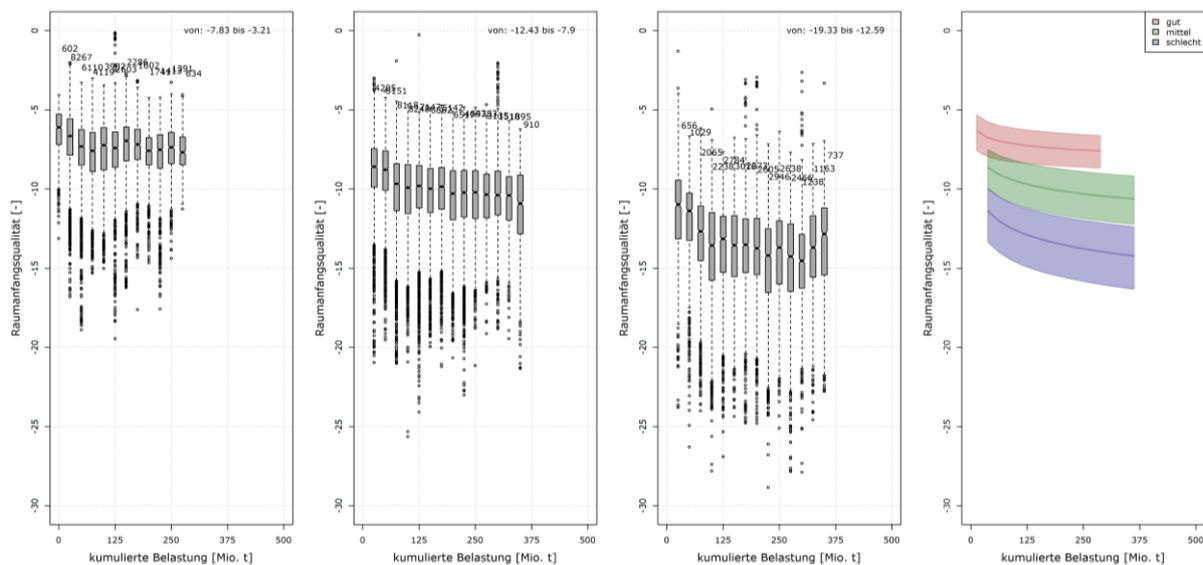


Abbildung 51 Entwicklung der Raumanfangsqualität Q_2 über die kumulierten Lasttonnen gruppiert nach Q_2

3.4.6 Sensitivitätsanalyse

Die angestellten Gleislageanalysen sollen als solide Basis für die Entwicklung eines Bewertungsmaßstabes dienen, der es ermöglicht, unterschiedliche Strecken hinsichtlich ihres Gleislageverhaltens zu klassifizieren. Von den bisherigen Auswertungen ausgenommen waren Streckenquerschnitte im Bogen. In Bogenabschnitten unterliegt der Gleisrost durch die Bogenfahrt des Fahrzeuges und die geometrischen Anforderungen anderen Beanspruchungscharakteristika als in der Gerade. Durch die auftretenden Führungskräfte tendieren Gleise im Bogen oftmals zur Ausprägung eines Richtungsfehlers. Das Auftreten möglicher Verwindungsfehler ist an dieser Stelle gesondert zu erwähnen. Die Auswertung der Standardabweichung Richtung hat diesen Umstand klar verdeutlicht. Der auf der einen Seite stärkeren Fehlerausprägung steht die geringere Bewertung dieser im Rahmen der Betrachtung der MDZ-Ziffer, aufgrund der reduzierten Geschwindigkeit, gegenüber. Trotz der besonderen Anforderungen, in Kombination mit den Auswirkungen der geschwindigkeitsabhängigen Instandhaltungsstrategie und des geringen Stichprobenumfangs, ist ein Vergleich der Ergebnisse mit den vorhergehend gewonnen Erkenntnissen anzustreben. Ein

Vergleich erlaubt eine Art der Sensitivitätsanalyse, wenngleich die Ergebnisse der Bogenauswertung mit Bedacht zu interpretieren sind. Grundsätzlich basieren dabei die Auswertungen auf den Abfragebedingungen von V3 und V4 und unterliegen daher bereits großen Streuungen.

Ziel der Sensitivitätsanalyse ist es, die Auswertungen der Abfragen V1 bis V3 übereinanderlegen und damit Auskünfte über die Robustheit des Ergebnisses zu erhalten. In diesem Vergleich wird ausschließlich die logarithmische Regression der Medianwerte repräsentativ für die gesamte Stichprobe betrachtet. Die entstehenden Kurven der Raumendqualität und Raumanfangsqualität kennzeichnen dabei jenen Bereich in dem die Gleislagequalität in 50% der Fälle zu liegen kommt.

Prinzipiell zeigen alle Ergebnisse (siehe Abbildung 52) einen ähnlichen Verlauf und stehen so für die Reproduzierbarkeit der Auswertung. Singuläre Abweichungen, wie zum Beispiel im Falle der Raumendqualität von Holzschwellen bei der Abfrage V3 unterliegen einem gewissen Rahmen, erscheinen zufallsbedingt und sind daher vernachlässigbar. Betonschwellengleise unterliegen generell höheren Streuungen, die sich vor allem über ihre Verschlechterungsraten besonders deutlich ausprägen. Je allgemeiner die Abfragen formuliert werden, desto eher werden Streckenabschnitte mitberücksichtigt, die in ihrem Verhalten Auffälligkeiten aufweisen und so nicht dem globalen Gleislageverhalten entsprechen. Dennoch lässt sich vor allem in der Raumanfangsqualität eine besonders hohe Ergebnisstabilität erkennen. Die Streuung der Raumendqualitäten ist mit einem MDZ-a-Punkt im Rahmen einer tolerierbaren Ungenauigkeit.

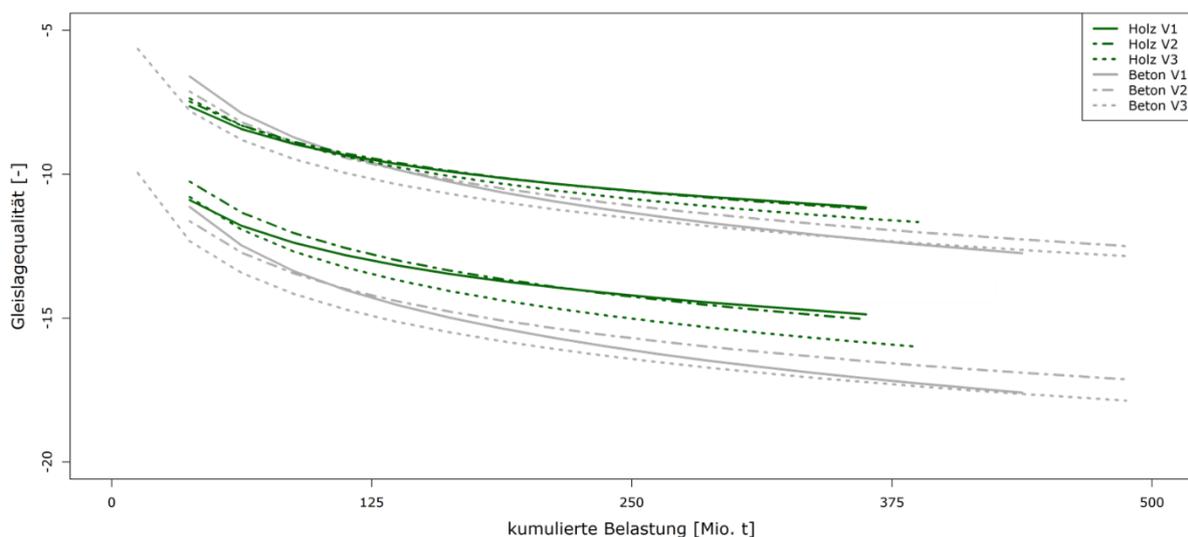


Abbildung 52 Resultierende Umhüllende der Abfrage V1 bis V3

Erweitert man die Betrachtung auch auf die Auswertungen von Bogenabschnitten mit Betonschwellen so ergibt sich ein neues Bild. Berücksichtigt werden dabei Querschnitte,

die einen Radius zwischen 300 und 600 Meter aufweisen. Im Falle des Vergleichs der Auswertung der Abfrage Radius V3 mit geraden Abschnitten ergibt die Standardabweichung Höhe deutlich erhöhte und somit schlechtere Werte. In der Auswertung der MDZ-Ziffer weisen jedoch sowohl die Raumanfangs- und Raumendqualität augenscheinlich geschwindigkeitsabhängig bessere Niveaus auf. Dieses Phänomen konnte bereits bei der Betrachtung unterschiedlicher geschwindigkeitsabhängiger Instandhaltungsintervalle beobachtet werden und lässt sich auf die zu hoch gewählten Instandhaltungsniveaus von Strecken mit niedriger Geschwindigkeit zurückführen. Im Fall von Bogenbereichen lösen oftmals Verwindungsfehler einen Stopfeinsatz aus, lange bevor die betrachteten Qualitätssignale kritische Werte annehmen. Abfrage „V4 Radius“ kompensiert scheinbar diesen Effekt durch die stärkere Ausprägung von Gleislagefehlern und die Qualitäten erreichen wieder den annähernd gleichen Level, wie in den vorhergehenden Auswertungen. Die Stabilität der Ergebnisse erlaubt die Nutzung der Gleislageentwicklung über die kumulierte Belastung als Grundlage der Qualitätseinstufung einer Anlage. Die Streuung zwischen den Ergebnissen der einzelnen Abfragen um einen MDZ-Punkt muss lediglich in Wahl der Ausdehnung der einzelnen Qualitätsstufen mitberücksichtigt werden.

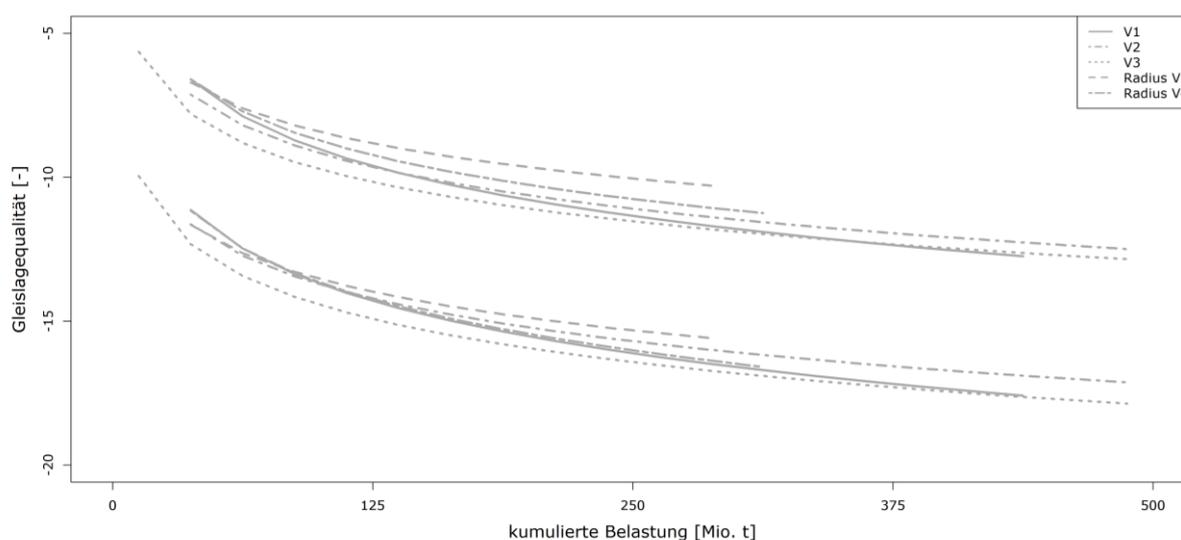


Abbildung 53 Gegenüberstellung der Ergebnisse für Raumanfangs- und Raumendqualitäten im Falle von Betonschwellen der unterschiedlichen Abfragen V1 bis V4

3.5 Klassifizierungsalgorithmus Zusammenfassung

3.5.1 Modellaufbau

In den vorangegangenen Auswertungen dieser Arbeit wurde davon ausgegangen, dass die Verschlechterung der Raumanfangs- und Raumendqualität einem logarithmischen Trend folgt. Für den Vergleich einzelner Abfragen hinsichtlich ihres unterschiedlichen Verlaufes und der Prüfung eines signifikanten Unterschiedes zeigte sich diese Annahme als

hinlänglich genau. Für die nachfolgende Klassifizierung ist jedoch eine detaillierte Untersuchung dieses Sachverhaltes notwendig.

Die Klassifizierung der Gleislage soll einen Vergleich zwischen der vorliegenden Gleislagequalität eines Querschnittes mit der durchschnittlichen Entwicklung der Gleislage über die Nutzungsdauer erlauben. Von wesentlicher Bedeutung ist hierfür die Entwicklung der Raumendqualität, da sie repräsentativ für die indizierende und somit auslösende Qualität für eine Maßnahme steht. Raumendqualitäten werden zusätzlich zur Raumanfangsqualität auch von der Verschlechterungsrate und dem umgesetzten Stopfzyklus maßgeblich beeinflusst, wodurch ihre Entwicklung einer größeren Streuung unterliegt. Die stärkere Streuung zwischen den einzelnen Medianwerten führt zu geringeren Bestimmtheitsmaßen der untersuchten Regressionsmodelle, die zwischen 80 und 90% zu liegen kommen. In diesem Zusammenhang wurde ein quadratisches, lineares und logarithmisches Regressionsmodell untersucht.

Augenscheinlich stellt sich ab 250 Millionen Lasttonnen eine konstant bleibende Raumendqualität ein, die auch über einen logarithmischen Ansatz nur teilweisen beschrieben werden kann. Das Einpendeln der Raumendqualität ab einem bestimmten Zeitpunkt symbolisiert einen wesentlichen Unterschied zur Entwicklung der Raumanfangsqualität, einen Effekt, den weder das logarithmische noch das quadratische Modell zur Genüge abbilden kann. Um diesem Umstand dennoch in der Klassifizierung Rechnung zu tragen, werden ab 250 Millionen Lasttonnen die Klassifizierungsgrenzen konstant gehalten. Nachfolgende Auswertungen zeigen, inwiefern sich diese Änderung auf das Ergebnis auswirkt. Der Klassifizierungsalgorithmus besteht aus zwei unterschiedlichen Stufen, der Primär- und der Sekundärklassifizierung, die in den nachfolgenden Kapiteln näher beschrieben werden.

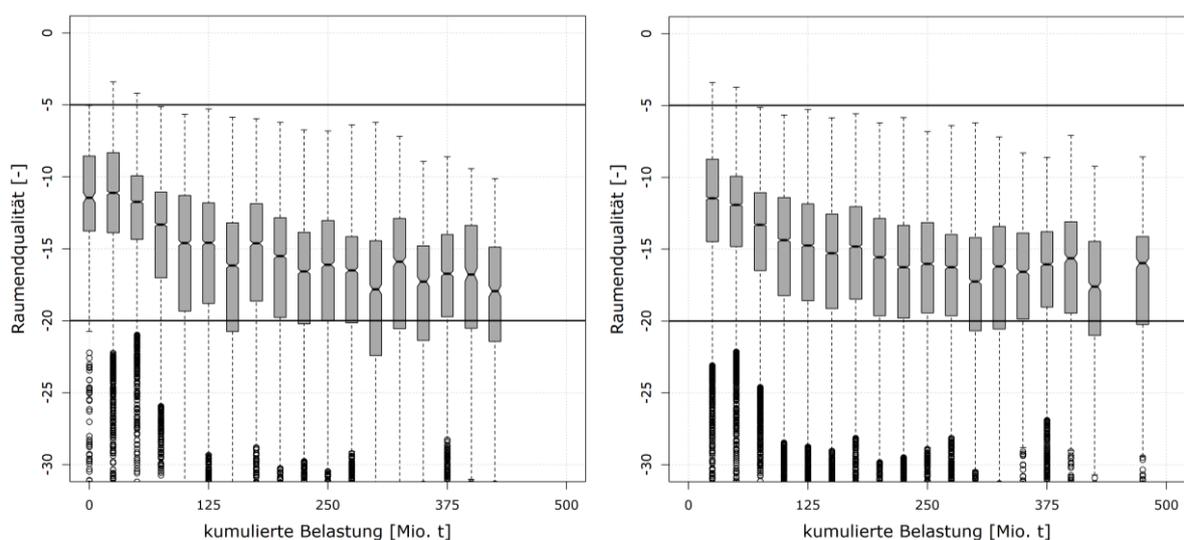


Abbildung 54 Entwicklung der Raumendqualitäten von Betonschwellen links: V1 rechts:V2

3.5.2 Primärklassifizierung

Die Primärklassifizierung bewertet die Gleislagequalität eines Querschnittes zu einem gewählten Zeitpunkt. Der Zeitpunkt ist prinzipiell beliebig wählbar, die Existenz eines gültigen Regressionsmodells zum gewählten Zeitpunkt ist allerdings vorausgesetzt. Die aus dem Regressionsmodell berechnete Qualität (Bewertungsqualität Q_b) wird mit den gewählten Klassifizierungsgrenzen verglichen. Diese Klassifizierungsgrenzen nehmen über die kumulierte Belastung unterschiedliche Werte an und spiegeln so die Entwicklung der Gleislage über die Nutzungsdauer einer Anlage wider (siehe Abbildung 55). Im Falle des Vorhandenseins einer kumulierten Belastung entwickelt sich diese Grenze als Funktion der kumulierten Belastung. Die Grenzen ergeben sich dabei wie folgt:

Klasse 1: $>$ oberes Quartil mittlere Verschlechterungsrate

Klasse 2: Median – oberes Quartil der mittleren Verschlechterungsrate

Klasse 3: Median – unteres Quartil der mittleren Verschlechterungsrate

Klasse 4: unteres Quartil der mittleren Verschlechterungsrate – unteres Quartil schlechte Verschlechterungsrate

Klasse 5: unteres Quartil schlechte Verschlechterungsrate

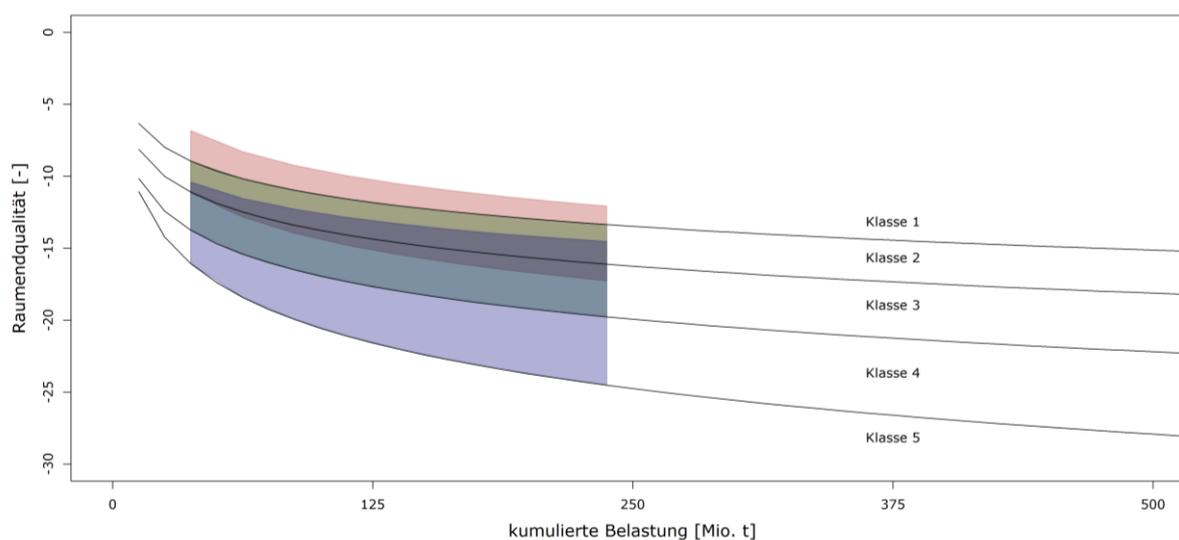


Abbildung 55 Klasseneinteilung der Raumendqualität

Die mögliche Klassifizierung setzt prinzipiell die korrekte Berechnung der kumulierten Belastung voraus und inkludiert somit die Existenz eines gültigen Belastungsmodells, wie auch ein gültiges Einbaujahr Schwelle. Um für jene 25% des TUG-Netzes in denen zumindest eine der Bedingungen nicht erfüllt ist, dennoch eine Möglichkeit zu schaffen, zu klassifizieren, wird den Querschnitten eine Normbelastung von 250 Millionen Lasttonnen

zugeordnet. So wird auf eine dynamische Bewertung des Anlagenzustands bewusst verzichtet und unabhängig der in das System eingebrachten Belastung kategorisiert.

3.5.3 Sekundärklassifizierung

Die Sekundärklassifizierung bewertet allein die vorliegende Verschlechterungsrate. Prinzipiell ist es möglich diese Bewertung ebenfalls belastungsabhängig aufzubauen, wengleich Verschlechterungsraten über die Nutzungsdauer weitaus höheren Streuungen unterliegen als Raumanfangsqualitäten. Die Verschlechterungsrate unterliegt über die Nutzungsdauer kaum einer Veränderung bzw. kann sie nicht eindeutig dem Anstieg der kumulierten Belastung zugerechnet werden. Die Sekundärklassifizierung zielt daher lediglich darauf ab, Querschnitte mit besonders hoher Verschlechterungsrate zu identifizieren. Auf eine tagesbelastungsabhängige Klassifizierung wurde verzichtet und lediglich global zwischen hohen und niedrigen Verschlechterungsraten unterschieden.

Querschnitte mit einer hohen Verschlechterungsrate werden dabei automatisch in die nächste Qualitätsklasse herabgestuft. Die Sekundärklassifizierung dient dabei als Abschätzung der zeitlichen Stabilität der Klassenzuordnung und kann im Gesamtalgorithmus berücksichtigt werden oder unberücksichtigt bleiben. Ergänzend zur Klassifizierung erlaubt die Verschlechterungsrate aber auch die Abschätzung, wie viel Zeit benötigt wird, ohne gesetzte Maßnahme die nächste Klasse zu erreichen.

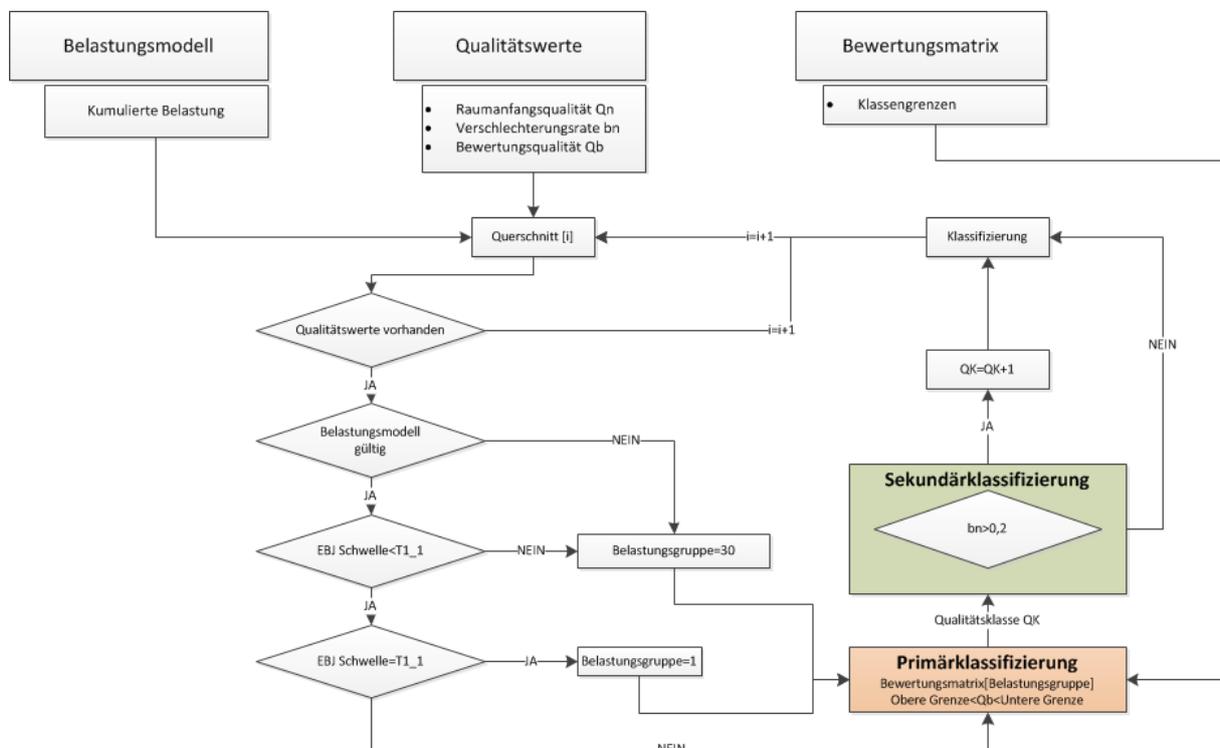


Abbildung 56 Schematische Darstellung des Klassifizierungsprozesses für Qualitätswerte

3.5.4 Vergleich zwischen einer voll- und teillogarithmischen Bewertung

Im Kapitel 3.5.1 wurde bereits auf die Herausforderung des korrekten Modellaufbaus zur Wahl der Klassifizierungsgrenzen eingegangen. Die Bewertung der Qualitätswerte aus dem Jahr 2011 ermöglicht stichprobenartig einen Vergleich der Ergebnisse beider unterschiedlichen Herangehensweisen. In diesem Vergleich werden die Ergebnisse des logarithmischen Verlaufes dem des teillogarithmischen gegenübergestellt (siehe Abbildung 57).

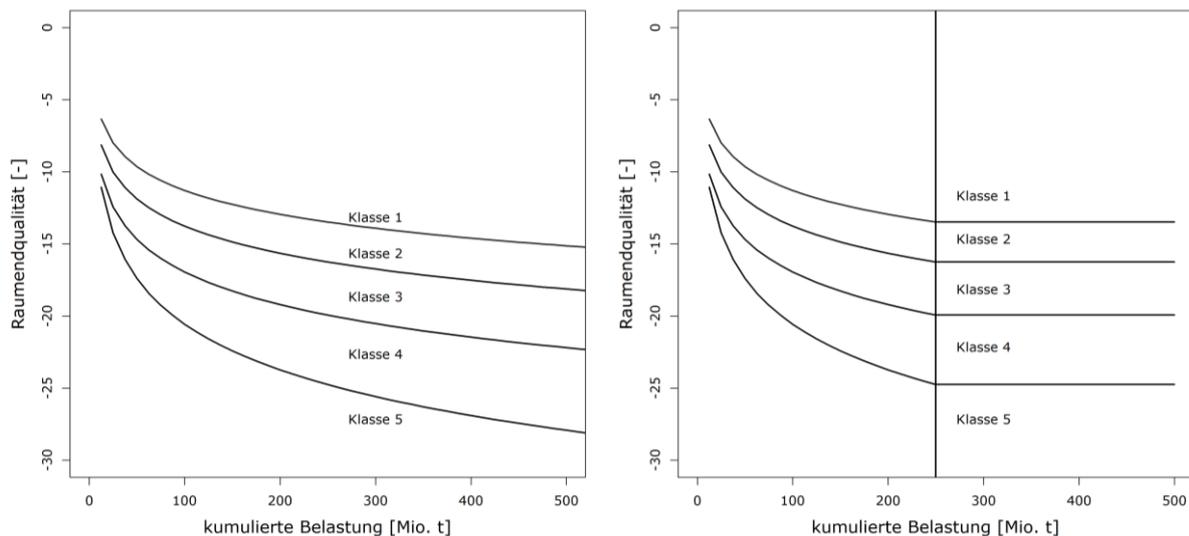


Abbildung 57 Entwicklung der unterschiedlichen Klassengrenzen bei logarithmischem [links] und teillogarithmischem [rechts] Verlauf

Wie erwartet führt die teillogarithmische Klassifizierung zu einer tendenziell strengeren Bewertung der Gleislage, da die Klassengrenzen nach 250 Millionen Tonnen konstant bleiben und nicht weiter abnehmen. Dieser konstante Verlauf der Klassengrenzen wirkt sich stärker bei den höheren Klassen aus, da hier die Veränderung der Grenzen nach 250 Millionen Tonnen weitaus höher ausfällt, als in den niedrigen Klassen.

Dennoch bildet sich der Unterschied zwischen beiden Abfragen geringer aus, als ursprünglich angenommen. Dieser geringfügige Unterschied ist unter anderem ein Indiz für die hohe Stabilität des Ergebnisses und lässt sich über die konzentrierte Werteverteilung in den einzelnen Gleislageklassen klar argumentieren (Abbildung 59). In weiterer Folge wird der teillogarithmische Verlauf für die Definition der einzelnen Grenzen herangezogen.

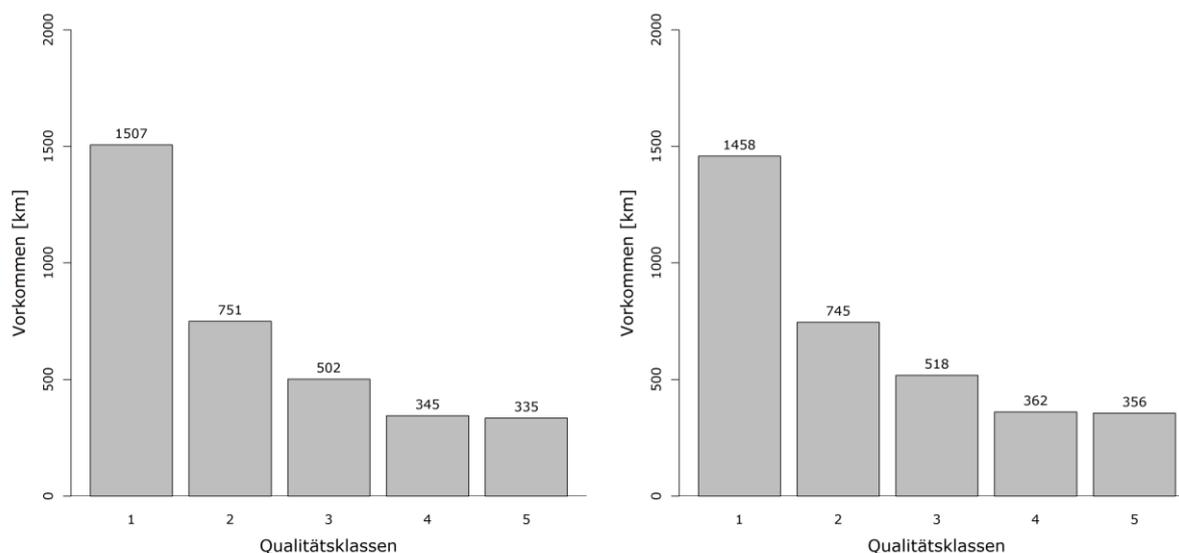


Abbildung 58 Entwicklung der Klassenzuscheidung bei logarithmischem [links] und teillogarithmischem [rechts] Verlauf rechts

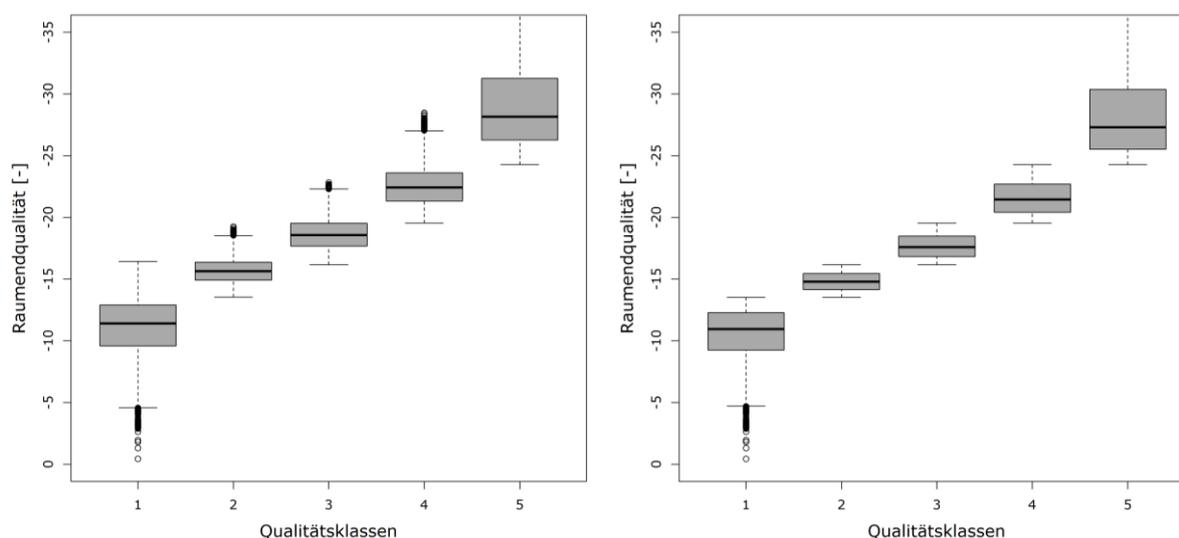


Abbildung 59 Verteilung der Bewertungsqualitäten innerhalb der Qualitätsklassen bei einem logarithmischem [links] und teilkonstantem [rechts] Verlauf vor der Sekundärklassifizierung

3.5.5 Anwendung der Klassifizierung auf das TUG-Netz

Die vorhergehenden Kapitel zielten darauf ab, die Entwicklung der Gleislage über die Nutzungsdauer bzw. über die eingebrachten kumulierten Lasttonnen näher zu beschreiben. Die Sensitivitätsanalysen zeigten die Stabilität dieser Entwicklung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Parameterausprägungen. In der Umlegung der Ergebnisse auf das gesamte TUG-Netz ist genau diese Stabilität eine besondere Herausforderung. Es ist möglich die Klassifizierung sowohl auf Qualitätswerte als auch ohne Sekundärklassifizierung auf Qualitätssignale anzuwenden. Beide Möglichkeiten bieten Vor- und Nachteile. Die Existenz und die Güte der Regression im einzelnen Querschnitt definiert im Wesentlichen die Aussagekraft der Klassifizierung. Während bei der Erstellung des Klassifizierungsalgorithmus

durch die Wahl unterschiedlicher Kriterien (siehe Tabelle 2) die Regressionsgüte positive beeinflusst werden konnte, würde eine derartige Einschränkung eine netzweite Anwendung der Klassifizierung stark einschränken. Im Vergleich dazu gestaltet sich die Betrachtung von Qualitätssignalen als wenig robust gegenüber möglichen Messausreißern und die Zuordnung von getätigten Instandhaltungsmaßnahmen gestaltet sich als schwierig. Unter Berücksichtigung dieser Vor- und Nachteile wird der Klassifizierungsalgorithmus netzweit auf die Qualitätswerte aus den Jahren 2005 bis 2012 angewandt. Die Klassen lassen sich nachstehend wie folgt näher erklären:

- Klasse 1: Die Qualität der Gleislage befindet sich in einem für die kumulierte Belastung der Anlage sehr gutem Niveau.
- Klasse 2: Die Qualität der Gleislage befindet sich in einem für die kumulierte Belastung der Anlage guten Niveau.
- Klasse 3: Die Qualität der Gleislage befindet sich in einem für die kumulierte Belastung der Anlage befriedigendem Niveau.
- Klasse 4: Die Qualität der Gleislage befindet sich in einem für die kumulierte Belastung der Anlage genügendem Niveau, eine mögliche Maßnahmen zur Hebung der Gleislage ist zu empfehlen.
- Klasse 5: Die Qualität der Gleislage befindet sich in einem für die kumulierte Belastung der Anlage nicht genügendem Niveau, eine mögliche Maßnahmen zur Hebung der Gleislage ist notwendig.

Maßgebend für die Kategorisierung ist die dynamische Bewertung des Zustands über die Nutzungsdauer. Die Bewertung berücksichtigt somit, dass der Zustand der Anlage einer gewissen Verschlechterung unterliegt und setzt ein durchschnittliches Verhalten als Referenz an. Die angesetzten Grenzen zwischen den Qualitätsstufen bleiben nicht konstant über die Nutzungsdauer, sondern entwickeln sich dynamisch mit dieser.

Eine Gleislage von -12 MDZ Punkten kann unabhängig der Sekundärklassifizierung, unter Berücksichtigung der eingebrachten Lasten in den Klassen 1 bis 3 zu liegen kommen. Diese Bewertung berücksichtigt zu Beginn der Nutzungsdauer eine wesentlich höhere Eingriffsschwelle zur Planung von Stopfeinsätzen als zu ihrem Ende.

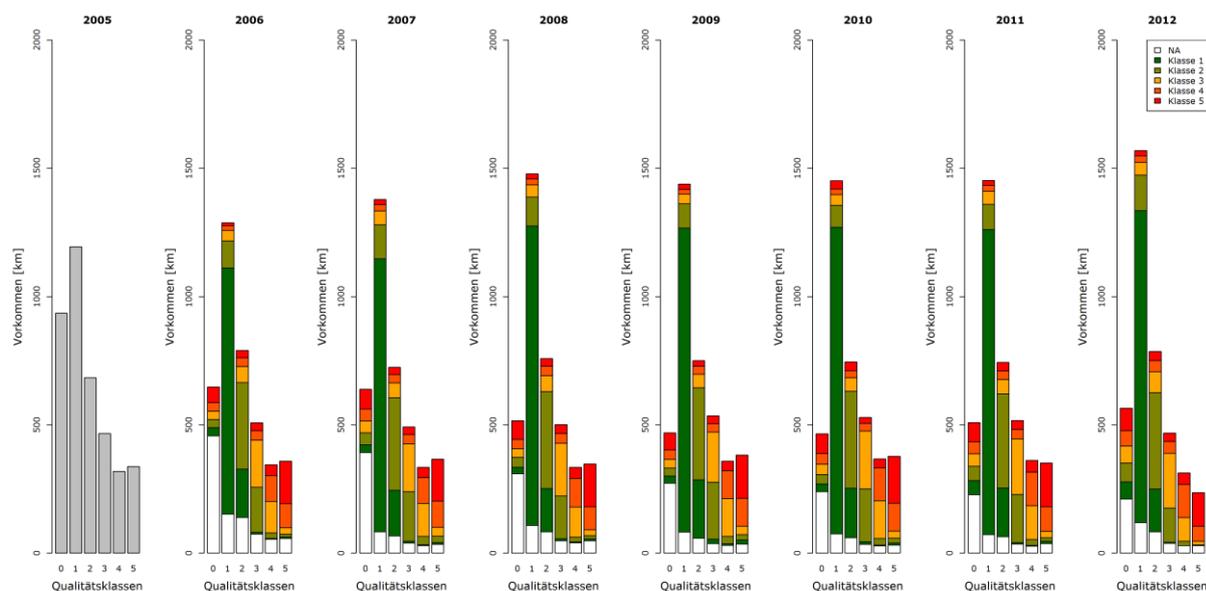


Abbildung 60 Entwicklung der Klassenzuordnung von 2005 bis 2012 in absoluten Zahlen

Die angesprochene Entwicklung der Klassifizierung wird in Abbildung 60 zwischen den Jahren 2005 bis 2012 dargestellt. Die mit Farbe versehenen Teilbalken geben Aufschluss über die Zuordnung des Querschnittes im Jahr davor. Aus dieser Farbkodierung lässt sich deutlich erkennen, wie sich die unterschiedlichen Querschnitte über die Jahre innerhalb der einzelnen Klassen verhalten. Es zeigt sich, dass Querschnitte einmal einer Klasse zugeordnet, mehrheitlich in dieser verbleiben, oder zwischen den benachbarten Klassen wechseln. Ein Wechsel von Querschnitten über mehr als eine Klasse innerhalb eines Jahres ist im Gegensatz dazu deutlich seltener. Diese Gesetzmäßigkeit prägt sich ab der Klasse 3 geringer aus, da Gleise dieser Qualitätsklasse öfter instandgehalten werden, als Gleise in höheren Qualitätsklassen. In den Jahren 2005 bis 2007 ergeben sich vermehrt Querschnitte, denen kein gültiges Regressionsmodell zugeordnet werden kann, weshalb die Ergebnisse der Klassifizierung in diesen Jahren vorsichtig interpretiert werden müssen.

Nimmt man die Ergebnisse der Jahre 2005 bis 2007 aus der weiteren Betrachtung heraus lässt sich beginnend mit 2008 eine stetige Reduktion der Klasse 1 bis 2011 erkennen. Äquivalent dazu nimmt die Anzahl der Querschnitte in den Klassen 4 und 5 zu. Diese Klassen werden als kritische Klassen bezeichnet, da sie oftmals eine Maßnahme nach sich ziehen. Erst im Jahr 2012 spiegelt sich die Anhebung der Re-Investitionsquote auch in der Klassifizierung der Gleislage wider und die Querschnitte in der Klasse 1 steigen erheblich an.

Im nächsten Schritt wird das Ergebnis der Streckenklassifizierung dem in den letzten Jahren umgesetzten Stopfumfang gegenübergestellt. Die Streckennummern erlauben einen Vergleich zwischen der umgesetzten Stopfmenge und der Streckenklassifizierung, sollen jedoch eine geografische Zuordnung der Ergebnisse wesentlich nicht ermöglichen.

Dieser Vergleich soll zeigen, ob eine Korrelation zwischen der umgesetzten Stopfmenge und der Qualitätszuordnung feststellbar ist. Zwei horizontale Linien kennzeichnen dabei die 70% und 50% Marke und sollen die Interpretation der Ergebnisse erleichtern. Fasst man die Querschnitte der vierten und fünften Klasse zusammen, so zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Streckenqualitäten. Während die Strecken 9 bis 13 eine besonders geringe Ausprägung dieser Klassen besitzen, zeigen einzelne Strecken eine deutliche Überschreitung der 70% Grenze.

Eine historische Betrachtung dieser Ergebnisse ermöglicht unter Berücksichtigung von Instandhaltungs- und Reinvestitionsumfang eine Bewertung der Ergebnisstabilität des Klassifizierungsalgorithmus. Einmalige Überschreitungen des Grenzwertes lassen sich in erster Linie auf die Unsicherheit des querschnittsbezogenen Regressionsmodells zurückführen. Besonderes Augenmerk ist wie bereits bei der netzweiten Auswertung der Klassifizierung auch auf die Anzahl der ungültigen Bewertungen zu legen. Dieser Umstand zeigt sich deutlich in der Analyse der Ergebnisse der Strecke 18. In den Jahren, in denen sich die Anzahl der ungültigen Bewertungen reduzierte, stieg der Umfang kritischer Klassen erheblich an.

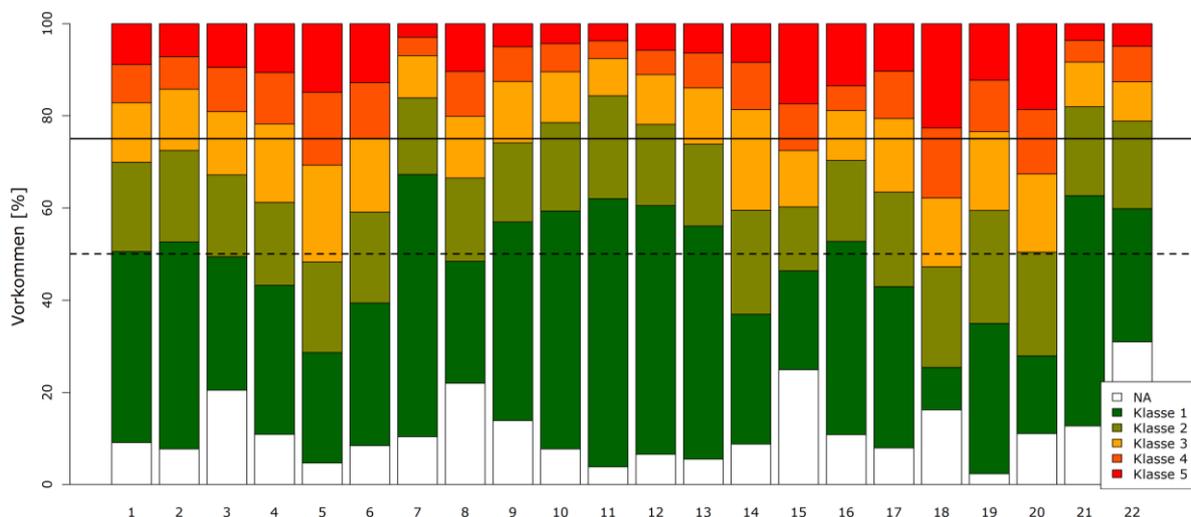


Abbildung 61 Aufteilung der Qualitätsklassen auf die einzelnen Strecken im Jahr 2009

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
2012	12%	10%	22%	15%	29%	15%	5%	26%	15%	11%	8%	7%	9%	24%	20%	5%	19%	30%	27%	17%	6%	17%
2011	16%	12%	23%	20%	34%	22%	6%	26%	25%	13%	10%	13%	12%	26%	19%	5%	21%	19%	27%	20%	8%	11%
2010	18%	12%	23%	18%	32%	20%	7%	24%	19%	13%	10%	11%	13%	22%	21%	9%	19%	7%	25%	43%	9%	21%
2009	17%	14%	19%	22%	31%	25%	7%	20%	13%	10%	8%	11%	14%	19%	28%	19%	21%	38%	23%	33%	8%	13%
2008	16%	14%	15%	18%	26%	24%	6%	23%	15%	13%	8%	18%	14%	21%	29%	11%	16%	10%	18%	26%	10%	4%
2007	16%	16%	15%	17%	27%	24%	7%	24%	14%	12%	9%	11%	12%	19%	23%	11%	19%	44%	20%	23%	11%	10%
2006	18%	20%	22%	21%	30%	21%	7%	22%	12%	12%	16%	10%	12%	18%	23%	14%	16%	12%	25%	22%	8%	4%

durchschnittliche Stopplänge ab 2006	22%	20%	25%	13%	9%	27%	13%	26%	16%	23%	11%	15%	4%	13%	28%	29%	26%	22%	21%	19%	22%	26%
durchschnittliche Stopplänge ab 2008	23%	18%	24%	12%	8%	26%	12%	25%	18%	21%	8%	17%	4%	13%	27%	29%	23%	23%	17%	22%	23%	25%
umgesetzte Neulagen seit 2006	17%	17%	33%	10%	5%	25%	17%	26%	17%	20%	1%	37%	2%	0%	29%	41%	31%	22%	9%	9%	28%	13%
umgesetzte Neulagen seit 2008	12%	12%	28%	10%	4%	17%	11%	21%	16%	14%	1%	33%	1%	0%	22%	33%	18%	22%	3%	8%	27%	6%

Abbildung 62 Zeitliche Entwicklung der streckenspezifischen Klassifizierung im Vergleich mit der umgesetzten Stopf- und Neulagenlänge gemessen an der Streckenlänge

Rot werden im Rahmen der Klassifizierung immer Jahre gekennzeichnet, in denen die kritischen Klassen mehr als 20% der Strecke einnehmen. Äquivalent dazu werden im Falle der Stopf- und Neulagenlängen jeweils die Strecken gekennzeichnet, die einen der zehn höchsten Werte aufweisen.

Mit Ausnahme einiger Strecke zeigt sich, dass Strecken mit einem hohen beständigen Anteil an kritischen Klassen öfter gestopft werden, als Strecken mit einem niedrigeren Anteil (siehe Abbildung 62). Allerdings existieren Strecken, die sich hinsichtlich ihrer Klassifizierung in einem augenscheinlich schlechten Zustand befinden, dieser schlechte Zustand jedoch keinen Niederschlag in der umgesetzten Stopfmenge findet. Besonders deutlich lässt sich dieser Zusammenhang in der Strecke fünf erkennen.

Der gegenteilige Effekt präsentiert sich ebenso. Es existieren Strecken, die zu einem großen Anteil reinvestiert oder gestopft wurden, die sich jedoch hinsichtlich der Gleislage kaum auffällig zeigen. Schlussendlich kann festgehalten werden, dass die Klassifizierung der Strecken jene Teile des Netzes identifiziert, die im hohen Maße Instandhaltungsmaßnahmen an sich binden.

3.5.6 Zusammenfassung und Ergebnisdiskussion

Die Aufrechterhaltung der Gleisgeometrie bildet einen zentralen Bestandteil im Aufgabenbereich des Eisenbahninfrastrukturbetreibers. Von der Aufrechterhaltung des sicheren Eisenbahnbetriebes getrieben, repräsentiert sich heutzutage die nachhaltige Nutzung der Infrastruktur unter Berücksichtigung des Fahrkomforts als zentrales Ziel.

Die mittelfristige Reduktion der MDZ-Einsätze zwischen den Jahren 2004 und 2009 auf rund 60% des ursprünglichen Umfangs, führte im TUG-Netz vice versa nicht zu einer prozentuell gleich hohen Abnahme der Gleislagequalität. Tatsache ist jedoch, dass sich die Gleislage im TUG-Netz von 2002 bis 2010 um knapp 10% verschlechtert hat. Die Erhöhung der Instandhaltungsmaßnahmen und der Neulagenprojekte in den Jahre 2010 und 2012 führte zu einem Stopp dieser negativen Entwicklung. Die langfristigen Auswirkungen oder Nichtauswirkungen dieser Maßnahmen lassen sich zum aktuellen Zeitpunkt nicht abschätzen. Die durchgeführten Neulagen konnten die Verschlechterung der Gleislage in gewissen Bereichen dämpfen, den Trend jedoch nicht umdrehen.

Der vermehrte Einsatz von besohlenen Betonschwellen in den letzten Jahren führte zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Standardabweichung Richtung. Dieser Effekt bleibt von der reduzierten Instandhaltung nahezu unbeeinflusst bzw. kompensiert den negativen Einfluss dieser zur Gänze. Im Falle der Betrachtung der MDZ-Ziffer überlagern sich

beide Effekte, wenngleich sich die negativen Folgen der reduzierten Instandhaltung deutlich zeigen. Ein Vergleich der Ein- und Ausbauqualitäten unterschiedlicher Oberbaustoffe bestätigt die Vorteile von Betonschwellen mit Besohlung gegenüber den übrigen Schwellentypen. Eine rund 20%ige bessere vertikale Gleislage von besohlenen Betonschwellen im direkten Vergleich mit dem unbesohlenen Pendant konnte bereits in vorhergehenden Studien nachgewiesen werden und wird im Rahmen dieser Auswertungen bestätigt (vgl. [Marschnig, Berghold 2011]). Die Gleislage einer Eisenbahnanlage verschlechtert sich mit den in das System eingebrachten kumulierten Lasten und folgt dabei im Falle der untersuchten Daten einem logarithmischen Trend. Eine detaillierte Analyse der Entwicklung der Raumanfangsqualitäten erlaubt die Unterteilung dieser in drei unterschiedliche Bereiche, die sich hinsichtlich ihres Verhaltens voneinander unterscheiden. Dabei ergeben sich 125 und 250 Millionen als Grenze für diese Sektoren (siehe Abbildung 63). Ein ähnliches Verhalten wurde bereits in früheren Forschungsarbeiten festgestellt (vgl. [Chrismer, Selig 1993]). Hinsichtlich der Entwicklung der Verschlechterungsraten korrelieren die absoluten Ausprägungen dieser mit der täglichen Gleisbelastung, wenngleich sich aus ihrer Entwicklung über die kumulierte Belastung kein eindeutiger Trend ableiten lässt. Deutlich zeigen Holzschwellen im Vergleich zu Betonschwellen nicht nur eine geringere Verschlechterungsrate, sondern auch eine langsamere Verschlechterung der Raumanfangsqualitäten. Beide Schwellenarten besitzen zu Beginn der Nutzungsdauer höhere Verschlechterungsraten, die sich im Laufe der ersten 100 Millionen Tonnen auf konstantem Niveau einpendeln. Im Fall von Betonschwellen streuen die Verschlechterungsraten stark um dieses Niveau und zeigen so deren besondere Sensibilität hinsichtlich der vorhandenen Unterbauqualität.

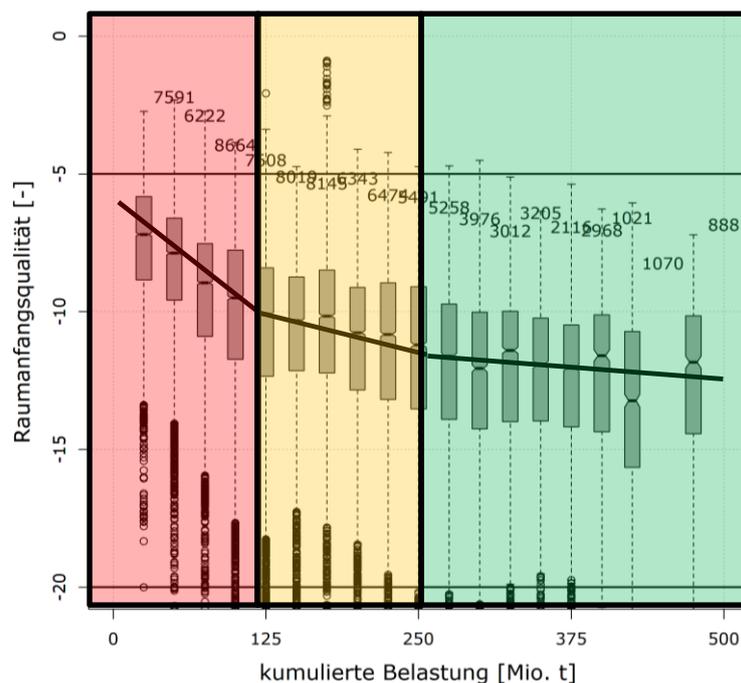


Abbildung 63 Entwicklung der Raumanfangsqualität bei Betonschwellen auf Grundlage der Abfrage V2

3.6 Der Zusammenhang zwischen Wellenlängen und Schadenscharakteristika

Das nachfolgende Kapitel entstand in enger Zusammenarbeit mit Dipl.-Ing. Matthias Landgraf und umfasst Ergebnisse und Textpassagen, die teilweise schon veröffentlicht sind. Wortgleiche Textpassagen sind als solche gekennzeichnet.

Der Schwerpunkt der vorhergehenden Kapitel liegt auf der Betrachtung unterschiedlicher Qualitätssignale bzw. deren zeitlicher Entwicklung in Form eines Regressionsmodells und den daraus folgenden Qualitätswerten. Sowohl die Standardabweichung, als auch die MDZ-Ziffer stellen berechnete Werte dar, die abhängig von ihrer Berechnungsweise lediglich eine spezifische Charakteristik des ursprünglichen Höhen- bzw. Richtungssignals wiedergeben. Unterschiedliche Wellenlängen beeinflussen die Ausprägung der Qualitätssignale unterschiedlich stark. Untersuchungen [Auer 2003] zeigen, welche Frequenzbereiche die Ausprägung der Qualitätssignale MDZ und SigmaH im Wesentlichen beeinflussen (siehe Tabelle 3). Wellenlängen kleiner als 5 Meter beeinflussen die MDZ-Ziffer weitaus stärker, als die Standardabweichung Höhe, die hingegen von Wellenlängen größer als zehn Meter dominiert wird. Dies liegt in erster Linie daran, dass Wellenlängen zwischen 5 und 20 Metern zur Ausprägung einer besonders starken Amplitude tendieren. Tendiert der Mittelwert des betrachteten Messsignals dazu, um den Wert Null zu schwanken (siehe [Auer 2004]), so reduziert sich die Formel der Standardabweichung auf die Bewertung der quadratischen Abweichungen (quadratisches Mittel). Hohe Amplituden werden stärker repräsentiert als kleine. Die MDZ-Ziffer berücksichtigt Beschleunigungsdifferenzen an einem imaginären Fahrzeugmodell und wird von kleineren Wellenlängen stärker beeinflusst.

	SigmaH	MDZ
<5m	4%	51%
5-10m	35,9%	27,5%
10-20m	38,6%	15,5%
>20m	21,4%	5,9%

Tabelle 3 Einfluss unterschiedlicher Wellenlängen auf die Qualitätssignale SigmaH und MDZ [Auer 2003]

Die Qualitätswerte beschreiben die durchschnittliche Gleislage in bestimmten Bereichen und bilden die Grundlage für die Planung von Maßnahmen. Zusätzlich zu diesen Qualitätswerten werden häufig die Rohdaten des Längshöhensignales für Untersuchungen herangezogen, um punktuelle Überschreitungen von Schwellenwerten zu bestimmen.

Unterzieht man Messsignale einer genaueren Betrachtung, so unterscheiden sich diese hinsichtlich Wellenlänge und Amplitude. Über eine Filterung ist es möglich, die Signale hinsichtlich unterschiedlicher Wellenlängenbereiche einzugrenzen und somit nur mehr spezifische Wellenlängenbereiche zu betrachten. Die geltende Norm EN13848-6 sieht dafür die folgenden drei Bereiche vor:

D1: 3 m bis 25 m

D2: 25 m bis 70 m

D3: 70 m bis 150 m im Falle der Längshöhe

70 m bis 200 m im Falle der Richtung

(vgl. [Österreichisches Normungsinstitut 2014])

Die Untersuchung des Gleislagesignals hinsichtlich des Zusammenspiels zwischen der Amplitude und ihrer zugeordneten Wellenlänge fand bereits früh Eingang in diverse Forschungsarbeiten. Ursprünglich näherte man sich dieser Problemstellung von Seiten des Maschinenbaus, um Fahrzeugreaktionen und folglich den Fahrkomfort näher zu beschreiben (vgl. [Frederich 1984] und [Rießberger 1997]). Erst später versuchte man mögliche Korrelationen zwischen dem Leistungsdichtespektrum und auftretenden Schadensmechanismen zu finden [Schöpp 2011], sowie neue Anforderungen an Hochgeschwindigkeitsstrecken zu definieren [Kipper, Gerber & Schmeister 2013].

Ausführlich wurde in den vorhergehenden Kapiteln die Entwicklung der Gleislage diskutiert, ohne jedoch detailliert auf die unterschiedlichen Ursachen der Verschlechterung einzugehen. Die Auswertungen in Kapitel 3.4 zeigen deutlich den durchschnittlichen Zusammenhang zwischen den in das System eingebrachten Lasten und der sich verschlechternden Gleislage. Unbestritten ist dabei der wesentliche Einfluss der Unterbauqualität und der Schottergüte auf die Geschwindigkeit der Verschlechterung. Lediglich die genaue Abstimmung des schichtförmig aufgebauten Gleiskörpers vom Gleisrost, über den Schotter, bis zum Unterbau erlaubt die optimale Abtragung der eingebrachten Lasten. Unstetigkeiten in dieser Abstimmung führen über kurz oder lang zu Fehlern in der Gleisgeometrie und erfordern die Durchführung einer korrektiven Maßnahme. Das Eindringen von Feinteilen aus dem Unterbau, fehlende Entwässerung, oder der Einbau von Schotter niedriger Güte führt dazu, dass sich Gleislagefehler schneller ausbilden, Instandhaltungsintervalle dichter werden und sich die Nutzungsdauer der Anlage wesentlich reduziert. Über reaktive Maßnahmen werden lediglich die Auswirkungen des Fehlers, nicht jedoch seine Ursache behoben.

Es stellt sich die Frage, ob es möglich ist, über die Beschreibung der Fehlercharakteristik der Gleislage nähere Rückschlüsse auf die Ursache der Verschlechterung zu ziehen. Zusätzlich zur Entwicklung der Gleislage über die Nutzungsdauer würde diese Analyse die Möglichkeit bieten, die genaue Fehlerursache zu bestimmen und daher eine verursachungsgerechte Fehlerbehebung, anstelle der bloßen Bekämpfung der Auswirkung zu ermöglichen. Im Wesentlichen wird in Österreich die Nutzungsdauer des Schotters durch die Schotterzerstörung über die eingebrachten Kräfte, oder die eingebrachten Feinteile aus dem Unterbau begrenzt. Außerdem beschleunigt das Fehlen einer Entwässerung bzw. ihre unzureichende Ausbildung die Verschlechterung der Gleislage rapide.

Das Leistungsdichtespektrum erlaubt die Zerlegung des Messsignales in seine periodischen Anteile [Rießberger 1997] und ordnet diese der berechneten Leistungsdichte zu. Vereinfacht ausgedrückt, erlaubt das Leistungsdichtespektrum die Zusammensetzung des Signales hinsichtlich seiner unterschiedlichen Wellenlängen und Amplituden zu erfassen. Für detaillierte Analysen bildet das Leistungsdichtespektrum eine fundierte Grundlage, während eine netzweite Anwendung wenig zielführend erscheint. Einzelne Forschungsarbeiten versuchten auf unterschiedliche Arten, die große Anzahl von Informationen, die ein Leistungsdichtespektrum zur Verfügung stellt, zu nutzen. Frederich [Frederich 1984] näherte mit Hilfe einer kubischen Parabel den Verlauf des Leistungsdichtespektrums an und ordnete die Parameter der Parabel unterschiedlichen Qualitätsstufen zu. Über diese Annäherung gelingt es, die Signalcharakteristik in ausreichender Form zu beschreiben und die Informationen auf das Wesentlichen zu reduzieren. Weiterführende Versuche unterschiedliche Frequenzbereiche miteinander zu vergleichen [Schöpp 2011], um mögliche hohlliegende Schwellen zu bestimmen, zeigten stichprobenartig auch den gewünschten Erfolg.

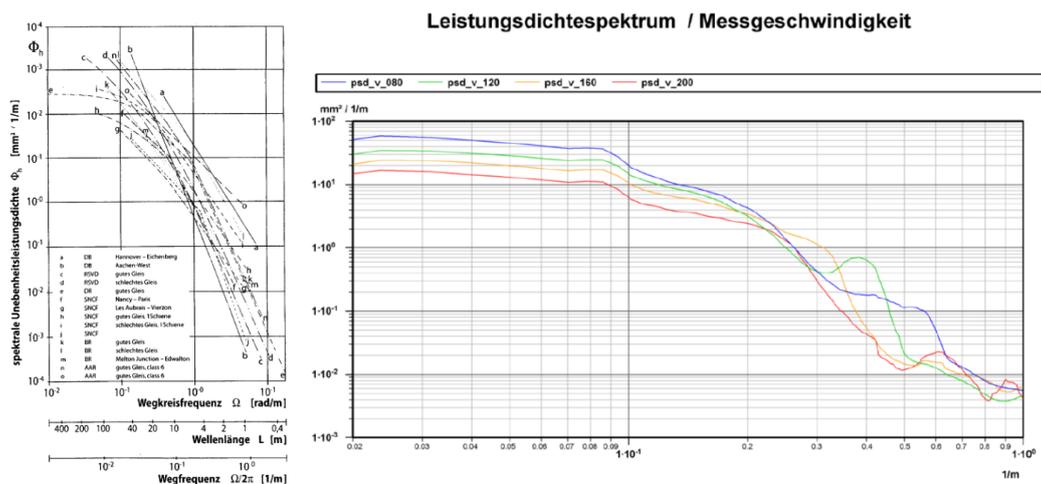


Abbildung 64 Unterschiedliche Anwendungen des Leistungsdichtespektrums links: Untersuchung unterschiedlicher Strecken hinsichtlich ihrer Signalcharakteristik [Frederich 1984] rechts: Signalcharakteristik bei Strecken mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten [Schöpp 2011]

Trotz der erkennbaren Erfolge der frequenzabhängigen Gleislageanalyse, fand diese erst 2014 Eingang in die aktuelle Normung [Österreichisches Normungsinstitut 2014]. Die Normung beschreibt momentan das Leistungsdichtespektrum lediglich als Möglichkeit und unterlässt die Angabe von weiterführenden Analysemethoden oder Schwellenwerten. Um eine netzweite Anwendung der frequenzabhängigen Gleislageanalyse zu implementieren, ist es wie die vorhergehenden Beispiele zeigten notwendig, die Komplexität der Auswertung zu vereinfachen. Erst eine Vereinfachung würde eine netzweite Anwendung ermöglichen bzw. sinnvoll machen.

Die Vereinfachung einer frequenzabhängigen Gleislageanalyse steht somit im Mittelpunkt des folgenden Abschnittes dieser Arbeit. Es gilt eine Möglichkeit aufzuzeigen, die es erlaubt die Signalcharakteristik einer Kurve (eines Messsignales) zu erfassen und zu bewerten.

Mithilfe der klassischen Geometrie ist es nicht möglich die Welligkeit eines Messsignales zu beschreiben. Benoit B. Mandelbrot entwickelte eine Möglichkeit [Mandelbrot 1977] die Rauigkeit von Objekten zu erfassen, deren Beschreibung zum damaligen Zeitpunkt nicht möglich war [Mandelbrot 1983]. Die fraktale Dimension eines Objektes prägt sich abhängig von dessen Rauigkeit in unterschiedlicher Weise aus und eignet sich so auch für die Beschreibung Rauigkeit der Gleislage. Das Potential der Fraktalanalyse zur Bestimmung der Rauigkeit der Gleislage erkannte Hyslip [Hyslip 2002a] und wandte diese im Zuge der Evaluierung des Nord-Ost-Korridors der National Railroad Passenger Corporation (Amtrack) zum ersten Mal an.

Die Fraktalanalyse zielt darauf ab, die Möglichkeit zu prüfen, aus der Gleislageanalyse bzw. der Signalcharakteristik, nähere Informationen über den Zustand der Anlage zu erhalten.

3.6.1 Historische Entwicklung der Fraktalanalyse [Hansmann, Landgraf 2013]

Für die Erläuterung des genauen Ablaufes der Fraktalanalyse eignet sich am besten ein von Mandelbrot selbst geprägtes Beispiel [Mandelbrot 1967]. Mandelbrot bedient sich der Fragestellung nach der Küstenlänge von Großbritannien, um die Fraktalanalyse näher zu erläutern. Auch wenn diese Fragestellung auf dem ersten Blick simpel anmutet weist die zerklüftete Küste Großbritanniens zahlreiche Unregelmäßigkeiten auf, die es nahezu unmöglich machen sie in ihrer Struktur zu erfassen, geschweige denn ihre Länge zu bestimmen. Sie stellt damit ein perfektes Beispiel für die Anwendung der Fraktalanalyse dar.

Die Fraktalanalyse beruht auf der Tatsache, dass es möglich ist, nicht-lineare geometrische Kurven zu linearisieren, indem durch die Unterteilung in immer kleiner werdende

Segmente und schlussendlich über Tangenten in den einzelnen Punkten der Kurve diese beschrieben wird (Abbildung 65).

Allgemein lassen sich klassische geometrische Figuren anhand ganzzahliger Dimensionen erklären [Mandelbrot, Blumen 1989]. Kurven besitzen dabei eine Dimension, während Flächen über zwei Dimensionen beschrieben werden können. Mandelbrot ging jedoch von der Tatsache aus, dass Kurven durch ihre Rauigkeit zwischen diesen ganzzahligen Vielfachen zu liegen kommen können und beschrieb daher diese neuartige Dimension als *fraktale Dimension*.

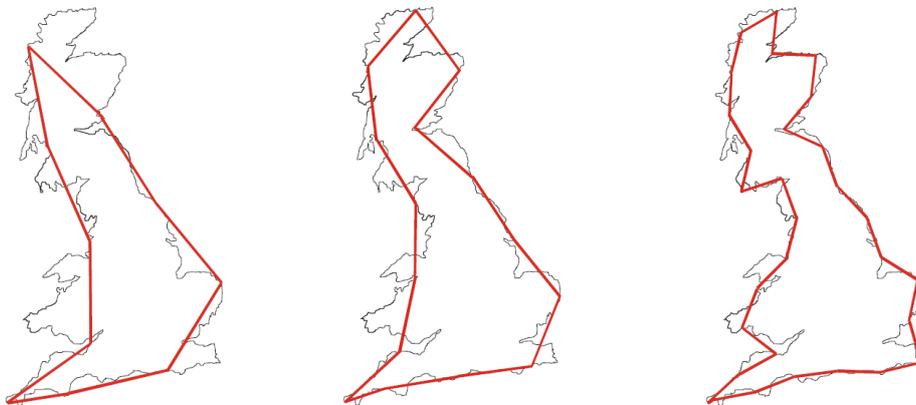


Abbildung 65 Beschreibung der Küstenlänge Großbritanniens mit Hilfe der Modifizierten Divider Length Method [Hyslip 2002a]

Unterschiedliche Methoden, wie die Divider Length Method oder die Box Method, erlauben es nun, die fraktale Dimension einer Kurve zu berechnen. Diese kann dabei, abhängig von ihrer Komplexität, Werte zwischen eins und zwei annehmen. Im Zuge der Modified Divider Length Method wird die zu beschreibende Kurve in gleichlange Segmente λ unterteilt und anschließend die Länge des resultierenden Polygonzugs $L(\lambda)$ berechnet. Im nächsten Berechnungsschritt wird die Länge der Segmente reduziert und der Polygonzug erneut berechnet. Durch diese Iteration passt sich der Polygonzug immer besser an die Kurve an, bis er sie schließlich vollends beschreibt.

Mandelbrot zeigte, dass zwischen der realen Länge der Kurve, der Anzahl der Segmente sowie deren Länge folgender Zusammenhang besteht:

$$L(\lambda) = N * \lambda^{1-D_r}$$

mit:

$L(\lambda)$: Länge des Polygonzugs als Funktion von λ ,

λ : Länge des Teilsegments,

N : Anzahl der Unterteilungen und

D_r : fraktale Dimension.

Aus dieser Gleichung ergibt sich:

$$\log L(\lambda) = (1 - D_r) \log \lambda + \log n$$

Damit lässt sich die Zunahme der Länge des Polygonzugs mit steigender Anzahl von Unterteilungen über eine zugeordnete Regression bzw. deren Steigung beschreiben. Werden nun die berechneten Polygonlängen in Abhängigkeit von ihrer Segmentlängen im logarithmischen Maßstab dargestellt (Richardson Plot), ergibt sich die fraktale Dimension der Kurve zu

$$D_r = 1 - m$$

mit:

m : Steigung der approximierten Linien.

Zusammenfassend ergibt sich die fraktale Dimension einer Kurve als Steigung jener Gerade, die sich bestmöglich an die doppellogarithmische Darstellung anpasst. Kurven mit lediglich einer fraktalen Dimension werden als selbstähnliche Kurven bezeichnet. Die Selbstähnlichkeit von Kurven steht für die Analogie von wieder auftretenden Signalcharakteristika in unterschiedlichen Maßstäben (siehe Abbildung 66). Erlaubt eine Gerade nicht mehr die ausreichende Beschreibung des Verlaufs im Richardson Plot, so weisen die untersuchten Kurven meist unterschiedliche Selbstähnlichkeiten auf (siehe Abbildung 67). Die Selbstähnlichkeit von Gleislagedaten ist kein zentraler Bestandteil dieser Arbeit, weshalb an dieser Stelle auf weitere Ausführungen verzichtet und lediglich auf die vorangegangenen Forschungsarbeiten [Hyslip 2002b] verwiesen wird.

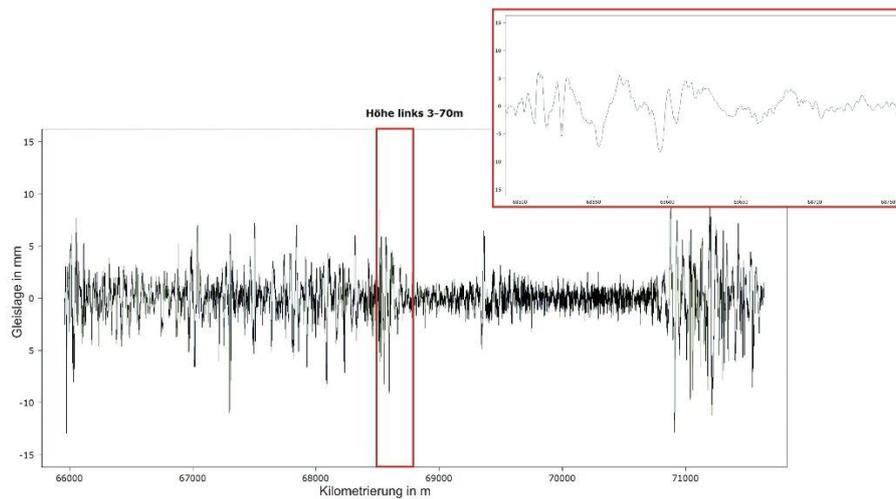


Abbildung 66 Darstellung der Gleislage in unterschiedlichen Maßstäben zur Verdeutlichung der nicht vorhandenen Selbstähnlichkeit

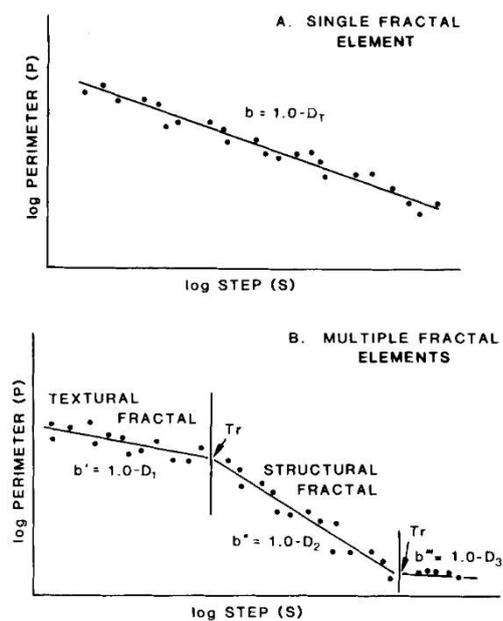


Abbildung 67 Auftreten einer einfachen (oben) oder von mehreren unterschiedlichen fraktalen (unten) Dimensionen [Orford, Whalley 1983]

3.6.2 Umsetzung der Fraktalanalyse auf die Gleislage im TUG-Netz [Hansmann, Landgraf 2013]

Nachfolgend gilt es die Berechnungsmethode der Modified Divider Method auf die Gleislage im TUG-Netz anzuwenden. Grundsätzlich erlaubt es die Fraktalanalyse Abschnitte mit unterschiedlicher Ausdehnung miteinander zu vergleichen, da die Berechnung der fraktalen Dimensionen der Abschnitte von dieser Wahl unabhängig ist. Eine netzweite gleitende Anwendung der Fraktalanalyse erfordert jedoch eine eindeutige Wahl der Einflusslänge,

um zeitlich reproduzierbare Werte des gleichen Abschnittes zu erhalten. Die fraktalen Dimensionen werden für das zwischen 1 und 70 m gefilterte Messsignal der vertikalen Gleislage (Abtastrate= 0,25m) des rechten und linken Schienenstranges ermittelt.

Die Wahl der Einflusslänge erfolgt unter zwei Gesichtspunkten: Auf der einen Seite beeinflusst die maximal auftretende Wellenlänge im Signal die Wahl der Einflusslänge. Denn die Modified Divider Length Method benötigt zumindest zwei Stützpunkte (siehe Abbildung 71) um eine Wellenlänge eindeutig zu beschreiben. Berücksichtigt man auf diese Weise die maximal auftretenden Wellenlängen, so ergibt sich eine minimale anzustrebende Einflusslänge von 140 Metern. Andererseits führt die Wahl einer zu großen Einflusslänge dazu, dass bei auftretenden Fehlerwerten oder unbekanntem Werten in großen Abschnitten keine Aussage getroffen werden kann. Unabhängig davon würden größere Einflusslängen bei einem ab einer Wellenlänge von 70 m gefiltertem Signal zu keinerlei Mehrwert führen. Unter Berücksichtigung der Einflusslängen anderer Qualitätssignale, wurde die Einflusslänge der Fraktalanalyse mit 150 m festgesetzt.

Die Messwerte beider Schienenstränge werden vom Algorithmus eingelesen und auf Fehlerwerte oder fehlende Messwerte überprüft. Nur wenn alle 601 Einzelmessungen gültige Werte aufweisen, ist es möglich, die Fraktalanalyse für den vorliegenden Bewertungsabschnitt zu berechnen. Eine ungerade Einflusslänge ist Voraussetzung, um die eindeutige Verortung der Werte auf einem Streckenquerschnitt zu ermöglichen. Folglich ergibt sich die Einflusslänge nicht exakt zu 150 m, sondern zu 150,25 m. Die Werte aus der Fraktalanalyse werden im Anschluss an die Berechnung dem Streckenkilometer zugeordnet, der in der Mitte des Datensegments zu liegen kommt. Das Datensegment wird iterativ in immer kleiner werdende Teilabschnitte λ unterteilt (siehe Abbildung 68), wobei jedem Unterteilungspunkt in eindeutiger Form ein Punkt des Messsignales zugeordnet wird. Um ein durchgängig bestimmtes Messsignal zu erhalten, wird der Verlauf zwischen zwei Messticks linear interpoliert. Die Länge des entstandenen Polygonzuges wird über den pythagoreischen Lehrsatz ermittelt und der Länge des Teilabschnittes λ zugeordnet.

$$L = \sum_1^N L_i = \sum_1^N \sqrt{(Y_{i-1} + Y_i)^2 + \left(\frac{EL}{N}\right)^2}$$

Mit

Y_n : Wert des Signals an der Stelle n, N: Anzahl der Unterteilungen,

i: Laufvariable und EL: Länge des Datensegments.

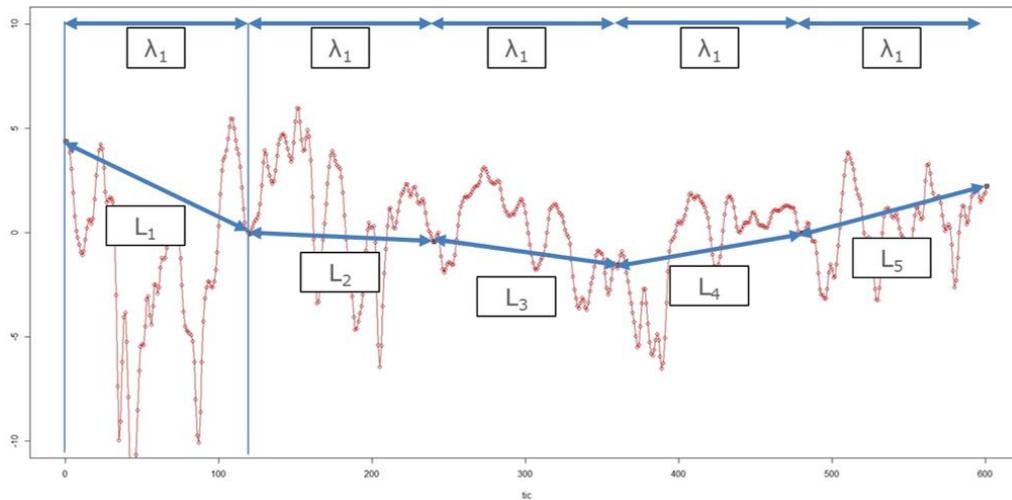


Abbildung 68 Beispielhafte Interpolation eines Messsignals mit 600 Messticks (=150m) nach der Unterteilung in 5 gleiche Abschnitte der Länge λ

Eine doppellogarithmische Gegenüberstellung der Länge des Polygonzuges und der Länge des Teilsegmentes zeigt das in Abbildung 69 dargestellte charakteristische Bild und erlaubt die Ermittlung der fraktalen Dimensionen. Die „1-70 m Gleislage“ umfasst augenscheinlich drei fraktale Dimensionen. Bereits frühere Auswertungen am Nord-West-Korridor von Amtrack wiesen der Gleislage mehrere fraktale Dimensionen zur hinreichend genauen Beschreibung zu. Hylsip [Hylsip 2002a] gab in seinen Untersuchungen lediglich zwei Sektoren an, ließ jedoch Wellenlängen unter 3 m unberücksichtigt.

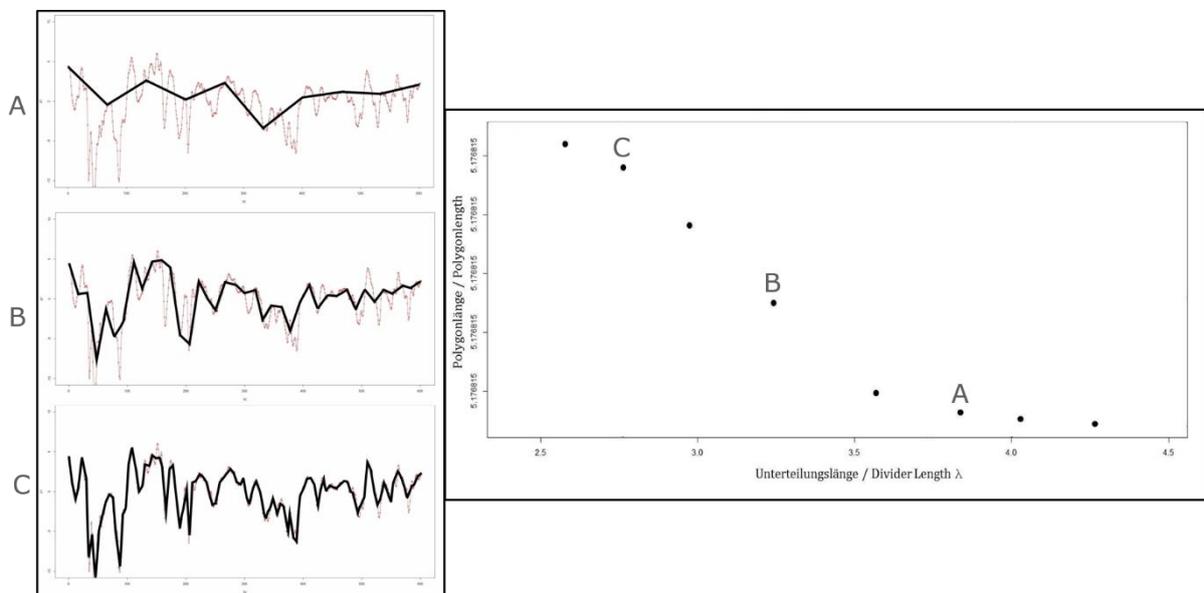


Abbildung 69 Charakteristischer Verlauf der Polygonlänge in Abhängigkeit der Unterteilungslänge λ

Bevor das Hauptaugenmerk auf die netzweite Auswertung der fraktalen Dimensionen gelegt werden kann, ist es notwendig, deren Aussagekraft zu evaluieren. Welche Korrelation besteht zwischen den auftretenden Wellenlängen und den fraktalen Dimensionen? In einem ersten Schritt erfolgt die Auswertung demzufolge anhand einer einfachen Sinuswelle, deren Wellenlänge schrittweise modifiziert wird (siehe Abbildung 70).

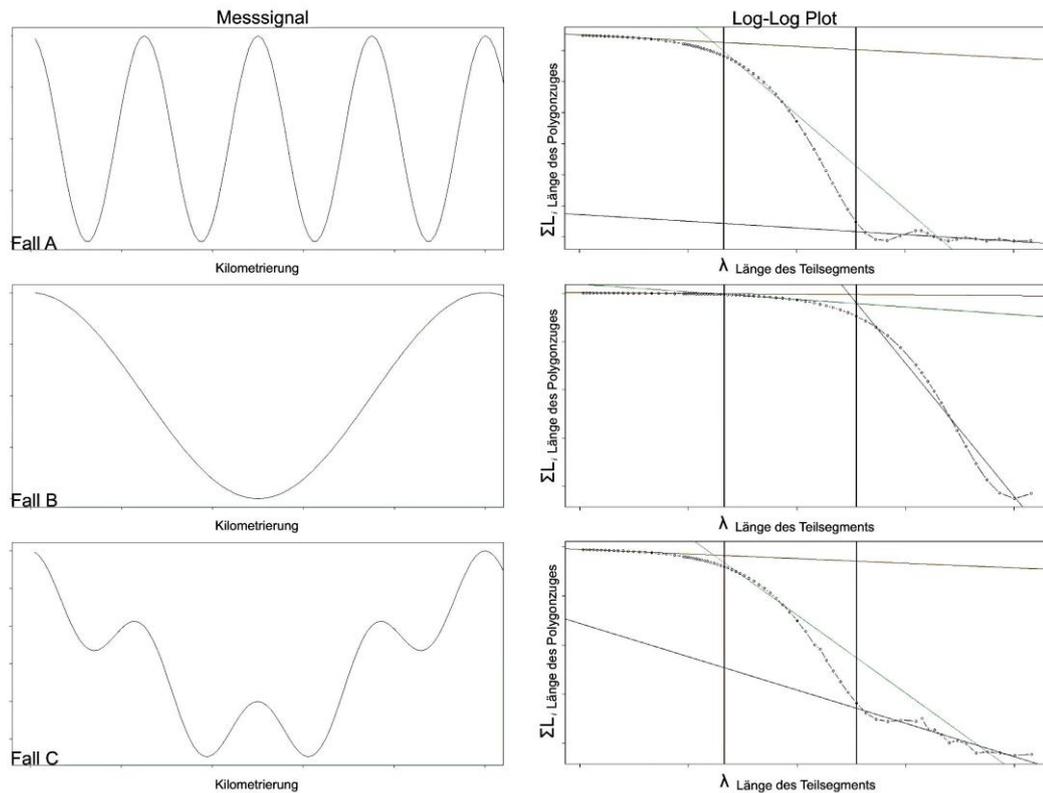


Abbildung 70 Auswirkungen unterschiedlicher Wellenlängen auf die fraktalen Dimensionen

Die Kalibrierung der Fraktalanalyse ermöglicht den Vergleich unterschiedlicher Ausprägungen einzelner Dimensionen im Falle einer 10 m (Fall A), einer 100 m Wellenlänge (Fall B), sowie deren Superposition (Fall C). Als Resultat zeigt sich im Richardson Plot die Verschiebung der maximal auftretenden Steigung der eingeschriebenen Regressionsgeraden von links nach rechts. Im Falle einer Wellenlänge von 10 m erhöht sich die Steigung des mittleren Sektors deutlich, während die Wellenlänge von 100 Metern lediglich zu einer Erhöhung der Steigung des rechten Sektors beiträgt.

Die Steigung des ersten Sektors reagiert nur geringfügig auf die unterschiedlichen Wellenlängen. Augenscheinlich besteht ein Zusammenhang zwischen den Längen der Teilsegmente, der Anpassung an das Messsignal und der auftretenden Wellenlänge. Die größte Steigerung der Anpassung des Polygonzuges an eine Wellenform ergibt sich, wenn die Wellenlänge einer Kurve je nach Lage doppelt oder viermal so groß ist wie die Teilsegmentlänge (siehe Abbildung 71). Eine genaue Bestimmung der auftretenden Wellenlängen in einem Signal – wie bei der Anwendung des Leistungsdichtespektrums – ist mit der Fraktalanalyse nicht möglich.

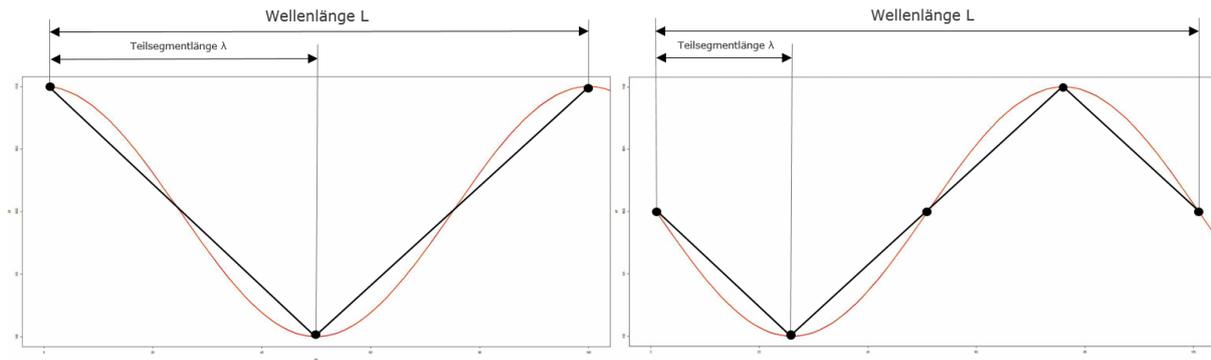


Abbildung 71 Korrelation zwischen der Teilsegmentlänge und der Wellenlänge des vorliegenden Signals

Im Gegensatz dazu lassen sich spezifische Frequenzbereiche über die Dimension des Signals beschreiben. Die einzelnen Sektoren werden über Grenzen zueinander abgegrenzt. Während die erste Grenze bei 2-5 m zu liegen kommt, positioniert sich die zweite zwischen Wellenlängen von 10-20 m. Die Wahl der Grenzen beruht auf unterschiedlichen, teilweise empirisch ermittelten Gesichtspunkten. Die erste Grenze dient hauptsächlich dazu den zweiten Sektor (mittelwelliger Sektor) vom Einfluss sehr kleiner Wellenlängen zu befreien. Die zweite Grenze trennt den zweiten vom dritten Sektor (langwelliger Sektor) und liegt damit im Haupteinflussgebiet der Standardabweichung.

Die Steigungen der Geraden berechnen sich innerhalb dieser Sektoren über lineare Regressionsmodelle. Im kurz- (Slope1) und mittelwelligen (Slope3) Sektor starten die Berechnungen jeweils vom linken Rand des Sektors und werden Punkt für Punkt bis zur Sektorgrenze ausgeführt. Konträr dazu beginnt die Berechnung im langwelligen (Slope2) Sektor von rechts. Mit der punktwweisen Erweiterung verändert sich auch das Bestimmtheitsmaß der modellierten Geraden, welches in Folge nicht nur als Gütekriterium, sondern auch als Entscheidungsgrundlage für das endgültige Regressionsmodell dient. Aus den punktwweise berechneten Regressionsmodellen wird sektorenweise jenes Modell gewählt, welches das höchste Bestimmtheitsmaß aufweist und zumindest fünf Werte als Grundlage besitzt.

Die Fraktalanalyse zielt darauf ab, in erster Linie jene Frequenzbereiche zu beschreiben, die von der aktuellen Gleislageanalyse primär von der Standardabweichung Höhe, nicht abgebildet werden. Reduziert man den Grund für die fortschreitende Verschlechterung der Gleislage, ergo für das Ende der Nutzungsdauer des Gleisschotters auf die zwei wesentlichen Auslöser, nämlich die Schotterzerstörung und den Unterbau, so gilt es, die Frage zu beantworten, ob sich diese Schädigungsursachen in unterschiedlichen Signalcharakteristika manifestieren. Somit beruht die Unterscheidung zwischen kurzen, mittleren und langen Wellenlängen weiterführend auf einer durch vorhergehende Forschungsarbeiten ([Hyslip 2002b], [Schöpp 2011], [Holtzendorff 2003], [Rohim Boy Berawi 2013]) gestützten Theorie. Demzufolge kann davon ausgegangen werden, dass sich Schotterzerstö-

rungen mehrheitlich im kurz- und mittelwelligen Bereich manifestieren, während Unterbauprobleme primär langwellige Schädigungsbilder aufweisen. Diese Theorie deckt sich mit der charakteristischen Zusammensetzung des Richardson Plot und soll im nachfolgenden Abschnitt näher beleuchtet werden. Nach der Berechnung der unterschiedlichen Steigungen in den einzelnen Sektoren werden die Werte über eine Länge von 100 m geglättet und schlussendlich in Querschnitten alle fünf Meter ausgegeben. Dies erlaubt in weiterer Folge eine Untersuchung der zeitlichen Entwicklung der Werte und reduziert die Rechenleistung und Rechenzeit maßgeblich. Eine Zeitreihenanalyse ohne Mittelung würde zu großen Streuungen unterliegen.

3.6.3 Netzauswertung

Im Rahmen der netzweiten Auswertungen ist in erster Linie zu beachten, dass die Einschränkung der Fraktalanalyse auf ausschließlich gültige Messwerte, die Grundgesamtheit des Netzes stark beeinflusst. Die Fraktalanalyse wurde im gesamten TUG-Netz seit dem Jahr 2005 berechnet. Für die Netzauswertungen werden außerdem, wenn nicht anders erwähnt, nur Jahreswerte herangezogen. Ähnlich wie bereits bei vorhergehenden Analysen werden für diese nur die ersten Messfahrten des Jahres verwendet mit der Bedingung, dass diese in den ersten fünf Monaten durchgeführt wurden. Diese Anforderungen führen auf 62% des Netzes zu gültigen Dimensionswerten der Fraktalanalyse (siehe Abbildung 72). Diese Stichprobe ist ausreichend, Aussagen über Wertverteilung und Korrelationen zu formulieren. Auswertungen, die nur einen Aspekt wie z.B. den Einfluss des Schienenstranges untersuchen, werden stellvertretend für das Jahr 2011 durchgeführt, da hier die Stichprobe den größten Umfang annimmt.

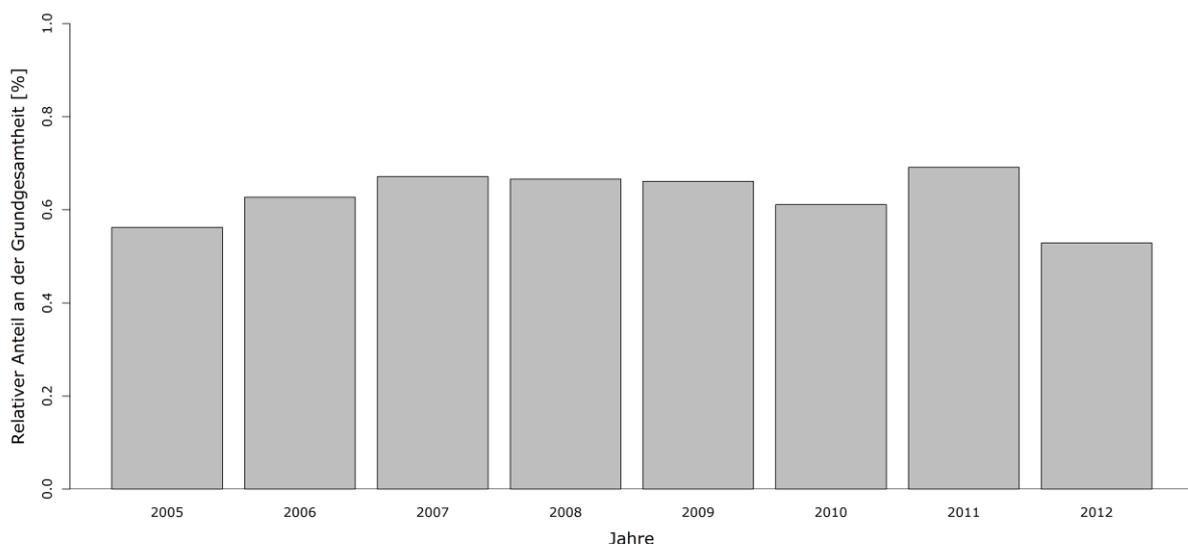


Abbildung 72 Relativer Anteil gültiger Jahreswerte gemessen am Gesamtnetz

Die Messung der Gleisgeometrie liefert für den linken und rechten Schienenstrang verschiedene Messwerte. Inwiefern sich dieser Unterschied auf die Ergebnisse der Fraktalauswertung auswirkt, ist im nachfolgenden Abschnitt zu klären.

In der Häufigkeitsverteilung folgen die linke und die rechte Schiene augenscheinlich dem annähernd gleichen Verlauf (siehe Abbildung 73). Die unterschiedlichen Steigungen nehmen sehr kleine Werte an und werden für alle Auswertungen, um ihre Ausprägung zu verdeutlichen, mit dem Faktor $10 \cdot e^7$ multipliziert. Berücksichtigt man diesen Faktor, so ergeben sich die Werte der Slope1 und Slope2 annähernd gleich. Die geringfügig stärkere Ausprägung der Slope1 kann an dieser Stelle vernachlässigt werden. Am stärksten präsentiert sich die Steigung des mittelwelligen Sektors, ein Umstand der bereits aus dem typischen Richardson Plot zu erkennen war. Auch wenn die Häufigkeitsverteilungen des linken und rechten Schienenstrangs der gleichen Funktion folgen, so kann die Frage nach dem Unterschied zwischen den beiden, momentan nicht eindeutig geklärt werden.

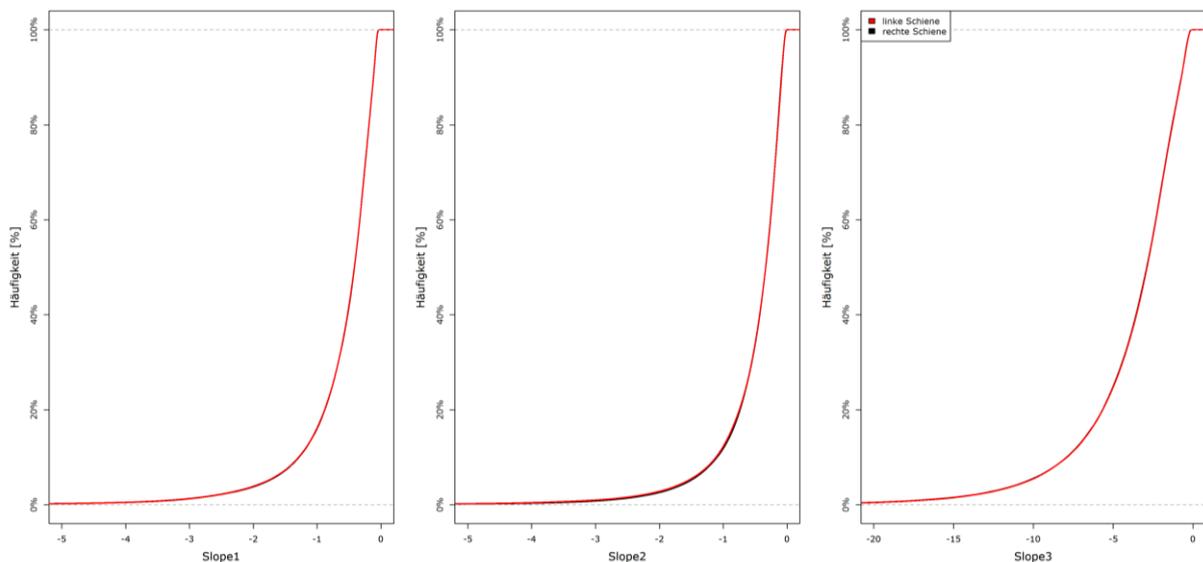


Abbildung 73 Häufigkeitsverteilung der Slope1 bis Slope3 unterteilt in die einzelnen Schienenstränge, bezogen auf das Jahr 2011

Um den Unterschied zwischen beiden Schienensträngen detailliert zu untersuchen, ist es notwendig die messfahrtspezifischen Differenzen zwischen den Werten der Fraktalanalyse zu betrachten. Diese Auswertung beruht daher nicht auf Jahreswerten, sondern vergleicht die Ergebnisse der Messfahrten untereinander. Aus den entstehenden Differenzen zwischen linker und rechter Schiene, wird für jeden Querschnitt die 10% und 90% Quantile der Dimensionen berechnet. Die 10% und 90% Quantilswerte verteilen sich wie in der Abbildung 74 mit Hilfe von Boxplots dargestellt.

In allen drei Dimensionen bewegt sich die Abweichung zwischen den Schienensträngen deutlich unter dem Wert eins. Im kurzwelligen Bereich unterscheiden sich die beiden

Schienenstränge am geringsten voneinander, wobei berücksichtigt werden muss, dass in diesem auch die absolute Ausprägung nicht mit jener der mittelwelligen Dimension verglichen werden kann (Abbildung 73). Die Differenz zwischen der linken und rechten Schiene ist somit im Falle der unterschiedlichen Dimensionen anders zu betrachten. Da jedoch nicht ihr Vergleich, sondern ihre Ausprägung im Mittelpunkt der Betrachtung steht, wird auf die Normierung der Werte verzichtet. Unabhängig davon nimmt der Unterschied zwischen den Schienensträngen bei besonders geringen Ausprägungen der Dimension eine nicht vernachlässigbare Größe (Abbildung 74) an. Inwiefern dieser Unterschied allerdings auch Auswirkungen auf die Bewertung des Komponentenzustandes nach sich zieht, zeigen nachfolgende Auswertungen.

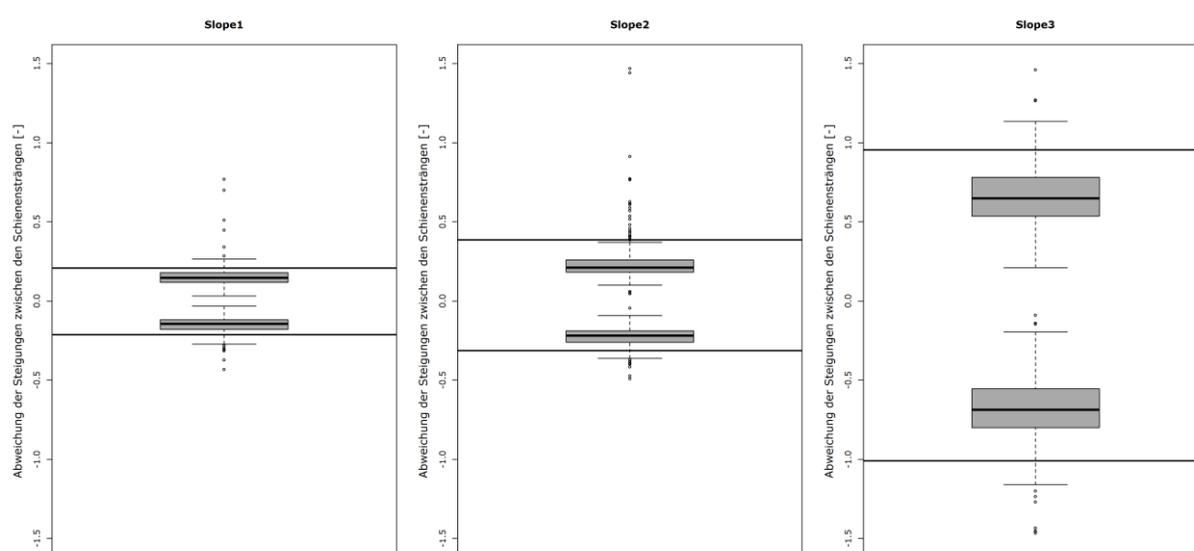


Abbildung 74 Verteilung der 10% (oberer Boxplot) und 90% (unterer Boxplot) Quantile der Differenzen zwischen den Werten der Slopes beider Schienenstränge

Die Fraktalanalyse zielt nicht darauf ab, die herkömmliche Art der Gleislageanalyse (siehe 3.1) zu ersetzen, sondern versteht sich als zusätzliche Informationsquelle. Wesentlich ist es in diesem Zusammenhang, mögliche Korrelation zwischen den einzelnen Dimensionen und herkömmlichen Methoden zu betrachten, um den Informationsgewinn zu maximieren. Die Abbildung 75 stellt die Dimensionswerte aus dem Jahr 2011 den zugeordneten Werten der Standardabweichung Höhe gegenüber. Die eingeschriebenen Boxplots umfassen die Werte der Dimensionen der Fraktalanalyse und werden, über die auf eine Nachkommastelle gerundete Standardabweichung Höhe, in Gruppen zusammengefasst. Die Skalierung der Darstellung wurde an die Werteverteilung angepasst und umfasst im mittelwelligen Sektor Werte zwischen -20 und 0, in allen übrigen Sektoren Werte von -5 bis 0. Mit größer werdenden Steigungen nimmt auch die Standardabweichung Höhe in allen Dimensionen zu.

Dies ist ein Zusammenhang, der auf Grund der mathematischen Berechnung der Standardabweichung über die Fehlerquadrate logisch begründbar ist. Diese Korrelation prägt sich im Falle des mittel- und langwelligen Sektors stärker aus, als im Bereich des kurzwelligen Sektors. Ein Umstand, der sich aus dem Einfluss unterschiedlicher Frequenzen auf die Standardabweichung (Tabelle 3) ableiten lässt.

Die Verläufe der vorliegenden Korrelationen unterscheiden sich geringfügig voneinander. Die langwellige Korrelation wächst vor allem bei kleinen Werten der Standardabweichung weniger stark, als bei Werten größer eins. Im Falle der kurz- und mittelwelligen Korrelation zeigt sich dieser Zusammenhang konträr. Die Werte der zwei Dimensionen wachsen stark mit steigender Standardabweichung, um sich bei hohen Werten schlussendlich auf nahezu konstantem Niveau einzupendeln. Besonders stark zeigt sich dieser Effekt bei Slope1.

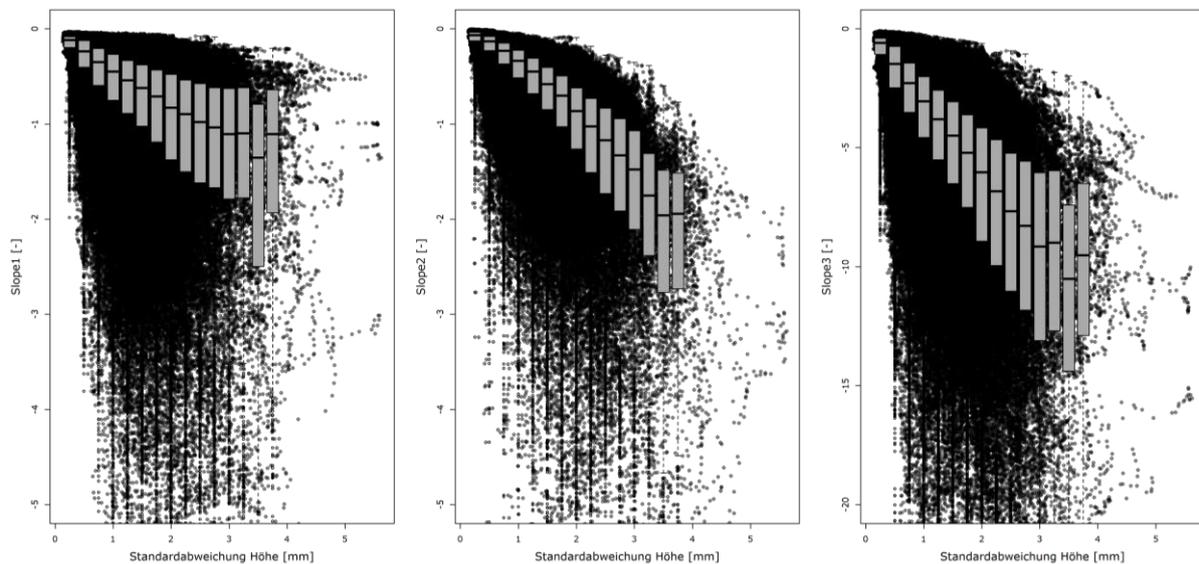


Abbildung 75 Gegenüberstellung der einzelnen Dimensionen und den zugeordneten Werten der Standardabweichung Höhe

Der in Abbildung 75 dargestellte Zusammenhang prägt sich für die langwellige Dimension in der ursprünglichen und vorab beschriebenen netzweiten Umsetzung der Fraktalanalyse in etwas anderer Form aus (siehe Abbildung 76 links). Erste Gegenüberstellungen zeigen, eine weitaus stärkere Korrelation zwischen dem langwelligen Bereich und der Standardabweichung Höhe, als ursprünglich erwartet.

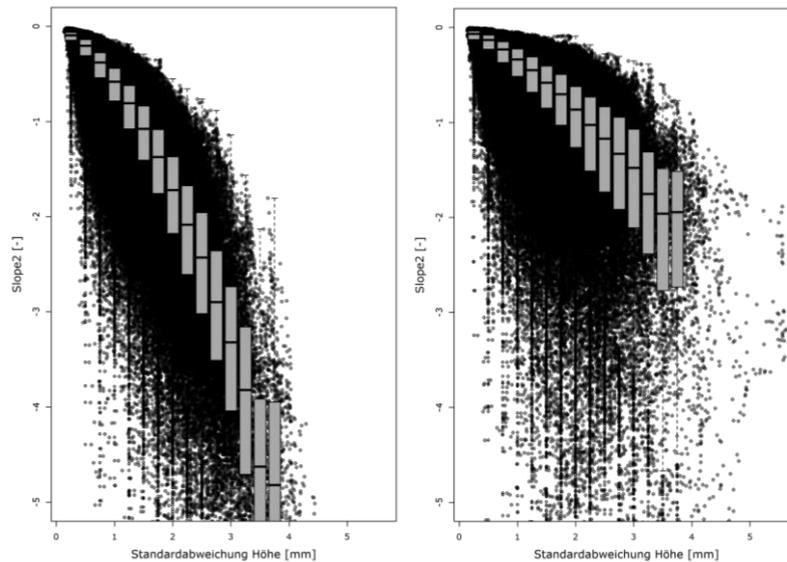


Abbildung 76 Gegenüberstellung der langwelligen Dimension mit den zugeordneten Werten der Standardabweichung in der alten (links) und neuen (rechts) Berechnungsform

Die langwellige Dimension weist sehr geringe Steigungen und somit auch geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Punkten des Richardson Plots auf. Diese geringen Unterschiede führen im Zuge der alten Berechnungsmethode sehr oft dazu, dass die Steigung der Geraden von Punkten nahe der Grenze zum mittelwelligen Sektor dominiert wird (siehe Abbildung 76).

Die Bestimmung der optimalen Anpassung der Geraden an die vorliegenden Punkte über das höchste Bestimmtheitsmaß kann, bedingt durch die geringen Abweichungen, an dieser Tatsache nichts ändern. Bei einem derartigen Zusammenhang besteht jedoch die Gefahr, mit unterschiedlichen Qualitätswerten den gleichen Effekt zu beschreiben. Um diese Möglichkeit in weiterer Folge auszuschließen bzw. den Effekt zu reduzieren, wurde die Grenze des langwelligen Sektors so verschoben, dass sich in diesem lediglich Wellenlängen über 25 m wiederfinden.

Eine vergleichbare Interaktion, wie sie bereits zwischen Standardabweichung Höhe und Slope2 in der ursprünglichen Fraktalanalyse festgestellt werden konnte, zeigt sich auch bei der Gegenüberstellung der Slope1 und Slope3 (siehe Abbildung 77 links). Dieser Zusammenhang ergibt sich zwingend aus der Berechnungsmethode der Fraktalanalyse und basiert auf der Tatsache, dass Fehler unterschiedlicher Wellenlängen nie komplett separiert voneinander auftreten. So erklärt sich auch der weitaus geringere Einfluss zwischen der Slope3 und Slope2.

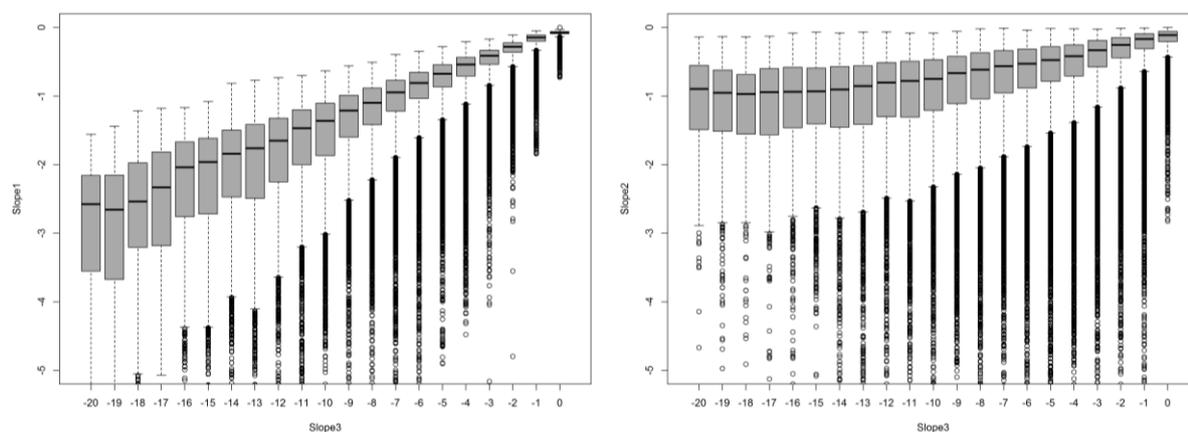


Abbildung 77 Einfluss der Dimensionen der Fraktalanalyse untereinander

Die Auswertungen der vorliegenden Arbeit konzentrieren sich auf die Schotterzerstörung und deren Beurteilung durch die Fraktalanalyse. Auswertungen der langwelligen Dimension beschränken sich lediglich auf netzweite Auswertungen zur näheren Betrachtung der Datengrundstruktur und möglicher Korrelationen. Ein ausgewähltes Beispiel wird jedoch die Möglichkeiten der Fraktalanalyse als Evaluierungstool für mögliche Unterbauprobleme exemplarisch aufzeigen.

3.6.4 Einwirkung der Schotterbettreinigung auf die Dimensionen der Fraktalanalyse

Um zu überprüfen, ob die Fraktalanalyse wirklich Möglichkeiten bietet, den Zustand des Schotters zu erfassen, ist es notwendig die Ergebnisse weiterführend zu validieren. In einem ersten Schritt werden die Werte der Fraktalanalyse vor und nach einer Schotterbettreinigung miteinander verglichen. Eine Schotterbettreinigung ohne Austausch des Gleisrostes zählt nicht zu den Standardmaßnahmen der ÖBB und bedarf daher einer besonderen Notwendigkeit und technischen Begründung. Positiv für die Betrachtung gestaltet sich der Umstand, dass die Schotterbettreinigung im Gegensatz zur Neulage ausschließlich vom Zustand des Schotters getrieben wird. Unter dem vorausgesetzten Zusammenhang zwischen Signal und Schotterzerstörung müsste sich der Zustand über die Signalcharakteristik eindeutig beschreiben lassen.

Eine Gegenüberstellung der auftretenden Steigungen zeigt deutlich eine erkennbare Auswirkung der Schotterbettreinigung auf die Steigungen des mittel- und kurzwelligen Bereichs. Natürlich beeinflusst eine Schotterbettreinigung auch die Standardabweichung Höhe und die MDZ-Ziffer, wenngleich sich dieser Einfluss geringer darstellt.

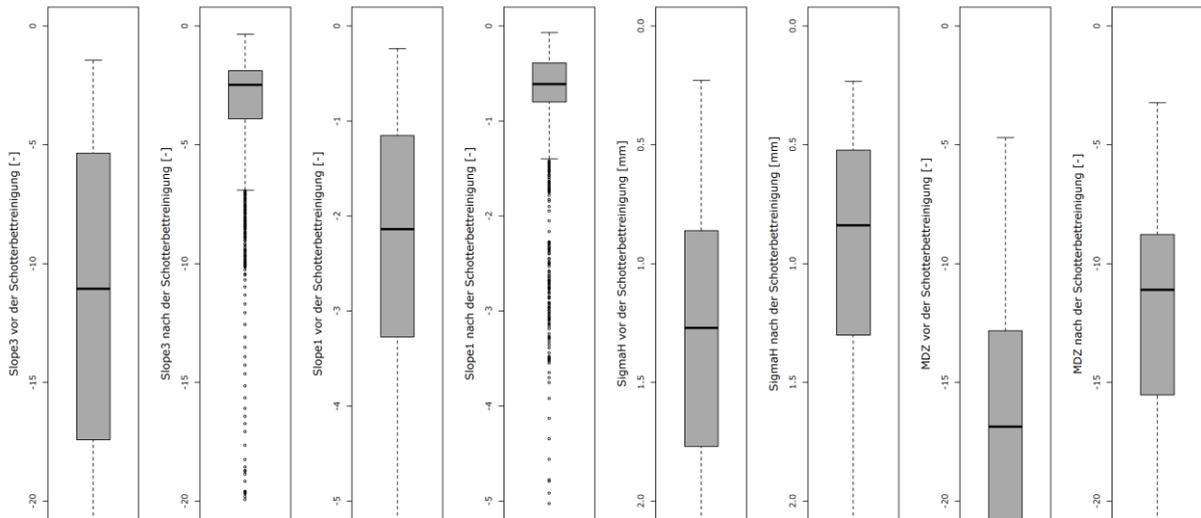


Abbildung 78 Auswirkungen der Schotterbettreinigung auf einzelne Qualitätssignale

Die Schotterbettreinigung verbessert maßgeblich die Ausprägung der Slope3 sowie Slope1. Dieser Sachverhalt untermauert die ursprünglich getroffene Annahme, dass es möglich ist, aus diesen Steigungen der Fraktalanalyse nähere Informationen auf den Schotterzustand zu ziehen. Bildet sich der langwellige Bereich tatsächlich als Indikator für mögliche Unterbauprobleme aus, müssen die Werte der Slope2 von der Durchführung einer Schotterbettreinigung nahezu unberührt bleiben. Ein Effekt der sich deutlich in Abbildung 79 ausbildet.

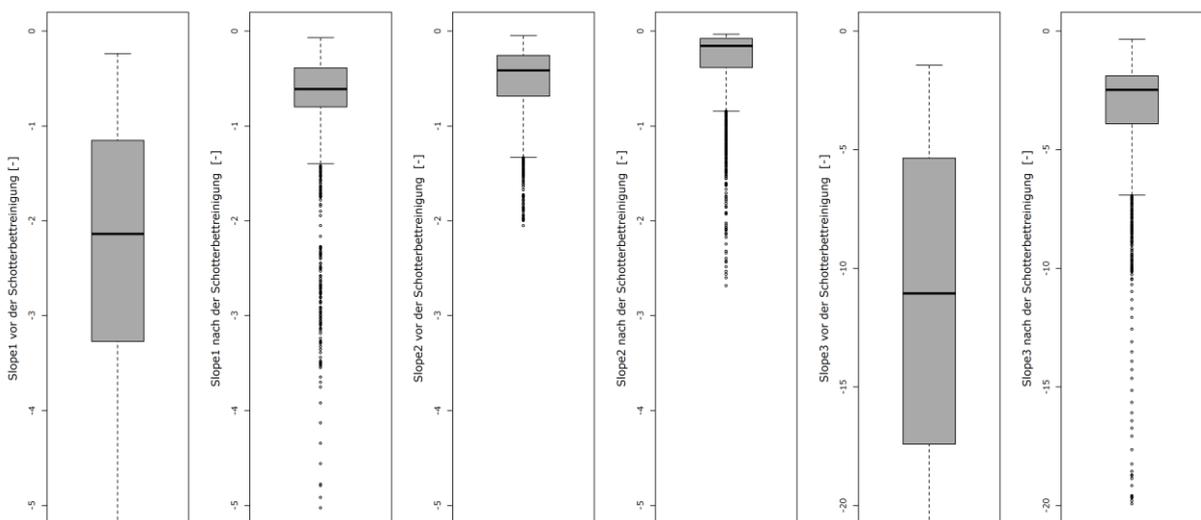


Abbildung 79 Auswirkungen eines Reinigungseinsatzes auf die einzelnen Dimensionen der Fraktalanalyse (links: vor der Reinigung rechts: nach der Reinigung)

Erstmals ist es nun möglich, die Ergebnisse der Betrachtung beider Schienenstränge in ihrer Dimension richtig zu bewerten. Die Ausprägung der Dimensionen in der hier vorliegenden Größenordnung lässt den Unterschied zwischen den beiden Schienensträngen für die Beurteilung des Schotterzustandes vernachlässigbar klein erscheinen. Ob allerdings die Informationen der Differenz zwischen den beiden Schienen, für etwaige zusätzliche Bewertungen Mehrwert aufweist, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter beurteilt und kann daher nicht ausgeschlossen werden.

Eine Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Slope3 und SigmaH im Rahmen eines Scatterplots zeigt eine interessante Auffälligkeit (Abbildung 80). Diese Auffälligkeit findet sich nicht im Zusammenhang der beiden Größen wieder, sondern zeigt sich vielmehr in Bereichen ihres „Nicht-Zusammenhangs“ (orange Punkte). In den vorhergehenden Jahren trat diese Anomalie zwar auf, konnte jedoch mit den momentan zur Verfügung stehenden Mitteln nicht dargestellt werden. Die Querschnitte erfüllten die getroffenen Parameter für die aktuelle Betrachtung der ersten Messfahrt des Jahres nicht.

Hierbei handelt es sich um Querschnitte, deren Gleislage maßgeblich von Wellen einer mittleren Länge dominiert werden, die jedoch hinsichtlich der normativen Gleislagebeurteilung kaum Auffälligkeiten zeigen. Genau jene Querschnitte zeigen einen Abschnitt des TUG-Netzes, der aufgrund stark fortgeschrittener Schotterzerstörung gereinigt werden musste. Ein vergleichbares Phänomen tritt auch zwischen SigmaH und Slope1 auf, während hingegen die Werte der Slope2 nahezu unberührt bleiben.

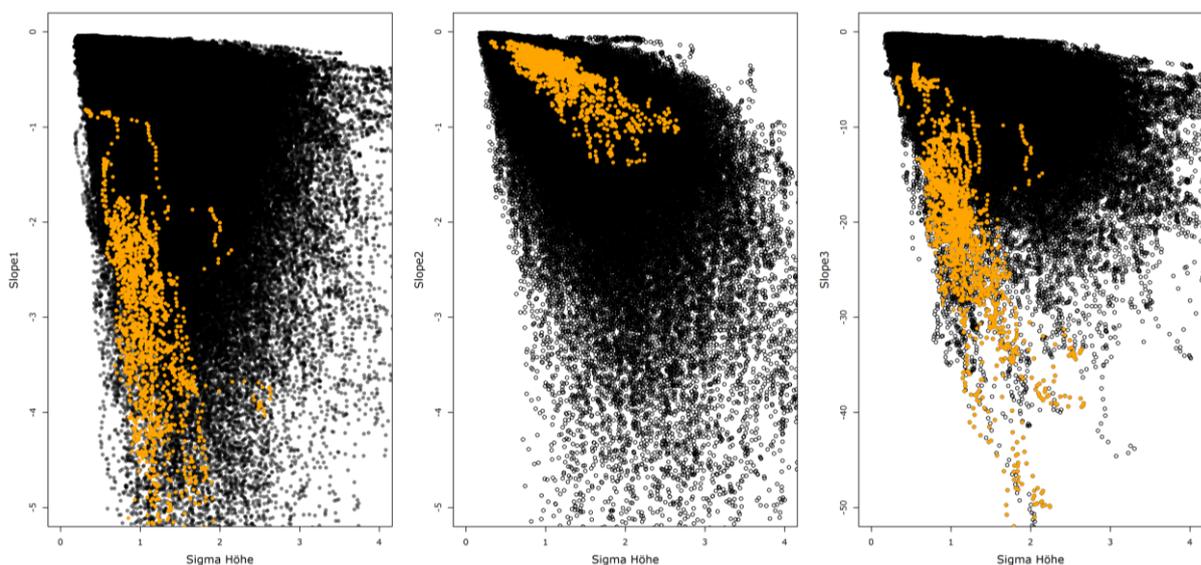


Abbildung 80 Anomalie des Zusammenhangs zwischen Standardabweichung Höhe und Slope3

3.6.5 Theorie trifft Praxis – Gleisbegehung

Im zweiten Schritt wurden, basierend auf den bisher gewonnen Erkenntnissen, Bereiche im TUG-Netz ausgewählt, die sich durch das Auftreten besonders hoher Fraktalwerte auszeichnen. Auf eben diesen Streckenabschnitten durchgeführte Gleisbegehungen dienen als stichprobenartige Validierung der Fraktalanalyse über die Erfassung die Anlagenzustandserfassung vor Ort. Die Analyse, die zur Auswahl der insgesamt sieben Bereiche führte, wird exemplarisch anhand des Fallbeispiels A dargestellt. Die detaillierten Auswertungen der anderen Beispiele werden im Rahmen dieses Kapitels ausgespart. Um dennoch einen Überblick über die einzelnen Fallbeispiele zu erlangen werden wesentliche Informationen zu den einzelnen Abschnitten in Tabellenform aufbereitet. Darin enthalten sind allgemeine Informationen, wie die aus der Schätzfunktion berechnete kumulierte Belastung, oder auch das durchschnittliche Stopfintervall seit 2005.

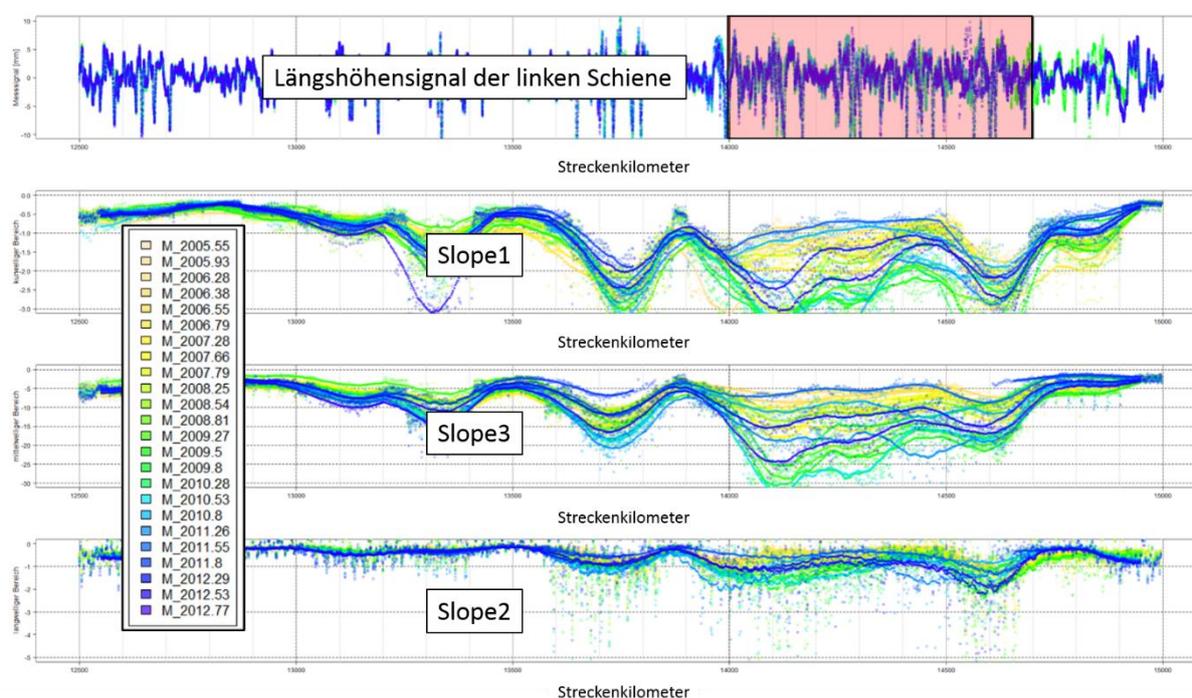


Abbildung 81 Detaillauswertung der Fraktalanalyse für die linke Schiene am Beispiel A

Weiterführend erlauben die Ergebnistabellen der einzelnen Projekte einen Einblick in die Verteilung der Qualitätssignale, Standardabweichung Höhe, Slope1, Slope2 und Slope3. Die angegebenen Werte repräsentieren jeweils den Mittelwert des Abschnittes seit dem Jahr 2005. In den Klammern wird zusätzlich zum Mittelwert die 75% Quartile angegeben. Die Werte erlauben so eine abschätzende Einstufung der Abschnitte hinsichtlich ihrer Gleislageentwicklung und erlauben gemeinsam mit den Bildern der Gleisbegehung eine stichprobenartige Validierung.

Abbildung 81 erlaubt einen schienengetreuen Überblick über die berechneten Werte der Fraktalanalyse für einen 2500 m langen Abschnitt (roter Bereich). In diesem konkreten Beispiel offenbaren Teilbereiche um den Kilometer 14,000 bis 14,700 im kurz- und mittelwelligen Bereich besonders hohe Werte. Bei einer Begehung vor Ort zeigte der Schotter deutliche Verschleißerscheinungen, die landläufig als „Weiße Spritzer“ bezeichnet werden und beispielhaft für eine fortgeschrittenen Schotterzerstörung stehen. Das Untersuchungsgebiet (Beispiel A) befindet sich in einem Bahnhofsbereich und weist das erwähnte Verschleißbild in regelmäßigen Abständen auf. Bei einer relativ geringen kumulierten Belastung von 193 Mio. Tonnen liegt der Schluss nahe, dass sich in diesem Fall der fortgeschrittene Schotterverschleiß auf die ungünstigen Rahmenbedingungen im Bahnhof zurückführen lässt und nur peripher von der Krafteinbringung getrieben wird.

Beispiel A			
Vorliegendes Stopfintervall: 3 a Kum. Belastung 2013: 193 Mio. t Begehungsdatum: 16. Juli 2013 StreckenKM: 14,000-14,700		Linke Schiene	Rechte Schiene
	Standardabweichung Höhe	1,14 mm (1,43 mm)	
	Slope1	-1,9 (-2,5)	-1,9 (-2,4)
	Slope2	-0,9 (-1,2)	-0,8 (-1,0)
	Slope3	-13,1 (-17,3)	-13,4 (-18,3)




Tabelle 4 Beispiel A

Auch wenn das Beispiel B (Tabelle 5) geringfügig erhöhte Werte der Slope3 aufweist, so dient es als Paradebeispiel für das Auftreten eines langwelligen Fehlers und seiner Ursache in der Realität [Hansmann, Landgraf 2013]. Äquivalent zu Beispiel A unterliegt auch dieser Streckenabschnitt einer geringen kumulierten Gleisbelastung. Trotz dieser geringen Belastung und den eingesetzten Holzschwellen wird der Abschnitt alle zwei Jahre einer Stopfmaßnahme unterzogen. Der auftretende einzelne weiße Spritzer steht für einen bereits fortgeschrittenen Verschleiß des Schotterbettes. Die hohen Werte im langwelligen Bereich der Fraktalanalyse, die Lage der Anlage im Abschnitt und der Bewuchs des Schotterbettes (Tabelle 5) legen den Schluss nahe, dass in diesem Abschnitt die Entwässerung des Oberbaus nicht mehr gewährleistet ist. Eine Reinigung des Schotterbettes, sowie die Wiederherstellung der Entwässerungsfähigkeit sind in diesem Abschnitt seitens des regional Zuständigen angedacht.

Beispiel B			
Vorliegendes Stopfintervall: 2 a Kum. Belastung 2013: 121 Mio. t Begehungsdatum: 17. Juli 2013 StreckenKM: 134,000-134,300		Linke Schiene	Rechte Schiene
	Standardabweichung Höhe	1,13 mm (1,43 mm)	
	Slope1	-1,0 (-1,1)	-1,1 (-1,2)
	Slope2	-2,1 (-2,7)	-1,9 (-2,51)
	Slope3	-6,1 (-8,1)	-6,7 (-8,9)
			

Tabelle 5 Beispiel B

Beispiel C (Tabelle 6) befindet sich im Bereich einer Überleitstelle mit einer Belastung von knapp 400 Mio. Tonnen pro Gleis. Die hohen Werte der Fraktalanalyse spiegeln sich deutlich im Anlagenzustand vor Ort wider. Deutlich weisen in diesem Fall nicht nur der Schotter, sondern auch schon einzelne Schwellen fortgeschrittene Verschleißzustände auf. Davon betroffen sind unter anderem auch die Schienenbefestigungen, deren Korrosion ein Anzeichen für die hohe dynamische Beanspruchung des Gesamtsystems ist.

Beispiel C			
Vorliegendes Stopfintervall: 3 a Kum. Belastung 2013: 385 Mio. t Begehungsdatum: 14. Okt. 2013 StreckenKM: 71,200-72,000		Linke Schiene	Rechte Schiene
	Standardabweichung Höhe	1,18 mm (1,51 mm)	
	Slope1	-2,3 (2,8)	-2,3 (-2,8)
	Slope2	-0,5 (-0,8)	-0,5 (-0,6)
	Slope3	-16,4 (-19,8)	15,8 (-18,4)
			

Tabelle 6 Beispiel C

Beispiel D			
Vorliegendes Stopfintervall: 2 a Kum. Belastung 2013: 579 Mio. t Begehungsdatum: 15. Okt. 2013 StreckenKM: 38,900-39,100		Linke Schiene	Rechte Schiene
	Standardabweichung Höhe	1,13 mm (1,47 mm)	
	Slope1	-1,6 (-1,9)	-1,6 (-2,0)
	Slope2	-0,7 (-0,8)	-0,8 (-0,9)
	Slope3	-13,3 (-16,5)	-14,3 (-17,9)






Tabelle 7 Beispiel D

Obwohl sich Beispiel D (Tabelle 7) und Beispiel E (Tabelle 8) hinsichtlich ihrer Ausdehnung nicht gänzlich decken, ist es doch ratsam sie gemeinsam zu betrachten. Beide treten im selben Streckenabschnitt nur auf unterschiedlichen Gleisen auf, und besitzen die annähernd gleiche kumulierte Belastung. Oberflächlich betrachtet ergeben sich die bereits bekannten weißen Stellen im Schotter. Nach dem Ausheben des Zwischenfaches ließ sich eine starke Zerstörung der Schwellenunterkante (Abrundung), sowie ein hoher Anteil von Feinteilen, zumindestens im oberen Bereich des Schotteroberbaus, erkennen. Der gesamte Abschnitt wurde im Jahr 2013 nach der Begehung vor Ort einer Schotterbettreinigung unterzogen.

Die Freilegung des Zwischenfaches brachte im Fall des Beispiels E bei der Begehung überraschenderweise ein vollkommen intaktes Schotterbett ans Licht. Grund dafür war eine im Untersuchungsgebiet zwei Monaten davor durchgeführte Schotterbettreinigung, welche im Rahmen der Messsignalanalyse noch nicht berücksichtigt werden konnte. Der gereinigte Schotter konnte neben der Strecke noch fotografiert und näher betrachtet werden (siehe Tabelle 8).

Beispiel E			
Vorliegendes Stopfintervall: 2 a Kum. Belastung 2013: 578 Mio. t Begehungsdatum: 15. Okt. 2013 StreckenKM: 38,100-39,100		Linke Schiene	Rechte Schiene
	Standardabweichung Höhe	1,14 (1,47)	
	Slope1	-1,5 (-1,8)	-1,5 (-1,8)
	Slope2	-0,6 (-0,8)	-0,6 (-0,8)
	Slope3	-13,3 (-16,4)	-13,3 (-16,4)






Tabelle 8 Beispiel E

Beispiel F			
Vorliegendes Stopfintervall: 3 a Kum. Belastung 2013: 218 Mio. t Begehungsdatum: 15. Okt. 2013 StreckenKM: 163,700-164,500		Linke Schiene	Rechte Schiene
	Standardabweichung Höhe	1,12	
	Slope1	-1,4 (-1,74)	-1,4 (-1,7)
	Slope2	-0,4 (-0,5)	-0,5 (-0,6)
	Slope3	-8,0 (-9,9)	-7,9 (-9,8)





Tabelle 9 Beispiel F

Beispiel F verdeutlicht die Gefahren, die sich unter anderem aufgrund fortgeschrittener Schotterzerstörung ergeben können. Die Zerstörung des Schotters reduziert die Elastizität des Gesamtsystems, womit die Schwelle steigenden Belastungen ausgesetzt ist.

Diese Belastung führt schlussendlich zum Versagen des Systems und zum Bruch der Schwelle oder der Schiene. Die Bilder stammen aus einem Bereich, in dem die Werte der kurz- und mittelwelligen Dimension weit über dem Durchschnitt des Gesamtabschnittes zu liegen kommen (164,150 km) und sollen so lediglich als Beispiel für das Auftreten eines Extremfalls dienen. Auffällig für diesen Bereich sind im gesamten Abschnitt rapide Verschlechterungen der Slope3.

Für das letzte Beispiel wurde absichtlich ein Bereich gewählt, der zwar nach wie vor erhöhte Fraktalwerte aufweist, deren Ausprägung allerdings geringer ist als in den vorangegangenen Bereichen. Im vorliegenden Untersuchungsgebiet treten singular begrenzt bereits weiße Stellen im Schotter auf. Der Schotter unter der Schwellenunterkante weist einen deutlich erhöhten Feinkornanteil auf (siehe Tabelle 10). Mittelfristig wird es notwendig sein den, vorliegenden Abschnitt zu reinvestieren bzw. das Schotterbett auszutauschen. Dennoch ist die Schotterzerstörung noch nicht auf dem Niveau der vorhergehenden Beispiele angelangt. Diese Tatsache lässt sich in den Werten der einzelnen Dimensionen wiederfinden. Zum ersten Mal im Rahmen dieser Ergebnisdiskussion nimmt die linke Schiene in der mittelwelligen Dimension deutlich höhere Werte an, als die rechte Schiene. Da die vorhergehenden Auswertungen bestätigten, dass dieser Fall nicht die Regel darstellt wird auf die nähere Analyse weiterführend verzichtet. Ob der Grund für diesen Unterschied auch in der Bogenlage des Abschnitts zu suchen ist, werden zukünftige Forschungsarbeiten zeigen.

Beispiel G			
Vorliegendes Stopfintervall: 5 a Kum. Belastung 2013: 439 Mio. t Begehungsdatum: 17. Juli 2013 StreckenKM: 3,900-4,300		Linke Schiene	Rechte Schiene
	Standardabweichung Höhe	1,18	
	Slope1	-1,0 (-1,1)	-0,7 (-0,8)
	Slope2	-0,3 (-0,4)	-0,3 (-0,3)
	Slope3	-5,0 (-6,0)	-3,6 (-4,3)




Tabelle 10 Beispiel G

Sowohl die Analyse der Reinigungseinsätze der letzten fünf Jahre, als auch die stichprobenartige Überprüfung der Ergebnisse im Rahmen von Gleisbegehungen, bestätigen den Zusammenhang zwischen der Schotterzerstörung und den Werten der Slope1 und

Slope3. Da die kurzweilige Dimension Gefahr läuft, zusätzlich von Schienenoberflächenfehlern und einem Grundrauschen des Messsystems beeinflusst zu werden, konzentrieren sich die Auswertungen in weiterer Folge auf die Analyse des mittelweiligen Bereichs, ohne jedoch die Werte der kurzweiligen Dimension ganz außer Acht zu lassen.

3.6.6 Aufbau eines Regressionsmodells und seine Möglichkeiten

Nach der Untersuchung der Auswirkungen der Schotterbettreinigung auf die Fraktalanalyse stellt sich die Frage, wie die Fraktalwerte auf die Durchführung einer Stopfmaßnahme reagieren. Um dies beantworten zu können, ist es notwendig, den zeitlichen Verlauf der Dimensionswerte am Querschnitt zu beschreiben und mögliche sprunghafte Verbesserungen zu detektieren. Im Anschluss daran erlaubt der Vergleich der detektierten Verbesserungen mit den real umgesetzten Stopfeinsätzen die Beantwortung. Diese Vorgehensweise wurde beispielhaft an zwei Strecken des TUG-Netzes umgesetzt. Der angestrebte Vergleich umfasst 250 Gleiskilometer, die in den letzten Jahren sowohl gestopft, als auch partiell gereinigt wurden. Die Betrachtung der Zeitreihe am Querschnitt erlaubt außerdem die Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und zielt nur sekundär darauf ab, funktionell das Verhalten detailliert zu beschreiben. Nachdem die Anpassung der Funktion kein erklärtes Ziel dieser Arbeit ist, kann zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung hinlänglich genau ein lineares Modell angenommen werden.

Die Zeitreihenanalyse erfolgt über einen Algorithmus, der im Laufe dieser Arbeit noch näher beschrieben wird und den Namen ProgMod trägt. Die Aufgabe von ProgMod ist die Erkennung von sprunghaften Änderungen im zeitlichen Verlauf einer statistischen Kennziffer, sowie die Identifikation und das Eliminieren von Ausreißern. Im Falle der Fraktalanalyse bedient sich der Algorithmus eines einfachen Schwellenwerts 4 und vergleicht diesen mit den ermittelten Differenzen zweier aufeinanderfolgender Messfahrten. Dieser Schwellenwert stammt einerseits aus stichprobenartigen Betrachtungen von einzelnen Zeitreihen und orientiert sich außerdem an den Werten der Standardabweichung über die Zeit. Abbildung 82 zeigt deutlich, dass Streuungen von bis zu 3, im Falle von Zeitreihen durchaus der Regel entsprechen. Die Wahl eines zu geringen Grenzwertes erscheint demzufolge wenig sinnvoll und generiert auch die Gefahr, dass Zeitreihen bedingt durch ihre natürliche Streuung ohne Instandhaltungsmaßnahmen unterteilt werden. Wenn das berechnete Regressionsmodell nachfolgend zu irreführenden Aussagen führt, wird der Grenzwert weiter abgesenkt und die Auswirkungen auf die Ergebnisse werden näher untersucht. Überschreitet ein Messpunkt diesen Schwellenwert mit seiner Differenz zum vorhergehenden, sowie nachfolgenden Messwert, so wird er als Ausreißer markiert und von der weiteren Betrachtung ausgenommen. Überschreitet die Differenz nur einseitig den Schwellenwert,

so wird zwischen den beiden Messfahrten eine Maßnahme gesetzt und die Regression startet mit der nächsten Messfahrt neu.

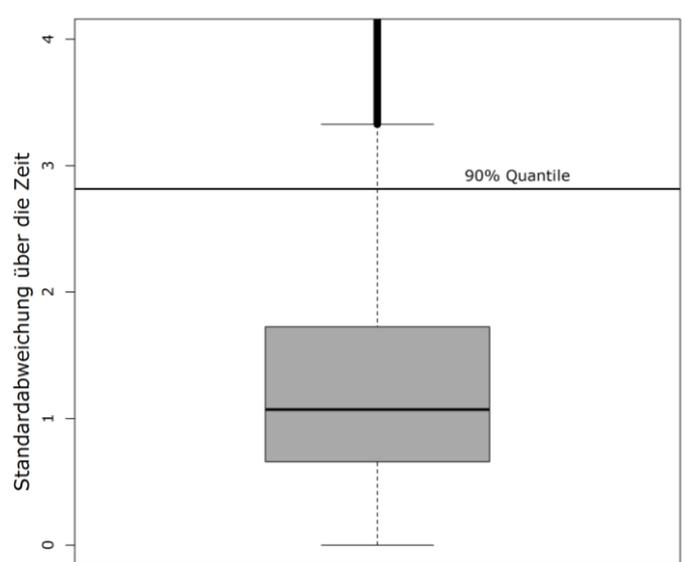


Abbildung 82 Querschnittstreu berechnete Standardabweichung über die Zeit der Slope3

Nur die Mitberücksichtigung eines Regressionsmodells erlaubt es, den Effekt der „kontrollierten“ Verschlechterung zu erfassen. Solange der Einfluss von Instandhaltungsmaßnahmen auf die Werte der Fraktalanalyse nicht näher geklärt ist, würde selbst eine Gegenüberstellung des zeitlichen Variationskoeffizienten mit bestehenden Qualitätssignalen, als Überprüfung ihrer Reproduzierbarkeit, kaum sinnvoll erscheinen.

In einem ersten Schritt gilt es, die Gültigkeit des Regressionsmodells nachzuweisen. Unter der mehrfach bestätigten Annahme der Korrelation zwischen der Slope3 und dem vorliegenden Schotterverschleiß, müsste die Berechnung eines Regressionsmodells zu einer mehrheitlich negativen Steigung auf den betrachteten Strecken führen. Die Betonung eines mehrheitlich auftretenden Effekts mag dem ersten Anschein nach seltsam klingen, beruht allerdings auf der Tatsache, dass in dieser Analyse nicht zwischen dem freien Streckengleis und potentiellen Störstellen unterschieden wird. Störstellen weisen oftmals nicht nur besondere Instandhaltungsmaßnahmen auf, sondern tendieren außerdem zu komplexem Verhalten, deren Beschreibung über die Grenze dieser Arbeit hinausgeht. Tatsächlich nimmt die Steigung der Regressionsgeraden, wie das Beispiele der Strecke 3 und 4 zeigt, in 75 % der Fälle negative Werte an und folgt somit dem erwarteten Verlauf. Abgesichert über die Anordnung der 90% Quantile, knapp über Null, erlaubt das Regressionsmodell die geforderte Beschreibung der Verschlechterung der mittelwelligen Dimension.

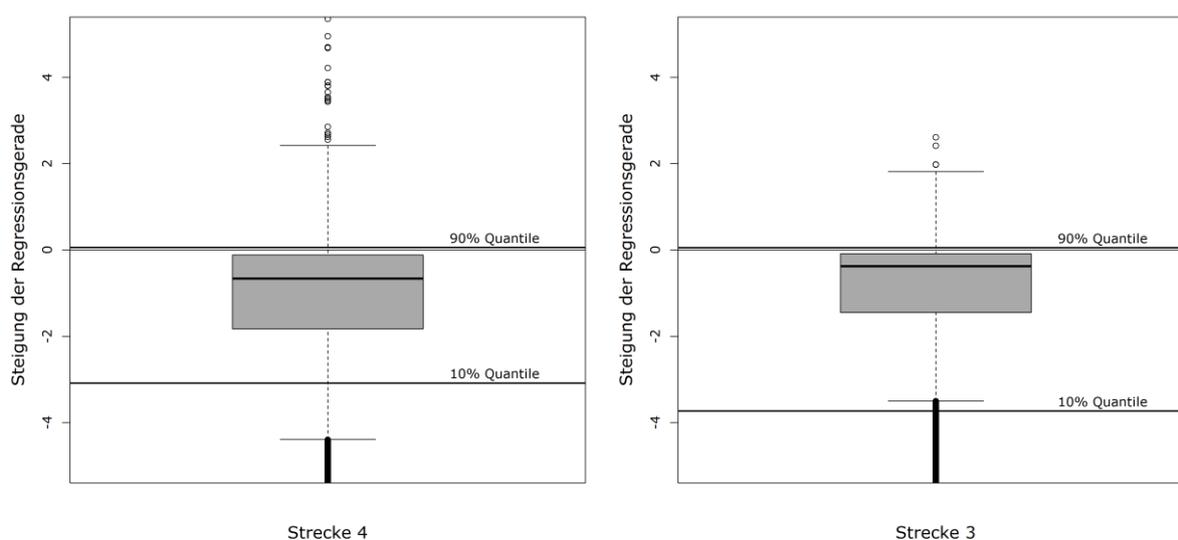


Abbildung 83 Gegenüberstellung der berechneten Steigungen des Regressionsmodells zur Abschätzung der zeitlichen Entwicklung der Slope3 am Querschnitt

Trotz des sehr einfach gewählten Modellaufbaus ergeben die absoluten mittleren Abweichungen vom berechneten Regressionsmodell, vergleichbar mit den Schwankungen zwischen der linken und rechten Schiene (Abbildung 74), geringe Werte. Sieht man diese Abweichungen in Relation mit den vorangegangenen Auswertungen, so lassen sich die vorliegenden Abweichungen aufgrund ihrer Größe vernachlässigen.

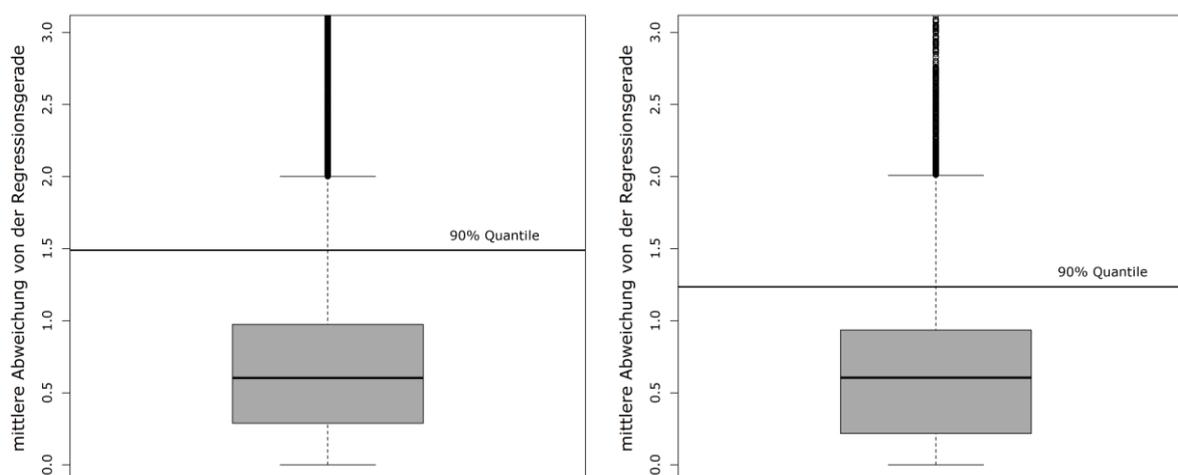


Abbildung 84 Verteilung der absoluten, mittleren Abweichungen der einzelnen Messfahrten von der Regressionsgeraden im Falle des mittelwelligen Sektors der linken Schiene links: Strecke 4 rechts: Strecke 3

Nachdem die vorhergehenden Auswertungen die Zuverlässigkeit des Regressionsmodells bestätigen, dient es als Grundlage für die Überprüfung der Auswirkungen von Stopfmaßnahmen auf den mittelwelligen Sektor. Der Algorithmus ProgMod erlaubt die Identifikation von sprunghaften Änderungen im Verhalten eines Qualitätssignals, ohne diesen eine konkrete Ursache zuzuordnen. Die Existenz eines Zusammenhanges zwischen diesen sprunghaften Änderungen und der Durchführung eines Stopfeinsatzes kann über

eine stichprobenartige grafische Überprüfung erfolgen, ebenso wie auch über einen querschnittsgetreuen Vergleich zwischen der Anzahl der real umgesetzten Stopfeinsätze und der durch den Algorithmus bestimmten Einsätze. Die beiden ermittelten Größen unterscheiden sich deutlich voneinander. Tendenziell werden bei der Slope3 zu wenig Stopfeinsätze über Sprünge im Verhalten erkannt, während hingegen Schotterbettreinigungen die Entwicklung deutlich beeinflussen.

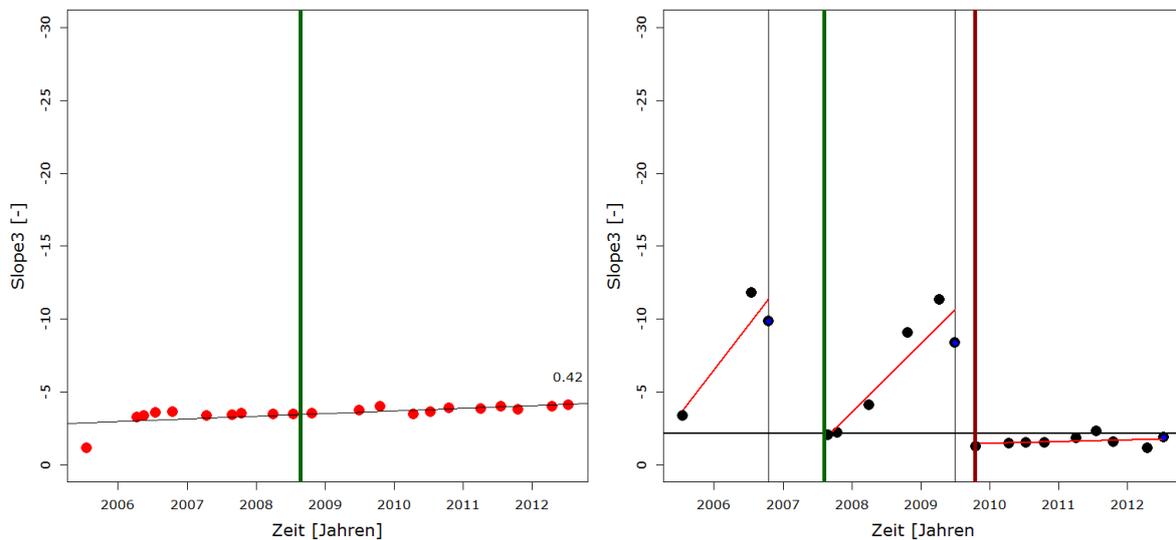


Abbildung 85 Ergebnis des ProgMod-Algorithmuses links: keine Verbesserung der Slopewerte durch einen Stopfeinsatz (grün) rechts: Verbesserung der Slopewerte durch einen Stopfeinsatz (grün) und Reinigungseinsatz (rot)

An dieser Stelle sei ergänzend angemerkt, dass der Algorithmus nur dann Maßnahmen detektieren kann, wenn vor und nach dem Durchführungszeitpunkt entsprechende Messfahrten vorhanden sind. Liegen die Messfahrten so weit auseinander, dass zwischen den Messfahrten durch die Verschlechterung wieder ein ähnliches Gleislageniveau erreicht wird, wäre es dem Algorithmus unmöglich, einen Einsatz zu setzen. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurden Strecken gewählt, die sich durch ein langes Stopfintervall auszeichnen. Stichprobenartige Überprüfungen des Algorithmus zeigen, dass eine Verbesserung der Slope3 durch einen Stopfeinsatz vor allem bei sehr großen Steigungen eintritt. Es kann kein genauer Grund für die teilweise Verbesserung der fraktalen Dimension bestimmt werden. Ob die Verbesserung an der Art des Stopfeinsatzes selbst liegt (z.B. beeinflusst durch die Menge des zugegebenen Neuschotters) oder Indiz für die Ausführungsqualität desselben ist, sollte Teil zukünftiger Forschungsarbeiten sein.

Der vergleichsweise geringe Einfluss von Stopfeinsätzen auf die Slope3 ermöglicht die Entwicklung der Werte über die Nutzungsdauer zu betrachten, ohne die Auswertung auf Qualitätswerte zu beschränken (siehe Abbildung 86). Eine derartige Auswertung wäre für die konventionelle Gleislageanalyse kaum zielführend. Zu sehr würden die Qualitätssignale durch die durchgeführten Instandhaltungstätigkeiten springen. In die Abbildung

gehen über das Jahr gebildete Medianwerte ein, wodurch die Stichprobe gegenüber den ursprünglich verwendeten ersten Messfahrten des Jahres erhöht wird. Diese Auswertungen beschreiben so knapp 75% des Netzes.

Es zeigt sich eine annähernd lineare und ungestörte Verschlechterung der Werte mit steigender Belastung. Für die Darstellung wurden Holzschwellen und Neulagen nach 2011 von der Betrachtung ausgeschlossen. Außerdem wurde, um zu verhindern, dass die Boxplots über die Berücksichtigung lokaler Spezifika einseitig verzerrt werden, die Anzahl der notwendigen Werte für ihre Darstellung mit 2.000 je kumulierte Belastungsgruppe festgesetzt.

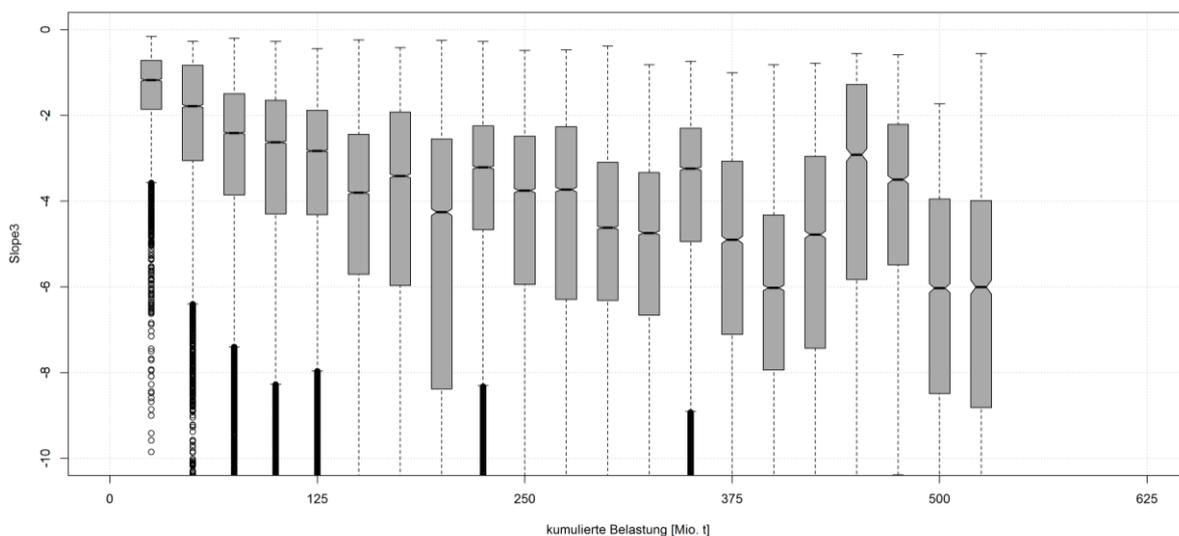


Abbildung 86 Entwicklung der Slope3 (jährliche Medianwerte) über die kumulierte Belastung im Fall von Betonschwellen

Drei der dargestellten Boxplots kommen deutlich oberhalb des erkennbaren Trends zu liegen. Eine nähere Betrachtung ihrer Wertezusammensetzung zeigt, dass sie maßgebliche von lediglich einem zusammenhängenden Streckenabschnitt einer TUG-Strecke beeinflusst werden. Ihr anderes Verhalten lässt sich zwar nicht eindeutig begründen, allerdings ermöglicht dieses Faktum und ihre klare einseitige, geografische Zuordnung ihre Identifikation als Ausreißer. Im Median erreichen Betonschwellen kurz vor ihrem Ausbau einen Slope Wert von -6, 25% von ihnen liegen aber bei -8.

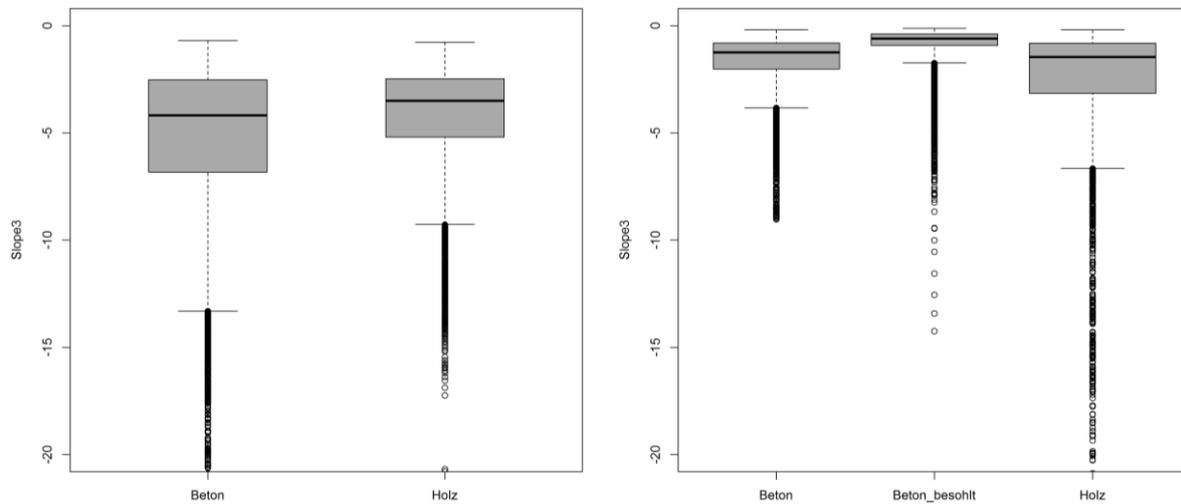


Abbildung 87 Ausprägung der mittelwelligen Dimension im Falle von unterschiedlichen Schwellentypen vor (links) und nach (rechts) einer Neulage

Im Rahmen der Betrachtung von Re-Investitionsprojekten und ihrer Ausbauqualität zeigt sich im Vergleich zu den vorrangegangenen Gleislageauswertungen ein konträres Bild. In der Grundausswertung der Standardabweichung Höhe (siehe Abbildung 25) weisen Holzschwellen sowohl vor, als auch nach der Neulage eine schlechtere Gleislagequalität als Betonschwellen auf. Eine Untersuchung zeigte, dass dieser Effekt über die Filterung eines spezifischen Geschwindigkeitsintervalls verschwindet. In der Gegenüberstellung der Slopewerte (siehe Abbildung 87) vor und nach der Neulage, weisen Holzschwellen bereits ohne Filterung vor der Neulage, ein besseres Niveau auf. Es liegt somit der Schluss nahe, dass im TUG-Netz Gleisanlagen mit Holzschwellen augenscheinlich mehrheitlich nicht aufgrund einer fortgeschrittenen Schotterzerstörung ausgebaut werden. Es muss daher noch einen anderen Grund für die Re-Investition dieser geben. Ein ähnliches Bild ergeben auch die Werte der Betonschwelle, wengleich diese Werte deutlich weiter streuen. Unabhängig davon, welche Qualitätssignale der Gleislage betrachtet werden – es zeigen sich immer die positiven Eigenschaften der Schwellenbesohlung.

Prinzipiell präsentieren sich die Slopewerte über die Jahre (siehe Abbildung 88) mit wenigen Ausnahmen als mehr oder weniger stabil. Die Auswirkungen der Reinigungseinsätze auf der Strecke 4 lassen sich in der Entwicklung der spezifischen Werte erkennen. Deutlich bildet sich allerdings zwischen den Strecken ein Unterschied aus. Während gewisse Strecken unter dem netzweiten Medianwert zu liegen kommen – dieser ist als schwarzer Strich erkenntlich – weisen andere Strecken deutlich höhere Werte auf. Einige von ihnen liegen sogar mit ihrem 75% Quartil über dem netzweiten Median. Ob sich diese Unterschiede auf die höhere oder niedrigere kumulierte Belastung zurückführen lassen oder darauf, dass die Qualität des Schotters trotz vereinheitlichter Anforderungen dennoch streut, lässt sich aufgrund dieser Auswertung nicht bestimmen. Eindeutig lassen sich über

die Auswertung jedoch regionale Schwerpunkte für zukünftige Maßnahmen, wie Schotterbettreinigungen oder Re-Investitionen setzen.

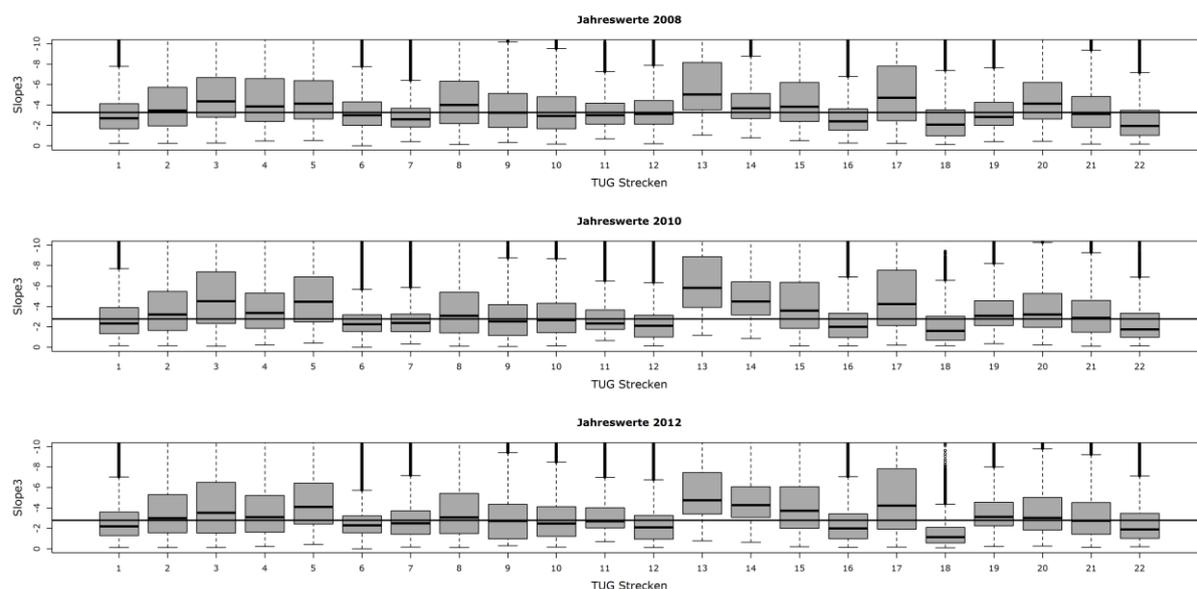


Abbildung 88 Streckenspezifische Entwicklung der Dimensionswerte (Slope3) in den Jahren 2008, 2010 und 2012

Die Auswertung des Algorithmus ProgMod auf der Strecke 4 erlaubt einen kurzen Einblick in das Potential einer detaillierten Zeitreihenanalyse. Zusätzlich zu der Information des aktuellen Schotterzustandes ist es möglich, über die Extrapolation der Regressionsgerade die Entwicklung zu prognostizieren. Die Prognose etabliert so eine Bewertung der Substanz des Schotters. Bei der Betrachtung der Darstellung (siehe Abbildung 89) gilt es zu beachten, dass etwaige Neulagen nach dem Bezugsjahr 2012 nicht berücksichtigt werden. Wird der Schotter einer Anlage in den nächsten Jahren gewechselt oder gereinigt, beginnt ein neuer Lebenszyklus, der in dieser Betrachtung keinen Eingang mehr findet. Die Darstellung der gesamten Bandbreite des Ergebnisses mitunter bis zum Jahr 95 soll auf keinen Fall das Bild einer äquivalent erreichbaren Nutzungsdauer vermitteln. Vielmehr verdeutlicht die direkte Darstellung der Ergebnisse, dass in diesem Fall die Schotterzerstörung nicht zentraler Auslöser für eine Neulage ist. Wie bereits andere Auswertungen gezeigt haben, beeinflusst in diesen Bereichen offensichtlich eine andere Komponente die Nutzungsdauer der Anlage maßgeblich. Unter der Prämisse der Prognosegenauigkeit wäre eine Abschätzung von Maßnahmen über die nächsten 10 bis 20 Jahre hinaus wenig zielführend, vor allem, da der Einfluss von Stopfeinsätzen noch nicht gänzlich bewertet werden kann. Hierbei handelt es sich um ein für die betrachtete Strecke 4 charakteristisches Bild. Andere Strecken können je nach Alter der vorliegenden Gleisanlagen oder Schwellentyp andere Ausprägung der Werte aufweisen.

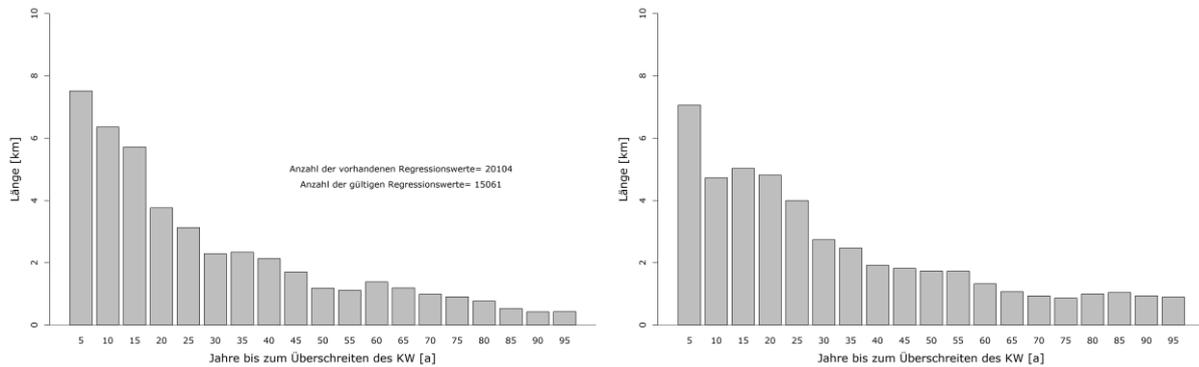


Abbildung 89 Anwendung des Prognosemodells zur Abschätzung der Restsubstanz des Schotterersatzes links: kritischer Wert = -8 rechts: kritischer Wert = -10

Das fehlende netzweite Prognosemodell macht es notwendig, die Bewertung der Schotterzerstörung im Rahmen der Fraktalanalyse über Qualitätssignale vorzunehmen. Eine detaillierte Unterteilung in Qualitätsklassen, wie sie im Rahmen der klassischen Gleislageanalyse umgesetzt wurde, ist dafür so nicht angedacht. Um dennoch für das übrige Netz eine Zustandserfassung zu etablieren, werden für die Bewertung über das Jahr gebildete Medianwerte verwendet. Diese Medianwerte sollen verhindern, dass die Bewertung aufgrund einzelner Messausreißer verzerrt wird. Der Einfluss möglicher, im Laufe des Jahres durchgeführter Instandhaltungsmaßnahmen wird im Rahmen dieser Betrachtung wesentlich vernachlässigt. Das Jahr 2012 wird als Bezugsjahr herangezogen.

Überschreiten die jährlichen Medianwerte den kritischen Wert -8 wird der Querschnitt gekennzeichnet, eine Maßnahmenplanung in den folgenden Jahren ist anzuraten.

3.6.7 Zusammenfassung und Ausblick

Zentraler Bestandteil des Kapitels über die Fraktalanalyse ist die Prüfung der Möglichkeit, charakteristische Signalformen der Gleislage spezifischen Schadensformen zuzuordnen. Die Fraktalanalyse schafft die Möglichkeit, die Signalcharakteristik der Gleislage in reproduzierbarer Art zu erfassen und netzweit auszugeben. Die Prüfung der Möglichkeit, basierend auf diesen Werten die Schotterzerstörung zu beschreiben, zeigt durchwegs gute Ergebnisse. Die Auswertungen der Reinigungseinsätze und Re-Investitionsprojekte der letzten Jahre verifizierten die über Gleisbegehungen gewonnen Erkenntnisse und bestätigten die von Hyslip aufgestellte Annahme der Korrelation zwischen der Schotterzerstörung und den Werten der mittelwelligen Dimension der Fraktalanalyse.

Die Fraktalanalyse versteht sich nicht als Ersatz für die normative Gleislagenanalyse, sondern eher als eine Ergänzung zu ihr. Der Bereich des kurz- und langwelligen Sektors wurde im Rahmen dieser Arbeit nur gestreift und bedarf noch weiterer Analysen, bevor

er im Rahmen einer Zustandsermittlung Eingang in ein mesdatengestütztes Anlagenmanagement finden kann.

Auch wenn die Entwicklung der Slope3 über die kumulierte Belastung bereits zu stabilen Ergebnissen führt, beinhaltet der unterschiedliche Einfluss von Stopfeinsätzen offene Fragestellungen. Das Prognosemodell erlaubt die Bestimmung der Restsubstanz des Schotterbettes, sofern diese durch die Schotterzerstörung aufgrund der eingebrachten Last begrenzt wird. Diese Substanzerfassung erlaubt die mittelfristige Planung von Einsätzen und bildet so eine mögliche Grundlage für die Planung des Mitteleinsatzes.

Eine Erweiterung der Fraktalanalyse auf z.B. die Richtungslage und die Beantwortung offener Fragestellungen birgt Potential für weitere Forschungsarbeiten. Offene Fragestellungen ergeben sich beispielhaft wie folgt:

- I Wie lässt sich der Unterschied der Auswirkungen einzelner Stopfeinsätze auf die Fraktalanalyse erklären?
- I Welche Informationen lassen sich aus der kurzwelligen Dimension gewinnen?
- I Lassen sich aus der Richtungslage Informationen zur Stabilität von Dammlagen gewinnen?
- I Bergen zusätzliche Parameter des Richardson Plot, Möglichkeiten für noch eine detaillierte Zustandsbeschreibung?
- I Welchen Mehrwert bietet die Analyse der Differenz zwischen den beiden Schienensträngen?

4 Dem Schwellenzustand auf der Spur

Die Auswertungen der Gleisgeometrie zeigten, dass für eine Re-Investition nicht immer die Gleislage selbst die Ursache ist. Holzschwellen weisen eine signifikant niedrigere Nutzungsdauer (in kumulierten Tonnen) als Betonschwellen auf, obwohl sie sich hinsichtlich ihres Gleislageverhaltens weitaus schonender präsentieren. Unter der Annahme, dass sich Schotter- und Unterbauzustand in der Gleislage widerspiegeln, ist der Grund für den Ausbau von Holzschwellen demnach in einer anderen Komponente zu suchen.

Der Schienenverschleiß bzw. das Auftreten von Schienenoberflächenfehlern führt zwar früher oder später zu einem Tausch der Schiene –der Außen- und/oder Innenschiene –, diese bedingt jedoch alleinig nur selten die Re-Investition der Anlage. Eine Re-Investition des Gleises ist nur dann notwendig, wenn zusätzlich zur Schiene auch die anderen Komponenten fortgeschrittenen Verschleiß aufweisen und so die Restsubstanz der gesamten Anlage limitiert wird. Ein Schientausch ist im Rahmen eines nachhaltigen, auf Lebenszykluskosten basierenden Anlagenmanagements zielführend, wenn die Restnutzungsdauer der übrigen Komponenten ausreicht um die jährlichen Kosten der Anlage wieder auf das Niveau vor dem Schienenwechsel zu bringen. Anders ausgedrückt: Ein Schientausch ist im System nur dann zielführend, wenn die übrigen Komponenten ausreichend Nutzungsdauer akquirieren können, so dass ein Gesamttausch der Anlage gegenüber dem Schientausch zu Mehrkosten führt. Ein Schientausch kann somit zwar zur Re-Investition einer Anlage führen, löst diese jedoch nur indirekt aus.

Die Schwellen dienen im Eisenbahnoberbau in erster Linie zur Herstellung und Aufrechterhaltung der Spurweite, zum Festhalten der Schiene und zur Lastverteilung (vgl. [Lichtberger 2010]). Sie unterliegen hohen Beanspruchungen und begrenzen durch die hohen Kosten, die ein Einzelschwellenwechsel verursacht, maßgeblich die Nutzungsdauer der gesamten Anlage.

Aufgrund der heute noch zulässigen Imprägnierungsmöglichkeiten von Holzschwellen spielt die biologische Zerstörung nur eine untergeordnete Rolle, wenngleich sie im Fall einer Rissbildung maßgeblich zum Ende der technischen Nutzungsdauer beitragen kann. Holzschwellen tendieren dazu, über die Ausweitung der Befestigungslöcher und Risse in der Schwelle den nötigen Kraftschluss nicht mehr sicherstellen zu können. Das Einpressen der Rippenplatten in die Schwellensubstanz trägt zusätzlich dazu bei. [Schultheiß, Schulz 1985]

Betonschwellen weisen hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber den eingebrachten Lasten auf, geben diese jedoch über eine geringere Fläche (verglichen mit Holzschwellen)

an den Schotter weiter. Die Folge ist eine stärkere Schotterzerstörung, die durch das höhere Gewicht der Betonschwellen und die geringere Elastizität weiter forciert wird.

Wenngleich Betonschwellen eine hohe Widerstandsfähigkeit aufweisen, so tendieren vor allem früher eingebaute Schwellentypen durch zu gering gewählte Vorspannkräfte zur Rissbildung. Diese führt schlussendlich zum notwendigen Wechsel der Betonschwellen [Auer 2010]. Bei den aktuell in Österreich standardmäßig eingesetzten Schwellentypen treten diese Schädigungsbilder selten auf, sofern die Zwischenlagen rechtzeitig getauscht werden und so eine nachhaltige Schädigung des Schienenaufagers verhindert werden kann.

4.1 Einleitung

Das nachfolgende Kapitel legt das Hauptaugenmerk auf die kontinuierliche Beschreibung der Interaktion zwischen Schwelle und Schiene bzw. des Schwellenzustandes. Eine Betrachtung der aktuellen Zugänge zu dieser Thematik lässt unterschiedliche Möglichkeiten der Bestimmung des Komponentenzustandes erkennen.

Auf der einen Seite zeigen Forschungsarbeiten auf, dass es möglich ist über die automatisierte Analyse von hochaufgelösten Bildern Risse in Holzschwellen [Yella, Dougherty & Gupta 2009] genauso festzustellen, wie das singuläre Fehlen von Befestigungsmaterial bei Betonschwellen [Terashima et al. 2011]. Über den Verschleiß der Zwischenlage erlaubt diese Auswertemethodik jedoch keinerlei Rückschlüsse. Die vorliegende Arbeit zielt darauf ab, mit den bestehenden Messsignalen ein Maximum an Information über den vorliegenden Anlagenzustand und seine Entwicklung zu generieren. Die beschriebenen Aufnahmen werden in Österreich momentan nicht netzweit erhoben, weshalb diese Möglichkeit der Zustandserfassung nicht weiter ausgeführt wird.

Auf der anderen Seite führt die Auswertung der vorliegenden Schienenneigung bzw. ihrer zeitlichen Entwicklung zu aufschlussreichen Ergebnissen. Eine Abschätzung eines notwendigen Zwischenlagenwechsels ist über diese Analyse ebenso möglich, wie auch eine Bestimmung des Einpressens der Rippenplatte in die Holzschwelle. Die Messung der Schienenneigung ist direkt an die Schienenprofilmessung gekoppelt und erlaubt eine Bestimmung der schienengetreu vorliegenden Neigung des Profils. Aus der Erfahrung ergibt sich eine außenseitige Zwischenlagendicke von 2 mm als optimaler Zeitpunkt, die Zwischenlage zu tauschen. Umgelegt auf die eingesetzten Schienenprofile bedeutet, pauschal formuliert, eine Überschreitung des Werts Null so einen notwendigen Tausch der Zwischenlage. (vgl. [Auer 2005])

Restdicke Zwischenlagenrand in Abhängigkeit der gemessenen Schienenneigung														
Profil	Fußbreite	Schienenhöhe		1/40	1/80	1/160	0	- 1/160	- 1/80	- 1/40	- 1/20	- 1/10	Tangens	Schienenneigung
60 E1	150 mm	172 mm		6	4.1	3.2	2.3	1.3	0.4	-1.5	-5.3	-12.8	mm	Restdicke Zw
54 E2	125 mm	151 mm		6	4.4	3.7	2.9	2.1	1.3	-0.3	-3.4	-9.6	mm	Restdicke Zw
49 E1	125 mm	149 mm		6	4.4	3.7	2.9	2.1	1.3	-0.3	-3.4	-9.6	mm	Restdicke Zw

Abbildung 90 Wirksame Zwischenlagendicke an der Außenseite in Relation zur Schienenneigung [Auer 2010]

Ist es der Schienenprofilmessung allerdings nicht möglich, das Profil zu erkennen, bleibt auch die Messung seiner Neigung aus. Um in diesem Fall dennoch Informationen über den Zustand zu erlangen und die aus der Schienenneigung gewonnenen Erkenntnisse zusätzlich abzusichern, ist es sinnvoll, die Bewertung zu erweitern. Außerdem zeigt die Messung der Schienenneigung vor allem in ihrer zeitlichen Reproduzierbarkeit teilweise Schwächen und unterliegt erkennbaren Streuungen. Die Erweiterung soll so unter anderem der Absicherung der Ergebnisse dienen, ohne jedoch neue Messsysteme zu etablieren.

Fest steht, dass über die eingebrachten Lasten die Komponenten einem Verschleiß unterliegen. Egal, ob in der Geraden oder im Bogen, gibt das Gesamtsystem unter Belastung nach, um anschließend wieder in die Ausgangslage zurückzukehren. Über die ansteigenden Verkehrslasten nehmen die Bewegungen des Systems zu und die Ausgangsposition verschlechtert sich immerfort. Eine Rückkehr in die ursprüngliche Position ist je nach Beanspruchung nicht mehr bzw. nur noch teilweise möglich. Stichprobenartige Auswertungen verdeutlichen den Umstand, dass sich diese Bewegung im kurzweiligen Rauschen der Spur widerspiegelt. Netzweite Auswertungen sollen folglich klären, ob es möglich ist, über die Rauigkeit des Spursignals Informationen über den Komponentenzustand zu generieren.

Durch den Verschleiß des Schienenprofils, die Einpressung der Rippenplatte und die horizontale Verschiebung des Schienenfußes unterliegt die Spurweite im Bogenbereich einer Erweiterung. Die Spurweite wird vom Messwagen am verschlissenen Profil 14 mm unter der Schienenoberkante gemessen [Österreichisches Normungsinstitut 2009]. Ein Schienentausch reduziert zwar die Spurerweiterung in den meisten Fällen, führt aber zu keiner Wiederherstellung des Ausgangszustandes, da die Spurerweiterung von unterschiedlichen Parametern beeinflusst wird. Diese starke Abhängigkeit der Spurweite von unterschiedlichen Einflüssen macht eine automatisierte Auswertung nahezu unmöglich. Lediglich aufgrund einer Spurerweiterung auf den Zustand der Schienenfestigung oder Rippenplatte zu schießen, ohne gleichzeitig das Schienenprofil zu betrachten ist nicht zielführend. Nicht die Spurerweiterung selbst, sondern die Entwicklung des Signalrauschens steht im Mittelpunkt der nachfolgenden Betrachtungen.

Im Zuge dieser gilt es folgende Fragestellungen zu beantworten:

- I Ist es möglich, über das Rauschen des Spursignals Informationen über den Komponentenzustand Schwelle, bzw. über den Kraftschluss zu erhalten?
- I Besteht eine Möglichkeit, die Entwicklung des Rauschens kontinuierlich zu erfassen und seine Entwicklung über die Nutzungsdauer zu beschreiben?
- I Prägt sich das Rauschen der Spur nicht nur abhängig von dem Alter der Anlage, sondern auch abhängig von der eingesetzten Oberbauform aus?
- I Wie wirkt sich das Schleifen der Schiene auf den neu ermittelten Parameter aus?
- I Gelingt es, über den neu generierten Parameter kraftschlussverbessernde Maßnahmen zu erkennen?

4.2 Die Rauigkeit der Spur

In den vorliegenden Messsignalen wird die Spur nicht über ihren realen Messwert angegeben, sondern über ihre Abweichung zur Normspurweite 1435 mm. Neubaustrecken bzw. reinvestierte Gleise wurden in Österreich in den letzten Jahren mehrheitlich mit einer Normspurweite von 1437 mm eingebaut (vgl. [ÖBB Infrastruktur AG 2009], [ÖBB Infrastruktur AG 2012]). Junge Streckenabschnitte weisen somit im TUG-Netz eine eingebaute Spurerweiterung auf. Um die Nomenklatur zu vereinfachen, wird im Weiteren von statistischen Kennziffern der Spur gesprochen, obwohl sich diese eigentlich auf die Abweichung von der Normspurweite beziehen und nicht auf die absolute Spurweite referenzieren.

Die einfachste Möglichkeit, das Rauschen (Rauigkeit) eines Signals zu fassen, ist die gleitende Berechnung der Standardabweichung. Eine äquivalente Vorgehensweise zählt im Bereich der Gleislageanalyse (vgl. Kapitel 3) zum aktuellen Stand der Technik und ist seit Jahren gängige Praxis. Eine Betrachtung des Messsignals der Spur (siehe Abbildung 91 erste Zeile) erlaubt die grobe Unterteilung des Signales in zwei unterschiedliche Signalcharakteristika: In Bogenbereichen tendiert die Spur über den gesamten Bereich größere Werte (Spurerweiterungen) anzunehmen, während in der Geraden die Abweichungen um den Wert Null streuen. Eine Berechnung der Standardabweichung Spur würde demzufolge (siehe Abbildung 91 zweite Zeile) maßgeblich von den langwelligen Spurerweiterungen im Bogen beeinflusst werden. Die Berechnung der Standardabweichung am ursprünglichen Signal zeigt diesen Einfluss deutlich. Die berechneten Werte steigen in erster Linie in den Übergangsbögen maßgeblich an, also genau in jenen Bereichen, in denen es zu einer rapiden Änderung der Werte kommt. Im eigentlichen Bogenbereich sinken die Werte wieder ab, um im darauffolgenden Übergangsbogen wieder anzusteigen. Die Erweiterung der Messsignalauswertung zielt jedoch nicht auf das langwellige Rauschen der Bogenbereiche ab, sondern versucht das kurz- bzw. mittelwellige Rauschen des Spursignals zu fassen. Die

Erwartung besteht, über die Beschreibung des Rauschens die Interaktion zwischen Schiene und Schwelle quantifizieren zu können. In diesem Bereich sollten sich auch jene Bewegungen widerspiegeln, die durch den Verschleiß der Zwischenlage oder das Einpressen der Rippenplatte etc. verursacht werden.

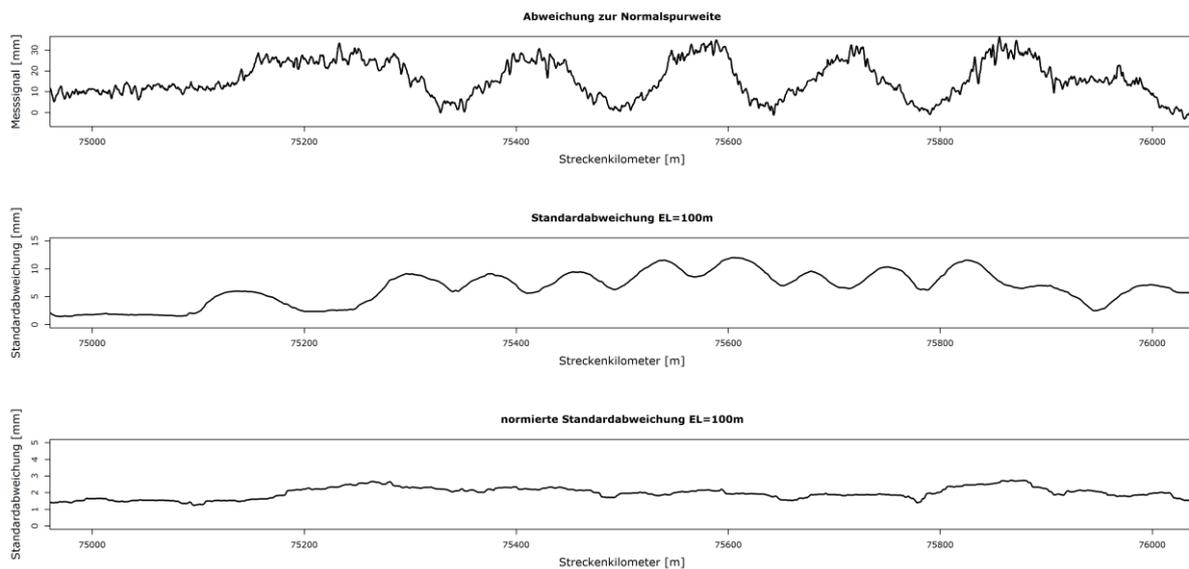


Abbildung 91 Beispielhafte Auswertung der Standardabweichung Spur und ihres normierte Pendant

Für die Erfassung der Rauigkeit des Spursignals bedient man sich einer einfachen Filterung des ursprünglichen Signals. Im Rahmen dieser Signalfilterung wird in einem ersten Schritt der gleitende Mittelwert mit einer Einflusslänge von 25 m berechnet (siehe Abbildung 92 oben). Der gleitende Mittelwert erlaubt als Tiefpassfilter die Beschreibung von Trassierungselementen mit einer Mindestelementlänge von 25 m. Vom ursprünglichen Messsignal wird dieser Mittelwert anschließend abgezogen, wodurch es möglich wird, den Einfluss der Spurerweiterung in den Bogenbereichen aus dem Signal herauszufiltern. Übrig bleiben kleinere Wellenlängen. Der vorab stark schwankende Mittelwert der Spur nimmt den Wert Null an (siehe Abbildung 92 unten). An dem so modifizierten Messsignal ist es nun möglich die Rauigkeit des Signals über die Berechnung der Standardabweichung zu quantifizieren (siehe Abbildung 91 dritte Zeile).

Neben der erforderlichen Mindestelementlänge setzt dieser Algorithmus auch voraus, dass der Anstieg der Spurerweiterung im Mittel linear und nicht plötzlich erfolgt. Plötzliche Spurerweiterungen treten lediglich in Weichenbereichen auf (Herzbereich) oder sind Indiz für ein singuläres Systemversagen. Die Ausdehnung dieser plötzlichen Spurveränderungen liegt deutlich unter den 25 m und ist daher von dieser Filterung nahezu unberührt.

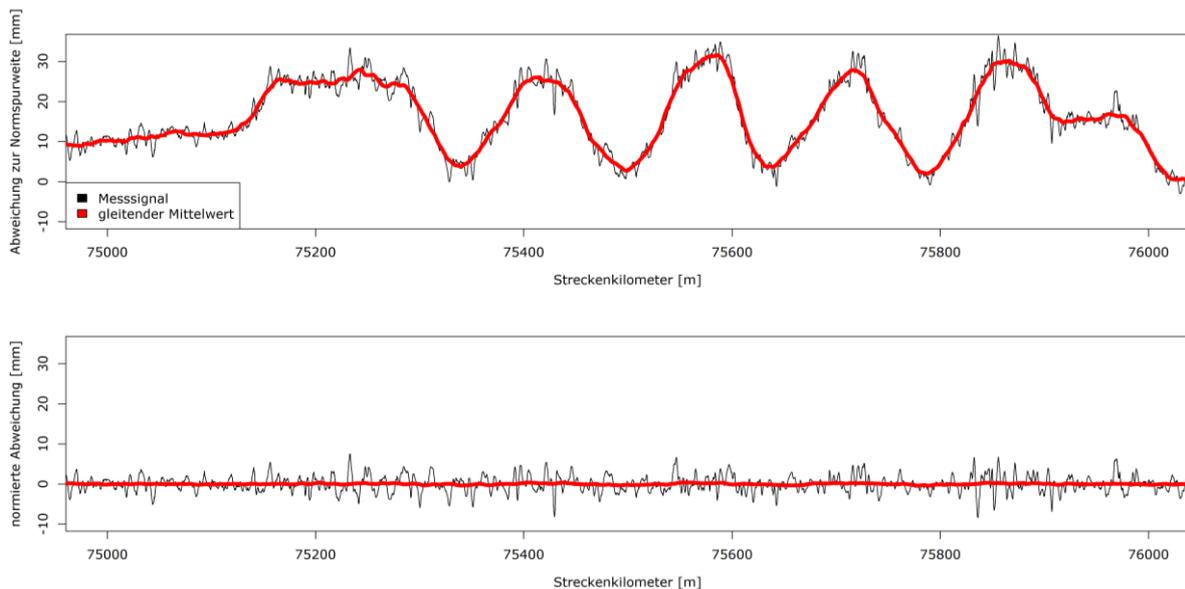


Abbildung 92 Normierungsprozess der Spur oben: ursprüngliches Signal mit dem gleitenden Mittelwert unten: normiertes Signal

4.2.1 Der Störstellenalgorithmus

Bevor die normierte Standardabweichung Spur über das gesamte TUG-Netz angewandt wird, ist es notwendig – wie auch schon bei der Gleislageanalyse – gewisse Einschränkungen an der Grundgesamtheit vorzunehmen. Ohne diese Einschränkungen, unterlägen die Auswertungen einer viel zu großen Streuung und liefen außerdem Gefahr surreales Verhalten abzubilden. Standardabweichungen in Übergangsbereichen zwischen Beton- und Holzschwellen stellen zwar, mathematisch gesehen, einen korrekt berechneten Wert dar, bilden jedoch weder den einen noch den anderen Anlagenzustand ab. Außerdem fokussiert diese Arbeit per Definition auf die Beschreibung des Verhaltens des ungestörten Streckengleises, die Auswertungen müssen dementsprechend gefiltert werden.

Im Zuge der Gleislageanalyse erlaubt das Attribut „gültige Länge“ eben diese Effekte von der Betrachtung auszuschließen. Die gültige Länge berücksichtigt neben dem Anfang und Ende von Maschineneinsätzen, weiters den Radius, die Belastungsklasse, die Schienenform, den Schwellentyp, Bahnhofsbereiche, Weichen, Brücken, Eisenbahnkreuzungen und Tunnelabschnitte (vgl. A1 und Tabelle 11). Die Analyse des Spursignals erfordert die Überarbeitung dieser Einschränkungen, da diese in Teilbereichen viel zu eng und in anderen zu weit gefasst wären. Ein sogenannter Störstellenalgorithmus untersucht die einzelnen Informationen, die mit den Querschnitten im TUG-Netz verknüpft sind, hinsichtlich ihrer Variabilität in einem vordefinierten Bereich und dient so der Identifikation von möglichen Unstetigkeiten wie auch Störstellen.

Eine Berücksichtigung von Maschineneinsätzen erscheint im Rahmen der aktuellen Analyse wenig zielführend. Die TUG-Datenbank berücksichtigt lediglich Großmaschineneinsätze, deren Auswirkungen auf das Spursignal (mit Ausnahme von Neulagen) technisch nicht begründbar sind. Die einzige Ausnahme in diesem Zusammenhang könnte die Durchführung von Schleifeinsätzen darstellen. Bis zum jetzigen Zeitpunkt kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Abnutzung der Schiene auch eine Auswirkung auf die Standardabweichung Spur mit sich bringt, da ein Zusammenhang zwischen der absoluten Ausprägung dieser und der Verschleißgeometrie gegeben ist. Eine Gegenüberstellung der Standardabweichung Spur vor und nach der Durchführung eines Schleifeinsatzes zeigt deutlich, dass die Entwicklung des Qualitätssignals von diesem Einsatz unabhängig ist. Diese Unabhängigkeit ist aufgrund der geringen Wellenlänge von Schienenoberflächenfehlern und ihren Amplituden nicht weiter verwunderlich, musste aber dennoch vor einer weiteren Analyse untersucht werden. Beispielhaft zeigt die unten angeführte Abbildung eine solche Gegenüberstellung.

Im Rahmen dieser wurden lediglich Bögen mit einem Radius kleiner als 250 m berücksichtigt. In diesen Bögen kann davon ausgegangen werden, dass beim Schleifeinsatz eine Reprofilierung der Schiene selbst durchgeführt wird. Eine Beeinflussung der Spurweite kann somit prinzipiell als gegeben vorausgesetzt werden. Signifikant unterscheiden sich die Mittelwerte vor und nach dem Durchführen eines Schleifeinsatzes voneinander, während die Standardabweichung diese Signifikanz nicht aufweist. Für die übrigen Radienklassen ergibt sich in äquivalenten Auswertungen weder ein Unterschied im Mittelwert noch in der Standardabweichung.

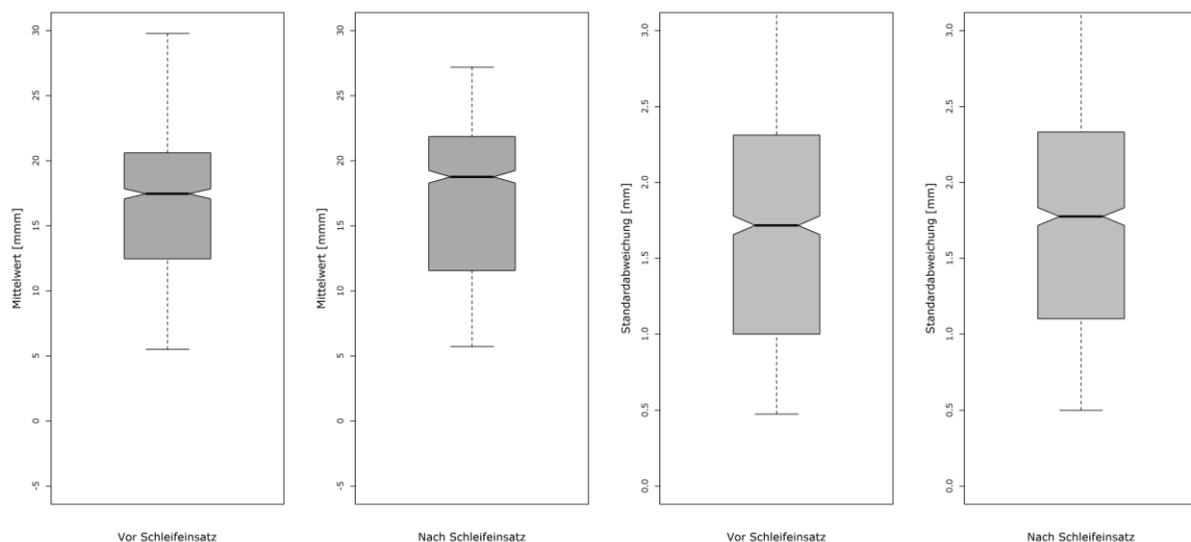


Abbildung 93 Entwicklung der Qualitätssignale Spur vor und nach der Durchführung eines Schleifeinsatzes

Schlussendlich zielt die Überarbeitung der gültigen Länge darauf ab, den Stichprobenumfang zu vergrößern. Die Sensibilität der Auswertung gegenüber Messausreißern ist deutlich höher, als bei einer Betrachtung von Qualitätswerten. Die vergrößerte Stichprobe soll dieses Risiko minimieren.

Wie bereits im Rahmen der Bestimmung der gültigen Länge, werden äquivalent dazu im Störstellenalgorithmus Einbauten wie Weichen, Brücken, Eisenbahnkreuzungen und Tunnelbereiche berücksichtigt. Bahnhofsbereiche werden als solche nicht separat ausgenommen (siehe Tabelle 11). Der Störstellenalgorithmus prüft die Homogenität eines Bereichs, dessen Länge je nach Einflusslänge der statistischen Kennziffer individuell angepasst werden kann. Umgelegt auf die Standardabweichung Spur mit einer Einflusslänge von 25 m, würde der Störstellenalgorithmus nur Werte für Bereiche ausgeben deren Parameter sich innerhalb von 25 m nicht oder nur in den vorgegebenen Toleranzen ändern.

Der Störstellenalgorithmus ermittelt netzweit die Differenz zwischen den Krümmungen aufeinanderfolgender Streckenquerschnitte. Diese Differenz erlaubt die Identifikation von Übergangsbögen. Erst nach Einstellen eines konstanten Radius kleiner 600 m wird der Querschnitt für eine mögliche Bogenauswertung herangezogen, wobei Einflusslängen unberücksichtigt bleiben.

Die Berücksichtigung unterschiedlicher Schwellenformen oder Schienenprofile erfolgt in vergleichbarer Form, wobei hier eine Einflusslänge berücksichtigt wird. Im Falle eines Profilwechsels bleiben so die Werte im Umfang von einer halben Einflusslänge vor und nach dem Wechsel unberücksichtigt. Die Frage, inwiefern ein unterschiedliches Einbaualter berücksichtigt oder vernachlässigt werden kann, ist schwierig zu beantworten. Der Störstellenalgorithmus sieht Einbaujahre, die sich lediglich um fünf Jahre voneinander unterscheiden als vergleichbar an, alle größeren Differenzen werden gekennzeichnet und im Algorithmus abhängig vom gewählten Einflussbereich ausgegeben. Die Einbaujahre der Schiene liegen im TUG-Netz nicht schienengetreu vor, weshalb die Auswirkungen eines einseitigen Schientausches im Rahmen des Störstellenalgorithmus nicht beachtet werden können.

Belastungssprünge führen zu keinerlei Einschränkungen der Querschnitte, da die unterschiedlichen Verhalten nicht über das Oberbaualter, sondern über das entwickelte Belastungsmodell und die so berechnete kumulierte Belastung abgebildet werden. Lediglich 25% des TUG-Netzes erfüllen alle Bedingungen der gültigen Länge. Diese kleine Stichprobe präsentiert deutlich die besonders konservativ gewählten Annahmen. Im Gegensatz dazu weist der Störstellalgorithmus rund 40% des Netzes einer definierten Störstelle zu. Dieser Wert kann um 50% reduziert werden, wenn lediglich Übergangsbögen mit einem Radius kleiner 600 m ausgeschlossen werden.

Informationen über unterschiedliche Befestigungssysteme, Zwischenlagen oder Arbeiten, die mit diesen Komponenten bzw. deren Austausch in Verbindung stehen, liegen im TUG-Netz nicht vor. Aussagen über die Verschlechterung der Signale können lediglich Kombinationen zwischen Schienenprofil und Schwellentyp berücksichtigen.

	Gültige Länge	Störstellenalgorithmus
Maschineneinsätze	Ja	Nein
Störstellen (EK, Weichen, Brücken)	Ja	Ja
Tunnelbereiche	Ja	Ja
Bahnhofsgebiete	Ja	Nein
Schwellentyp	Ja	Ja
Schienenprofil	Ja	Ja
Einbaujahr Schwelle	Nein	Ja
Einbaujahr Schiene	Nein	Ja
Belastungskategorie	Ja	Nein
Trassierung	Ja	Ja

Tabelle 11 Vergleich der Eingangsparameter zur Ermittlung der gültigen Länge und im Rahmen des Störstellenalgorithmus

4.2.2 Werteverteilung

Nach Normierung der Werte erfolgt die gleitende Berechnung der Standardabweichung Spur mit zwei unterschiedlichen Einflusslängen über das gesamte TUG-Netz. Dieser Berechnung liegt der Algorithmus SlidingWindow zugrunde, der es ermöglicht, gleitend über das gesamte Netz unterschiedliche statistische Kenngrößen zu berechnen. Es steht dem Anwender dabei frei, die gewünschten Kenngrößen (Median, Mittelwert, Standardabweichung oder MAD) auszuwählen und die Einflusslänge zu definieren. Nachfolgende Auswertungen konzentrieren sich auf die Fassung des „Spurrauschens“, während die übrigen statistischen Kennziffern, mit Ausnahme des Mittelwerts, in dieser Arbeit unberücksichtigt bleiben. Der Algorithmus toleriert maximal 10% Fehlerwerte bzw. fehlende Werte im ursprünglichen oder normierten Messsignal, bevor er für den aktuellen Querschnitt einen Fehlerwert ausgibt.

Die Schienenneigung und die Spurweite unterscheiden sich hinsichtlich der Abtastrate des Messsystems. Während die Schienenneigung alle 2,5 m ausgegeben wird, ergeben sich die Werte der Spurweite alle 25 cm. Dies ermöglicht eine hohe Detailgetreue der Auswertung und ermöglicht im Falle der Spurweite eine größere Anzahl von Fehlerwerten. Die

Einflusslängen für die Berechnungen werden mit 25 m und 100 m frei gewählt. Die 100 m Einflusslänge repräsentiert eine durchaus gängige Einflusslänge, wie sie auch schon von der Gleislageanalyse bekannt ist. Eine kleinere Einflusslänge erlaubt eine exaktere Erfassung des auftretenden Fehlers hinsichtlich seiner Position und Ausdehnung.

Im Falle einer 100 m Einflusslänge wird vor allem in kurzen Bogenbereichen die Beschreibung des Zustandes schwierig. Mit kleiner werdender Einflusslänge nimmt die Anfälligkeit des Algorithmus gegenüber Ausreißern, vor allem bei Anwendung von nicht-robusten Schätzern, wie der Standardabweichung und dem Mittelwert, zu. Eine mögliche Zeitreihenanalyse sollte aus diesem Grund tendenziell mit großen Einflusslängen durchgeführt werden. Je nach Wahl der Einflusslänge der statistischen Kennziffer, ergibt sich spiegelgleich die Einflusslänge des Störstellenalgorithmus.

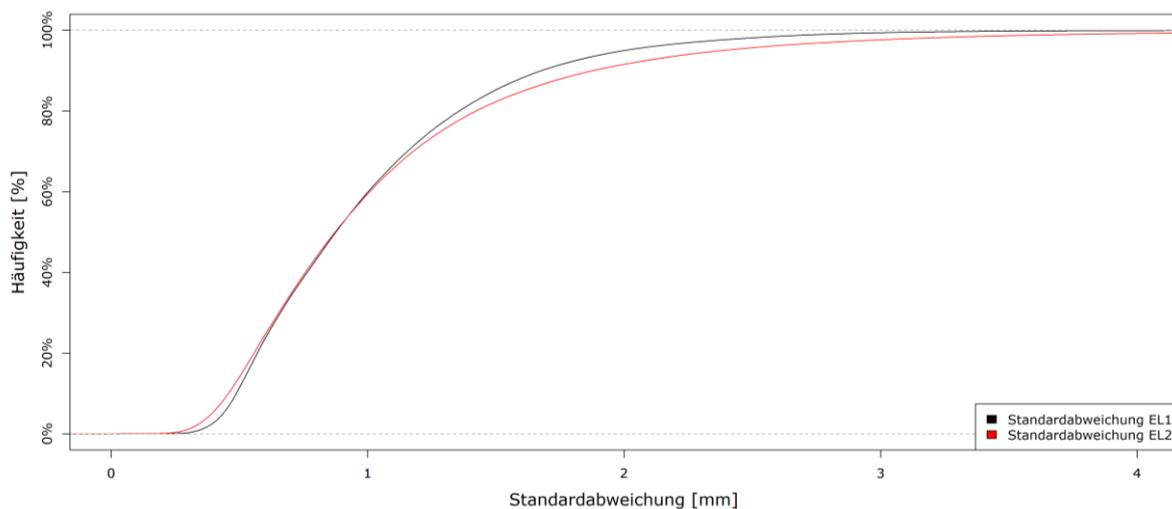


Abbildung 94 Gegenüberstellung der Häufigkeiten unterschiedlicher Einflusslängen der Standardabweichung Spur im Bezugsjahr 2011

Beide Einflusslängen ergeben im Median den nahezu gleichen Wert. Die kleinere Einflusslänge weist jedoch eine größere Streuung auf, was sich im flacheren Verlauf der kumulierten Häufigkeiten zeigt. Dieser Umstand ist über die höhere Detailtreue der kleineren Einflusslänge zu erklären. Im Gegensatz zu großen Einflusslängen konzentrieren sich hohe Werte der Standardabweichung lokal um die Störstelle, während bei großen Einflusslängen diese Information verschmiert über den gesamten Bereich wiedergegeben wird. Dennoch weist der Interquartilsbereich zwischen beiden Einflusslängen einen geringen Unterschied auf.

Die Berechnung von querschnittsgetreuen Jahreswerten über den Median der 2011 durchgeführten Messfahrten erlaubt die Erfassung der vorliegenden Werteverteilung der statistischen Kennziffer. Inwiefern unterschiedliche Instandhaltungsarbeiten diesen Wert verzerren, sei an dieser Stelle außer Acht gelassen. In erster Linie zielt diese Auswertung darauf ab, zu verdeutlichen, welche Auswirkungen die Einschränkung der Berechnung auf

störfreie Querschnitte nach sich zieht. Eventuelle Unterschiede in der Altersstruktur zwischen den unterschiedlichen Störstellen bleiben unberücksichtigt.

Unabhängig von diesen getroffenen Vereinfachungen bildet sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Störstellen und dem freien Streckengleis aus (siehe Abbildung 95). Um die Überlagerung einzelner Störstellen zu verhindern, repräsentiert diese Auswertung lediglich Querschnitte mit einer auftretenden Störstellenart. Es darf am Querschnitt lediglich eine Art von Störstelle detektiert werden, um Eingang in dieser Auswertung zu finden. Sowohl der Übergang zwischen unterschiedlichen Schienenprofilen als auch Schwellentypen führt zu einer erhöhten Standardabweichung Spur. Bekannterweise bilden sich an den Übergangsbereichen zwischen Schwellen oder Profilen sehr oft Störstellen aus, die sich im Instandhaltungsaufwand niederschlagen.

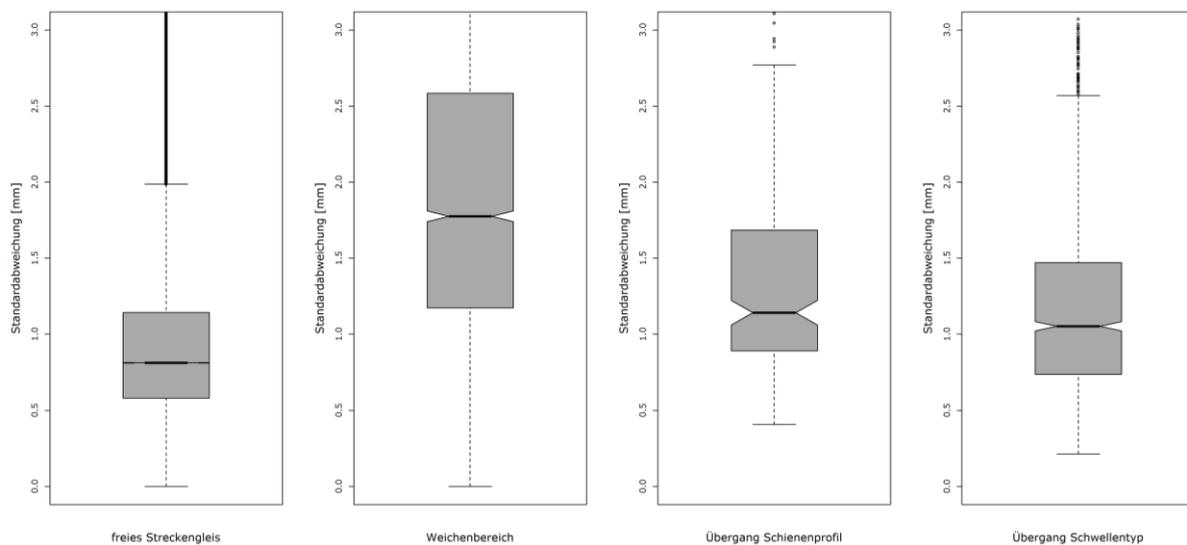


Abbildung 95 Ausprägung der Standardabweichung Spur bei unterschiedlichen Störstellen

Die Ermittlung der Schienenneigung erlaubt Rückschlüsse auf den aktuellen Zustand der Zwischenlage bzw. der Holzschwelle zu ziehen. Die fehlende Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messung erschwert allerdings die Bestimmung der zeitlichen Entwicklung dieses Parameters. Ein Vergleich der Varianzkoeffizienten gibt in weiterer Folge Aufschlüsse darüber, ob es möglich ist, über die Standardabweichung Spur diesen Parameter reproduzierbarer zu erfassen.

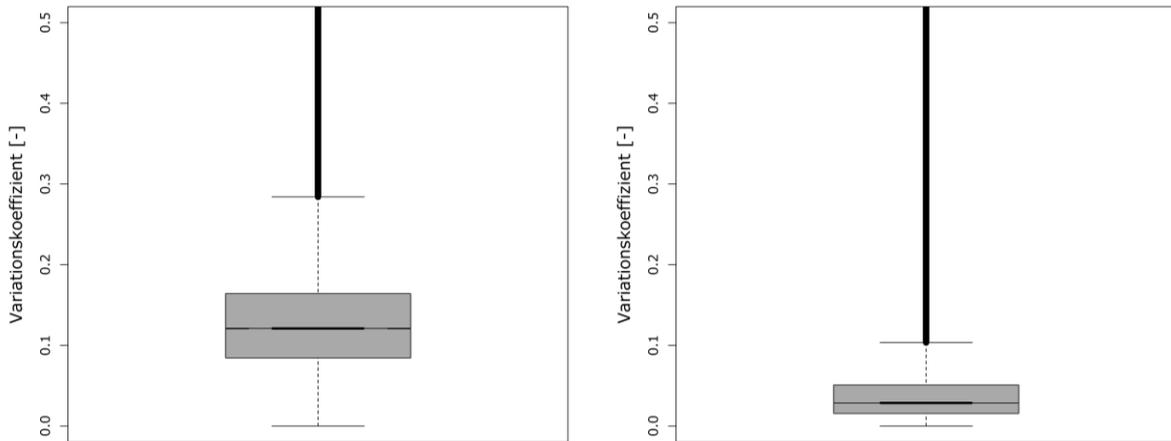


Abbildung 96 Variationskoeffizient des Mittelwertes der Schienenneigung der linken Schiene [links] und der Standardabweichung Spur [rechts] bezogen auf die Messfahrten aus dem Jahr 2011

Abbildung 96 weist der zeitlichen Messung der Standardabweichung Spur bezogen auf das Jahr 2011 eine deutlich höhere reproduzierbare Genauigkeit zu. Abbildung 97 erlaubt durch die erkennbare Korrelation die Umlegung der bereits bekannten Ergebnisse der Schienenneigung auf die Standardabweichung Spur. Demzufolge indiziert ein erhöhter Wert der Standardabweichung Spur im Falle von Betonschwellen den notwendigen Zwischenlagenwechsel.

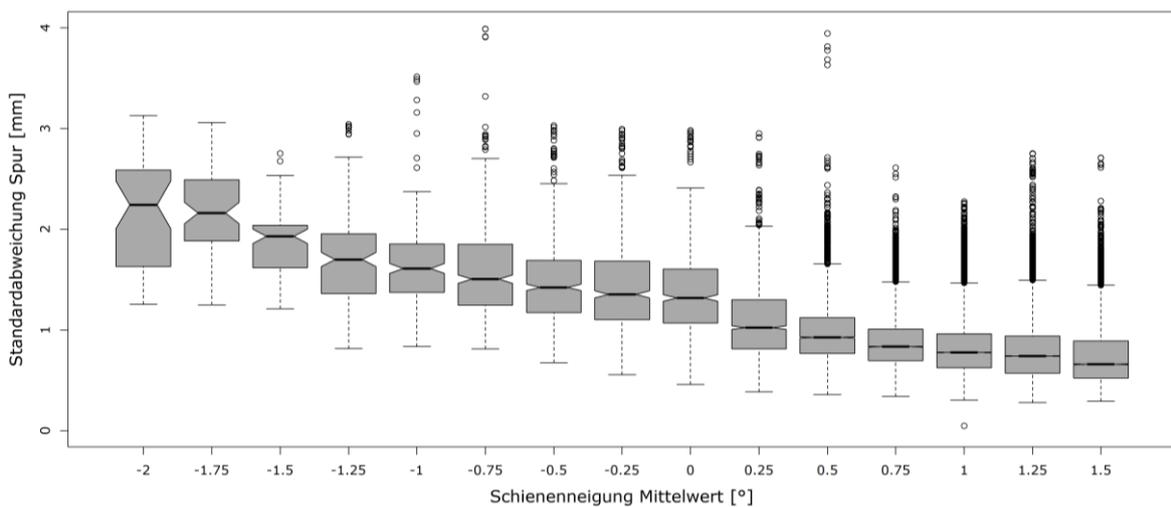


Abbildung 97 Korrelation zwischen dem vorliegenden Mittelwert der Schienenneigung und der Standardabweichung der Spur im geraden Betonschwellengleis ohne Störstellen

Geht man für einen Zwischenlagenwechsel von einem kritischen Bereich von 0 bis -0,5 aus (vgl. [Auer 2010]), so erlaubt die obenstehende Darstellung die Umlegung dieses Werts auf die Standardabweichung Spur. 75% der Werte erreichen in diesem Bereich eine Dimension von 1,1. Für eine erste Annäherung kann dieser Wert für einen möglichen Zwischenlagenwechsel in Betracht gezogen werden. In dieser Betrachtung ist es allerdings nicht möglich auf unterschiedliche Arten von Zwischenlagen bzw. Befestigungssysteme einzugehen.

4.2.3 Einbauqualität und Ausbauqualität

Die Betrachtung der Ein- und Ausbauqualität (für nähere Informationen zur Berechnung vgl. 3.3) weist unabhängig von den berücksichtigten Radien den Holzschwellen höhere Werte bei Ausbau zu als Betonschwellen. Ein Umstand, der sich über den unterschiedlichen Komponentenaufbau unschwer erklären lässt. Während zwischen Betonschwelle und Schiene lediglich die Zwischenlage für ein elastisches Verhalten sorgt, interagiert das Holzschwellensystem prinzipiell elastischer.

In Bogenbereichen kleiner 600 m übt das Fahrzeug durch das vermehrte Einbringen von Führungskräften eine erhöhte Beanspruchung aus (vgl. [Führer 1979]). Diese erhöhte Krafteinbringung spiegelt sich in einem stärkeren Verschleiß wider, der sich auch deutlich in der resultierenden Ausbauqualität zeigt. Die Ausbauqualität von Betonschwellen steigt im Median deutlich über den angegebenen kritischen Wert von 1,5 und erreicht bei Holzschwellen Werte von knapp 2,5. Der Unterschied zwischen den beiden Schwellenformen bildet sich im Bogenbereich besonders stark aus, was sich in erster Linie auf den spezifischen Einsatz von Holzschwellen in engen Bögen ($R < 250$ m) zurückführen lässt. Die Einbauqualität weist den Holzschwellen im Vergleich zu Betonschwellen ein nahezu doppelt so hohes Niveau zu, während sich der Unterschied zwischen besohlenen und unbesohlenen Schwellen verschwindend klein ausprägt.

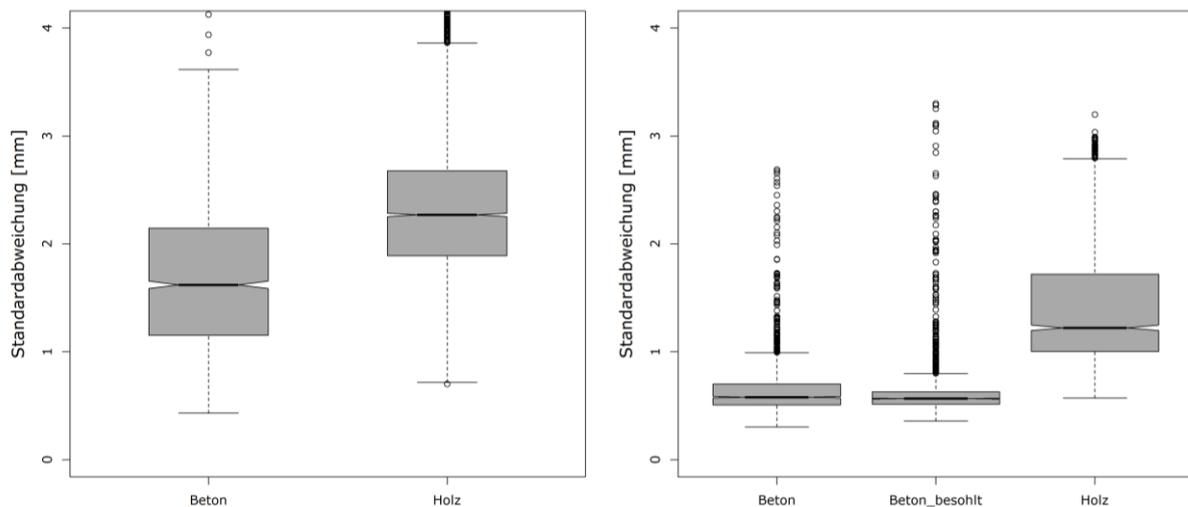


Abbildung 98 Durchschnittliche Standardabweichung Spur vor [links] und nach [rechts] dem Durchführen einer Re-Investition der Anlage in Bogenbereichen mit einem Radius kleiner 600 m

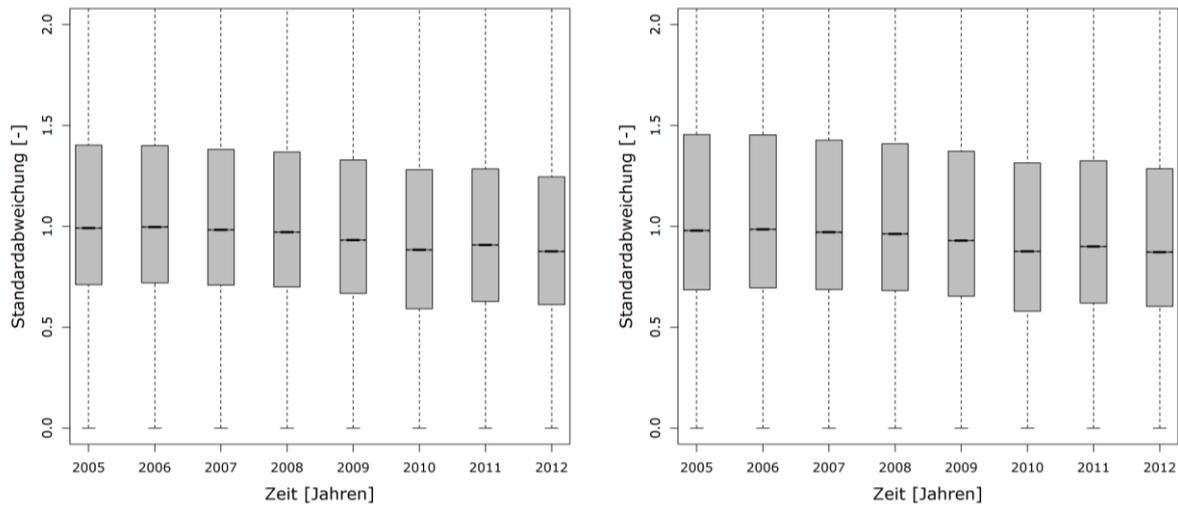


Abbildung 99 Entwicklung der Jahreswerte der Standardabweichung Spur seit 2005 links: Einflusslänge 25 m rechts: Einflusslänge 100 m

Ob der Grund für diesen Unterschied, wie auch schon bei der Gleislageanalyse, im Einsatz der Holzschwellen in Bereichen mit besonderen Anforderungen zu suchen ist, werden weitere Auswertungen zeigen. Der vermehrte Ausbau von Holzschwellen im Netz der ÖBB und das mehrheitliche Ersetzen dieser durch besohlte Betonschwellen schlägt sich auch in der positiven Entwicklung dieser Kennziffer in den letzten fünf Jahren nieder (siehe Abbildung 99). Ein Unterschied zwischen den beiden Einflusslängen 25 m und 100 m lässt sich in dieser netzweiten Auswertung von Jahreswerten nicht erkennen.

Bevor nun die zeitliche Entwicklung der Standardabweichung über die kumulierte Belastung näher betrachtet werden kann, gilt es die Auswirkungen möglicher Instandhaltungsarbeiten auf diese näher zu untersuchen. Informationen hinsichtlich der Durchführung oder des Zeitpunkts solcher Maßnahmen, wie z.B. Zwischenlagenwechsel, Schraublochanierung oder Kleineisenregulierung liegen in der aktuellen Datenbank nicht vor. Es muss daher versucht werden über Hilfsmittel die Häufigkeit solcher Maßnahmen abzuschätzen, bzw. anhand von stichprobenartigen Überprüfungen einzelner Einsätze den Effekt solcher Maßnahmen zu erfassen.

4.3 Prognosemodell ProgMod

Der ProgMod-Algorithmus wird auch im Rahmen der Fraktalanalyse eingesetzt. Es handelt sich hierbei um einen vereinfachten, strukturprüfenden Algorithmus, der im Rahmen dieser Arbeit anhand unterschiedlicher statistischer Kennziffern überarbeitet und kalibriert wird.

4.3.1 Algorithmusaufbau

Der Algorithmus prüft die Differenz zwischen den zeitlich aufeinanderfolgenden statistischen Kennziffern am Querschnitt, und vergleicht diese mit einem empirisch festgesetzten Grenzwert. Hinsichtlich der Wahl und der Anzahl der Grenzwerte unterscheiden sich die auf unterschiedlichen Kennziffern angewandten Algorithmen. Während bei der Fraktalanalyse und der Standardabweichung Spur die berechneten Differenzwerte mit einem einzigen konstanten Grenzwert verglichen werden, ist diese Vorgehensweise beim Mittelwert Spur wenig zielführend. Der Mittelwert Spur birgt die Besonderheit, dass die Verbesserung des Anlagenzustands, sowohl positive, als auch negative Differenzbeträge aufweisen kann. Ein einseitiger Vergleich dieser Differenzen würde demzufolge zu einem falschen Ergebnis führen. Um diesem Umstand gerecht zu werden, bilden die Absolutwerte der Differenzen im Rahmen der Betrachtung des Mittelwerts die Basis für den Vergleich. Auswertungen mit einem einzigen Grenzwert bringen eine weitere Herausforderung zum Vorschein: In geraden Abschnitten weisen Anlagen vor der Neulage oftmals eine verengte Spur auf, während sich in Radien der Trend Richtung Spurerweiterung zeigt. Die relative Verbesserung der statistischen Kennziffern nach einer Maßnahme gestaltet sich in beiden Fällen unterschiedlich. Um diese Tatsache abzubilden, orientiert sich der Grenzwert am über die Zeit berechneten MAD des Querschnitts.

Als MAD bezeichnet man in der Statistik den Median Absolut Deviation, also den Median der Abweichung der einzelnen Zeitwerte vom Median dieser. Der MAD stellt das robuste Pendant zur Standardabweichung dar und wird unter anderem zur Identifikation von Ausreißern herangezogen (vgl. [Lehmann 2012]).

Die Ermittlung der Differenzwerte wird aufeinanderfolgend zweimal ausgeführt. Der Differenzwert wird jeweils der zeitlich früheren Messfahrt zugeordnet. Somit wird jede Messfahrt, mit Ausnahme der letzten in der Zeitreihe, eindeutig einem Deltabetrag zugewiesen wird. Während im ersten Durchgang bei allen ProgMod-Algorithmen die Absolutwerte verglichen werden, berücksichtigt der zweite Durchgang abhängig von der Kennziffer Absolutwerte oder reale Differenzwerte.

Der erste Durchgang dient der Ermittlung von Ausreißern in der Zeitreihe, um die Qualität des eingeschriebenen Regressionsmodells zu erhöhen. Liegen zwei aufeinanderfolgende Differenzbeträge über dem angegebenen Grenzwert, erkennt der Algorithmus den zweiten als Ausreißer und schließt die Ergebnisse der zugeordneten Messfahrt in diesem Querschnitt von einer weiteren Betrachtung aus. Beispielhaft zeigt Abbildung 100 die beschriebene Zeitreihenanalyse. Die vertikalen Linien im linken Bild kennzeichnen jene Werte, die über dem angegebenen Grenzwert (im Falle der Standardabweichung Spur 0,5)

zu liegen kommen. Das rechte Bild präsentiert die Werte der Zeitreihenanalyse nach der vollautomatisierten Ausreißeridentifikation.

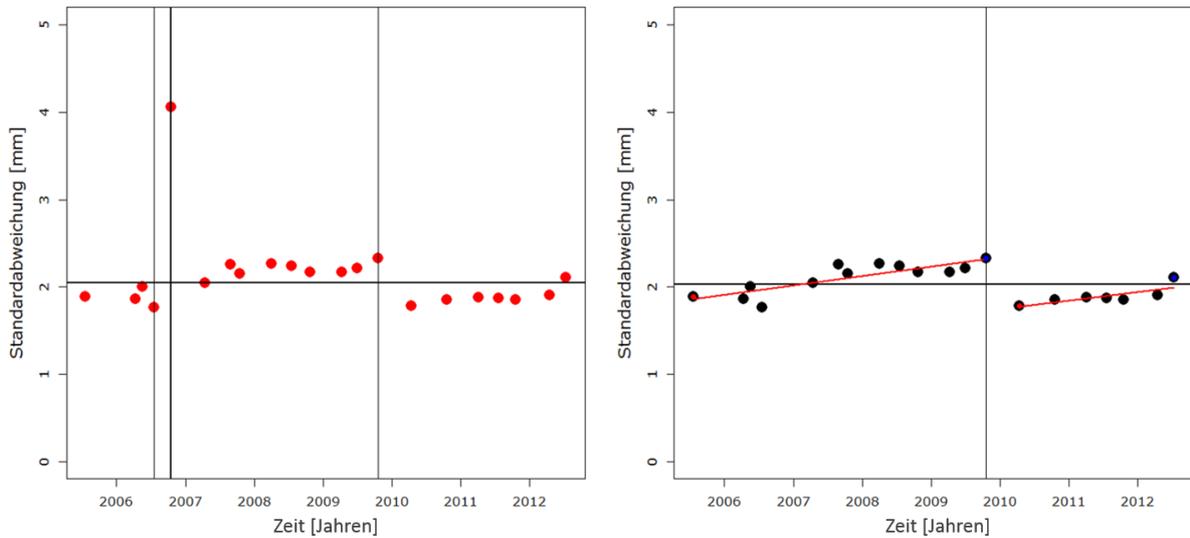


Abbildung 100 Ermittlung von Ausreißern und Berechnung der Regression durch den Algorithmus ProgMod am Beispiel der Standardabweichung Spur

Die Ergebnisse der ProgMod-Algorithmen werden nachstehend für die beiden statistischen Kennziffern Standardabweichung und Mittelwert Spur mit der Einflusslänge 100 m diskutiert. Als Grundlage für die Ergebnisdiskussion dient, wie bereits im Fall der Fraktalanalyse, das Gleis 1 der TUG-Strecke 4.

4.3.2 Ergebnisse des Regressionsmodells

Das beschriebene Regressionsmodell wird auf 136 Gleiskilometern angewandt und erlaubt so, erste Schlussfolgerungen aus dem zeitlichen Verhalten der Qualitätssignale zu ziehen. Die gewählte Strecke 4 zeichnet sich durch eine Mischung von Bogenbereichen und geraden Streckenabschnitten aus und bildet so ein breites Belastungsspektrum ab. Das Fehlen von Informationen zu jeglichen Instandhaltungsmaßnahmen macht es sehr schwierig, das berechnete Regressionsmodell zu validieren.

Erlaubt die Standardabweichung die Abbildung des Zustands der Schwelle bzw. der Interaktion zwischen Schiene-Befestigung-Schwelle, so ergibt sich wie bereits in 4.2.3 nachgewiesen, ein signifikanter Unterschied zwischen Ein- und Ausbauqualität. Es gilt zu überprüfen, ob dieser Unterschied auch durch den Algorithmus ProgMod erkannt wird. Um dies zu überprüfen, werden auf der untersuchten Strecke zwei Neulagenbereiche ausgewählt, die zwischen 2005 und 2012 reinvestiert wurden. Während der eine Abschnitt ausschließlich gerade verläuft, bildet ein 350 m Bogen den Hauptbestandteil des zweiten Bereichs.

In beiden Fällen zeigt der Algorithmus deutlich den Bereich der Neulage. Während im geraden Bereich (siehe Abbildung 101 [links]) die Neulage nahezu ungestört durch den Algorithmus detektiert wird, zeigt sich im zweiten Bereich kein eindeutiges Ergebnis. Im Bereich der Neulage (47,200 km bis 47,500 km) ermittelt der Algorithmus mehrere Sprünge im Verhalten. Eine genauere Betrachtung der Zeitreihe verdeutlicht, dass in diesem Bogenbereich bereits vor der Neulage Maßnahmen unbekannter Art getroffen wurden, die eine Verbesserung des Qualitätssignales nach sich zogen.

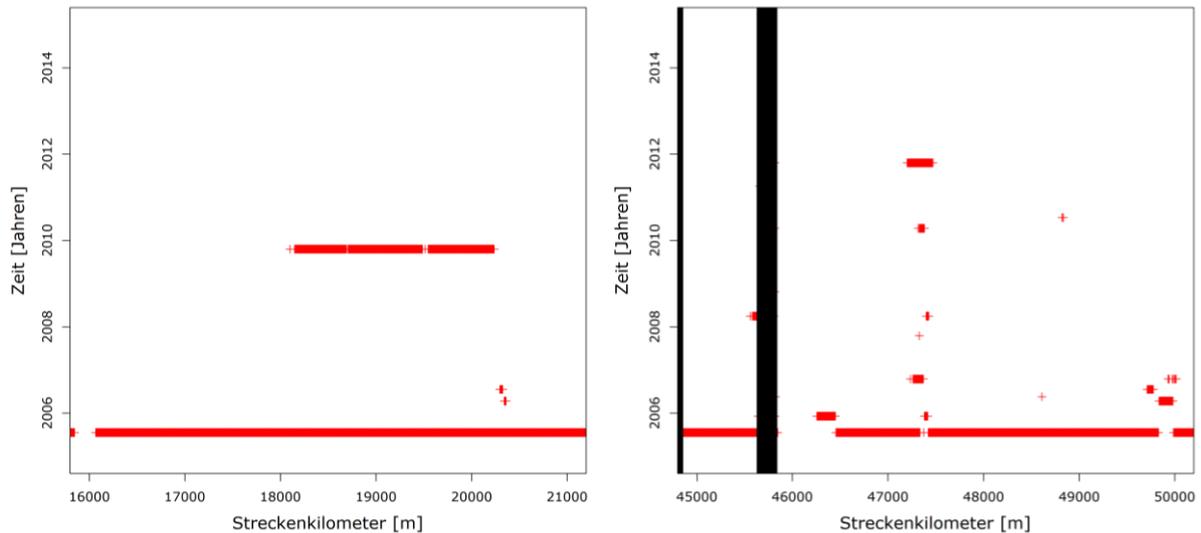


Abbildung 101 Ermittlung von Neulagen über den ProgMod-Algorithmus

Auf wenige Meter begrenzte Sprünge in der Zeitreihe spiegeln oftmals Messausreißer wider. In Bereichen von Störstellen, wie im rechten Bild durch den schwarzen Balken gekennzeichnet, folgen zeitlichen Entwicklungen oftmals anderen Gesetzmäßigkeiten. Die beiden Beispiele beweisen die Anwendbarkeit des Algorithmus, verdeutlichen aber auch die Herausforderungen, die sich durch eine messsignalbasierter Ermittlung von Maßnahmen ergeben.

In einem zweiten Schritt, gilt es die Gültigkeit des Regressionsmodells über die ausgegeben Parameter zu überprüfen. Von besonderem Interesse sind in diesem Fall die Ausprägungen der Steigungen des Mittelwertes Spur im Bogenbereich, verglichen mit jenen in der Gerade. Es bildet sich ein signifikanter Unterschied (siehe Abbildung 102) zwischen den beiden Steigungen aus. Wie aufgrund der Lasteinwirkung erwartet, prägt sich in Bogenbereichen in Folge der Führungskräfte eine positiv steigende Gerade und somit eine Tendenz zur Spurerweiterung aus. Ganz im Gegensatz dazu, verengt sich die Spur in der Geraden mehrheitlich. Dies lässt sich auf die exzentrische Lasteinbringung und das nach innen drehende Moment zurückführen (vgl. [Liu 2013]).

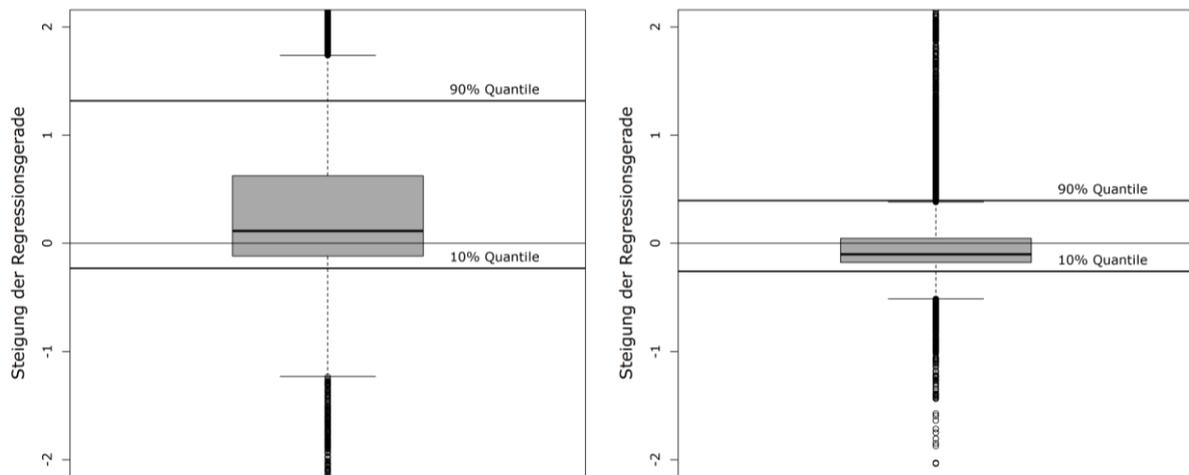


Abbildung 102 Berechnete Steigungen der Regressionsmodelle für den Mittelwert Spur links: für Bogenbereiche rechts: für gerade Streckenabschnitte

Die Regressionsberechnung weist der Standardabweichung, sowohl für den Bogen, als auch für die Gerade, in 75% der Fälle eine negative Steigung zu. Die Ausprägung der Steigung fällt in Bogenbereichen größer als in Geraden aus.

Die Position der 10% Quantile weist deutlich darauf hin, dass sich die Standardabweichung Spur mit wachsender kumulierter Belastung verschlechtert und somit modellhaft einen Verschleißprozess abbildet.

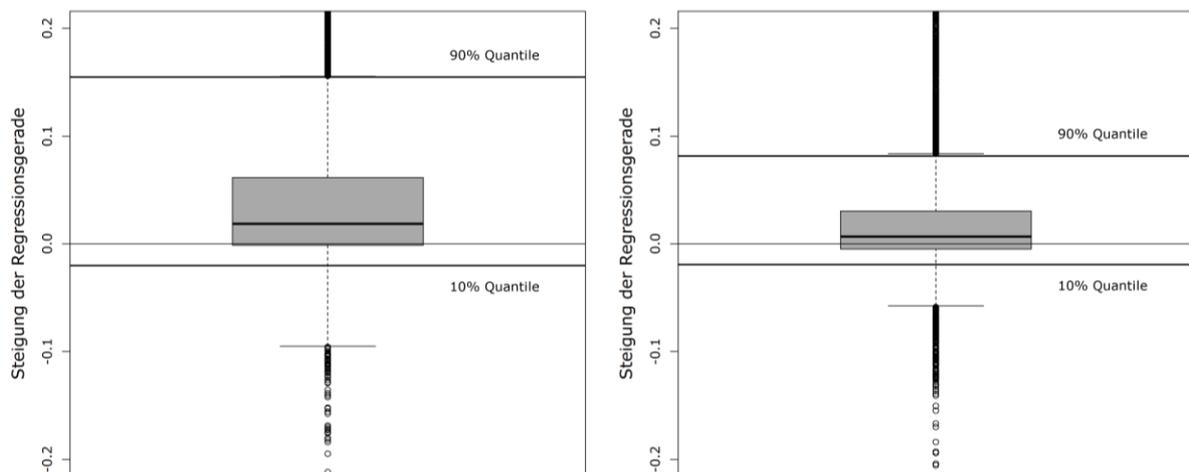


Abbildung 103 Berechnete Steigung der Regressionsmodelle für die Standardabweichung Spur links: für Bogenbereiche rechts: für gerade Streckenabschnitte

Abhängig vom Wertespektrum prägen sich die mittleren Abweichungen der Regressionsgerade des Mittelwerts und der Standardabweichung Spur unterschiedlich stark aus (siehe Abbildung 104). Aus dieser Verteilung lässt sich die geringe Abweichung der einzelnen Messfahrten vom Regressionsmodell ableiten, wodurch die Modellannahmen für diese Strecke als hinreichend genau betrachtet wird.

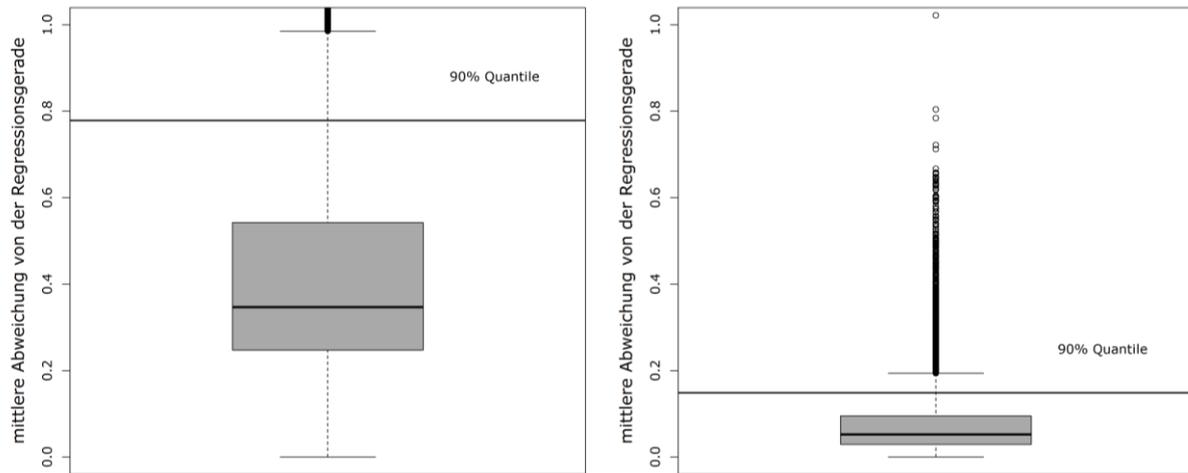


Abbildung 104 Mittlere Abweichung von der Regressionsgerade links: Mittelwert rechts: Standardabweichung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das vorliegende Regressionsmodell für die Beschreibung der Entwicklung der Standardabweichung und des Mittelwerts Spur die notwendige Genauigkeit aufweist. Die fehlenden Informationen zu den getätigten Instandhaltungsmaßnahmen können hinsichtlich des Zeitpunkts der Maßnahme abgeschätzt werden.

Ein Zusammenhang zwischen den Sprüngen im Mittelwert und den Sprüngen in der Standardabweichung konnte nicht in jedem Fall festgestellt werden. In knapp 18% der Querschnitte konnte eine sprunghafte Veränderung der Standardabweichung detektiert werden, wobei lediglich 25% dieser auf Radien entfallen. Die meisten Verbesserungen der Qualitätssignale lassen sich über durchgeführte Neulagen erklären.

Zusätzliche Informationen zu Instandhaltungsarbeiten würden das Ergebnis verbessern und eine detaillierte Analyse ermöglichen. Die geringe Anzahl von detektierten sprunghaften Änderungen macht es möglich, die Entwicklung der Qualitätssignale über die kumulierte Belastung ohne Einschränkungen zu betrachten. Dennoch soll vorab die Auswirkung von bekannten Instandhaltungsarbeiten überprüft werden.

4.4 Auswirkungen von Maßnahmen und spezifischen Oberbaukombinationen auf die Qualitätssignale

Das Fehlen von Informationen zu Maßnahmen (Zwischenlagenwechsel, Kleineisenregulierung usw.) macht eine netzweite Auswertung deren Auswirkung auf die Qualitätssignale unmöglich. Eine stichprobenartige Auswertung von Bereichen, in denen bekanntermaßen eine Maßnahme gesetzt worden ist, soll die Möglichkeiten der neu entwickelten Standardabweichung Spur aufzeigen. Es werden dabei jeweils die Jahreswerte vor und nach einer Maßnahme miteinander verglichen und dem Mittelwert gegenübergestellt. Wie

bereits im Rahmen der Fraktalanalyse, stehen die Werte in den Klammern für die 75% Quartile und die Werte außerhalb für die mittlere Qualität im Untersuchungsgebiet.

Beispiel H		
Oberbauform: Holz 54E2	Begehungsdatum: 16. Juli 2013	
Kum. Belastung 2013: 409 Mio. t	StreckenKM: 60,050-60,200	
	Vor der Maßnahme	Nach der Maßnahme
Standardabweichung [mm]	1,4 (1,6)	2,1 (2,3)
Mittelwert [mm]	13,9 (17,8)	8,5 (10,8)





Tabelle 12 Beispiel H

Beispiel H (siehe Tabelle 12) fällt durch eine sprunghafte Veränderung der Qualitätssignale Spur auf. Die Holzschwellen des Abschnitts zeigen bereits vor der Maßnahme einen mit einer Standardabweichung von 1,4 dem Alter und der Bogenlage entsprechenden, hohen Wert. Der Einbau von Keilplatten führte 2012 zu einer Reduktion der Spurerweiterung, während sich die Standardabweichung Spur maßgeblich erhöhte. Die Begutachtung des Anlagezustands vor Ort zeigt eingepresste Rippenplatten und eine teilweise stark reduzierte Schwellensubstanz. Da aufgrund betrieblicher Umstände eine Gleisneulage in diesem Bereich nicht möglich ist, wird in den nächsten Jahren eine Schraublochanierung in Betracht gezogen.

Beispiel I und Beispiel J verdeutlichen die Auswirkungen einer derartigen Schraublochanierung auf die Qualitätssignale Spur. Deutlich verbessert sich die Standardabweichung Spur, wenngleich die Auswirkungen dieser Maßnahmen auf die mittelfristige Entwicklung der Schwellensubstanz nicht abgeschätzt werden kann. Zu wenige Werte sind nach der Schraublochanierung vorhanden, um aus diesen bereits eine weitere Entwicklung des Zustands vorherzusagen.

Beispiel I		
Oberbauform: Holz 54E2 Kum. Belastung 2013: 409 Mio. t	Begehungsdatum: 04. Oktober 2012 StreckenKM: 23,200-23,700	
	Vor der Maßnahme	Nach der Maßnahme
Standardabweichung [mm]	1,8 (2,1)	0,8 (0,8)
Mittelwert [mm]	1,6 (3,0)	0,3 (0,8)
		

Tabelle 13 Beispiel I

Beispiel J		
Oberbauform: Holz 49E1 Kum. Belastung 2013: 482 Mio. t	Begehungsdatum: 04. Oktober 2010 StreckenKM: 78,600-78,800	
	Vor der Maßnahme	Nach der Maßnahme
Standardabweichung [mm]	1,4 (2,1)	0,9 (0,9)
Mittelwert [mm]	7,4 (13,0)	3,3 (3,4)
		

Tabelle 14 Beispiel J

Beispiel I unterscheidet sich von den übrigen Beispielen mit Holzschwellen durch den deutlich größeren Radius ($R=1500$ m). Da im Rahmen der Schraublochanierung, sofern erforderlich, auch einzelne Schwellen getauscht werden, ist es schwierig, den Effekt dieser pauschal zu bewerten. Dennoch spiegelt sich der Effekt der Maßnahme deutlich in der Standardabweichung Spur wider.

Beispiel K		
Oberbauform: Beton 60E1 Kum. Belastung 2013: 456 Mio. t	Begehungsdatum: 15. Oktober 2013 StreckenKM: 3,800-4,300	
	Vor der Maßnahme	Nach der Maßnahme
Standardabweichung [mm]	1,4 (1,71)	1,0 (1,2)
Mittelwert [mm]	5,3 (7,0)	0,6 (2,0)
		

Tabelle 15 Beispiel K

Standen bis jetzt lediglich Holzschwellen im Zentrum der Analyse versucht, das nächste Beispiel (siehe Beispiel K Tabelle 15), die Auswirkungen eines Zwischenlagenwechsels bei Betonschwellen näher zu untersuchen. Die Zwischenlagen wurden im betrachteten Streckenabschnitt im Rahmen einer Maßnahme 2012 getauscht. Die Maßnahme erstreckte sich auf 500 m in einem Bogen mit einem Radius von 550 m. Ein Wechsel der Schiene selbst wurde nicht durchgeführt. Deutlich lässt sich die erreichte Verbesserung des Anlagenzustands in den Qualitätssignalen durch eine Reduktion der Standardabweichung um knapp 0,5 erkennen. Der Zwischenlagenwechsel wurde auf beiden Gleisen durchgeführt und führt zu vergleichbaren Ergebnissen, wenngleich sich die Verbesserung auf Gleis 1 stärker ausprägt. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Ergebnisse von Gleis 1 konkret angeführt. Diese Ergebnisse zeigen um Kilometer 4,1 einen besonders hohen Wert der Standardabweichung Spur. Bei einer genaueren Untersuchung dieses Bereichs wiesen die Zwischenlagen bereits kurz nach dem Einbau einen sichtlichen Verschleiß auf (siehe Begehungsbilder Tabelle 15).

Beispiel L zeichnet sich durch seine verhältnismäßig geringe kumulierte Belastung aus. Es handelt sich um eine 2006 durchgeführte Neulage. Dieser Neulagenabschnitt unterlag in den vergangenen sieben Jahren einer abgeschätzten Belastung von 150 Millionen Bruttotonnen und zeigt deutliche Verschleißerscheinungen. Die Gegenüberstellung der durchschnittlichen Jahreswerte weist einen deutlichen Anstieg der Qualitätssignale auf. Der Bruch einzelner SKL-Verbindungen, der Riss einzelner Winkelführungsplatten und der sichtliche Verschleiß der Zwischenlagen über den gesamten Abschnitt, macht das Setzen einer Maßnahmen in diesem Abschnitt dringend erforderlich.

Beispiel L		
Oberbauform: Beton 60E1 Kum. Belastung 2013: 151 Mio. t	Begehungsdatum: 14. Oktober 2013 StreckenKM: 90,400-90,700	
	2008	2013
Standardabweichung [mm]	0,6 (0,6)	0,9 (1,0)
Mittelwert [mm]	7,3 (8,7)	12,0 (14,7)
		

Tabelle 16 Beispiel L

Am Schluss des Kapitels steht ein Beispiel, das mit seinen Qualitätswerten die Auswirkungen eines verabsäumten Wechsels der Zwischenlagen präsentiert. In einem geraden Abschnitt stieg die Standardabweichung Spur in den letzten Jahren von 1,6 auf 2,0 an. Vorort zeigt der Schienenfuß bereits eine fortgeschrittene Zerstörung des Schwellenauflegers (siehe Tabelle 17 linkes Bild) und die eingebrachten Kräfte führen in Einzelfällen bereits zum Riss der Betonschwelle (siehe Tabelle 17 rechtes Bild).

Beispiel M		
Oberbauform: Beton 54E2 Kum. Belastung 2013: 385 Mio. t	Begehungsdatum: 15. Oktober 2013 StreckenKM: 71,500-71,600	
	2008	2013
Standardabweichung [mm]	1,6 (1,6)	2,0 (2,0)
Mittelwert [mm]	-1,0	-1,4
		

Tabelle 17 Beispiel M

Zusammenfassend gilt im Fall von Betonschwellen ab einer Standardabweichung von 1,0 bis 1,5 ein Zwischenlagewechsel als ratsame Maßnahme. Dies zeigen die Auswertungen der betrachteten Beispiele ebenso, wie auch die Korrelation mit der Schienenneigung.

Standardabweichungen, die sich deutlich höher ausprägen, deuten auf ein teilweises Systemversagen hin und bedingen das Setzen von anderen Maßnahmen, wie z.B eines Einzelschwellenwechsels. Eine Schraubblochanierung wurde bei Holzschwellen bei einer Standardabweichung von 1,5 bis 2,0 durchgeführt. Auch wenn sich zum momentanen Zeitpunkt die mittelfristige Substanzentwicklung noch nicht abschätzen lässt, zeigt sich deutlich ein Erfolg dieser Maßnahme. Die Auswirkungen einer Kleineisenregulierung konnten im Rahmen dieser Untersuchung aufgrund fehlender Informationen nicht durchgeführt werden.

4.5 Entwicklung der Standardabweichung über die kumulierte Belastung

Die Erkenntnisse aus den vorhergehenden Kapiteln zeigen die Möglichkeit, auf mit der Standardabweichung Spur eine zusätzliche Zustandserfassung zu implementieren.

Die Standardabweichung Spur erlaubt im Falle von Betonschwellen eine Erfassung des Zustands der Zwischenlage und des Befestigungssystems. Teilweise lassen sich sogar Aussagen über den Zustand der Schwelle selbst treffen.

Bei Holzschwellen indizieren erhöhte Werte der Spur mögliche Kraftschlussprobleme und beschreiben damit einhergehende Substanzengpässe der Schwelle selbst.

Die Werte der Standardabweichung ergeben sich abhängig vom eingesetzten Schwellentypen zu unterschiedlichen Niveaus. Holzschwellen weisen eine von Natur aus höhere Standardabweichung Spur auf. Woher dieser Unterschied kommt, soll eine genauere Betrachtung der Entwicklung der Standardabweichung über die kumulierte Belastung klären. Zusätzlich ergibt sich die Frage nach dem Einfluss unterschiedlicher Schienenprofile auf die berechneten Werte. Vorhergehende Forschungsarbeiten (vgl. [Liu 2013]) wiesen eine erhöhte Schienenfußspannung im Fall unterschiedlicher Schienenprofile (60E1 und 54E3) nach. Dieser Spannungsunterschied muss sich, zumindestens geringfügig, auch in der Entwicklung der Standardabweichung Spur widerspiegeln.

Einen derartigen Unterschied abzubilden, erfordert die Darstellung der Entwicklung der statistischen Kennziffern über die kumulierte Belastung. Für eine Untersuchung der belastungsabhängigen Entwicklung ist es erforderlich, zwischen einzelnen Oberbaukombinationen (Schienenprofil und Schwellentyp) zu unterscheiden, ohne jedoch durch die Filterung die Stichprobe zu sehr einzugrenzen. Bei einem zu geringen Stichprobenumfang führt die Betrachtung der Entwicklung zu stark streuenden Ergebnissen und macht eine Interpretation schwierig.

Nachdem rund 80% des TUG-Netzes in geraden Streckenabschnitten ($R > 600$ m) liegen, konzentriert sich die Auswertung unterschiedlicher Oberbaukombinationen auf eben

diese. Eine Übersicht über die Häufigkeit der eingesetzten Oberbaustoffe ergibt drei Kombinationen als maßgebend. Die nachfolgende Auswertung untersucht folglich die Unterschiede der Entwicklung der Standardabweichung Spur der Oberbaukombinationen 54E2 und 60E1 auf Betonschwellen und 54E2 auf Holzschwellen. Mögliche Querschnitte mit einer kumulierten Belastung größer als 500 Mio. t werden in dieser Analyse nicht berücksichtigt.

Bereits vorhergehende Auswertungen deuteten auf einen prinzipiellen Unterschied in der absoluten Ausprägung der Standardabweichung Spur zwischen Holz- und Betonschwellen hin. Unabhängig von der Art des Schienenprofils lässt sich ein derartiger Unterschied über die gesamte Entwicklung erkennen. Betonschwellen starten in ihrer Entwicklung, unabhängig vom eingesetzten Schienenprofil, bei einem Wert von 0,5; während Holzschwellen zu Beginn einen fast doppelt so hohen Wert aufweisen. Holzschwellen verschlechtern sich degressiv, während sich im Fall von Betonschwellen ein annähernd linearer Verlauf einstellt.

Trotz der vorhandenen Streuungen lassen sich aus dieser Entwicklung Schlussfolgerungen ziehen. Ein 54E2 Schienenprofil führt verglichen mit einem 60E1 Schienenprofil bei Betonschwellen zu einem stärkeren Anstieg der Standardabweichung Spur. Das Einpressen der Rippenplatte in die Holzschwellen wirkt sich in einem, in den ersten 125 Mio. t verstärkten Anstieg der Standardabweichung aus. Schlussendlich ergibt sich ein mit Betonschwellen vergleichbarer Anstieg. Holzschwellen unterliegen, verglichen mit Betonschwellen, weitaus höheren Streuungen, was sich auf die große Anzahl unterschiedlicher Befestigungsmaterialien zurückführen lässt.

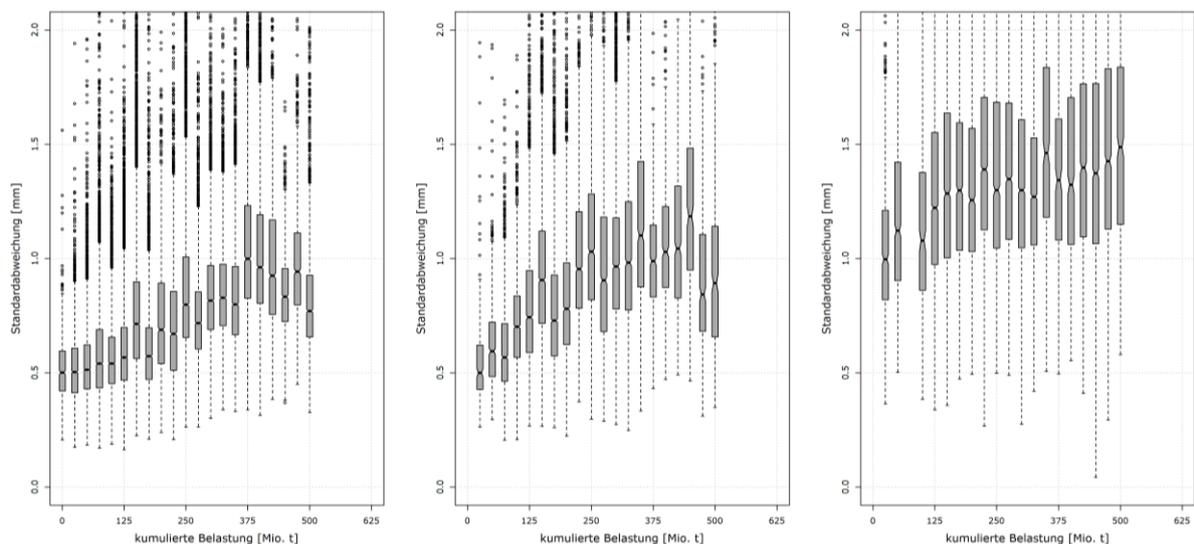


Abbildung 105 Entwicklung der Standardabweichung Spur mit der Einflusslänge 25 m für unterschiedliche Oberbaukombinationen links: 60E1 Betonschwellen Mitte: 54E2 Betonschwellen rechts: 54E2 Holzschwellen

Für eine Darstellung der Auswirkungen der Trassierungselemente auf die Entwicklung der Standardabweichung würde eine Filterung der Schienenprofile zu einer zu geringen Grundgesamtheit führen. Trotz der gewonnenen Erkenntnisse über unterschiedliche Oberkombinationen wird der Unterschied zwischen den einzelnen Schienenprofilen in der nachfolgenden Auswertung in Kauf genommen. Um die Streuungen zu reduzieren, wird nachfolgend für die Medianwerte der einzelnen Belastungsgruppen und Gruppierungen eine lineare Regression berechnet und deren Parameter miteinander verglichen. Der Unterschied zwischen den einzelnen Schwellenformen Holz und Beton kann allerdings in keiner Form vernachlässigt werden, zu groß ist der Unterschied der Standardabweichung zwischen diesen. Sie bilden gemeinsam mit den Radiengruppen „ $R > 600$ “ (R1), „ $400 < R < 600$ “ (R2) und „ $250 < R < 400$ “ (R3) die berücksichtigten Parameter für die nachfolgende Auswertung.

Die angegebenen Grenzwerte ergeben sich aus der Zusammenfassung bereits bekannter Ergebnisse. Einerseits werden dafür die Auswertungen der Ausbau- und Einbauqualität, die Korrelation zwischen Spur und Schienenneigung und andererseits die Begehungen vor Ort berücksichtigt. Sie verstehen sich als Richtwert, wenngleich weitere Untersuchungen ihre Stabilität erst zeigen müssen.

Die Entwicklung der Standardabweichung Spur bei Betonschwellen beginnt für alle betrachteten Radienklassen einheitlich bei 0,5 und unterliegt bei kleiner werdenden Radien einem größeren Anstieg. Sie reflektiert so die höhere Beanspruchung im Bogen, die auf Schiene, Befestigung und Schwelle wirkt. Ein äquivalentes Bild zeigen auch Holzschwellen, wenngleich diese in geraden Abschnitten, verglichen mit Bogenbereichen, zu Beginn höhere Werte aufweisen. Dieser Unterschied mag damit zusammenhängen, dass heutzutage Holzschwellen in geraden Streckenabschnitten nur dann eingebaut werden, wenn es äußere Umstände erfordern. In den meisten Fällen führen die besonderen Anforderungen zu einer erhöhten Beanspruchung und folglich zu einem erhöhten Verschleiß. Ungeachtet davon, kann der Unterschied nahezu vernachlässigt werden.

Interessanterweise weisen Holzschwellen in unterschiedlichen Radienklassen bei Ausbau zwar eine unterschiedliche kumulierte Belastung auf, aber den gleichen Wert der Standardabweichung Spur. Ein Phänomen, das sich bei Betonschwellen nicht bzw. gegensätzlich ausbildet. Eine Komponente bei einer einheitlich bestimmten Qualität auszubauen, würde in weiterer Folge jedoch bedeuten, dass eben diese Komponente mit dem Erreichen dieser Qualität das Ende ihrer Nutzungsdauer erreicht hat. Holzschwellengleise werden demzufolge aufgrund des Zustands der Schwelle ausgebaut.

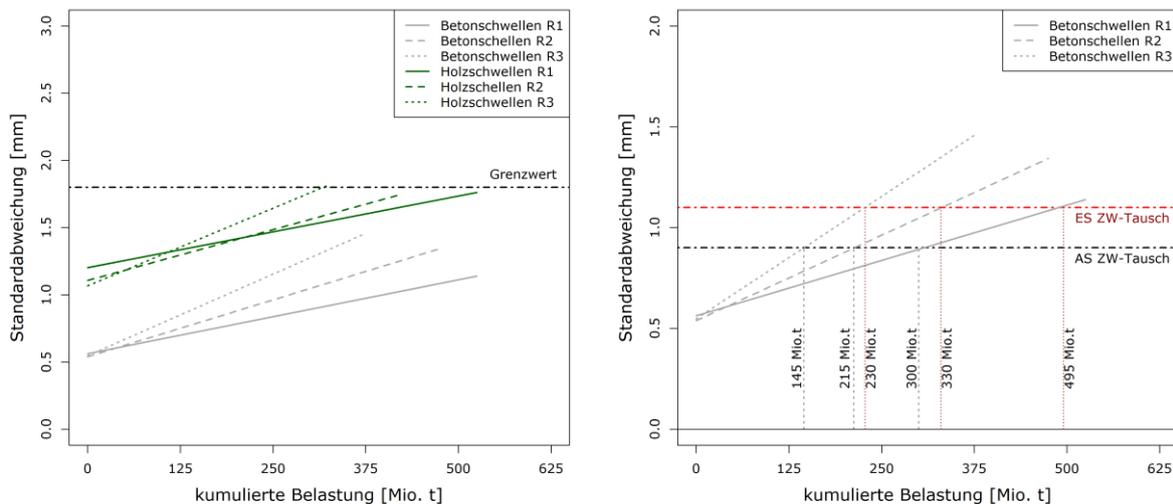


Abbildung 106 Entwicklung der Standardabweichung Spur mit der Einflusslänge 25 Meter über die kumulierte Belastung gefiltert nach Trassierungselemente und Schwellenform

Sehr wohl ergibt sich aber in sämtlichen Radienklassen für Betonschwellen die Notwendigkeit des Zwischenlagenwechsels. Die Projektion des Schnittpunkts der Grenzlinie (AS ZW Tausch oder ES ZW-Tausch) mit der ansteigenden Standardabweichung Spur bei Betonschwellen auf die Abszisse der Darstellung, erlaubt die Angabe der vorgeschlagenen kumulierten Belastung für einen solchen Wechsel. Diese Vorschläge nehmen für die Aufmerksamkeitsschwelle (AS ZW-Tausch) geringfügig höhere Belastungswerte an, als sie zum aktuellen Zeitpunkt aus vorliegender Veröffentlichung bekannt sind (vgl. [Auer 2005]).

Der schleifende Schnitt mit den Geraden führt bei einer geringfügigen Änderung des Grenzwertes zu einem massiven Anstieg der auslösenden kumulierten Belastung. Wie sich die Änderung des Eingriffswertes auf die resultierenden Mengen an Zwischenlagenwechsel auswirkt, wird eine Sensitivitätsanalyse nachfolgend klären. Deutlich ergeben sich im Falle der Eingriffsschwelle (ES ZW-Tausch) nahezu um 100 Mio.t. höhere Belastungswerte für einen notwendigen Zwischenlagentausch (siehe Abbildung 106).

Dennoch steht die geringfügige Abweichung von bestehenden Werten (siehe Abbildung 107) trotz der unterschiedlichen Ansätze für die Plausibilität des Ergebnisses.

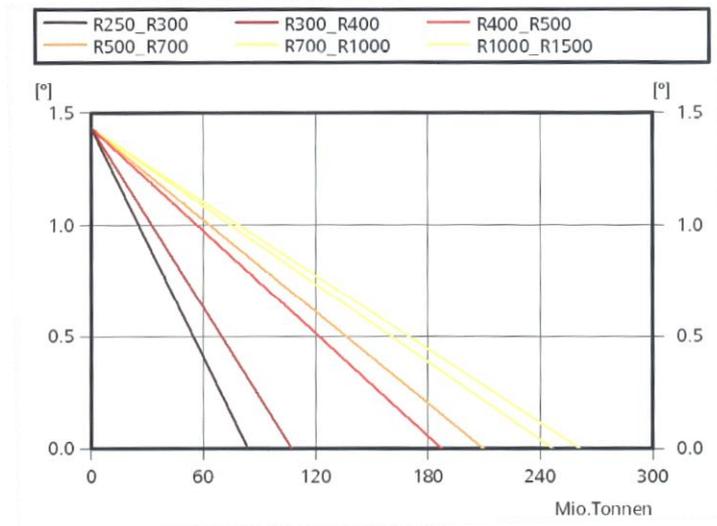


Abbildung 107 Veränderung der Schienenneigung (60E1, ZW-K2a Betonschwelle) [Auer 2005]

4.6 Netzweite Auswertung

Lediglich auf knapp 25% des TUG-Netzes kommen Holzschwellen zum Einsatz und ihre Anzahl nimmt kontinuierlich ab. Betonschwellen werden in 65% des Netzes eingesetzt, wobei 10% mit Besohlung eingebaut wurden. Im übrigen Teil des Netzes werden Schwellen eingesetzt, die aufgrund ihrer geringen Stichproben keinen Eingang in die Auswertungen finden, oder aufgrund fehlender Informationen nicht eindeutig zugewiesen werden können.

Von der Bewertung prinzipiell ausgenommen werden Störstellen, wie Weichen, Eisenbahnkreuzungen, Brücken und Tunnelbereiche. Übergangsbereiche zwischen Schienenprofilen und Schwellentypen werden im Rahmen dieser Bewertung allerdings berücksichtigt. Fokussiert man die Auswertung in einem ersten Schritt auf den Zwischenlagenwechsel von Betonschwellen, so ergeben sich nach der Einschränkung des Störstellenalgorithmus je nach Wahl der Einflusslänge 2.052 km (100 m Einflusslänge) oder 1.597 km (25 m Einflusslänge) zu bewertendes Gleis. Die Standardabweichung Spur mit einer Einflusslänge von 100 m weist auf 400 km Gleis eine Überschreitung des Grenzwertes AS ZW Tausch. Dieser Wert zeigt sich äußerst sensibel gegenüber der Wahl des Grenzwerts, der mit 0,9 konservativ gewählt wurde. Erhöht man diesen Wert auf 1,1 und führt man die Bewertung erneut durch, so weist der Algorithmus lediglich 200 km aus. Ohne weitere Untersuchungen, die den Grenzwert weiter absichern, besteht keine Möglichkeit, die Schwankung im Ergebnis weiter einzudämmen. Dennoch erlaubt die Standardabweichung Spur, unter Berücksichtigung dieser Unsicherheit, den Bedarf an Zwischenlagenwechsel abzuschätzen.

Rund 14 km der Betonschwellen und 73 km der Holzschwellen überschreiten nach Auswertung der Standardabweichung mit der Einflusslänge 100 m den angenommenen

Grenzwert für die Schwellensubstanz. Hier zeigt sich der Unterschied zwischen den gewählten Einflusslängen am stärksten, da vor allem auf kurzen Abschnitten diese Werte öfters überschritten werden und daher diese Überschreitung von der kurzen Einflusslänge stärker repräsentiert wird.

4.7 Zusammenfassung

Der entwickelte Parameter Standardabweichung Spur ermöglicht, basierend auf den vorliegenden Erkenntnissen, die Beschreibung der Interaktion zwischen Schiene, Befestigung und Schwelle. Im Fall von Betonschwellen lassen sich daraus Rückschlüsse auf den Zustand der Zwischenlage ebenso ziehen, wie auch auf das partielle Versagen einzelner Teilkomponenten (Bruch der Schwelle). Die Standardabweichung Spur zielt, im Zuge der Beschreibung des Zustands von Holzschwellen, in erster Linie darauf ab, den Kraftschluss an sich zu erfassen und ermöglicht somit indirekt auch Informationen über den Schwellenzustand selbst zu generieren.

Die Zeitreihenanalyse führt, sowohl beim Mittelwert, als auch bei der Standardabweichung Spur, zu reproduzierbaren Ergebnissen, die die ursprüngliche Erwartungshaltung erfüllen. Während in Bogenbereichen der Mittelwert durch die Führungskräfte und die Seitenabnutzung des Schienenprofils danach strebt, die vorgegebene Spur zu vergrößern, tendiert die Spur in der Geraden zur Verengung. In beiden Bereichen prägt sich ein positiver Anstieg der Standardabweichung Spur aus, im Falle von Bogenbereichen deutlich stärker als in Geraden. Das Fehlen von Information über zustandsverbessernde Maßnahmen erschwert die Bestimmung des Zustands Schwelle bzw. der Interaktion Schiene-Befestigung-Schwelle. Durchgeführte Vor-Ort-Untersuchungen erlauben es, in Kombination mit Betrachtung der in den letzten Jahren durchgeführten Neulagenprojekte, Vorschläge für Grenzwerte zu formulieren. Ein Vergleich der Jahreswerte der Standardabweichung mit festgelegten Grenzwerten realisiert eine Abschätzung des notwendigen Zwischenlagenwechsels und erlaubt die Beschreibung der Substanz der Schwelle.

Möglichen, nachfolgenden Arbeiten bietet das Thema der Komponentenbeurteilung noch zahlreiche Fragestellungen. Das Thema der mittelfristigen Auswirkung von Schraublochanierungen oder Kleineisenregulierungen sei an dieser Stelle nur beispielhaft genannt. Eine Ausweitung der Auswertungen auf zusätzliche Signale erhöht die Genauigkeit der Beschreibung des Anlagenzustandes und birgt genügend Potential für die Zukunft.

5 Epilog

Die vorliegende Arbeit präsentiert eine messdatengestützte Anlagenzustandserfassung als Grundlage für ein nachhaltig agierendes Anlagenmanagement und basiert auf zwei wesentlichen Aspekten. Die Analyse bestehender Messsignale erlaubt es dem Anlagenverantwortlichen, ergänzend eine Bewertung des aktuellen komponentenspezifischen Anlagenzustands sowie seiner zeitlichen Entwicklung vorzunehmen und gestattet so, eine langfristige strategische Planung des Mitteleinsatzes.

Die Erfassung des Zustands erfolgt, beginnend am Einzelquerschnitt, unterteilt in unterschiedliche Komponenten und mündet in einer netzweiten Evaluierung. Die netzweite Evaluierung des Anlagenzustands schafft die Möglichkeit Budgetmittel mittelfristig und zielorientiert zu planen. Eine direkte Ableitung der Maschineneinsatzplanung aus der vorliegenden Evaluierung gestaltet sich allerdings als schwierig. Zu groß ist die Abhängigkeit von baubetrieblichen und eisenbahnbetrieblichen Umständen, sodass eine bloße Analyse von Messsignalen allein eine seriöse Maßnahmenplanung nicht ermöglicht. Eine Messsignalanalyse erleichtert die Maßnahmenplanung, liefert Argumente für notwendige Maßnahmen und erlaubt die strategische Planung, ersetzt jedoch nicht interdisziplinäre Planung. Zusätzlich sind die Maßnahmenplanung und die strategische Planung einer wirtschaftlichen Untersuchung zu unterziehen.

Die Betrachtung der Gleislage basiert im Rahmen dieser Arbeit auf zwei unterschiedlichen Herangehensweisen:

Die Auswertungen des Regressionsmodells etablieren eine **Zustandsbewertung der Gleislage** abhängig von den ins System eingebrachten kumulierten Lasten. Die Zuordnung der einzelnen Querschnitte zu den unterschiedlichen Zustandsklassen erlaubt es auf diese Weise Schwerpunkte für Instandhaltungs- und Re-Investitionstätigkeiten mittelfristig zu planen.

Im Gegensatz dazu fungieren die Grenzwerte der Fraktalanalyse als reine Substanzbewertung und dienen nicht der Unterscheidung in einzelne Zustandsklassen. Die zeitliche Entwicklung der Dimensionswerte am Querschnitt erlaubt die Abschätzung der Restsubstanz und ermöglicht so eine **langfristige Prognose der Substanzentwicklung des Gleisschotters**.

Die Standardabweichung Spur stellt ein Qualitätssignal dar, das eine Erfassung der Interaktion zwischen der Schiene, Schwelle und Befestigung, basierend auf den bestehen-

den Messsignalen, erlaubt. Die Darstellung dieser Interaktion lässt notwendige Zwischenlagenwechsel, basierend auf einem Regressionsmodell, langfristig planen und erlaubt, im Falle der Holzschwelle, eine **Erfassung der Schwellensubstanz** selbst.

In einem letzten Schritt gilt es die gewonnenen Erkenntnisse zu kombinieren. Die Anwendung dieser Kombination auf 42 geplante Re-Investitionsprojekte im TUG-Netz soll die Möglichkeiten einer messdatengestützten Anlagenzustandserfassung aufzeigen. Von einer Zusammenfassung der einzelnen Kennziffern zu einer Gesamtkennziffer ist abgesehen worden, da dies die Aussagekraft der einzelnen Auswertungen reduziert hätte.

Untersucht werden 42 Re-Investitionsprojekte mit unterschiedlicher Länge, die im Rahmen eines mehrjährigen Projekts mit den ÖBB, sowohl technisch als auch hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Nachhaltigkeit geprüft wurden. Alle diese Re-Investitionsmaßnahmen werden in den nächsten Jahren von den ÖBB umgesetzt. Die Höhe der Balken in Abbildung 108 gibt an, wie viele Querschnitte Eingang in die Bewertungen finden. Die Höhe des Balkens der Oberbauinformation spiegelt die Länge des Projekts wider. Denn dieser ergibt sich frei von jeglichen fehlenden Werten im Gegensatz zu den betrachteten Qualitätssignalen und -werten. Um die Interpretation der Darstellung zu erleichtern, konzentrierte sich diese auf die Visualisierung der kritischen Klassen. Die kritischen Klassen definieren sich wie folgt:

- I Gleislage Klasse 3 bis Klasse 5
- I Fraktalanalyse ab einem Wert < -7 (Werte der Slope3)
- I Standardabweichung Spur $> 1,8$

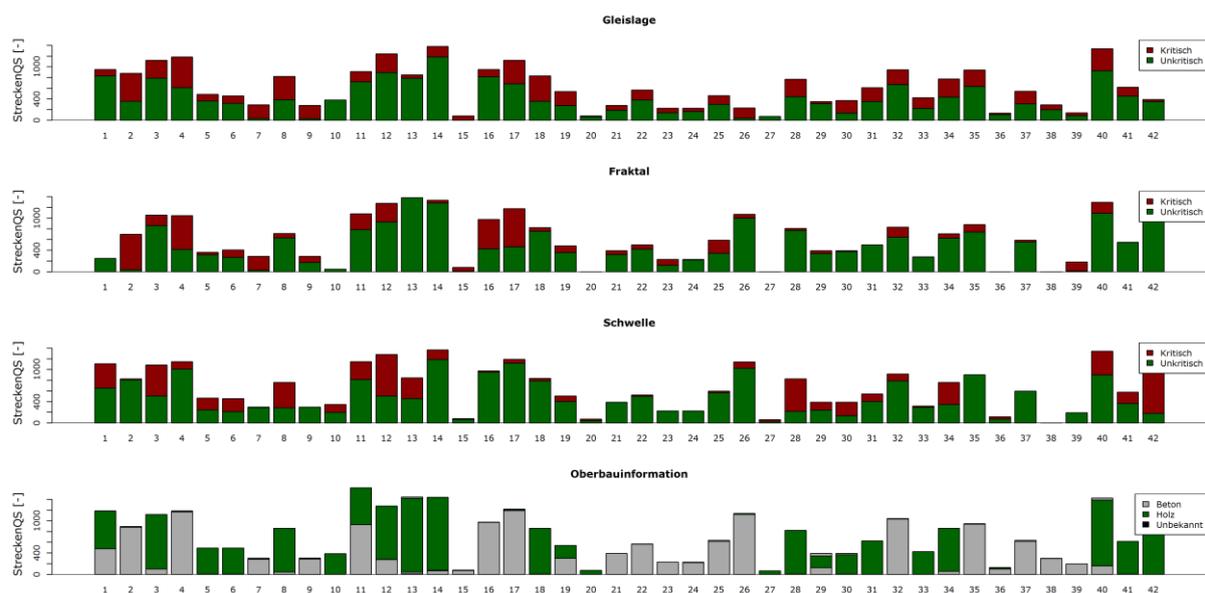


Abbildung 108 Anwendung der entwickelten messdatengestützten Anlagenzustandserfassung auf 42 Re-Investitionsprojekte der nächsten drei Jahre

Eine Erweiterung der Klassen, entgegen vorhergehenden Definitionen, war notwendig um den Umstand einer zeitlichen Verschlechterung mitberücksichtigen zu können. Diese Abminderung versucht die Tatsache, dass zwischen der Bewertung der Projekte und der Umsetzung mindestens drei Jahre liegen, zu berücksichtigen. Hierbei handelt es sich um eine Abschätzung, da ein netzweites Regressionsmodell nicht für alle Bewertungen vorhanden ist und daher die zeitliche Substanzentwicklung lediglich angenähert werden kann. Mehr als 90% der Re-Investitionsprojekte weisen, in zumindest einem der drei Bereiche (Gleislage, Fraktal, Schwelle), einen deutlichen Anteil an der kritischen Klasse auf und erlauben so ihre Re-Investition über Teile ihres Anlagenzustandes technisch zu argumentieren. Ausgenommen davon sind lediglich das Projekt 14 sowie einige Projekte, die eine Projektlänge kleiner als 400 m annehmen.

Die entwickelte messdatengestützte Zustandserfassung schafft die Grundlage für die Argumentation notwendiger Maßnahmen und erlaubt so den zielorientierten Mitteleinsatz. Die Frage der wirtschaftlichen Nachhaltigkeit einzelner Projekte lässt sich über diese Auswertung nicht pauschal bestimmen, wie sich am Beispiel des Projektes 14 deutlich zeigt. Dies war allerdings auch nicht das erklärte Ziel dieser Arbeit. Die technischen Substanzschwächen der einzelnen Re-Investitionsprojekte lassen sich jedoch deutlich erkennen und erlauben so eine angestrebte Einstufung des Komponentenzustands.

Miß alles, was sich messen läßt,

und mach alles meßbar, was sich nicht messen läßt.

Archimedes 287-212 v. Chr.

6 Literaturverzeichnis

- Audley, M. & Andrews, J.D. 2013, "The effects of tamping on railway track geometry degradation", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, no. 4, pp. 376-391.
- Auer, F. 2013, "Internationaler Trend in Richtung Multifunktions-Messfahrzeug", *Eisenbahntechnische Rundschau*, no. 12, pp. 26-30.
- Auer, F. 2010, *Zur Verschleißreduktion von Gleisen in engen Bögen*, Technische Universität Graz.
- Auer, F. 2005, "Optimierter Zwischenlagenwechsel bei den ÖBB", *ZEV rail Glasers Annalen*, no. 10, pp. 440-443.
- Auer, F. 2004, "Gleislagequalitätsanalyse zur Instandhaltungsoptimierung", *Eisenbahntechnische Rundschau*, no. 4, pp. 838-844.
- Auer, F. 2003, *Theoretische Untersuchung des Gleislagequalitätsparameters MDZ nach ADA II im Oberbaumesswagen EM250 der Österreichischen Bundesbahnen*, Forschungsbericht, Österreichische Bundesbahnen, Wien.
- Auer, F., Zuzic, M., Schilder, R. & Breymann, H. 2007, "13 Jahre Erfahrung mit gleisgebundener Untergrundsanierung im Netz der ÖBB", *Eisenbahntechnische Rundschau*, no. 12, pp. 817-827.
- Backhaus, K. 2011, *Multivariate Analysemethoden: eine anwendungsorientierte Einführung*, Springer, Berlin [u.a.].
- Bocciolone, M., Caprioli, A., Cigada, A. & Collina, A. 2007, "A measurement system for quick rail inspection and effective track maintenance strategy", *Mechanical Systems and Signal Processing*, no. 3, pp. 1242-1254.
- Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr 1971-2001, *Eisenbahn- und Seilbahnstatistik*, Republik Österreich, Wien.
- Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr 01.01.2013, "Rahmenplan 2014-2019", [Online], Available from: http://www.bmvit.gv.at/verkehr/gesamtverkehr/ausbau-plan/downloads/rahmenplan_oebb_2014.pdf.
- Chrismer, S. & Selig, E. 1993, "Computer model for ballast maintenance planning", *Proceedings of 5th International Heavy Haul Railway Conference, Beijing, China*.
- Enzi, M. 2011, *Optimaler Re-Investitionszeitpunkt für den Oberbau von Streckenabschnitten*, Technische Universität Graz.
- Faiz, R.B. & Singh, S. 2009, "Information analysis of rail track for predictive maintenance", *WSEAS Transactions on Computer*, pp. 1123-1133.
- Frederich, F. 1984, "Die Gleislage – aus fahrzeugtechnischer Sicht", *Zeitschrift für Eisenbahnwesen und Verkehrstechnik – Glaser Annalen*, no. 12, pp. 355-362.
- Führer, G. 1979, *Oberbauberechnung*, Verlag für Verkehrswesen, Berlin.

- Guler, H., Jovanovic, S. & Evren, G. 2011, "Modelling railway track geometry deterioration", *Proceedings of the ICE-Transport*, no. 2, pp. 65-75.
- Hanreich, W. 2004, "Modern Fahrweginspektion mit dem oberbautechnischen Messwagen EM 250", *ZEV Rail Zeitschrift für das gesamte System Bahn*, no. 9, pp. 18-27.
- Hanreich, W., Wogowitsch, M. & Datler, M. 2008, "Umsetzung des Instandhaltungsplanes bei ÖBB Infrastruktur nach internationalen Normen", *Eisenbahntechnische Rundschau*, no. 9, pp. 548-551.
- Hansmann, F. 2011, *Entwicklung eines Prognosemodells zur Planung von Stopfeinsätzen*, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft- TU Graz.
- Hansmann, F. & Landgraf, M. 2013, "Wie fraktal ist die Eisenbahn?", *ZEV Rail Zeitschrift für das gesamte System Bahn*, no. 11-12, pp. 462-470.
- Hansmann, F., Marschnig, S. & Veit, P. 2011, *Integrierte Instandsetzung- Versuch der Darstellung ihrer Auswirkung auf die Gleislage*, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, Graz.
- Hansmann, F. & Marschnig, S. 2012, "Der GleisPROPHET - ein Impuls zur Nachhaltigkeit", *ZEV Rail Zeitschrift für das gesamte System Bahn*, no. 9, pp. 350-357.
- Hempe, T. 2014, "Oberbau im Instandhaltungs- und Anlagenmanagement", *Eisenbahningenieur*, no. 9, pp. 112-116.
- Holtzendorff, K. 2003, *Untersuchung des Setzungsverhaltens von Bahnschotter und der Hohllagenentwicklung auf Schotterfahrbahnen*, Technische Universität Berlin.
- Holzfeind, J. 2009, *Zur Prognostizierbarkeit des Qualitätsverhaltens von Gleisen- Analyse des Qualitätsverhaltens am Einzelquerschnitt*, Technische Universität Graz.
- Hummitzsch, R. 2009, *Zur Prognostizierbarkeit des Qualitätsverhaltens von Gleisen- Statistische Analyse des Gleisverhaltens zur Erstellung eines Prognosemodells*, Technische Universität Graz.
- Hyslip, J.P. 2002a, "Fractal analysis of track geometry data", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 1, pp. 50-57.
- Hyslip, J.P. 2002b, *Fractal Analysis of Geometry Data for Railway Track Condition Assessment*, University of Massachusetts Amherst.
- Iliev, D. 2012, *Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch besohlenen Schwellen*, TU München, Lehrstuhl und Prüfamts für Verkehrswegebau.
- Jovanovic, S. 2003, "Kostenreduktion bei der Oberbauinstandhaltung durch ECOTRACK", *Eisenbahningenieur*, no. 5, pp. 30-34.
- Kipper, R., Gerber, U. & Schmeister, J. 2013, "Bestimmung langweilliger Gleisverformungen und deren Bewertung", *ZEV Rail Zeitschrift für das gesamte System Bahn*, no. 2, pp. 11-16.
- Landgraf, M. 2016, *Titel unbekannt*, Dissertation, Technische Universität Graz, Graz.

-
- Landgraf, M., Hansmann, F., Marschnig, S. & Veit, P. 2014, "Track Geometry and Sub-structure - a Provable Correlation?", *ACTGEORAIL 14*, ed. Librairie Ifsttar, .
- Lehmann, R. 2012, *Der Einfluss statistischer Ausreißer auf die Schätzung der natürlichen Variabilität in Daten zu Biota*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- Lichtberger, B. 2010, *Handbuch Gleis*, 3. edn, DVV Media Group, Hamburg.
- Lichtberger, B. 2007, "Der Querverschiebewiderstand der Gleise", *EIK Eisenbahningenieurkalender*, pp. 61-76.
- Liu, J. 2013, *Einfluss der Schienenbefestigungskomponenten auf das laterale Verformungs- und Lastverteilungsverhalten der Schiene*, Technische Universität München.
- Mandelbrot, B.B. 1983, *The fractal geometry of nature*, Macmillan.
- Mandelbrot, B.B. 1977, *Fractals : form, chance and dimension*, 1st edn, Freeman, San Francisco.
- Mandelbrot, B.B. 1967, "How long is the coast of Britain", *Science*, no. 3775, pp. 636-638.
- Mandelbrot, B.B. & Blumen, A. 1989, "Fractal Geometry: What is it, and What Does it do?[and Discussion]", *Proceedings of the Royal Society of London.A.Mathematical and Physical Sciences*, no. 1864, pp. 3-16.
- Marschnig, S. & Berghold, A. 2011, "Besohlte Schwellen im netzweiten Einsatz", *Eisenbahntechnische Rundschau*, no. 5, pp. 10.
- Matsuda, H., Takikwan, M., Ogiso, K. & Yazawa, E. 2011, "Study of Condition Monitoring for Track Irregularity and Track Materials using Commercial Test Car", ed. World Congress on Railway Research, .
- ÖBB Infrastruktur AG 2012, *Instandhaltungsplan- Oberbauanlagen DB IS 2 Teil 1*, Interne Richtlinie, Wien.
- ÖBB Infrastruktur AG 2009, *B50- Teil 1 Oberbauformen*, Interne Richtlinie, ÖBB Infrastruktur AG, Wien.
- ÖBB-Holding AG 2013, "Geschäftsbericht 2007-2012", [Online], . Available from: <http://blog.oebb.at/presse/publikationen/geschaeftsberichte/>.
- Oberlechner, G., Metzger, B. & Zywiel, J. 2001, "GPS-unterstütztes Standortsynchronisation", *Eisenbahntechnische Rundschau*, no. 1/2, pp. 53-55.
- Orford, J. & Whalley, W. 1983, "The use of the fractal dimension to quantify the morphology of irregular-shaped particles", *Sedimentology*, no. 5, pp. 655-668.
- Österreichisches Normungsinstitut 2009, *ÖNORM EN 13848-1*, Richtlinie, Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- Österreichisches Normungsinstitut 2014, *ÖNORM EN 13848-6*, Richtlinie, Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

- Pace, P. 2012, "Time to eliminate the data graveyards", *Railway Gazette International*, no. 12.
- Plasser & Theurer 2013, *Track Recording Cars*, Plasser & Theurer Export von Bahnbau-
maschinen Gesellschaft m.b.H., Wien.
- Rießberger, K. 1997, "Gleisgeometrie und Wirtschaftlichkeit- oder: wie gut muss ein Gleis
sein?", *Österreichische Verkehrs Gesellschaft- Spezial*, pp. 64-94.
- Rohim Boy Berawi, A. 2013, *Improving Railway Track Maintenance Using Power Spectral
Density*, Universidade do Porto.
- Röhler, M. 2013, "Jahresbericht 2005-2013", [Online], . Available from:
[http://www.schienencontrol.gv.at/deutsch/schienen-control/publikationen/jahresbe-
richte/jahresberichte.html](http://www.schienencontrol.gv.at/deutsch/schienen-control/publikationen/jahresbe-
richte/jahresberichte.html).
- Schöpp, A. 2011, *Gleislagequalität – Hohllagen bei Betonschwellengleisen*, Leopold-Fran-
zens-Universität Innsbruck.
- Schultheiß, H. & Schulz, G. 1985, "Schwellen für die Deutsche Bundesbahn", *Eisenbahn-
technische Rundschau*, no. 10, pp. 723-728.
- Selig, E., Cardillo, G., Stephens, E. & Smith, A. 2008, "Analysing and forecasting railway
data using linear data analysis", *Proceedings of the 11th International Conference on
Computer System Design and Operation in Railways and other Transit Systems*.
- Terashima, R., Matsuda, H., Takikawa, M. & Kozeki, M. 2011, "Study of Condition Moni-
toring for Track Irregularity and Track Materials using Commercial Test Car", World
Congress on Railway Research, .
- UIC 2010, *Guidelines for the Application of Asset Management in Railway Infrastructure
Organisations*, 2nd edn, International Union of Railways, Paris.
- Veit, P. 2013, "Instandhaltung und Anlagenmanagement des Fahrwegs", *Handbuch Ei-
senbahninfrastruktur*, pp. 1009-1054.
- Woodhouse, J. 2014, "Briefing: Standards in asset management: PAS 55 to ISO 55000",
- Yella, S., Dougherty, M. & Gupta, N.K. 2009, "Condition monitoring of wooden railway
sleepers", *Transportation research part C: emerging technologies*, no. 1, pp. 38-55.
- Zhang, Y., Murray, M. & Ferreira, L. 1999, "An integrated model for track degradation
prediction", *World Transport Research: Selected Proceedings of the 8th World Con-
ference on Transport Research*.

A1. Einblicke in die TUG-Datenbank

Die TUG-Datenbank wurde am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der technischen Universität Graz 2009 aufgebaut und in den letzten Jahren schrittweise erweitert. Die Datenbank kombiniert Informationen des Eisenbahnfahrwegs aus unterschiedlichen Datenquellen und erlaubt sowohl die netzweite als auch querschnittsgetreue Auswertung dieser. Einzelne Veröffentlichungen (vgl. [Hummitzsch 2009], [Holzfeind 2009] und [Enzi 2011]) beschäftigen sich bereits ausführlich mit der Beschreibung des genauen Aufbaus dieser Datenbank, weshalb nachfolgend lediglich deren Grundzüge angeführt werden.

Die Zuordnung von Informationen erfolgt im TUG-Netz nicht kontinuierlich, sondern alle fünf Meter diskret über sogenannte Streckenquerschnitte. Das bedeutet, dass die hinterlegten Informationen alle fünf Meter für Auswertungen zur Verfügung stehen, Informationen die dazwischen liegen nicht. Diese Zuordnung erlaubt es die gespeicherte Datenmenge zu reduzieren und den Verlust an notwendigen Informationen gegenläufig nahezu auszuschließen, da eine detailliertere Ausgabe der Daten nicht von der Genauigkeit der Eingangsdaten unterstützt würde. Auch wenn Messsignale eine geringere Abtastrate aufweisen als die Abstände zwischen zwei Streckenquerschnitten, so referenzieren die berechneten Qualitätssignale dennoch ihre Information immer auf die Streckenquerschnitte selbst.

A1.1 Aufbau der TUG-Datenbank

Um die Informationen aus unterschiedlichen Datenquellen zu nutzen, ist es notwendig diese in eine vergleichbare Datengrundstruktur zu überführen. Die Grundlage für diesen Referenzierungsvorgang bildet die Zusammenfassung einzelner ÖBB-Strecken in größere zusammenhängende Abschnitte mit aufsteigender Kilometrierung (siehe Abbildung 109). Die so entstehenden Abschnitte werden folglich als TUG-Strecken bezeichnet.

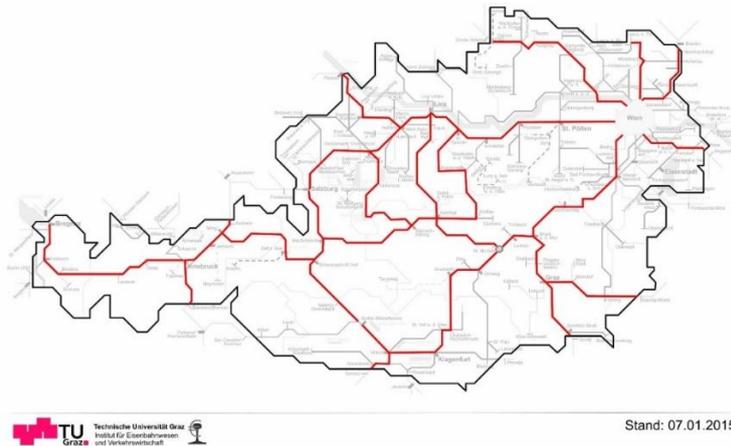


Abbildung 109 Darstellung des österreichischen Eisenbahnnetzes [grau] und der Strecken des TUG-Netzes [rot]

Die drei Ordnungsebenen „TUG-Strecke“, „Gleisnummer“ und „Streckenkilometer“ ermöglichen über die Bildung eines Primärschlüssels die eindeutige Identifikation jedes Streckenquerschnitts im TUG-Netz. Das gesamte TUG-Netz ist auf diese Art in 22 TUG-Strecken unterteilt und umfasst zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit rund 3.800 Gleiskilometer. Dadurch gelingt es über das TUG-Netz einen Großteil des Hauptnetzes der ÖBB abzubilden.

Einbauten	Brücken Tunnel Bahnhöfe Eisenbahnkreuzungen Weichen Stationsnamen	Messsignale	Spurweite Schienenfußabstand Schienenneigung Überwälzung Gleislage 1-70 m Gleislage 3-25 m
Trassierungsparameter	Krümmung Radius Überhöhung zulässige Geschwindigkeit (VzG)	Qualitätssignale	SigmaH SigmaR MDZ-a Standardabweichung Spur Mittelwert Spur
Maschineneinsätze	Einsatztyp Einsatzzeitpunkt	Qualitätswerte	Raumanfangsqualität Verschlechterungsrate DeltaSchnitt
Oberbauinformationen	Schienenprofil Schienengüte Einbaujahr Schiene Schwellentyp Einbaujahr Schwelle	Belastungsdaten	1997 1998 1999 2000 2001 2002 2007 2010

Abbildung 110 Überblick über jene Informationen, die jedem Streckenquerschnitt eindeutig zugeordnet sind

A1.2 Messsignale, Qualitätssignal und Qualitätswerte

In periodischen Abständen erfasst einer der Messwagen der ÖBB (siehe A2) den Zustand des Eisenbahnoberbaus über die Aufnahme von Mess- bzw. Qualitätssignalen. Jährlich werden diese Daten validiert und anschließend in das TUG-Netz eingepflegt. Die Datenbank zielt aktuell nicht darauf ab, kurzfristige Entwicklungen darzustellen oder den

Anlagenzustand zeitnah zu ermitteln, sondern bildet eine Datengrundlage für unterschiedliche Forschungsarbeiten.

Prinzipiell beinhaltet die aktuelle Datenbank neben zusätzlichen Informationen (siehe Abbildung 110) alle gültigen Messfahrten zwischen den Jahren 2001 und Ende 2013. Um für die Datenauswertung innerhalb dieser Arbeit die gleiche Datengrundlage zu schaffen, wurden lediglich die Messfahrten zwischen 2001 und Ende 2012 den Ausführungen zu Grunde gelegt. Mögliche nachträgliche Änderungen in den Daten können somit im Lauf der Entwicklung dieser Arbeit keine Auswirkungen auf die Ergebnisse besitzen. Die Anzahl der jährlichen Messfahrten nimmt über die Jahre bis 2005 deutlich zu, was dazu führt, dass sich die Hauptauswertungen, sofern sie kein Regressionsmodell berücksichtigen, auf die Zeitperiode zwischen 2005 und 2012 beziehen. Durch die geringere Anzahl von Werten vor 2005 könnte keine ausreichende Netzabdeckung über Jahreswerte erzielt werden. Angegebene Mengen würden zu gering ausfallen, da für einen Teil des Netzes kaum bzw. keine Werte zur Bestimmung des Anlagenzustands vorliegen. Ein Regressionsmodell erlaubt diese Tatsache zu vernachlässigen, da über den eingeschriebenen Trend die zeitliche Entwicklung der Werte auch bei wenigen Messwerten interpoliert werden kann.

Vorhergehende Forschungsarbeiten etablierten für einzelne Qualitätssignale (MDZ-a und SigmaH) ein netzweit berechnetes Regressionsmodell (vgl. [Hummitzsch 2009]). Dieses Regressionsmodell erlaubt die Beschreibung des Verschlechterungsverhaltens der Gleislage zwischen zwei Maschineneinsätzen (realen oder imaginären) über einen exponentiellen Ansatz. Eine plötzliche Verbesserung des Gleislageniveaus ohne die bekannte Durchführung eines Maschineneinsatzes wird als imaginärer Maschineneinsatz, als sogenannter „TUG-Einsatz“ gekennzeichnet. Dieser Einsatz kann einen nicht eingetragenen Maschineneinsatz ebenso repräsentieren, wie auch einen möglichen Messausreißer in der Zeitreihe. Unabhängig ob imaginärer oder realer, beide Arten von Maschineneinsätzen unterteilen die betrachtete Zeitreihe eines Streckenquerschnitts in einzelne Zeiträume. Innerhalb dieser Zeiträume wird die Entwicklung der Gleislage über ein Regressionsmodell beschrieben, wobei ein exponentieller Zusammenhang vorausgesetzt wird (vgl. [Rießberger 1997]). Der exponentielle Ansatz folgt der Aussage, dass sich ein gutes Gleis langsam verschlechtert, ein schlechtes umso schneller. Diese Tatsache lässt sich mathematisch über eine Differentialgleichung beschreiben, die nach ihrer Lösung zu folgender Form der Verschlechterung führt:

$$Q(t) = Q_n * e^{b_n * t}$$

Dabei steht Q_n für die Raumanfangsqualität des n-ten Raums nach dem Einbaujahr des Schotters. Die Raumanfangsqualität repräsentiert jene Qualität des Regressionsmodells, die zum Zeitpunkt Null des Zeitraums n vom Regressionsmodell eingenommen wird.

Im Fall des in Abbildung 111 dargestellten Streckenquerschnitts lassen sich fünf unterschiedliche Räume erkennen. Die vertikalen Linien symbolisieren unterschiedliche Arten von Maschineneinsätzen, wobei die TUG-Datenbank folgende Einsatzarten unterscheidet:

- I Unterbausanierung
- I Schotterbettreinigung
- I Gleisneulage
- I Stopfen und Stabilisieren von Gleisen
- I Weichstopfen
- I Schleifen

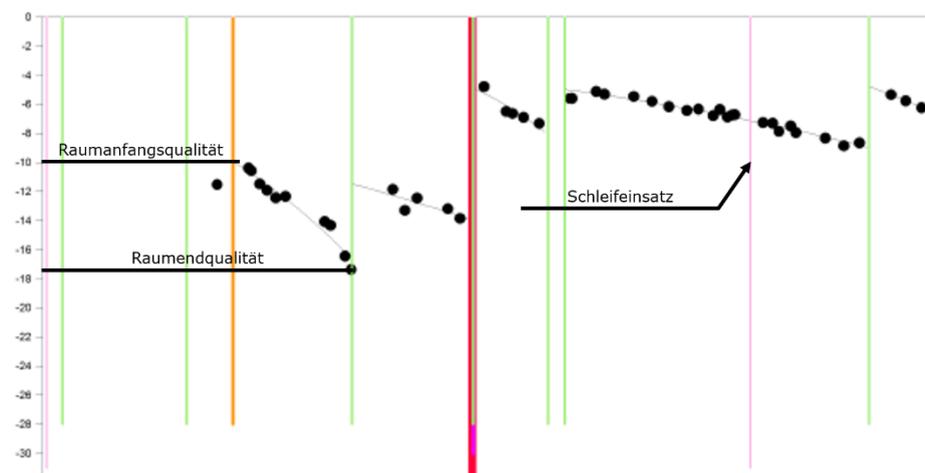


Abbildung 111 Typische Raumfolge eines Streckenquerschnitts

Bis auf Schleifeinsätze begrenzen sämtliche angeführten Einsätze einen Qualitätsraum. Jedem Raum wird in eindeutiger Form Raumanfangsqualität, Verschlechterungsrate und das Gütekriterium „DeltaSchnitt“ zugeordnet. DeltaSchnitt gibt die Größe der Abweichungen der einzelnen Messpunkte von der berechneten Regression an und erlaubt so eine Aussage über die Anpassungsgüte der eingeschriebenen Regressionskurve zu treffen.

Mögliche Störstellen oder Übergangsbereiche beeinflussen die Ausbildung der einzelnen Qualitätssignale und erschweren so die eindeutige Ergebnisinterpretation. Auswertungen frei von diesen Einflüssen berücksichtigen im Falle der Gleislage das Attribut „gültige Länge“ (vgl. 4.2.1). Das Attribut gültige Länge detektiert homogene Bereiche und berücksichtigt lediglich Streckenabschnitte in denen sich die Oberbaudaten Radius, Belastung, zulässige Geschwindigkeit, Schiene, Schwelle und durchgeführte Maschineneinsätze nicht verändern. Einbauten wie Bahnhof, Weichen, Brücken, Eisenbahnkreuzungen oder Tunnelbereiche dürfen in Bereichen gültiger Länge ebenfalls nicht vorkommen. Das Attribut gültige Länge erlaubt die Schaffung einer homogenen Stichprobe, die frei von bekannten Störquellen die Auswertung von Effekten erlaubt.

Über Abfragen unterschiedlicher Art ist es möglich aus der beschriebenen Datengrundgesamtheit Daten nach vorgegebenen Kriterien zu filtern. Diese Filterung kann je nach Anforderung sowohl querschnittsgetreu als auch raumspezifisch erfolgen. Es ist so möglich die durchschnittliche Ausprägung eines Qualitätssignales vor einer Neulage genauso zu ermitteln, wie auch die durchschnittliche Abweichung zur Normspurweite von Holzschwellen im Jahr 2008. Durch die eindeutige Verknüpfung der Daten ist möglichen Auswertungen nahezu keine Grenze gesetzt.

A2. Vom Ursprung der Messsignale – der Messwagen

Die Messsignalanalyse bildet einen zentralen Bestandteil dieser Arbeit. Aus diesem Grund soll ohne Beschränkung der Allgemeinheit im nachfolgenden Abschnitt die Möglichkeiten der Messung durch einen Messwagen näher beschrieben werden. Dabei wird das Hauptaugenmerk auf jene Messsysteme gelegt, deren Messsignale Eingang in die Bewertung finden. Dabei werden in erster Linie der Messwagen der ÖBB EM-250 (siehe Abbildung 112) sowie die neue Messwagengruppe der FA Plasser und Theurer beschrieben.



Abbildung 112 Messwagen als selbstfahrende Variante (links) [Plasser & Theurer 2013] oder angehängt an einen Zugverband (rechts) [Hanreich 2004]

In den letzten Jahren hat die Messung von unterschiedlichen Daten am Gleis, auf der einen Seite mit der Zunahme von Hochgeschwindigkeitsstrecken und auf der anderen Seite aufgrund des steigenden Kostendrucks in der Planung von Instandsetzungs- oder Re-Investitionsmaßnahmen, in ihrer Bedeutung stark zugenommen. Messzüge schaffen dabei eine hohe Messpräzision und erlauben eine Messung bei laufendem Betrieb, angehängt an einen bereits bestehenden Zug oder als selbstfahrende Variante. [Auer 2013]

A2.1 Messung der Gleisgeometrie

Die Messung der Gleisgeometrie (POS/TG Position-Track Geometry Measurement System) erfolgt heutzutage in Österreich standardmäßig über eine Inertialmesseinheit (IMU), zwei optische Spurweitenmesssysteme (Dual OGMS) und die Navigationsanlage (Navigationscomputer mit integriertem GPS-Empfänger und GPS-Antenne). Die eigentliche Messung realisiert dabei ein Messrahmen, der an den vier Achslagern des Laufdrehgestells befestigt ist und auf dem die IMU und die vier Messsensoren der doppelten Spurweitenmessung angebracht sind (siehe Abbildung 113). Der Messrahmen garantiert dabei eine ständige parallele Ausrichtung der Sensoren und der IMU zur Schienenoberfläche, wodurch dieser als Referenzebene für die Gleismessung herangezogen werden kann. Über die drei Beschleunigungsaufnehmer sowie die drei Drehgeber zur Messung von Winkeländerungen

ist es möglich die Bewegungen im Rahmen einer Raumkurve bezogen auf Erdkoordinaten darzustellen. Die Aufnahme der Winkeländerungen erfolgt dabei im Detail mit Hilfe von drei optischen Kreismesssystemen (Rate Gyros). Das Messsystem erfasst somit die translatorischen und rotatorischen Beschleunigungen, aus denen im Anschluss durch doppelte Integration die Lage des Messfahrzeugs und des Gleises berechnet werden können. Durch die Messung der Spurweite lässt sich folglich die Raumkurve für bei Schienen separat ermitteln. [Hanreich 2004]

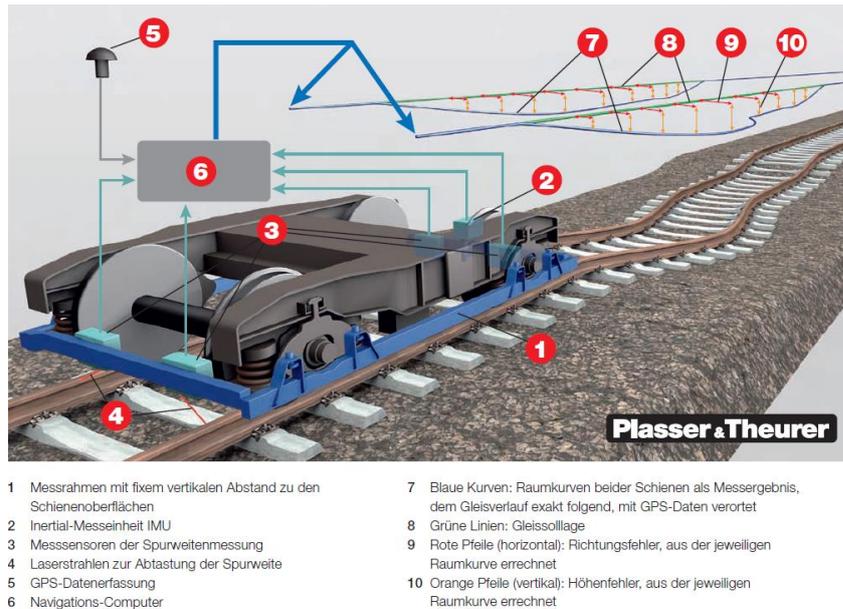


Abbildung 113 Arbeitsweise des Plasser & Thurer Gleisgeometriemesssystems

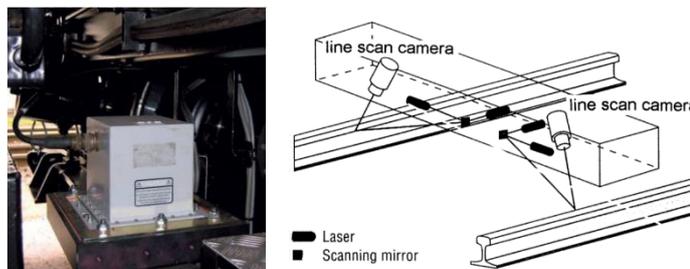


Abbildung 114 Inertialmesseinheit [links] Messprinzip der optischen Spurweite [rechts]

Die optische Erfassung der Spurweite (OGMS) funktioniert über eine Lasertriangulation mit deren Hilfe über einen Spurbalken, in dem zwei Laser, zwei Galvo-Spiegel und zwei Zielkameras untergebracht sind, die Spurweite 14 mm unterhalb der Schienenoberkante ermittelt wird (siehe Abbildung 114). [Hanreich, Wogowitsch & Datler 2008]

Das Wegmesssystem bestimmt die Messauslösung und ermöglicht so pro Radumdrehung 1000 Impulse. Aus der entstehenden Raumkurve ist es nun möglich, in vom Anwender bestimmten Abständen (z.B. alle 25 cm), alle gewünschten Daten der Gleisgeo-

metrie abzuleiten und über eine Schnittstelle aufzuzeichnen bzw. abzurufen. Bereits während der Messung realisiert ein Grenzwert-Überschreitungsbericht die Definition einzelner Schwellenwerte, deren Überschreitung noch während der Messung angezeigt wird. Außerdem lassen sich in die Auswertungssoftware neben unterschiedlichen Berechnungsalgorithmen für Kennziffern noch die Lage der rechten und linken Schiene, abgeleitet aus der Raumkurve, in drei unterschiedlichen Wellenlängen und drei unterschiedlichen Sehnenlängen in Echtzeit darstellen. Historische Daten können dabei zusammen mit den Messdaten anderer Messsysteme simultan dokumentiert werden.

Seit Beginn der Messungen stellt sich immer wieder das Problem die gemessenen Daten den einzelnen Streckenkilometern in einer entsprechenden Genauigkeit zuzuordnen, um eine Wiederholgenauigkeit und Reproduzierbarkeit gemäß EN-13005 bzw. DIN 1219-1 zu gewährleisten. Zu Beginn wurde dabei die Ortssynchronisation der Gleisgeometrieparameter von einem Bediener des Messfahrzeugs vorgenommen. Dabei wurde jeweils der örtliche Beginn der Messung genau dokumentiert und im Laufe der aktuellen Messung zum richtigen Zeitpunkt ein im Fahrzeug befindlicher Synchronisationsknopf gedrückt. Somit konnte eine Verbindung geschaffen werden zwischen z.B. den angebrachten Kilometrierungstafeln und den aufgezeichneten Messdaten. Da diese Vorgehensweise vor allem bei höheren Geschwindigkeiten an Genauigkeit einbüßt, wurde in einem weiteren Entwicklungsschritt versucht die manuelle Synchronisation über Magnete oder Balisen zu ersetzen. Eine Weiterentwicklung dieses Systems stellten dabei kodierte ALDs (Automatic Location Detectors) dar. Jedem ALD ist dabei eindeutig eine im Netz nur einmal vergebene Identifikationsnummer zugeordnet, die es ermöglicht bei Überfahrt des Messzugs die entsprechenden Standortdaten zu entnehmen. Die Kostspieligkeit dieses Systems und der hohe Wartungsaufwand aufgrund der Sensibilität gegenüber äußeren Einflüssen führten dazu, dass sich das System nicht durchsetzte. Mit dem Aufkommen der Satellitentechnik und der Zunahme der Genauigkeit des Gesamtsystems entwickelte Plasser American ein neuartiges System auf Basis satellitengestützter Standortsynchronisation (GALS= GPS Aided Location Synchronisation). Dabei handelt es sich um ein System, das die Daten aus dem differentiellen GPS (prinzipiell auch unter dem Verlust von Genauigkeit mit reinem GPS möglich) mit den Daten des POS/TG kombiniert. Der dabei eingesetzte Inertial-Navigations-Algorithmus (IIN) erlaubt auf der einen Seite ein Weiterführen der Messung auch bei kurzweiligem Ausfall des differentiellen GPS und erhöht auf der anderen Seite die Anzahl der Positionsangaben auf 200/s, im Gegensatz zu reinen GPS-Systemen, die eine Standortermittlung nur jede Sekunde ermöglichen. [Oberlechner, Metzger & Zywiel 2001]

Das beschriebene System weist im Normalfall im Geschwindigkeitsbereich von 5 km/h bis 250 km/h eine Genauigkeit von unter 1 mm auf und erlaubt so eine eindeutige Kilometrierung der Messdaten. Unter Einhaltung der angeführten Normen ist es dennoch

notwendig die ausgegebenen Daten weiter zu bearbeiten, da bereits Abweichungen von weniger als 2 m, die aufgrund von Unregelmäßigkeiten in der Messung (z.B. lange Unterbrechung des GPS-Signals) herrühren, das Ergebnis unbrauchbar machen. Dabei wird im Rahmen der anschließenden Bearbeitung der Messfahrten eine dieser als Referenzkanal gewählt um anschließend die übrigen Messfahrten in 50m Abschnitte zu unterteilen und zu verschieben, bis die Kovarianzen der Datensätze gegen 1 streben. Anders formuliert werden dabei die einzelnen Messfahrten gegenüber dem Referenzkanal so lange verschoben, bis Spitze auf Spitze der einzelnen Messfahrten zu liegen kommen (siehe Abbildung 115). [Hanreich, Wogowitsch & Datler 2008]

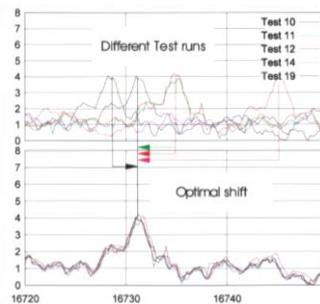


Abbildung 115 Vergleich zwischen den ursprünglichen Messfahrten [oben] und den Messfahrten nach der Nachbearbeitung [unten] [Hanreich 2004]

A2.2 Messung von Schienenprofil und Abnutzung

Um genauere Information über den aktuellen Schienenzustand zu erhalten bedient man sich einer Lasertechnik in Kombination mit zwei Empfangskameras, die beidseitig auf einem Drehgestell montiert sind. Dabei dienen die Laser als Messwertgeber, die auf das Schienenprofil gerichtet sind und es ermöglichen den gesamten Querschnitt der Schiene vom Schienenfuß zur Schienenoberfläche über die Empfangskameras zu erfassen. Die Lasereinheiten sind dabei präzise temperaturstabilisiert um mögliche Einflüsse von Umgebungslicht bestmöglich ausschließen zu können. Dabei tasten jeweils vier im unsichtbaren Frequenzbereich arbeitende Laser in Zeitabständen von 100 μ s die Schiene ab. Durch das so entstehende Laserfeld ist es möglich unter zu Hilfenahme von jeweils zwei hochauflösenden Kameras ein entzerrtes, hochgenaues Querschnittprofil von der Schienenoberkante bis zum Schienenfuß zu erstellen und folgende Parameter für beide Schienen getrennt voneinander zu bestimmen:

- Vollständiges Profil
- Schienenhöhe
- Schienenkopfbreite
- Schienenneigung
- Spurweite und minimale Spurweite

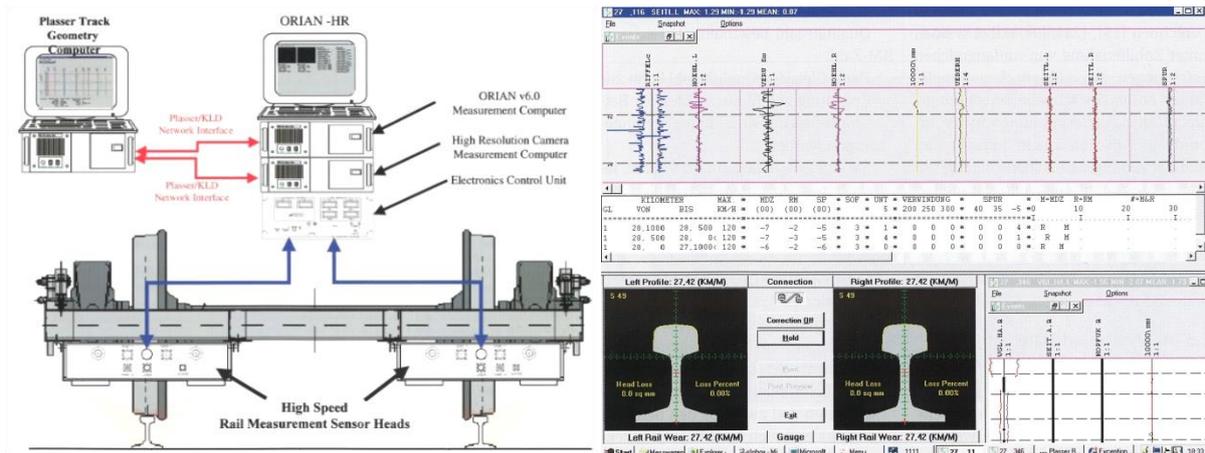


Abbildung 116 Messung von Schienenprofil und Abnutzung [Hanreich 2004]

Außerdem lassen sich bei bekanntem Sollprofil der Schiene aus den gemessenen Werten unten aufgezählte Messparameter ableiten:

- Abnutzung in Höhe und Breite
- Abnutzung der Schienenquerschnittsfläche, angegeben in Quadratmillimeter
- Abnutzung der Schiene an bis zu 9 benutzerdefinierten Punkten am Schienenkopf

Durch eine zusätzliche Kamera ist es möglich den Rad-Schiene-Kontakt für die linke und rechte Schiene zu erfassen, wodurch unter Zuhilfenahme eines zusätzlichen Algorithmus die äquivalente Konizität berechnet wird. [Hanreich 2004]