



Diplomarbeit

Auswertung von Radkraft-Messdaten zur Ermittlung eines Lastkollektives für die Lebensdauerabschätzung von Schienen

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-
Ingenieurs (Dipl.-Ing. oder DI)

Eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Maschinenwesen und
Betriebswissenschaften
von

Christian Pittner

Mat.Nr.: 1025853
Josefstädterstraße 51/3/12
1080 Wien
Österreich

unter der Leitung von
Dipl.-Ing. Dr. Karl-Otto Endlicher
Institut für Mechanik und Mechatronik, E325

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der
Bezeichnung

Diplomarbeit

Nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde.

Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in der Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, April 2017

Christian Pittner

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt und begleitet haben.

Mein Dank gilt an erster Stelle Herrn DI Roman Schmid von der ÖBB Infrastruktur AG der dieses Thema angeregt und ermöglicht hat. Im Besonderen für die sehr gute fachliche und organisatorische Zusammenarbeit, sowie die Zurverfügungstellung eines Büroarbeitsplatzes bei der ÖBB Infrastruktur AG.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Dr. Paul Mittermayr, Büro für angewandte Mechanik und Mathematik, für die Einschulung in die benötigten Programme und der Unterstützung bei der Auswertung bedanken.

Ich möchte mich außerdem bei Herrn Dr. Karl-Otto Endlicher, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit), für die fachliche Betreuung und die redaktionellen Korrekturen der Arbeit bedanken.

Weiter bei den Herren Ao. Prof. Dr. Manfred Plöchl und Ass. Prof. Dr. Johannes Edlmann für die organisatorische Unterstützung von Seiten des Instituts für Mechanik und Mechatronik der TU Wien.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern die mir das Studium ermöglicht haben und von denen ich immer Unterstützung bekommen habe.

Letztlich möchte ich mich bei meinen Freunden und Freundinnen bedanken, die mir besonders in Zeiten in denen der Erfolg der Arbeit ungewiss erschien stets motivierend und auch immer mit guten Ratschlägen zur Seite standen.

Kurzfassung

Um die Lebensdauer einer Schiene abzuschätzen und dadurch die optimalen Wechselintervalle vorausschauend planen zu können, ist es unerlässlich, die Belastung auf die Schienen möglichst genau zu kennen. Normalerweise sind Schienen Belastungen unterworfen, die unterhalb der Dauerfestigkeitsgrenze des verwendeten Werkstoffes liegen. Die eigentliche Abnutzung der Schienen erfolgt durch den Verschleiß infolge des Rollkontaktes mit den Rädern der Schienenfahrzeuge. Daher kann die Liegedauer von Schienen je nach Belastung auch bis zu 30 Jahre oder länger betragen. Sind die Schienen aber besonders hohen Belastungen unterworfen, so kann sich die Liegedauer dramatisch reduzieren. Die Abschätzung, wie lange eine Schiene in einem besonders hoch belasteten Streckenabschnitt verwendet werden kann, hängt stark von der Belastung ab. In einem Bogen beispielsweise sind die Belastungen nicht mehr so leicht abschätzbar, da es auch zu ausgeprägten Seitenführungskräften kommt. Wenn man die tatsächlichen Belastungen aber kennt, so kann mit heutigen Finite Element-Methoden eine Vorhersage getroffen werden, wann der Werkstoff der Schiene seine Zeitfestigkeit erreicht.

In der vorliegenden Arbeit wurde ein besonders hoch belasteter Streckenabschnitt im Schienennetz der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) ausgewählt, um mit Hilfe der Daten einer ortsfesten Schienenkraft-Messstelle die tatsächlich auftretenden Belastungen auf die Schiene zu ermitteln. Die gewählte Messstelle liegt in einem sehr engen Bogen mit einem Bogenradius von 183 m auf einer der Hauptverkehrsachsen Österreichs. Besonders durch den abwechslungsreichen Verkehr an Fernreisezügen, Nahverkehrszügen und Güterzügen stellt diese Messstelle ein vielfältiges Belastungskollektiv zur Verfügung.

Im Folgenden werden in der ersten Betrachtung der Belastung der Schienen die Mittelwerte der Kräfte über die Messstelle ermittelt, um einen Überblick über die zu erwartenden Kräfte zu bekommen. Dabei wird auf unterschiedliche Fahrzeugarten und Fahrgeschwindigkeiten eingegangen.

Nachfolgend werden die Kräftepaare der Aufstandskraft (Q-Kraft) und der Seitenführungskraft (Y-Kraft) an jedem Schwellenfach gegenüber gestellt, um die Belastungen der beiden Kräfte an gleichen Belastungsquerschnitten darzustellen. Von Interesse sind dabei die relativen Häufigkeiten des Auftretens der beiden einzelnen Kraftkomponenten, als auch deren Gleichzeitigkeit des Auftretens. Dadurch ergeben sich Häufigkeitsdiagramme, die die tatsächliche Belastung hinsichtlich der Y- und Q-Kraft auf die Schienen wiedergeben.

Darüber hinaus werden auch auf Basis der vorliegenden Daten Abschätzungen erarbeitet, um wie viel ein zukünftiges Fahrzeug mit 25 t Radsatzlast langsamer fahren muss, damit es die gleiche Belastung in einem engen Bogen auf die Schienen ausübt, wie ein heutiges Fahrzeug mit 22,5 t Radsatzlast.

Des Weiteren werden auch die tatsächlichen Kraftverläufe der Y- als auch der Q-Kraft über die Messstelle für einen Railjet der ÖBB und einen Güterzug betrachtet. Diese zusätzlichen Betrachtungen zeigen durchaus interessante Zusammenhänge auf.

Abstract

To estimate the operational lifetime of rails and to derive the optimal interval for replacing them, it is necessary to know the loads which are acting on the rails. Usually these loads are among the long life fatigue strength of the used material. The actual abrasions of the rails are driven by wear because of the contact between the rail and the wheels of the vehicles. The duration of the use of rails can reach 30 years or more. If the rails are under extraordinary loads, the duration of use can reduce dramatically. The estimation, how long a rail can be used in a high frequented rail sector depends heavily on the loads which are applied. In a curve for example, the loads on the rails are difficult to estimate, because of the lateral guiding forces acting in addition to the vertical wheel/rail forces. If the actual loads are known, it is possible to calculate a prediction, when the material of the rail is reaching the finite-life fatigue strength by using modern finite element methods.

In this present thesis a high frequented rail sector in the network of the Austrian Federal Railways was focused to determine the actual loads which are acting on the rails by using a stationary measuring site for wheel-rail forces. This measuring site was chosen, because it is located in a very tight bend with a radius of 183 m on a major traffic route of Austria. Especially the varying traffic at this rail sector consisting of long-distance trains, commuter trains and freight trains provides a diverse load spectrum.

In the first consideration of the loads on the rails, the mean values of the acting forces over the measuring site were focused. In this consideration various vehicle types and driving speeds are observed.

In the following the couple of forces, the vertical wheel/rail force (Q) and the lateral guiding force (Y) measured between the sleepers are considered, to show both forces, which are acting on the same cross section of the rail. The interest is concentrated on the relative frequency of the both acting forces and the concurrency of these forces. With these results, diagrams can be drawn for the actual forces with their frequency of acting.

Furthermore on base of the available data an estimation on how fast a future vehicle with an axle load of 25 t should be permitted to drive, to apply the same loads on the rails in a tight bend as a current vehicle with 22,5 t axle load, was accomplished.

Furthermore the actual curves of the Y- and Q-forces over the measuring site are plotted for a "Railjet"-train of the Austrian Federal Railways and a freight train. This consideration is showing quite interesting relationships.

Inhaltsverzeichnis

1.	Ziel der Arbeit.....	1
2.	Einleitung	2
2.1.	Bogenlauf von Schienenfahrzeugen.....	2
2.1.1.	Grundlagen des Bogenlaufs	2
2.1.2.	Rad/Schiene Kräfte.....	4
2.2.	Die Messstelle Breitenstein	12
2.2.1.	Aufbau der Messstelle	13
2.2.2.	Lage der Messstelle.....	16
2.2.3.	Gleislage.....	19
2.2.4.	Geschichte der Semmeringbahn.....	22
2.2.5.	Statistische Datenauswertung in der Messstelle.....	25
3.	Messdatenauswertung	28
3.1.	Methodik der Auswertung und verwendete Programme.....	28
3.2.	Einflussfaktoren auf die Messergebnisse	30
3.3.	Statistische Auswertungen als Mittelwerte über die Messstelle.....	35
3.3.1.	Auswertung der Gesamtheit der Überfahrten	36
3.3.2.	Auswertung nach spezifischen Fahrzeugen	37
3.4.	Schwellenfachspezifische Auswertungen.....	45
3.4.1.	Theoretische Überlegungen zum Auswerteprozess.....	45
3.4.2.	Schwellenfachspezifische Auswertung	49
3.4.3.	Parametervariationen zur Betrachtung zukünftiger Radsatzlasten	63
3.4.4.	Betrachtung der Kraftverläufe über der Messstelle	69
4.	Schlussbetrachtung.....	80
5.	Literaturverzeichnis	81
6.	Formelverzeichnis	84
7.	Abkürzungsverzeichnis	85
8.	Anhang.....	86
8.1.	Zusätzliche Diagramme von einer Woche im Juni 2016.....	86
8.2.	Absolute Häufigkeiten zu den Diagrammen in Kapitel 3.4.2.....	90

1. Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, aus den vorhandenen Messdaten einer stationären Schienenkraft-Messstelle im Netz der Österreichischen Bundesbahnen mehrere Lastkollektive für die tatsächliche Belastung der Schienen im Bogen abzuleiten. Der Fokus liegt (aufgrund der Lage der Messstelle in einem Bogen) auf den vor allem während der Bogenfahrt von Schienenfahrzeugen auftretenden seitlichen Führungskräften (Y-Kräfte). Im speziellen soll die Wechselwirkung zwischen den vertikal wirkenden Aufstandskräften (Q-Kräfte) und den gleichzeitig auftretenden Führungskräften herausgearbeitet werden.

Grundlage dieser Betrachtung sind die gemessenen Y- und Q-Kräfte, die schwellenfachspezifisch für jedes Fahrzeug, das die Messstelle passierte, vorliegen. Die Messdatensätze beinhalten darüber hinaus auch Daten zu verschiedensten Parametern, von aus den Messsignalen abgeleiteten Funktionswerten wie Fahrgeschwindigkeit, Radsatzfolge, unausgeglichene Querschleunigung oder statische und dynamische Radaufstandskräfte, sowie direkt gemessene Umwelteinflüsse. Durch die Auswertung der Radsatzfolge-Muster ist es möglich, die Fahrzeugbauart zu erkennen und somit weitere Differenzierungen der Daten durchzuführen und die Messdaten nach verschiedensten Gesichtspunkten hin zu untersuchen, was eine Erweiterung zu dieser Arbeit darstellen kann.

Das Besondere der hier betrachteten Messstelle in Breitenstein am Semmering ist, dass diese sich in einem sehr engen Bogen befindet. Der Bogenradius liegt bei 183 m, wodurch die aktuellen normativen Vorgaben hinsichtlich Laufverhalten eines Schienenfahrzeuges (EN 14363:2016) [1] verlassen werden, da in dieser, für die Zulassung von Schienenfahrzeugen maßgeblichen Norm, der sehr enge Bogen bei 250 m Radius (Prüfbereich 4) endet. Somit liegt dieser viel befahrene Streckenabschnitt außerhalb der für Schienenfahrzeuge nachzuweisenden Bogengängigkeit. Für eine lückenlose Prüfung der Eigenschaften eines Fahrzeuges wäre somit ein weiterer Prüfbereich für noch engere Bögen ($R < 250$ m) wünschenswert.

In weiterer Folge werden die in dieser Arbeit dargelegten Ergebnisse zu den Kraftverläufen der Aufstands- und Führungskräften als Belastung für eine Finite Elemente Berechnung der Schiene mit dem Ziel einer Lebensdauerabschätzung verwendet. Mit diesen Erkenntnissen kann die Liegedauer von derartig hoch beanspruchten Schienen im Bogen optimiert werden, bzw. die Lastkollektive können mit geänderter Zugzusammenstellung für ähnliche Streckenabschnitte verwendet werden.

2. Einleitung

Im Folgenden beinhaltet diese Einleitung einen kurzen Abriss zum Thema Bogenlauf von Schienenfahrzeugen und Literaturinhalte zu Rad/Schiene Kräften. Weiters werden die Messstelle mit ihrer technischen Ausrüstung sowie der besonderen Lage an einer der wichtigsten Hauptstrecken des österreichischen Eisenbahnnetzes beschrieben und die theoretischen Grundlagen zur Messdatenauswertung erläutert.

2.1. Bogenlauf von Schienenfahrzeugen

2.1.1. Grundlagen des Bogenlaufs

Betrachtet man ein Schienenfahrzeug im überhöhten Bogen, wie nachstehende Abbildung 1 zeigt, so kann man für den Massenmittelpunkt des Fahrzeuges den Schwerpunktsatz im angegebenen Koordinatensystem $(\vec{e}_q - \vec{e}_h)$ unter der Verwendung der nachstehenden Größen anschreiben.

ψ ...Querneigungswinkel der Fahrbahn in rad

\vec{Q}_a, \vec{Q}_i ...Vertikalkraft im Rad/Schiene-Kontakt
(außen/innen) in N

\vec{Y}_a, \vec{Y}_i ...Lateralkraft im Rad/Schiene-Kontakt
(außen/innen) in N

g ...Normfallbeschleunigung in m/s^2

m ...Masse des Fahrzeuges in kg

v ...Fahrgeschwindigkeit in m/s^2

R ...Bogenradius in m

s ...halbe Stützweite in m

u ...Überhöhung in m

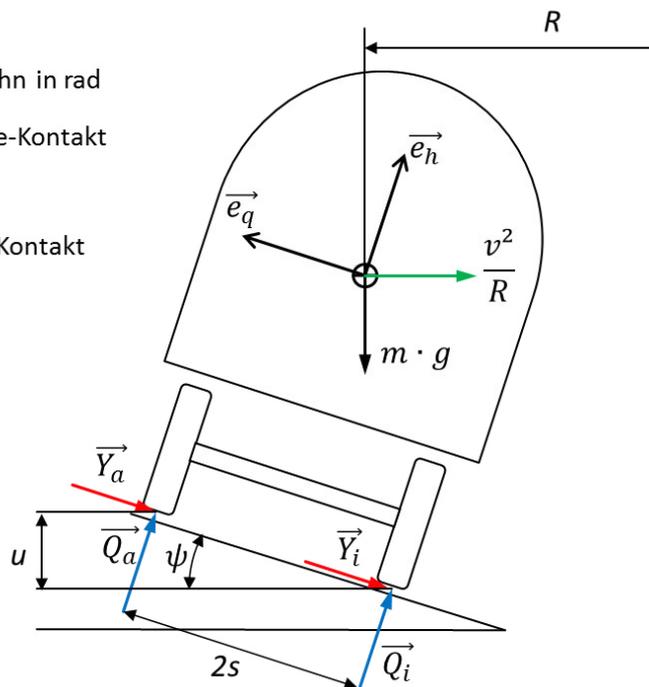


Abbildung 1: Schienenfahrzeug im Bogen

$$\text{SPS in } \vec{e}_q \text{ - Richtung: } -m \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \cos(\psi) = -(Y_a + Y_i) - m \cdot g \cdot \sin(\psi) \quad (1)$$

Durch Umformung erhält man die freie Seitenbeschleunigung zu

$$a_{q,f} = \frac{Y_a + Y_i}{m} = \frac{v^2}{R} \cdot \cos(\psi) - g \cdot \sin(\psi) \quad (2)$$

Um die fahrbare Bogengeschwindigkeit steigern zu können, sowie den Komfort für die Insassen zu verbessern, werden in der Regel die Schienen im Bogen mit einer Überhöhung verbaut. Aus der obenstehenden Abbildung kann der folgende Zusammenhang ermittelt werden.

$$\sin(\psi) = \frac{u}{2 \cdot s} \quad (3)$$

Mit einer Überhöhung u von beispielsweise den in Breitenstein realisierten $u_{tat} = 135$ mm im betrachteten Bogen und der Stützweite $2s$ von 1500 mm ergibt sich ein Querneigungswinkel von $\psi = 5,164^\circ$.

Unter Verwendung von Bogenradius ($R = 183$ m) und Überhöhung an der Messstelle Breitenstein ergibt sich für ein mit zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h fahrendes Schienenfahrzeug eine freie Seitenbeschleunigung $a_{q,f} = 0,629$ m/s². Die Beschleunigung liegt knapp unter der in Österreich verwendeten Grenze für die freien Seitenbeschleunigung von $a_{q,f} = 0,654$ m/s². Im Regelfall wird die zulässige Fahrgeschwindigkeit von diesem Grenzwert abgeleitet. Würden sich für die benachbarten Streckenabschnitte jedoch zu große Geschwindigkeitssprünge ergeben, so sind freie Seitenbeschleunigungen bis zu 0,85 m/s² zulässig. Als technisch maximale Grenze sind 1,0 m/s² festgelegt, wobei diese Grenze in der Regel von konventionellen Schienenfahrzeugen ohne Neigetechnik nur in wenigen Ländern ausgenutzt wird. Die Geschwindigkeit für Fahren mit ausgeglichener Überhöhung liegt im konkreten Abschnitt bei rund 45 km/h.

Der Überhöhungsfehlbetrag für die zulässige Fahrgeschwindigkeit im betrachteten Bogen berechnet sich mit untenstehender Formel zu $u_f = 94,38$ mm.

$$u_f = u - u_{tat} = s \cdot \sin(\beta) - u_{tat} \quad (4)$$

mit β als fiktiver Neigung bei ausgeglichener freier Seitenbeschleunigung ($a_{q,f} = 0$ m/s²)

$$\beta = \arctan\left(\frac{v^2}{R \cdot g}\right) \quad (5)$$

Beim Bogenlauf stellt sich für ein Schienenfahrzeug das prinzipielle Problem, dass die zu einem Radsatz verbundenen Räder der linken und der rechten Fahrzeugseite keine unterschiedlichen Drehzahlen aufbauen können. Daher ist es nötig, mit kegelähnlichen Radprofilen die notwendige Rollradiendifferenz für den Bogenlauf zuzulassen. In entsprechend engen Bögen stößt diese Möglichkeit aber an ihre Grenzen, da die Radprofile nicht beliebig breit bzw. steil sein können. Ein ideales schlupffreies Rollen ist damit nicht mehr möglich, und es kommt in der Regel an beiden Rädern eines Radsatzes, auch wenn diese weder angetrieben noch gebremst werden, zum Aufbau von Längsschlupfkraften.

Bei der Verwendung von Normalspur mit üblicher Spurerweiterung im Bogen kann beispielsweise unter Verwendung von UIC-ORE S1002 Standardradprofilen bei einer Querverschiebung des Radsatzes von ca. 5 mm eine Radiendifferenz von rund 1,3 mm aufgebaut werden. [15] Je nach Raddurchmesser (1070 bis 1250 mm) ergibt sich daher ein schlupffreies Rollen in Bögen mit 1230 bis 1440 m Bogenradius. Unter der Annahme eines am Spurkranz anlaufenden Rades kann sich eine Rollradiendifferenz von zusätzlich ca. 2 mm ausbilden. Dann liegen für übliche Raddurchmesser von Lokomotiven die schlupffrei durchfahrbaren Bogenradien im Bereich 800 bis 940 m. Für den engen Bogen in Breitenstein bedeutet dies, dass zwangsläufig erhebliche Schlupfkraften entstehen müssen. Da der betrachtete Bogen

üblicherweise mit ca. $0,6 \text{ m/s}^2$ freier Seitenbeschleunigung durchfahren wird, kommt es zu einer Entlastung der bogeninneren Räder, wodurch deren vertikale Radaufstandskraft sinkt. Die hohen Schlupfkräfte zusammen mit der Entlastung der bogeninneren Räder führen gerade im engen Bogen zur Ausbildung von Schlupfwellen an der bogeninnen liegenden Schiene. [15]

Die Spurerweiterung beträgt im Bogenradiusbereich zwischen 150 bis 200 m nach ÖBB Richtlinien 10 mm. Somit kann sich eine relativ große Verschiebung des Radsatzes aus der normalen Lage in Querrichtung einstellen und für große Rollradiendifferenzen sorgen.

[14], [15], [16]

2.1.2. Rad/Schiene Kräfte

Im folgenden sind Ergebnisse zum Thema Rad/Schiene Kräfte mit besonderem Augenmerk auf die in dieser Arbeit betrachteten lateralen Führungskräfte angeführt. Grundsätzlich ist anzumerken, dass in der Literatur die wahren lateralen Belastungen auf die Schienen nur in geringem Maße Eingang finden. Einzig die Summe der seitlichen Führungskräfte die pro Radsatz auf das Gleis wirken (Summe Y) werden herangezogen, aber nicht aus Gründen der Festigkeitsbetrachtung der Schienen, sondern, um die seitliche Verschiebung des Gleisrostes (Schienen und Schwellen als Gesamtbauteil) und damit die Gleislage zu betrachten.

- *Rechtliche Sicht:*

Auf europäischer Ebene beinhaltet die TSI (Technische Spezifikation Interoperabilität) für das Teilsystem Fahrzeug (2014/1302/EG) [17], jene Richtlinien des System Bahn, die in allen EU-Mitgliedstaaten zu verwenden sind.

In dieser Spezifikation sind Grenzwerte für die Laufsicherheit eines Schienenfahrzeuges angegeben; dazu zählen unter anderem die Gleisbeanspruchung in Querrichtung (Prud'homme-Kriterium) und der Quotient der Quer- und Vertikal Kräfte an einem Rad (der Y/Q-Wert), für die Fahrt in Bögen größer 250 m. Bögen kleiner 250 m werden in der aktuellen Fassung der TSI nicht explizit berücksichtigt, es sind aber in Vorgängerversionen der TSI (z.B. [18]) Grenzwerte angegeben worden.

Der nachfolgende Grenzwert der Gleisbeanspruchung in Querrichtung (Summe Y) gibt jene zulässige seitliche Verschiebungskraft der Schwellen gegen die Schotterbettung an, die durch dynamische Querkräfte des Rad/Schiene Kontaktes nicht überschritten werden darf.

$$\left(\sum Y \right)_{max,lim} = 10 \text{ kN} + \frac{P_0}{3} \quad (6)$$

mit P_0 als statische Radlast eines Radsatzes in kN.

Unter Annahme der zulässigen Radsatzlast von 22,5 t ergibt sich somit eine maximal zulässige seitliche Verschiebungskraft von 83,575 kN.

Diese maximale Gleisverschiebekraft ist die Summe der an beiden Schienen wirkenden resultierenden Kräfte in lateraler Richtung und stellt somit kaum Informationen über die seitliche Belastung der einzelnen Schienen selbst zur Verfügung. Es liegt aber nahe, dass in engen Bögen eine der beiden Schienen die Hauptbelastung trägt, da die vom Fahrzeug auf das Gleis wirkenden Führungskräfte an jeder Schiene jeweils nach außen gerichtet sind.

Der Quotient von lateralen und vertikalen Kräften eines Rades darf den Grenzwert von $Y/Q = 0,8$ [17] nicht überschreiten. Dies stellt das Kriterium für Bögen über 250 m Radius dar. Dabei ist Y die vom Rad auf die Schiene ausgeübte seitliche Führungskraft, gemessen mit einem Radsatz-basierten Messsystem und Q die vertikale Radaufstandskraft im Rad/Schiene Berührungspunkt.

Für Bögen mit einem Radius unter 250 m wird der Quotient

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\tan(\gamma) - 0,36}{1 + 0,36 \cdot \tan(\gamma)} \quad (7)$$

mit γ als Spurkranzwinkel des Rades angegeben [18].

Für einen Spurkranzwinkel von $\gamma = 70^\circ$ ergibt sich somit ein Grenzwert von $Y/Q = 1,2$. Dieser Quotient enthält aber keine Informationen über die Beträge der Kräfte und wird grundsätzlich als Entgleisungskriterium bzw. als Grenzwert für die Beurteilung der Lauffähigkeit des Fahrzeuges im verwundenen Gleis verwendet. Unter Annahme des Grenzwerts lässt sich aber die Y-Kraft auf die bogenäußere Schiene abschätzen.

- *Normative Sicht:*

Die Normen wie z.B. jene für die fahrtechnische Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen (EN 14363 [1]) verwenden die gleichen Formeln für die Gleisverschiebekraft und den Quotienten (Y/Q) wie in der TSI spezifiziert.

Es sei angemerkt, dass es sich in der Norm bei dem Quotient Y/Q aus Gleichung (7) nicht wie oft angegeben um das Nadal-Kriterium handelt, sondern um eine Umrechnungsformel für die Anpassung des Grenzwerts nach ORE B55 Untersuchungen für Spurkranzflankenwinkel kleiner als 70° . Die Formel ist dabei ident mit der Nadal-Formel für einen Spurkranzflankenwinkel von 70° und einem Rad-Schiene-Reibungsbeiwert von 0,36, wurde aber nicht von dieser abgeleitet.

Gleichung (6) für die Summe der Führungskräfte wird bei der Bewertung der Fahrsicherheit von Güterwagen mit einem Faktor von 0,85 multipliziert und stellt daher ein strengeres Kriterium dar. Der Quotient Y/Q liegt in dieser Norm bei 0,8, mit dem Zusatz, dass bei Überschreitung des Wertes bei den Messungen diese näher untersucht und die Ergebnisse besonders begründet werden müssen.

In den Beurteilungsgrößen zur Fahrwegbeanspruchung wird die quasistatische Führungskraft am bogenäußeren Rad $Y_{a,qst}$ auf die Einhaltung eines Grenzwertes von 60 kN geprüft. Dieses Kriterium berücksichtigt die lateralen Kräfte am bogenäußeren Rad als Mittelwert in Form des 50% Perzentil Wertes der Messwerte. Mit der Prüfung auf diesen Grenzwert erhält man somit die wahre Belastung in lateraler Richtung auf die bogenäußere Schiene. In manchen Ländern wird zusätzlich

der Maximalwert $Y_{a,max}$ ermittelt, um die maximalen Gesamtkräfte auf die Schiene abschätzen zu können. Für diese Maximalkraft gibt es keinen harmonisierten Grenzwert, sodass die Größenordnung von 100 kN als konsistent mit jenem Grenzwert der quasistatischen Beanspruchung angesehen wird.

- *Literatur:*

Ein wichtiger Beitrag zum Thema Y- und Q-Kräfte an der Schiene stammt von der ORE-SVA Frage C 138 [19], durchgeführt vom Forschungs- und Versuchsamts des Internationalen Eisenbahnverbandes mit dem Titel „Zulässige Höchstwerte der Y- und Q-Kräfte und Entgleisungskriterien“ aus dem Jahr 1986.

In diesem (Schluss-)Bericht werden die unter simulierten Betriebsbedingungen gefundenen Grenzwerte mit den tatsächlich im Betrieb vorkommenden Y- und Q-Kräften als Kriterium

- der Querverschiebung des Gleises (ΣY)
- der Schienenbeanspruchung (Q, Y)
- der Sicherheit gegen Entgleisung durch Aufsteigen des Spurkranzes (Y/Q) verglichen.

Im vorliegenden Fall ist vor allem die Schienenbeanspruchung von Interesse. Um einen Vergleich zwischen den seitens des ORE Ausschusses festgelegten Grenzwerten und den von verschiedenen Eisenbahnfahrzeugen tatsächlich erzeugten Y- und Q-Kräften anstellen zu können, wurden von mehreren Bahnen umfangreiche Versuche durchgeführt. Dafür wurden für jedes Fahrzeug repräsentative Bedingungen aus deren typischen Einsatzgebieten und der im Betrieb praktizierten Geschwindigkeiten ermittelt.

Im speziellen wurden Grenzwerte in Form von zulässigen Schienen-Dauerfestigkeitsspannungen festgelegt. Mit diesen können Wertepaarungen von Y- und Q-Kräften dahingehend geprüft werden, ob diese zusammen eine Belastung erzeugen, die unterhalb der Dauerfestigkeitswerte der Schiene liegen. Dabei wurden zwei verschiedene Schienenkontaktpunkte gewählt, einer in Schienenkopfmittle, zur Berücksichtigung des geraden Gleises, und einer am Schienenkopfrand zur Darstellung einer Bogenfahrt. Nachfolgende Abbildung 2 zeigt die ermittelten Grenzisobaren für ein Schienenprofil der Bauart UIC 54 mit einer Mindestzugfestigkeit von 880 N/mm² mit Kontaktpunkt am Schienenkopfrand. Weiters ist die Kurve unter Berücksichtigung eines Sicherheitskoeffizienten von 0,8 eingetragen.

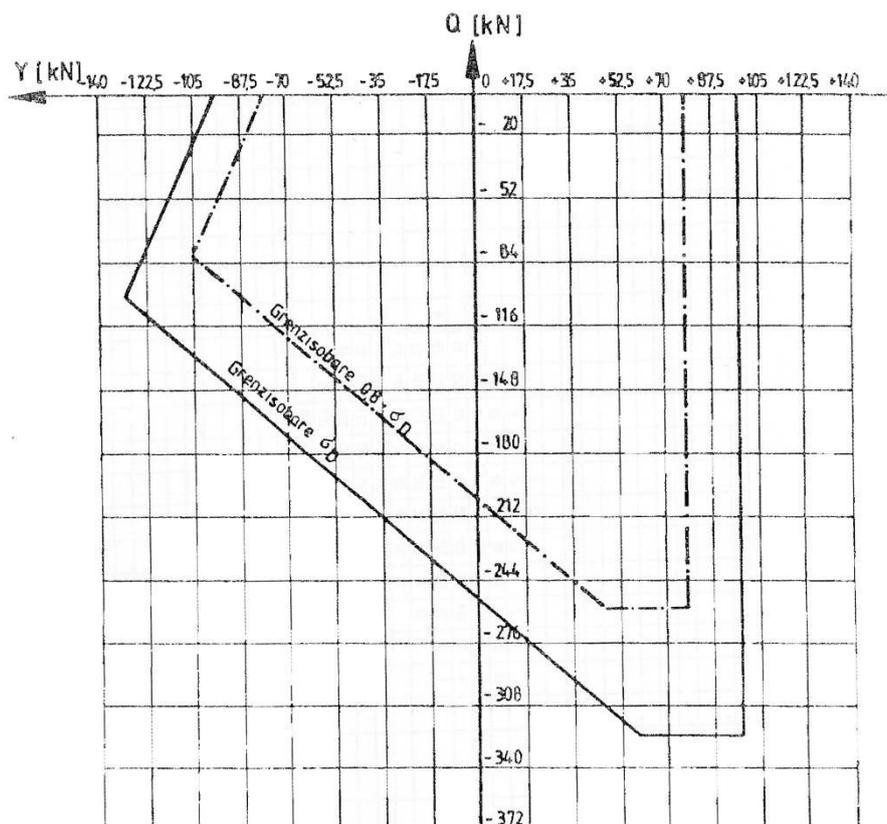


Abbildung 2: Grenzisobaren für UIC 54 bei Schienenkopfrand-Kontakt [19]

Diese Abschätzungen der zulässigen Belastungen wurden im Auftrag der DB (Deutschen Bahn) auf Basis von Untersuchungen an der Technischen Universität München am Institut von Dr. Eisenmann durchgeführt. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Betrachtung der Dauerfestigkeit in Schienenfußmitte, sowie am Schienenkopfrand. Für den Fall der Belastung der Schiene in Schienenkopfmittle wurde ein Diagramm mit Grenzisobaren erstellt, das die Dauerfestigkeitsgrenzen für die Schienenfußmitte angibt. Diese Grenzen erscheinen im Diagramm symmetrisch zur vertikalen Achse. Im obenstehenden Diagramm für den Schienenkopfrandkontakt ist zu erkennen, dass die Grenzisobaren eine deutliche Asymmetrie bezüglich der vertikalen Achse zeigen. Die Belastbarkeit des Schienenkopfrandes hinsichtlich der Dauerfestigkeit ist somit deutlich von den Wertepaaren der Y- und Q-Kräfte und im speziellen dem Vorzeichen der Y-Kraft abhängig. Je nach Vorzeichen der Y-Kraft wird die Dauerfestigkeitsgrenze daher bei gleichem Kraftbetrag bei kleineren oder größeren Q-Kräften erreicht.

Die gemessenen Y- und Q-Kräfte der Fahrversuche, wurden in Form von Histogrammen dargestellt. Für jedes Fahrzeug wurde vorweg eine Anforderungsmatrix erstellt, in der die Geschwindigkeitsbereiche und die Bogenradien gegenübergestellt sind, wobei ausschließlich jene Felder lauftechnisch untersucht wurden, die im Betrieb des Fahrzeuges am häufigsten auftreten. Pro Feld in der Anforderungsmatrix gibt es also ein Histogramm, in welchem die Y- und Q-Kräfte mit der Anzahl an aufgetretenen Wertepaaren eingetragen sind. Nachstehend ist das Histogramm einer Lokomotive der SNCF (Société Nationale des Chemins de fer Français, Nationale Gesellschaft der französischen Eisenbahnen) für das bogenäußere Rad des führenden Radsatzes der Lokomotive dargestellt. Aus dem Forschungsbericht ist aber nicht klar ersichtlich, um welche Lokomotive es sich gehandelt hat. Aus der Anforderungsmatrix wurden im vorliegenden Fall das Feld mit

einer Fahrgeschwindigkeit zwischen 80 und 110 km/h und einem Gleisbogenhalbmesser zwischen 1000 m und unendlich gewählt. Dem untenstehenden Diagramm liegen rund 10700 Messwertepaare der Kräfte zugrunde.

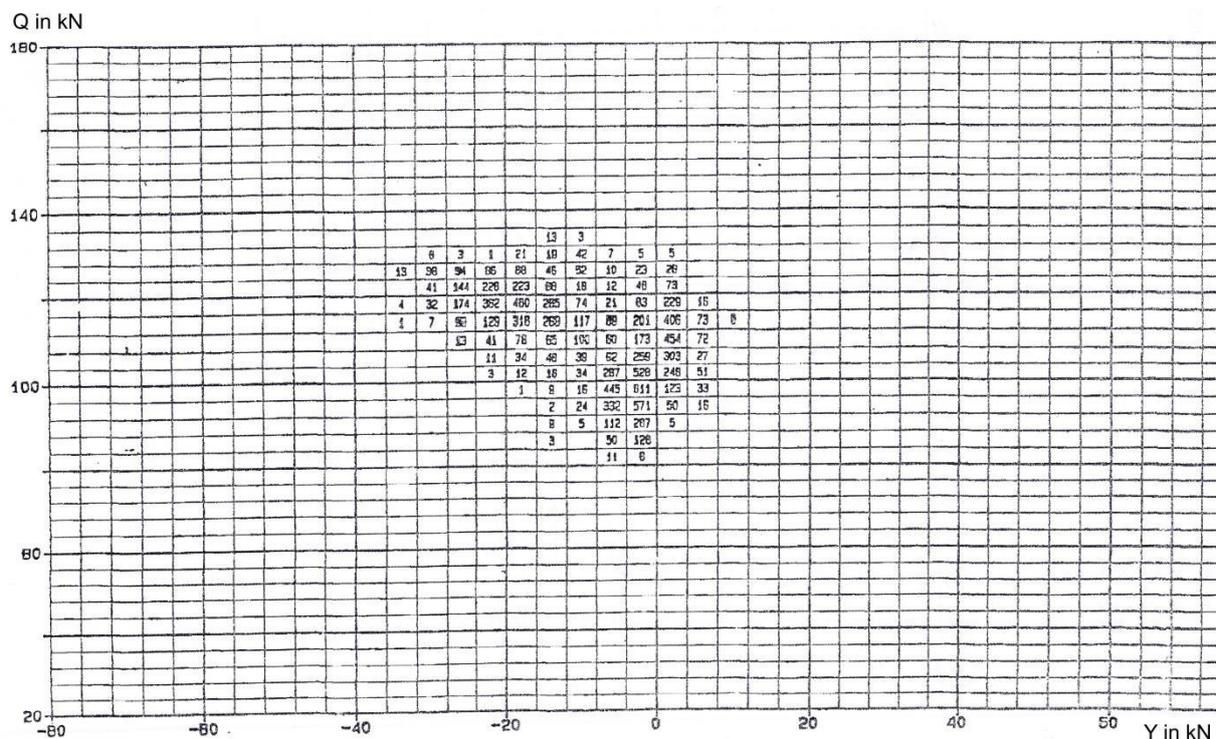


Abbildung 3: Histogramm der Y- und Q-Kräfte einer SNCF-Lokomotive, 1. Radsatz, Rad bogenaußen [19]

Die beiden Diagramme der Grenzisobaren und der Messwerte können nun getrennt nach Randbedingungen überlagert werden, und man erhält die Aussage, ob und wie viele Kräftepaare außerhalb der Dauerfestigkeit der Schiene liegen, bzw. innerhalb der mit dem Sicherheitsfaktor reduzierten Dauerfestigkeit. Dadurch wurde festgestellt, welche der getesteten Fahrzeuge (Lokomotiven und Reisezugwagen) in welcher Weise schädigenden Einfluss auf die Lebensdauer der Schiene haben. Die Daten der SNCF-Lokomotive wurden nach eigenen Kriterien der Betreibergesellschaft ausgewertet. Man kam aber zu dem Schluss, dass die Überschreitungen der Grenzwerte sehr gering ausgefallen sind und nur für spezielle Gleisstellen Einzelwerte außerhalb der Grenzen liegen.

In dem von Dr. Bernhard Lichtberger verfassten „Handbuch Gleis“ [15] ist der folgende in Abbildung 4 dargestellte Zusammenhang zwischen der Führungskraft Y und dem Bogenradius dargestellt. Zu beachten ist dabei besonders das Ansteigen der Kräfte im Bereich kleiner Bogenradien, wobei bei Lokomotiven besonders hohe Kräfte erreicht werden. Der eingetragene Streubereich berücksichtigt die fahrzeugspezifischen Parameter, wie Radsatzlast, Achsstand, Konstruktion des Drehgestells, Feder- und Dämpfungscharakteristik, aber auch gleisgeometrische Bedingungen, sowie die Fahrgeschwindigkeit. Darüber hinaus ist auch der Reibwert zwischen Rad und Schiene für die auftretenden Belastungen entscheidend. Der Reibwert ist abhängig von den Umgebungsbedingungen, wie Wettereinflüsse und Verschmutzungen, kann aber auch durch Schmieranlagen beeinflusst werden.

Aus diesem Diagramm kann abgelesen werden, dass eine Lokomotive in einem Bogen mit 200 m Bogenradius die Schienen mit mindestens 50 kN an lateraler Führungskraft belastet.

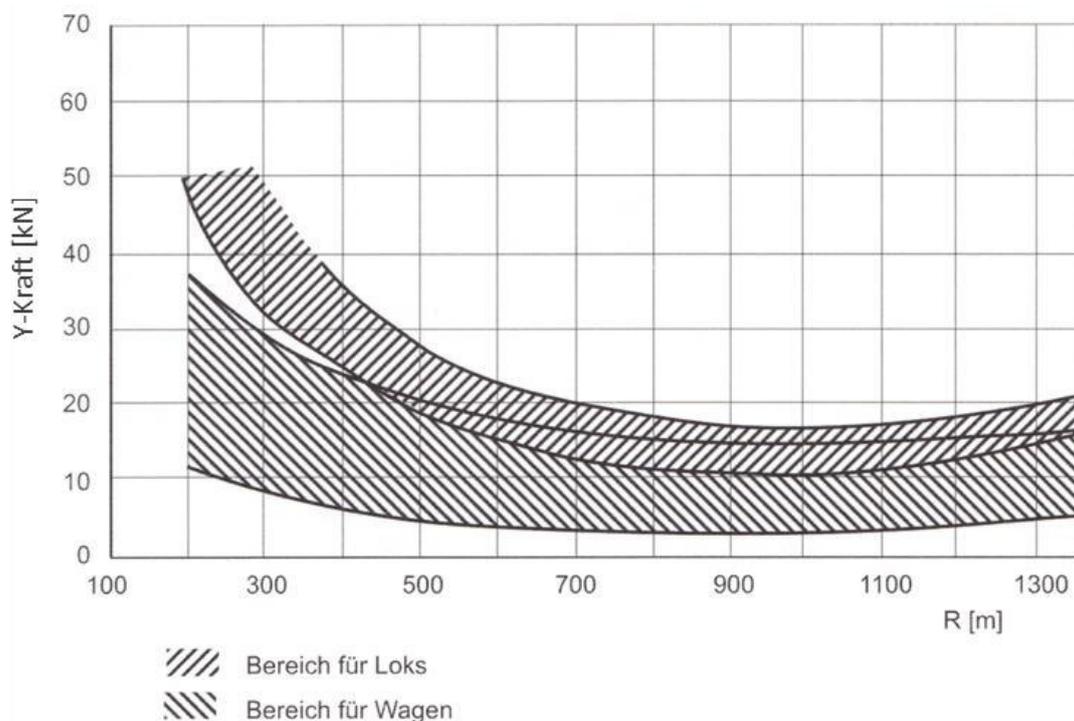


Abbildung 4: Horizontale Führungskräfte abhängig vom Bogenradius [15]

In der nachstehenden Abbildung 5 sind für die bogenäußere Schiene die Vertikalkraft, sowie die Horizontalkraft über der Seitenbeschleunigung für eine Radsatzlast von 22,5 t aufgetragen. Das Diagramm entspricht den theoretischen Überlegungen hinsichtlich Erhöhung der Aufstandskraft durch die dynamische Kraftverlagerung bei entsprechend schneller Bogenfahrt, sowie der damit einhergehenden steigenden Führungskraft. Die Verläufe zeigen daher im Vergleich mit obenstehender Abbildung das theoretisch lineare Verhalten.

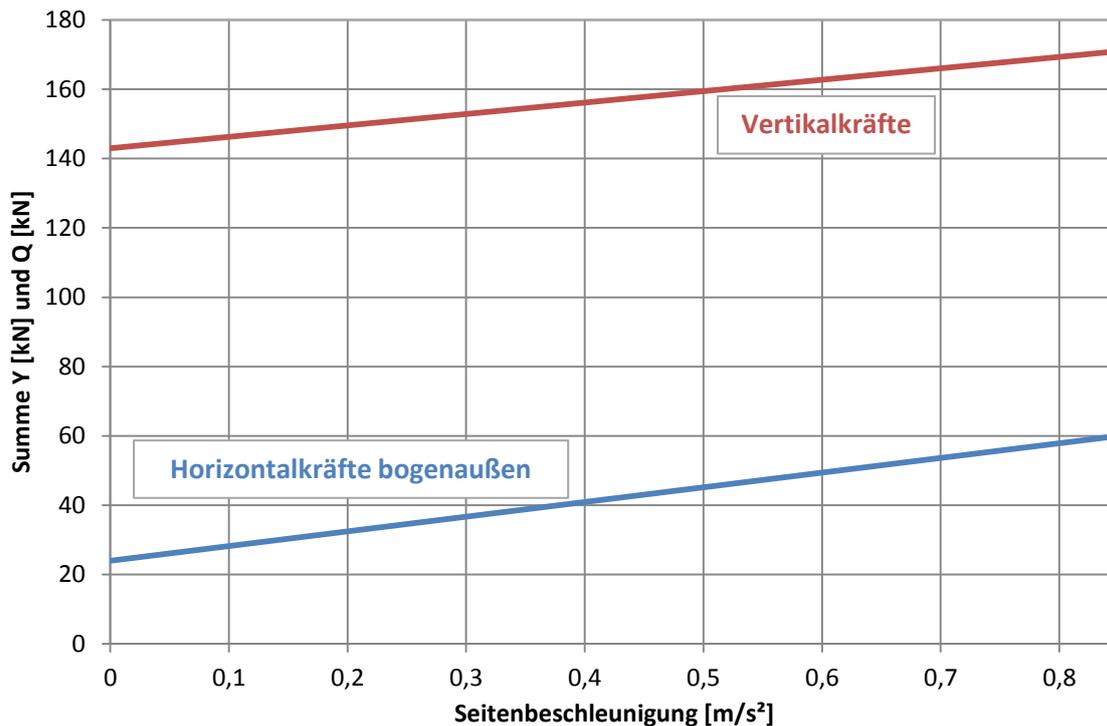


Abbildung 5: Aufstands- und Führungskraft an der bogenäußeren Schiene über der Seitenbeschleunigung [15] (nachgezeichnet)

Für eine Seitenbeschleunigung von $0,6 \text{ m/s}^2$ bei erlaubter Höchstgeschwindigkeit im betrachteten Bogen, ergeben sich aus obenstehendem Diagramm Horizontalkräfte von ca. 50 kN an der bogenäußeren Schiene.

Das übliche Querkraftniveau im geraden Gleis beträgt nach [15] $9\text{-}10 \text{ kN}$. Unter hohen Verkehrsbelastungen und an speziellen Gleisstellen wurden dynamische, vom Rad ausgeübte maximale Querkräfte von bis zu 180 kN festgestellt. Diese Spitzenbelastungen treten nur an sehr wenigen Stellen in dieser Intensität auf, weshalb man diese Kräfte in der Auslegungsrechnung nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass bei so hohen Spitzenbelastungen vor allem in Bögen mit geringem Bogenradius oder an speziellen Gleisstellen der Verschleiß aufgrund der Belastung so hoch ausfällt, dass die Schiene aufgrund der hohen Abnutzung getauscht werden muss. In diesen Fällen wird die Dauerfestigkeit der Schiene nicht erreicht, da diese erst nach einer Zeitdauer eintreten würde, zu der der Verschleiß eine nicht mehr akzeptable Schienen-Geometrieänderung erreicht hat.

Ein Reprofilieren, eventuell auch mit Spezialprofilen (asymmetrisches Schienenprofil) kann der Lebensdauer zuträglich sein, stellt aber einen Kostenfaktor dar, der bei einer Liegedauer der Schienen von wenigen Jahren nicht zu unterschätzen ist. Diese asymmetrischen Profile haben mehrere Vorteile, die die Mehrkosten üblicherweise aufwägen. Zu diesen Vorteilen zählen die größeren Rollradiendifferenzen am Radsatz, Verringerung der Schlupfwellenbildung an der bogeninneren Schiene bei reduziertem Seitenverschleiß und folglich geringere Seitenführungskräfte. Dadurch kann die Liegezeit der Schienen verlängert werden. Weiteres zu diesem Thema ist in [26] und [27] zu finden.

Durch die Querbeltung werden zusätzliche Biegemomente in die Schiene eingeleitet, die normal auf jene Biegemomente stehen, die durch die vertikalen Kräfte erzeugt werden. (siehe Abbildung 6)

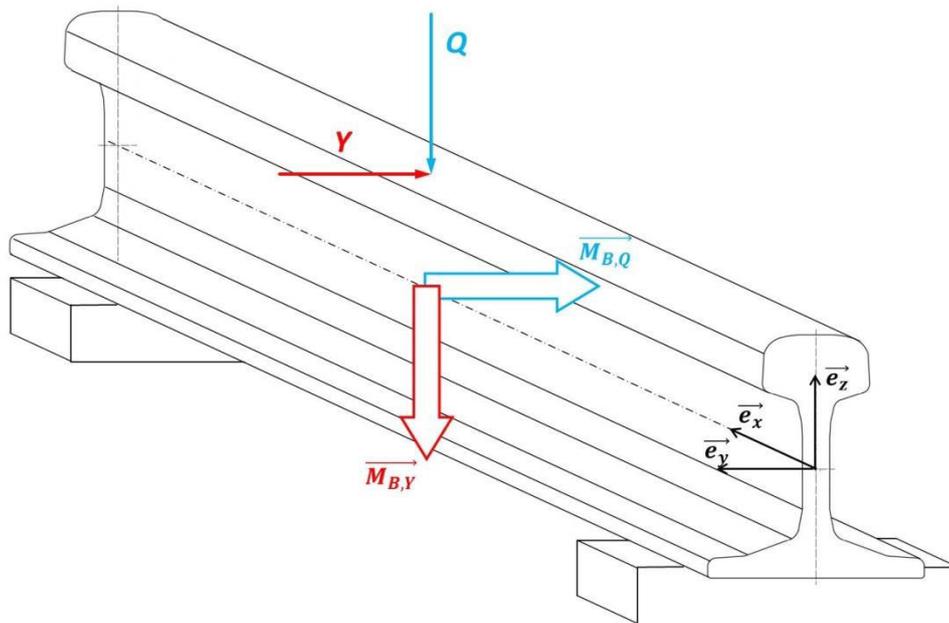


Abbildung 6: Schiene mit Biegemomenten

Die Literatur bietet einige Ansätze zur Berechnung von Schienen, die aber generell nur auf die vertikalen Radlasten eingehen. Wie in der Dissertation von Jörg [28] beschrieben, spielen die seitlichen Kräfte auf die Schiene nur eine untergeordnete Rolle bei der Dimensionierung von Schienen. Hierzu sei auf die Verfahren und Modelle von Winkler, Zimmermann und Timoshenko, sowie der weiterentwickelten Theorie von Eisenmann verweisen. [20], [21], [22], [23], [24], [25]

Im Buch *Modern Railway Track (Second Edition)* von Coenraad Esveld [29] wird auf ähnliche Messkampagnen eingegangen wie im schon erläuterten ORE Bericht. Im Jahr 1983 wurde unter der Führung der ORE Komitees D 161 und B 12 mithilfe eines Messzuges aus Wagons, ausgerüstet mit Y 25 und DB 65 Drehgestellen, Messungen der Rad/Schiene-Kräfte durchgeführt. Dabei wurden mit Messradsätzen die Y- und Q-Kräfte für 20 bzw. 22,5 t Radsatzlast auf verschiedenen Gleisqualitäten erforscht.

In der nachfolgenden Abbildung sind verschiedene Gleisqualitäten angegeben, die wie folgt definiert sind. Es wurden die Abweichungen der Gleislage, sowohl in vertikaler Richtung als auch in Längsrichtung als Standardabweichung (in Millimeter) in drei Klassen eingeteilt: 0 – 1 mm: „very good“, 1 – 2 mm: „good“, mehr als 2 mm: „moderate“.

In dieser Abbildung 7 sind die 99,85%-Werte der lateralen Rad/Schiene Kraft an der Außenschiene (Y_a) jeweils für 20 t und 22,5 t Radsatzlast dargestellt.

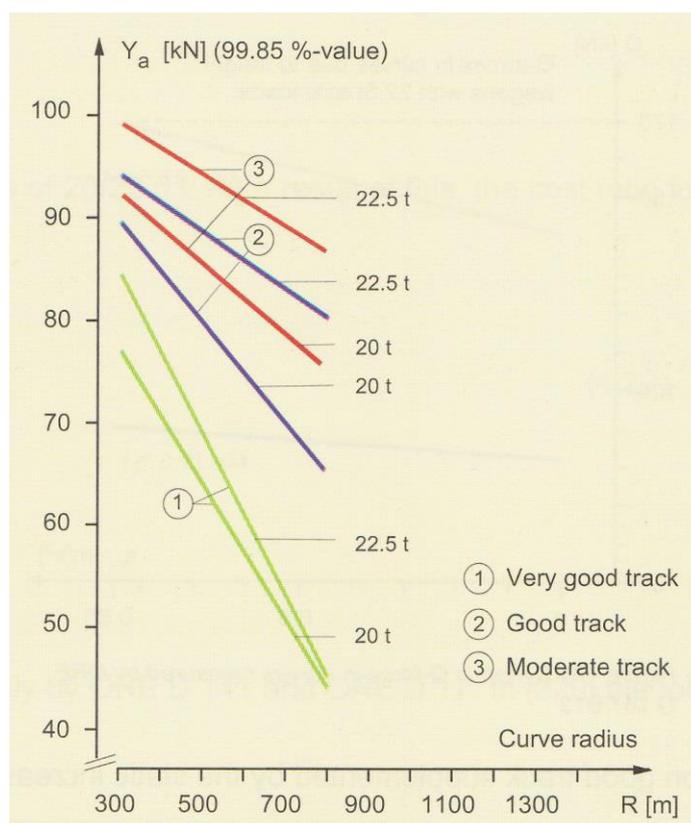


Abbildung 7: Lateralkraft an der Außenschiene über Bogenradius für verschiedene Gleisqualitäten [29]

Zu erkennen ist zum einen der starke Einfluss der Gleisqualität auf die Lateralkraft, als auch die starke Abhängigkeit vom Bogenradius. Der dargestellte Bereich des Bogenradius endet bei 300 m, sodass keine Aussagen über Bogenradien im Bereich 180 m möglich sind. Unter der Annahme eines weiterhin linearen Verhaltens (Annahme für die Ausgleichsgeraden) würde sich bei einer Extrapolation der dargestellten Kurven zumindest 80 kN ergeben, auf qualitativ schlechteren Gleisen aber bis über 100 kN laterale Kraft an der Außenschiene. Zu berücksichtigen ist aber, dass es sich hier um die maximalen Werte der lateralen Kraft handelt. Der Perzentilwert gibt hier an, dass sich 99,85% aller gemessenen Werte unterhalb der im Diagramm dargestellten Geraden befinden.

2.2. Die Messstelle Breitenstein

Die in dieser Arbeit betrachteten Messwerte stammen von der ARGOS® Messstelle der Österreichischen Bundesbahnen Infrastruktur AG in Breitenstein am Semmering (Niederösterreich). In der Netzkarte (Abbildung 8) ist die Lage des Semmering an der wichtigen Hauptverbindung von Wien in die südlichen Teile von Österreich ersichtlich.

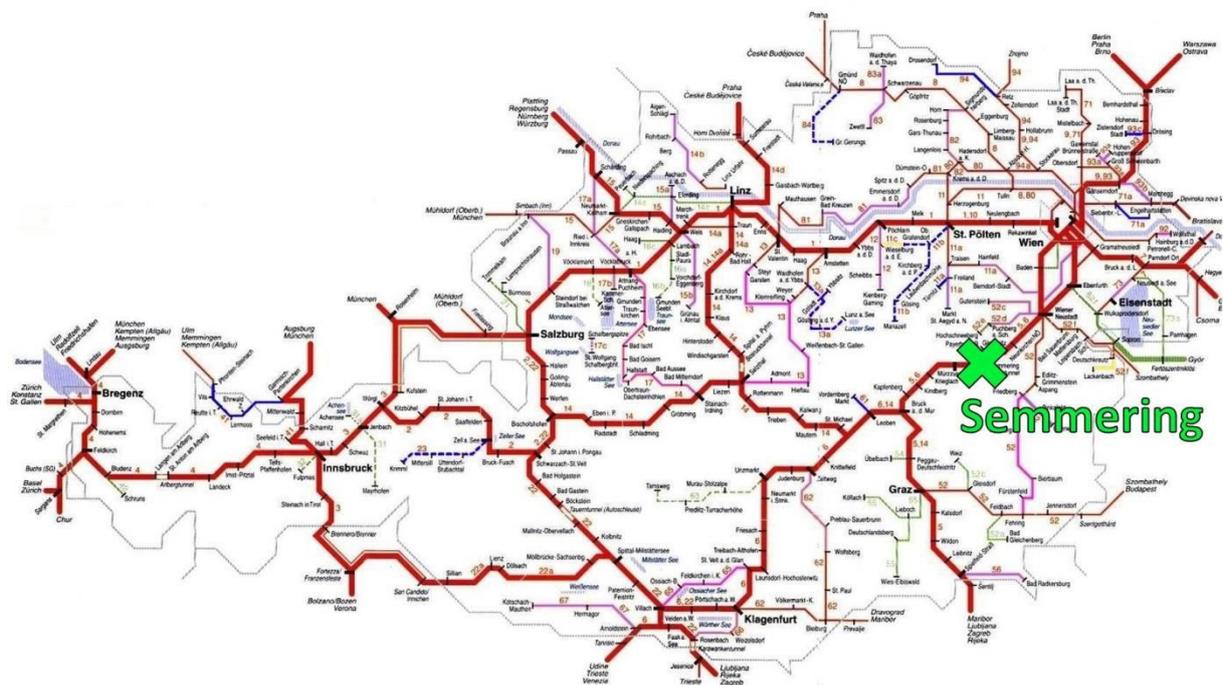


Abbildung 8: ÖBB Netzkarte (Stand 2001) [30]

2.2.1. Aufbau der Messstelle

Die Messstelle besteht aus Messaufnehmern an der bogeninneren sowie der bogenäußeren Schiene, wobei je Schwellenfach 4 Sensormodule (je 2 an jeder Schiene, also je eines an der Außen- und Innenseite jeder Schiene) montiert sind. Insgesamt sind 16 Schwellenfächer mit den je 4 fix befestigten Modulen ausgestattet. Daraus ergibt sich bei einem Schwellenabstand von 0,6 m eine Gesamtmessstrecke von 9,6 m. Da die Räder aktueller Schienenfahrzeuge einen Nenndurchmesser von ca. 1 m aufweisen, finden über die Länge der Messstrecke ca. 3 vollständige Abrollvorgänge statt. Somit können für bestimmte Beurteilungsgrößen die gemessenen Daten mit entsprechender Sicherheit bestimmt werden.

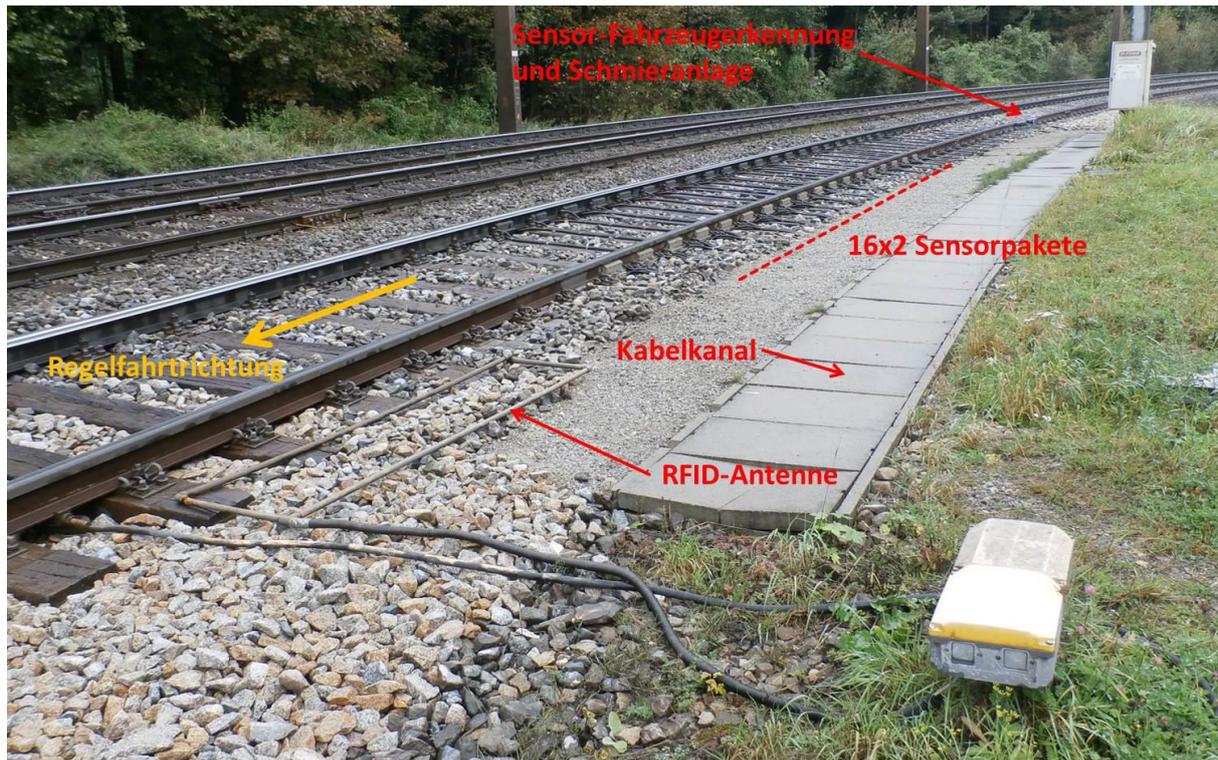


Abbildung 9: Übersicht-Messstelle Breitenstein [2]

Bei den Messaufnehmern handelt es sich um jene Bauform, die dauerhaft auf der Schiene befestigt wird und nicht um eine an die Schiene geschraubte Bauform. Dabei werden die Dehnmessstreifen (DMS) direkt auf die Schiene aufgeklebt, die dafür eine lokal spezielle Oberfläche aufweisen muss. Je nach verwendetem DMS-Befestigungsmittel muss eine mittlere Rauhtiefe von 2 bis 10 μm in diesen Oberflächenbereichen vorliegen. Daher kann es sich nicht um eine herkömmliche Schiene handeln, sondern um eine spezielle Messschiene mit den entsprechend bearbeiteten Oberflächenbereichen. Die Dehnmessstreifen werden durch stabile Schutzbleche vor diversen Umgebungseinflüssen, wie beispielsweise Steinschlag durch aufgewirbelten Schotter bei einer Zugüberfahrt oder den Wiedereinflüssen geschützt, wobei auf eine besondere Kabelführung Wert gelegt wurde. Die Kabel für die Messsignale von den Modulen an der Schiene werden in Schutzschläuchen zu einem parallel zur Schiene laufenden Kabelkanal geführt, wobei die Kabel der Außenschiene auf der Oberseite der Holzschwellen nach bogeninnen geführt werden, um Beschädigungen durch Oberbauinstandhaltungsmaschinen (Stopfmaschinen) zu vermeiden.

Die Kabel führen zu einem neben den Gleisen befindlichen kleinen Gebäude, in welchem die gesamte Messsignalauswertung, die Berechnung der gewünschten Größen und die Darstellung in graphischer Form, sowie die temporäre und dauerhafte Sicherung der Protokolldateien stattfindet. Der Primärrechner wird für die Aufzeichnung und Auswertung der Messdaten verwendet und speichert die Roh- und Protokolldateien auf eigenen Laufwerken ab. Der Sekundärrechner kann auf diese Laufwerke zugreifen und die Daten statistisch auswerten. Die Laufwerke sind mehrfachredundant ausgelegt, die Daten werden aber auch in gewissen Zeitabständen an den zentralen Server der ÖBB gesendet und dort archiviert.

Alternativ könnten anstatt der fix montierten Sensoren an den Schienenfuß geschraubte Sensorpakete verwendet werden. Diese stellen eine sehr einfache

Möglichkeit dar, Messungen ohne Vorhandensein einer speziellen Messschiene durchzuführen. Diese Module haben den Vorteil, an jeder Schiene appliziert werden zu können, bieten aber nicht die hohe Genauigkeit der direkten Befestigung. Das liegt daran, dass anstatt der Verwendung von vielen Dehnmessstreifen die Messung vor allem über die Durchbiegung der Schiene bzw. über Beschleunigungssensoren stattfindet. Es können somit im Gegensatz zur fest montierten Variante nicht alle Auswertegrößen erfasst werden. In der Messstelle Breitenstein sind zu Testzwecken an zwei Schwellenfächern an der bogeninneren Schiene zusätzlich zwei geschraubte Module vorhanden.

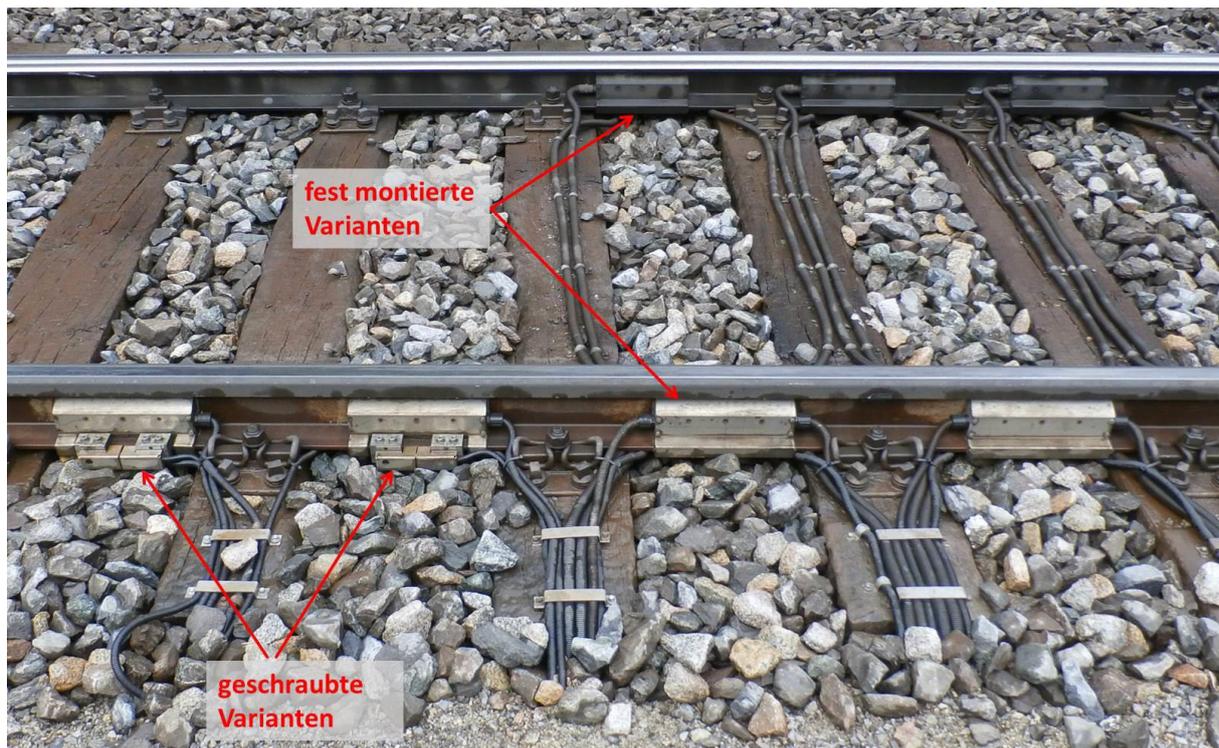


Abbildung 10: Messsensoren auf der Schiene - links zwei geschraubte Varianten, rechts zwei fest montierte Varianten [2]



Abbildung 11: Detailansicht Messsensoren - links geschraubte Variante, rechts fest montierte Variante [2]

Bei dem vorhandenen Messdatenerfassungs-System handelt es sich um eine Lösung der Firma HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik) in Form des Argos® Level 3

Systems. Dieses modular aufgebaute System kann beliebig erweitert werden, je nachdem, welche Parameter von Interesse sind. Die Messstelle Breitenstein ist für die Messung von statischen und dynamischen Vertikal- (Q-) und lateralen Führungskräften (Y-Kräfte) ausgelegt. Darüber hinaus werden auch die Schallemissionen der vorbeifahrenden Schienenfahrzeuge gemessen. Dazu ist in einem seitlichen Abstand von 7,5 m von der Gleisachse ein Mikrofon in einer Höhe von 1,2 m über SOK platziert. Die aufgezeichneten Daten werden auf einem eigenen Laufwerk gesichert und können dort ausgewertet werden.

Die Messgeräte sind dauerhaft aktiv und senden ihre Messwerte an den Computer. Dieser startet aber erst mit der Datenaufzeichnung, wenn ein Schienenfahrzeug ein vor der Messstelle befindliches Fahrzeugdetektionsgerät (Radsatzzähler) passiert. Dabei werden zuerst die aktuellen Messwerte der noch unbelasteten Schienen als Null-Wert gesetzt, um danach von diesem die Abweichungen bei der Fahrzeugüberfahrt bestimmen zu können. Die Datenaufzeichnung wird beendet, wenn sich die Messwerte eine bestimmte Zeitdauer lang nicht mehr ändern. Entweder die Schienenfahrzeuge haben dann die Messstrecke schon verlassen, oder diese sind auf der Messstelle zu einem Halt gekommen. In letzterem Fall kann das erneute Anfahren des Zuges erkannt werden, aber es werden keine Daten aufgezeichnet, da der Nullabgleich, aufgrund der schon belasteten Schiene, nicht möglich ist.

In Summe beinhaltet die Messstelle nahezu 1000 Aufnehmer (DMS, Weg- und Beschleunigungsaufnehmer) für eine möglichst genaue Auswertung. Pro Überfahrt eines Zuges können bis zu 1,2 GByte an Rohdaten erzeugt werden. Die dabei erreichte Wiederholgenauigkeit, die durch Wiederholungsmessfahrten nachgewiesen wurde, liegt unter 4% für die in Y-Richtung gemessenen Größen und unter 1% für die in Q-Richtung erhobenen Werte. [3]

Weiters gibt es eine RFID-Antenne (Radio-Frequency IDentification) an der Messstelle, welche die RFID-Tags (sofern vorhanden) an den vorüberfahrenden Fahrzeugen ausliest, um die Messdaten direkt mit einem bestimmten Fahrzeug zu verknüpfen. Dadurch kann ein Langzeit-Monitoring für bestimmte Fahrzeuge durchgeführt werden. Dabei ist durch die Lage der Antenne sowie der an beiden Fahrzeugseiten befindlichen RFID-Tags eine Erkennung der Fahrtrichtung möglich, womit die Messdaten exakt jedem einzelnen Rad zugeordnet werden können. Dies hat gegenüber der auf dem Betrieblichen Informationssystem (BIS) basierenden Fahrzeug-Messwert-Verknüpfung den Vorteil, dass auf Basis des Zugbildeplans die Messdaten mit den Fahrzeugen verknüpft werden.

In Regelfahrtrichtung vor der Messstelle befindet sich eine sogenannte Schienenkonditionieranlage, die die Aufgabe hat, einen möglichst konstanten Reibwert bei allen Umwelt- und Witterungsbedingungen herzustellen. So wird versucht, gleichbleibende Randbedingungen für die Messung zu gewährleisten.

[6]

2.2.2. Lage der Messstelle

Die Messstelle Breitenstein liegt an der Strecke Nr. 105 des österreichischen Bahnnetzes, auch Südbahn genannt, von Wien Hauptbahnhof über Wiener Neustadt und den Semmering nach Bruck an der Mur und weiter über Graz nach Spielfeld-

Straß, wo die Strecke nach rund 260 km das österreichische Staatsgebiet verläßt. Die Weiterführung dieser Strecke führt auf slowenischer Seite über Maribor und Ljubljana ins italienische Triest.

Die Semmeringbahn stellt einen knapp 42 km langen Teil der Südbahn dar, und verbindet Gloggnitz (Streckenkilometer 74,90, 441 m Seehöhe [8]) in Niederösterreich, mit Mürzzuschlag (Streckenkilometer 116,72, 681 m Seehöhe [8]) in der Steiermark. Dabei ist anzumerken, dass die Luftlinie zwischen den beiden Endbahnhöfen nur gut 21 km beträgt, die höchste Stelle der Bahn aber bei 898 m Seehöhe liegt.

Wie aus Abbildung 12 ersichtlich, verläuft die Strecke vor der Messstelle in einer leichten Rechtskurve durch den Weinzettelfeldtunnel und führt anschließend in den lang gezogenen Linksbogen (mehr als 90° Bogenwinkel), in welchem gegen Ende des Bogens die Messstelle liegt. Nach der Messstelle folgt ein Übergangsbogen und eine Gerade, in welcher der Bahnhof Breitenstein auf 791 m Seehöhe bei Streckenkilometer 97,56 liegt.

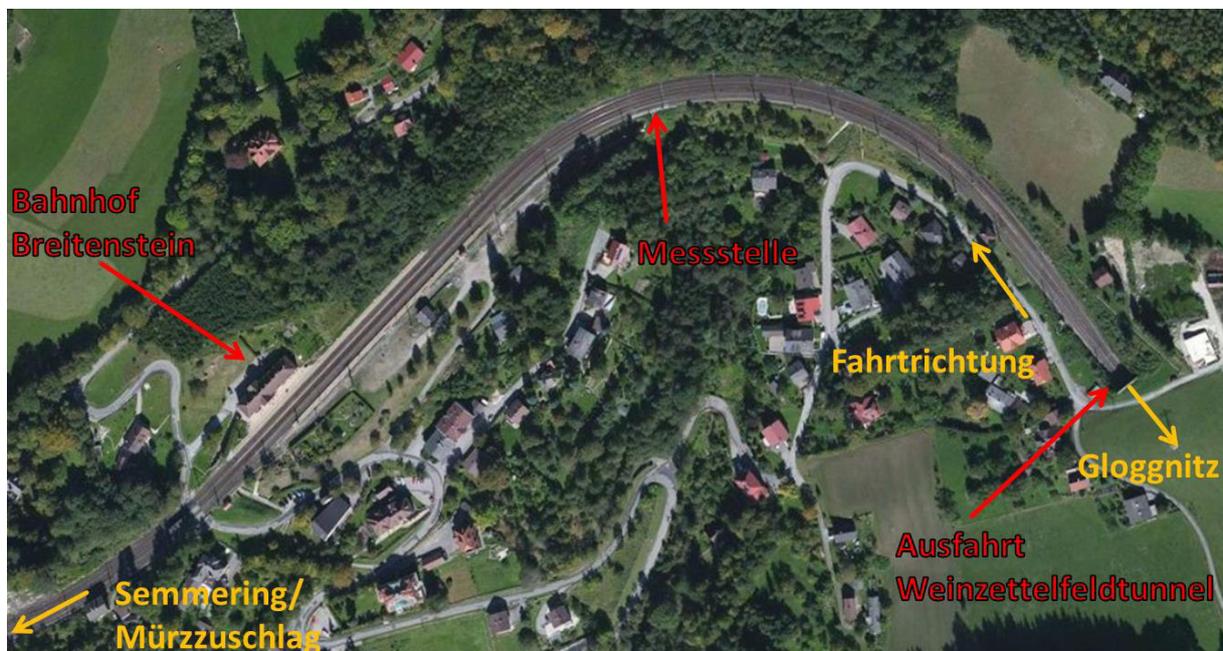


Abbildung 12: Satellitenansicht der Umgebung der Messstelle [4]

Im Bereich der Messstelle ist die Strecke 3-gleisig ausgebaut, wobei das Gleis mit der Messausrüstung das im Bogen ganz innen liegende Gleis 1 ist. Da am Semmering Linksverkehr herrscht, wird dieses Gleis 1, an der Nordrampe der Bahnstrecke, üblicherweise in Richtung Passhöhe (Fahrtrichtung Bhf. Semmering/Mürzzuschlag) durchfahren. Da das mittlere und rechte Gleis im Regelfall nur für Züge in Fahrtrichtung Gloggnitz bzw. von Bau- und Wartungsfahrzeugen sowie zum Ausweichen benutzt wird, passieren fast alle Züge Richtung Mürzzuschlag die Messstelle. Signaltechnisch ist die Strecke für Gleiswechselbetrieb ausgelegt, sodass prinzipiell auf allen Gleisen in jede Richtung gefahren werden kann.

Die Messstelle liegt nahe dem Kilometerstein 97,3, wobei der Bogenradius im Bereich der Messstelle 183 m beträgt. Die Überhöhung des Gleises beträgt 135 mm und die Längsneigung 4,438‰. Zum Vergleich sei angemerkt, dass rund 60% der

Strecke eine Steigung von ca. 20‰ aufweisen, die größte Steigung liegt bei 27,76‰ nahe dem Bahnhof Klamm-Schottwien.

Wie an den Bildern im Kapitel „Aufbau der Messstelle“ (Abbildungen 9, 10 und 11) erkennbar, weist der betrachtete Streckenabschnitt Schotteroberbau auf, wobei die Schienen auf Holzschwellen gelagert sind. Auf der Semmeringstrecke selbst wurden anderorts teilweise die Holzschwellen schon durch Betonschwellen ersetzt. Als Schiene ist im betrachteten Bereich eine Vignolschiene Bauart 49E1 laut EN 13674-1 [5] in der Stahlsorte R400HT verlegt. Generell ist die gesamte Semmeringstrecke mit diesem „schwächsten“ Schienenquerschnitt ausgestattet.

Schwerere Bauformen, wie 54E1 oder 60E1, würden größere Längskräfte verursachen und dadurch entsprechen größere seitliche Belastungen in Bögen (Stichwort Bogenatmung) in den Gleisrost einbringen. Die historischen Steinbauwerke wie Viadukte und Brücken können diesen höheren Belastungen aber nicht standhalten. Die Einbauneigung der Schienen liegt bei 1:40, was dem in Österreich üblichen Standard entspricht.

Aufgrund der Lage dieser Messstelle auf einer der meist befahrenen Strecken im österreichischen Eisenbahnnetz mit durchschnittlich ca. 70 Zugüberfahrten pro Tag (pro Richtung), von Regionalzügen über Fernreisezüge wie dem Railjet bis zu über 2000 t schweren Güterzügen mit bis zu vier Lokomotiven, sind die Belastungen für die Schienen vergleichsweise hoch. Bemerkenswerter Weise liegt der statistische Mittelwert der Radsatzlast deutlich über jenen von anderen Messstellen auf österreichischen Hauptstrecken, wie nachfolgende Abbildung 13 zeigt. Diese Tatsache liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit am hohen Anteil beladener Güterzüge.

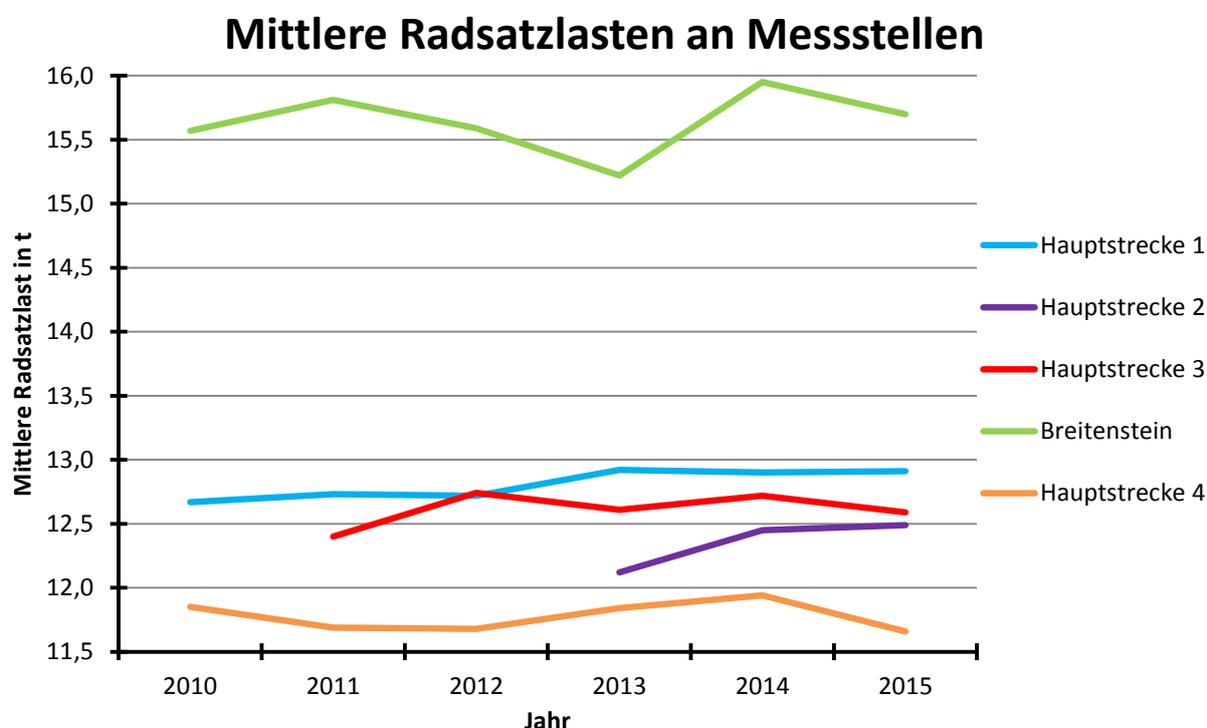


Abbildung 13: Jahreswerte – Mittlere Radsatzlast an Messstellen in Österreich [6]

Neben dem für eine Hauptbahn ungewöhnlich kleinen Bogenradius kommt dieser Messstelle besondere Relevanz für die Betrachtung der Belastung hinsichtlich der Lebensdauer einer Schiene zu. Die Belastung einer Schiene wird üblicherweise über

die Radsatzlasten und die Tonnage auf einem Gleisabschnitt bestimmt. Hier ist die mittlere Radsatzlast hoch, aber die Tonnagen, also die Massen pro Zeiteinheit, die diesen Gleisabschnitt passieren, liegen unter jenen von anderen Strecken. Es ist anzumerken, dass geringere, aber oftmalige Belastungen die Schiene gleichermaßen schädigen können wie hohe aber wenige Belastungen. Die hohen aber wenigen Belastungen können dabei auch im Bereich der Zeitfestigkeit liegen. In Breitenstein kommen aber zusätzlich noch die Belastungen der Bogenfahrt hinzu. Dadurch sind die Schienen hier besonderen Betriebsbedingungen ausgesetzt. Die Schienen erreichen im Bogen das Ende ihrer Lebensdauer relativ früh, da der Verschleiß die begrenzende Größe darstellt.

[6], [7], [8]

2.2.3. Gleislage

In diesem Kapitel wird auf die Gleislage im betrachteten Bogen in Breitenstein eingegangen. Die folgenden Abbildungen sind Ausschnitte aus der Gleisvermessung der Semmeringbahnstrecke durch den ÖBB Oberbaumesswagen EM 250 aus dem Juni 2016. Die Messstelle liegt bei Kilometer 97,3.

Die jeweiligen eingetragenen oberen/unteren Grenzwerte (oG/uG) der vorliegenden Beurteilungsgrößen sind in Form der Eingriffsschwelle (ES) angegeben. Diese Schwelle liegt zwischen der Aufmerksamkeitsschwelle (AS) und der Soforteingriffsschwelle (SES). Die Aufmerksamkeitsschwelle gibt an, dass der geometrische Gleiszustand in der regulären Instandhaltungsplanung berücksichtigt werden muss. Bei Überschreitung der Eingriffsschwelle sind korrigierende Instandhaltungsmaßnahmen erforderlich, damit die Soforteingriffsschwelle nicht vor der nächsten Inspektion erreicht wird. Bei Erreichen der Soforteingriffsschwelle sind definitionsgemäß Sofortmaßnahmen erforderlich. Dies kann zur Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit oder zur Sperre des Gleises führen, bis der Fehler beseitigt ist.

- *Spurweite und gleitender Mittelwert:*



Abbildung 14: Messschrieb Spurweite [6]

Die auf der horizontalen Achse dargestellte Kilometrierung ist in den Abbildungen 14 bis 20 identisch und wird einmalig in Abbildung 20 erklärt.

In Abbildung 14 sind die Spurweite (Spur) sowie deren gleitender Mittelwert über 100 m (Spur 100m) dargestellt.

Zu erkennen ist, dass die Spur im Vergleich zum Normmaß von 1435 mm um 20 bis 25 mm erweitert ist. Dies ist eine in Bögen übliche Spurerweiterung, die im Bereich der Messstelle leicht variiert.

- *Längshöhe:*

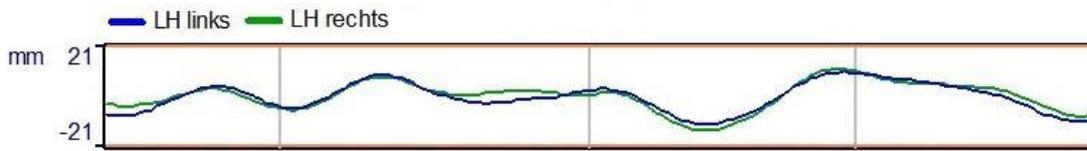


Abbildung 15: Messschrieb Längshöhe [6]

Die Längshöhe (LH rechts/links) gibt die Abweichung der Höhen der Schienenlaufflächen jeder Schiene von einer Bezugslinie in z-Richtung an. Dies entspricht dem Höhenverlauf des Schienenstranges.

Im Bereich der Messstelle ist eine senkenförmige Abweichung zu erkennen. Es ist im Weiteren zu hinterfragen, ob sich dadurch Änderungen der Aufstandskräfte über der Messstelle ergeben.

- *Querhöhe:*



Abbildung 16: Messschrieb Querhöhe [6]

Die Querhöhe ist die Differenz aus den Messsignalen der Längshöhe des linken und rechten Schienenstranges. Sie entspricht nicht der Überhöhung, sondern stellt die kurzweilige Abweichung der Überhöhung von einer gemittelten Überhöhung dar.

Der Verlauf der Querhöhe zeigt im Bereich der Messstelle nur geringe Abweichungen von der Nulllage. Vor der Messstelle ist aber eine leicht negative Querhöhe sichtbar.

- *Richtung:*

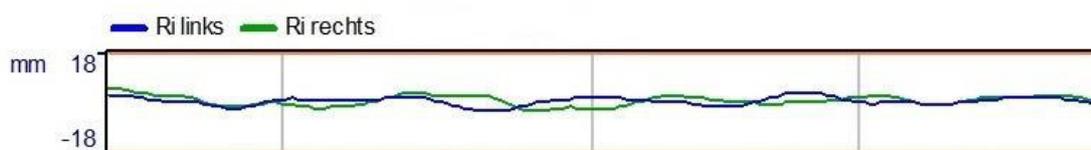


Abbildung 17: Messschrieb Richtung [6]

Unter der Richtung (Ri rechts/links) versteht man die Abweichung der Position eines Punktes auf der Schiene in y-Richtung von einer horizontalen Bezugslinie.

Die in Abbildung 17 angegebene Richtung weicht bei beiden Schienen nur gering von der Bezugslinie ab.

- *Verwindung:*

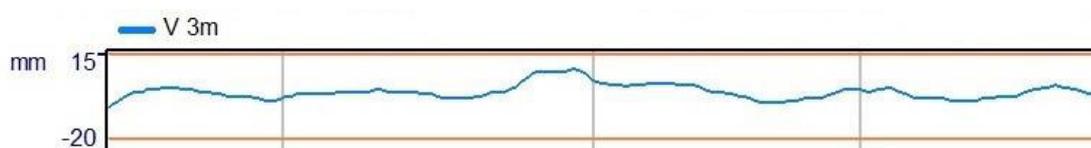


Abbildung 18: Messschrieb Verwindung [6]

Die Verwindung (V 3m) gibt die Differenz zwischen zwei Überhöhungen dividiert durch eine festgelegte Basislänge (hier 3 m) an. Die Einheit der Verwindung ist mm/m und nicht nur mm, wie im Messschrieb der Einfachheit halber angegeben. Sie stellt die Änderung der Überhöhung längs der Gleismittellinie dar.

Im Bereich der Messstelle ist generell eine leicht positive Verwindung gemessen worden, wobei eine stärkere Verwindung in positiver Richtung auffällt.

- *Überhöhung und Krümmung:*

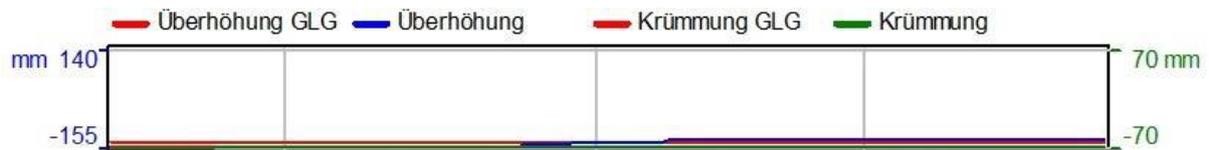


Abbildung 19: Messschrieb Überhöhung und Krümmung [6]

Die Überhöhung stellt die vertikale Höhendifferenz zwischen den beiden Schienenaufläufen dar. Die gemessene Überhöhung des Gleises beträgt rund 150 mm und liegt damit über dem Soll-Wert des Trassierungsplans von 135 mm. Die tatsächliche Überhöhung sinkt zusätzlich leicht in dem betrachteten Ausschnitt der Messkurven. Diese Abweichungen können dadurch entstehen, dass zwischen der Festlegung im Trassierungsplan und der Messfahrt eine Umtrassierung stattgefunden hat und dabei die Überhöhung geändert wurde. Eine durch den Fahrbetrieb ausgehende Änderung der Überhöhung ist in der Regel nicht so stark ausgeprägt. Die vorliegende Abweichung liegt aber innerhalb der zulässigen Abweichung der Ist- zur Soll-Überhöhung. Die Soll-Werte sind mit GLG (Gleisgeometrie) bezeichnet worden und stellen die Werte des Trassierungsplanes dar.

Die Krümmung ist angegeben als die Pfeilhöhe (in mm) einer Sehne an den Kreisbogen, mit einer Sehnenlänge von 10 m. Unter Verwendung einer einfachen Beziehung kann daraus der Bogenradius errechnet werden.

Die Krümmung beträgt im gesamten Auswerteabschnitt annähernd konstant -70 mm.

Sowohl die Überhöhung als auch die Krümmung sind definitionsgemäß in Rechtsbögen positiv. Da im vorliegenden Fall beide Werte negativ sind, wurde der Bogen bei der Messfahrt in Regelfahrtrichtung entsprechend einer Linkskurve durchfahren.

- *Fahrgeschwindigkeit:*

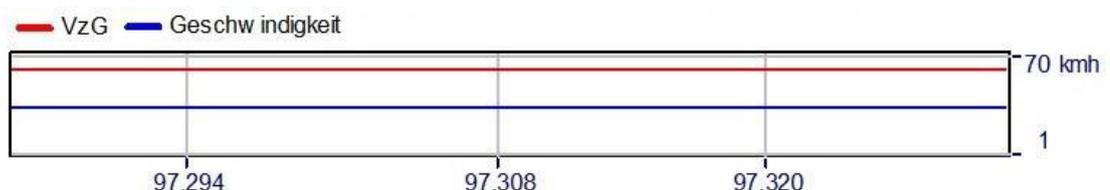


Abbildung 20: Messschrieb Fahrgeschwindigkeit [6]

Die Fahrgeschwindigkeit betrug bei dieser Messfahrt aus nicht näher definierten Gründen nur rund 35 km/h bei einer erlaubten Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h. In Abbildung 20 ist auch die für die anderen Messgrößen gültige Kilometrierung eingetragen.

2.2.4. Geschichte der Semmeringbahn

Die Semmeringbahn stellt jenen Teil der Südbahn dar, welcher als kürzeste Verbindung von Wien zur Adria die östlichen Ausläufer der Alpen überquert und dabei Niederösterreich mit der Steiermark verbindet. Fälschlicherweise wird der Semmering oft als Berg bezeichnet, handelt es sich doch tatsächlich um einen Sattel zwischen dem Pinkenkogel (1292 m) und dem Hirschenkogel (1340 m) auf 984 m Seehöhe.

Die erstmalige urkundliche Erwähnung eines Pfades durch das Gebiet des heutigen Semmerings stammt aus dem Jahre 1160. [11] Im Laufe des 12. bis 13. Jahrhunderts dürfte sich der Name Semmering aus dem Namen des an dieser Stelle befindlichen „Cerewald“ entwickelt haben. Dies bedeutet so viel, wie Harz- oder Nadelwald, was sich im Altslawischen als „smrek“ (= Ceder) ableiten lässt.

Mit dem zunehmenden Handel im 12. Jahrhundert zwischen der Ostsee und der Adria mit der aufstrebenden Hafenstadt Venedig entwickelte sich der Handelsweg über den Semmering zur „Venezianerstraße“.

Im Jahre 1728 wurde auf Drängen der Handelshäuser von Triest und der steirischen Landesstände eine deutlich verbesserte Straße eröffnet, die so genannte „Karolusstraße“. Diese war aufgrund ihrer hohen Steigung von 17% nur mit Pferd-Vorspann zu bewältigen. Für die schwersten Transporte war bis zu 10-facher Vorspann nötig.

Der rasch zunehmende Verkehr veranlasste dazu, 1839 bis 1841 eine neue Semmeringstraße zu bauen, die eine geringere Steigung als die alte aufweisen sollte. Diese Straße wurde im folgenden Jahrzehnt zur wichtigsten Verbindung zwischen den Endpunkten der mittlerweile fertig gestellten Eisenbahnlinien Wien-Gloggnitz und Mürzzuschlag-Bruck/Mur. Die Reisenden und Güter der Eisenbahn wurden daher mit dem Pferdewagen über den Sattel befördert.

Im 19. Jahrhundert war Österreich ein ausgesprochenes Eisenbahn-Pionierland. Nach der Vollendung der Strecken Linz-Budweis, oder der Kaiser-Ferdinand-Nordbahn von Wien nach Brünn war es ab 1842 möglich, von Wien nach Gloggnitz zu fahren. Da die Überquerung des Semmerings durch die Eisenbahn noch nicht denkbar war, wurde die südliche Staatsbahn Richtung Adria fortgesetzt. Unter der Leitung von Carl Ghenga wurde zwischen 1842 und 1844 das Teilstück Mürzzuschlag-Graz gebaut. In den weiteren Jahren wurde bis 1857 die Bahnlinie stückweise bis nach Triest gebaut.



Abbildung 21: Carl Ritter von Ghenga, Lithographie 1851 [9]

Schon 1842 erhielt Carl Ghenga den Auftrag, eine Querung des Semmerings zu planen. Nach Studienreisen nach Großbritannien und die Vereinigten Staaten schloss Ghenga die Planungen 1847 mit drei Varianten ab. Schon während der Planung gab es Kritiker und Gegenprojekte, sowie die Bezweifelung von Ingenieuren, dass dieses Projekt, auch wegen der Steigung, überhaupt umsetzbar sei. Es ist anzumerken, dass es zur Zeit der Planung weltweit noch keine bergtaugliche Lokomotive gab, was vor allem die unbeirrbar Zielstrebigkeit Ghegas unterstreicht.

Im Juni 1848 genehmigte schließlich das Ministerium für öffentliche Arbeiten die Pläne zur Überschreitung des Semmerings, wobei schon einige Wochen später mit der Umsetzung begonnen wurde.

Besonders der geomorphologisch komplizierte Aufbau des Semmerings auf niederösterreichischer Seite stellte große Herausforderungen in Form von Schluchten und Felswänden dar. Speziell durch Felsstürze, übermäßigen Gebirgsdruck und ständig eindringendes Wasser, vor allem im Haupttunnel, kam es zu bautechnischen Problemen.

Es waren ca. 20 000 Arbeiter mit der Errichtung beschäftigt (im Maximum ca. 10 000 gleichzeitig), wobei ein Drittel Frauen waren. Die Bauzeit betrug nur sechs Jahre, was eine technische und organisatorische Meisterleistung darstellt. Während der gesamten Bauphase kamen „nur“ 89 Arbeiter durch Arbeitsunfälle ums Leben.

Letztendlich wurde die Trasse mit 15 Tunnels, 16 ein- und zweistöckigen Viadukten, sowie mehr als 100 Brücken und Durchlässen auf einer Streckenlänge von ca. 42 km eine „steinerne Bahn“, da praktisch alle Bauwerke aus Stein gefertigt wurden, während Stahl fast nicht zum Einsatz kam.

Am 2. Juli 1853 fand die Schlusssteinfeier am Viadukt über die Kalte Rinne statt, wodurch alle Bauwerke vollendet waren. Die Erste Fahrt einer normalen Lokomotive über die gesamte Strecke wurde am 22. Oktober 1853 durchgeführt. Die inoffizielle Eröffnung der Bahn fand am nachfolgenden Tag statt, wobei in Beisein von Minister Andreas Freiherr von Baumgartner (Minister für Finanzen, Handel, Gewerbe und öffentliche Bauten) eine Festfahrt durchgeführt wurde. Noch im Jahre 1853 wurde auf dem Teilstück Gloggnitz-Payerbach der Betrieb aufgenommen. Die Betriebsaufnahme auf der gesamten Strecke erfolgte für den Frachtverkehr am 15. Mai 1854, jene des Personenverkehrs am 17. Juli 1854.

Erst im März 1850 erfolgte mittels weltweiter Ausschreibung (damals als Preisausschreiben) der Aufruf zum Bau einer zugkräftigen aber auch kurventauglichen Lokomotive. Im Juli 1851 standen in Payerbach vier Lokomotiven unter Dampf, die alle Bedingungen mühelos erfüllten. Die erste Lokomotive (von Wilhelm von Engerth) wurde aus den Vorteilen der vier vorgestellten erarbeitet und wies für die damalige Zeit besondere Merkmale, wie z.B. viele aber kleine angetriebene Räder, auf. Dies war für hohe Zugkraft an den Steigungen wichtiger, als eine große Höchstgeschwindigkeit, weshalb diese Lokomotiven in jedem der beiden Talbahnhöfe die „Flachland“-Lokomotiven ersetzen.

Während des ersten Jahrzehnts wurde die Bahn nur wenig ausgelastet, weshalb es aus heutiger Sicht bewundernswert ist, dass die Semmeringbahn von Anfang an zweigleisig ausgeführt wurde. Diese Weitsicht sollte sich erst einige Jahrzehnte später bezahlt machen.

Noch zu Lebzeiten von Carl Ritter von Ghega (Ritterschlag 1851), wurde die einzige bauliche Adaption an der Strecke durchgeführt. Da das Viadukt über den unteren Adlitzgraben aufgrund der Fliehkäfte der Züge in diesem starken Bogen außen abzusinken drohte, mussten an der Bogenaußenseite zusätzliche Stützpfeiler errichtet werden, die aber die Ästhetik des Talüberganges nicht beeinträchtigen sollten. Diese sind in Abbildung 22, jeweils in der Mitte der ursprünglichen Viaduktstützpfeiler gut zu erkennen.



Abbildung 22: Viadukt über den unteren Adlitzgraben [10]

Aufgrund der Finanznot des österreichischen Staates wurde die Semmeringbahn im Herbst 1858 an die neu gegründete Südbahngesellschaft, der späteren „Donau-Save-Adria-Eisenbahn-Gesellschaft“, verkauft.

Das Verkehrsaufkommen blieb in der Folgezeit eher gering. Erst ab 1870 stieg der Verkehr deutlich an, sodass auch immer stärkere Lokomotiven verwendet wurden.

Knapp vor der Jahrhundertwende stieg der Verkehr nochmals merklich an, was sich vor allem in steigendem Gewicht und Achsdruck niederschlug.

Nach der Eingliederung Österreichs ins Deutsche Reich, kam es infolge der Aufrüstung zu einem wirtschaftlichen Aufschwung und der Belebung des Verkehrs über den Semmering. Die steigende Industrieproduktion ab 1939 und die Truppentransporte vor der Sudetenkrise im August 1939 vor dem Angriff auf Polen, führten zu Spitzenleistungen im Verkehr über diese Gebirgsstrecke.

Das Güteraufkommen wurde auch durch Kohletransporte nach Italien, kommend von Oberschlesien, gesteigert, wobei je drei Lokomotiven einen Halbzug von 900 t über den Sattel brachten.

Diese ohnehin schon großen Beförderungsleistungen nahmen weiter zu, als Anfang 1941 Truppentransporte für den Jugoslawien-Feldzug zusätzlich abgewickelt werden mussten, sowie der bevorstehende Russlandfeldzug seine Schatten vorauswarf. Wurden in den Anfangsjahren des Streckenbetriebs 1000 t je Richtung täglich befördert und in der Zwischenkriegszeit bestenfalls 6000 t, so wurden damals Güterzüge mit in Summe täglich mehr als 75 000 t Richtung Süden geführt.

Der Verkehr im zweiten Weltkrieg endete für die Semmeringbahn am 1. April 1945, als das Betriebswerk Gloggnitz geräumt wurde und alle Lokomotiven in Richtung Mürzzuschlag abrollten. Die Kriegshandlungen im Semmeringgebiet dauerten bis zum 8. Mai 1945 an, fügten aber dem Bauwerk kaum nennenswerten Schaden zu. Die Semmeringbahn war zwar aufgrund der immensen Belastungen der Vorjahre abgewirtschaftet, jedoch betriebsfähig. Die Betriebsruhe dauerte aber nur rund fünf Wochen an, da die sowohl Niederösterreich, als auch die Steiermark kontrollierenden russischen Besatzungstruppen größtes Interesse an einer funktionierenden Bahnverbindung hatten.

Im März 1952 wurde der neu gebaute, zweite Semmering-Haupttunnel eröffnet und in der Folge der bestehende erste, ursprünglich zweigleisige, Haupttunnel auf ein Gleis zurückgebaut.

In den Nachkriegsjahren gab es eine Typenvielfalt aus Dampf- und Diesellokomotiven, die mit der im Mai 1957 begonnenen Elektrifizierung der Bahnstrecke langsam ein Ende fand. Bei der Aufstellung der Fahrdrachtmasten achtete man besonders darauf, diese optisch richtig, jeweils in Pfeilermittte auf den Viadukten anzuordnen. Am 29. Mai 1959 war schließlich die gesamte Strecke elektrifiziert, weshalb das Heizhaus Gloggnitz stillgelegt wurde und somit die Ära der Dampfzöcher zu Ende war. Seit damals wird der Großteil des Verkehrs mit Elektrolokomotiven abgewickelt.

Seit 1923 stand die Semmeringbahn unter Denkmalschutz. Nach Anstrengungen der NGO Alliance for Nature, unterstützt von den Bundesländern Niederösterreich und Steiermark in den 1990er Jahren, wurde schließlich die Semmeringbahn am 2. Dezember 1998 als erste Eisenbahnlinie der Welt in die UNESCO-Welterbe-Liste aufgenommen, wobei der landschaftliche Schutz der gesamten Region um die Semmeringbahnstrecke inkludiert ist.

[7], [11], weiterführende Literatur [12]

2.2.5. Statistische Datenauswertung in der Messstelle

Überarbeiteter Artikel aus [13]

Die Daten von Messstellen werden auch zur Überwachung von Grenzwerten, wie z.B. jene für statische- und dynamische Radlasten herangezogen, wodurch bei Überschreitung von Grenzwerten Zuganhaltungen veranlasst werden. Daher hat es Bedeutung, dass die Messwerte generell eine hohe Genauigkeit aufweisen. In Breitenstein selbst gibt es keine Zuganhaltungen aufgrund von Grenzwertüberschreitungen, da der Zug schon die anspruchsvolle Strecke befährt und eine Anhaltung und Ausreihung von Fahrzeugen praktisch nicht möglich ist.

Aufgrund der gesetzlichen Grundlagen, Normen und Vorschriften ist für örtliche Messstellen eine Genauigkeit in der Größe von der 3-fachen Standardabweichung bezogen auf den Referenzwert anzuwenden. Je nach Messgröße sind bestimmte Genauigkeiten festgelegt worden. Für die Messung von Radsatzlasten $\pm 2,5\%$, für die Messung der Radentlastung entsprechend den Beladungsvorschriften $\pm 6\%$ und für die Messung von Radunrundheiten $\pm 10\%$. Die Messunsicherheit bzw. die Messabweichung wird wie folgend betrachtet.

Messabweichungen einer Beurteilungsgröße von einem Referenzwert, also derjenige Vergleichswert der durch Anwendung eines anderen Messverfahrens (z.B. Wägung auf einer statischen Waage) ermittelt wird, setzen sich aus systematischen und zufälligen, bekannten und unbekanntem, Fehlern wie folgt zusammen:

- Die systematische Messabweichung: Diese wird angegeben durch die Abweichung des empirischen Mittelwerts vom Referenzwert. Der Mittelwert \bar{x} wird aus den durch Wiederholung gewonnenen Messwerten x_i ($i = 1, 2, \dots, N$) aus der Häufigkeitsverteilung der Stichprobe von der dazugehörigen Messwertreihe errechnet.

$$MEAN = \bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i \quad (8)$$

- Die zufällige Messabweichung: Diese wird angegeben durch die Abweichung der Einzelwerte vom Erwartungswert oder des Mittelwerts der Häufigkeitsverteilung der Stichprobe, beschrieben durch die empirische Standardabweichung, dem mittleren quadratischen Fehler. (siehe Abbildung 23)

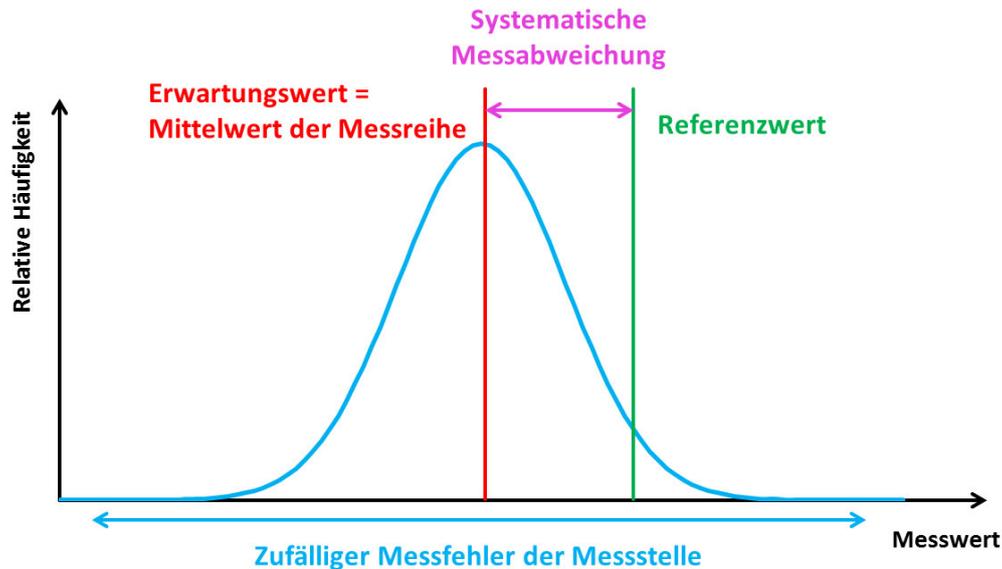


Abbildung 23: Systematische und zufällige Messabweichung [13] (nachgezeichnet)

Die Standardabweichung ergibt sich zu:

$$SDEV = \sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

Aus der untenstehenden Tabelle können die statistische Sicherheit P oder die Wahrscheinlichkeit, dass der Messwert sich im symmetrischen Intervall δ befindet, gefunden werden. (gültig für Normalverteilungen mit $N > 200$) Das heißt, je nachdem wie groß die Wahrscheinlichkeit sein soll, dass der Messwert innerhalb des Konfidenzintervalls liegen soll, muss eine größere Standardabweichung berücksichtigt werden. Sollen z.B. 95,5% der Messwerte in einem betrachteten Intervall liegen, so muss die doppelte Standardabweichung ($2 \cdot SDEV$) betrachtet werden, um den zum Intervall gehörigen Mittelwert errechnen zu können. Messwerte außerhalb der dreifachen Standardabweichung werden Ausreißer genannt. Bei sicherheitsrelevanten Beurteilungsgrößen wird üblicher Weise eine Wahrscheinlichkeit von 99,7% angewendet, sodass, bis auf die Ausreißer, alle Messwerte berücksichtigt werden. [19]

Tabelle 1: Statistische Sicherheit P [13]

δ	$SDEV$	2-fache $SDEV$	3-fache $SDEV$
P in %	68,3	95,5	99,7

Die Ursachen der systematischen Messabweichung sind bekannt und können prinzipiell bis auf eine Restabweichung durch Kalibrierfunktionen korrigiert werden. Die erforderliche Genauigkeit (Accuracy A) entspricht dem Vertrauensbereich für die Messwerte in Abhängigkeit der statistischen Messunsicherheit und wird in den meisten Fällen als ganzzahliges Vielfaches der Standardabweichung ($SDEV$) bezogen auf einen Referenzwert in Prozent angegeben:

$$A = \pm \left| \frac{\delta}{x_{REF}} \right| \cdot 100\% \quad (10)$$

Als Bezugswert = 100% wird hier definiert:

- die Referenzkraft eines Referenzfahrzeuges, mit dem die Genauigkeit nachgewiesen wird,
- ein konstanter Bezugswert x_{RMIN} als Funktion bei sehr kleinen Beurteilungsgrößen (z.B. 5 kN bei Radsatzlast <5 t)

3. Messdatenauswertung

3.1. Methodik der Auswertung und verwendete Programme

Da die zur Auswertung benötigten Daten und auch Programme nur an zwei Stellen vorhanden sind (direkt in der Messstelle Breitenstein und am Zentralserver der ÖBB), wurde zur Bearbeitung der Aufgabenstellung ein Remotezugang zum Sekundärrechner der Messstelle in Breitenstein verwendet.

Die Auswertungen wurden mit dem Programm „AdStat“ der Firma ADES (ADES Echtzeitdatenverarbeitungssysteme GmbH) durchgeführt. Aus der Vielzahl an Messwerten von den Sensoren werden im Primärrechner der Messstelle so genannte Beurteilungsgrößen errechnet und in statistisch vorausgewerteter Form (in Perzentilen) oder als Rohdaten für jeden Radsatz, bzw. jedes Rad oder jeden Sensor in der so genannten „Gast.log“-Datei abgelegt.

In den nachstehenden Abbildungen ist die Bedienoberfläche des Auswerteprogramms AdStat zu sehen.

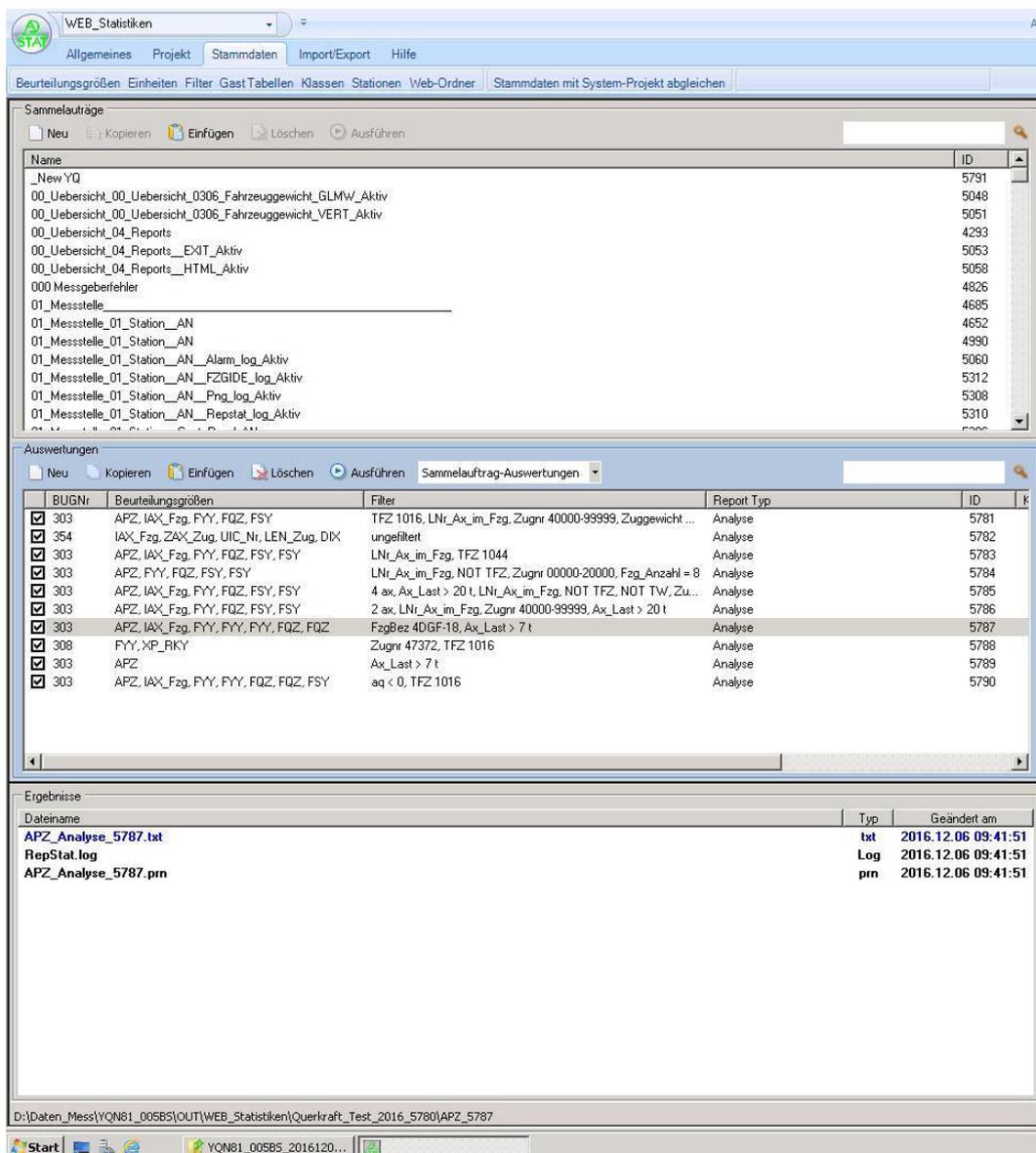


Abbildung 24: AdStat Bedienoberfläche-Screenshot (linker Teil)

Im linken Teil der Oberfläche sind die Sammelaufträge und die einzelnen Auswertungen zu sehen. Darunter sind die durch die letzte Auswertung erzeugten Ergebnisdateien einsehbar. In der rechten Bildhälfte werden die einzelnen Beurteilungsgrößen ausgewählt und die Filter gesetzt. Weiters gibt es noch Optionen zur direkten Erstellung von Grafiken, sowie zur automatischen Versendung der Ergebnisse per E-Mail.

The screenshot displays the AdStat software interface for data evaluation. The main window shows a table of evaluation metrics for station YQN81_00585 Breitenstein. The table includes columns for Name, Kurzname, Nr, Percentil, Schiene, Station, MIN ROT, MIN GELB, MAX GELB, MAX ROT, and Einheit. The data rows are as follows:

Name	Kurzname	Nr	Percentil	Schiene	Station	MIN ROT	MIN GELB	MAX GELB	MAX ROT	Einheit
Achslast	APZ	303	50,00	Gesamt	nicht gep...	...	...	22,5	25,0	t
Nr_Ax_im_Fzg	lAX_Fzg	354	kein Perz...	Gesamt	nicht gep...	...	...	...	...	...
Radquerkraft Y	FYY	308	0,15	Innen	nicht gep...	...	...	40,0	60,0	kN
Radquerkraft Y	FYY	308	50,00	Innen	nicht gep...	...	...	40,0	60,0	kN
Radquerkraft Y	FYY	308	99,85	Innen	nicht gep...	...	...	40,0	60,0	kN
Radlastkraft Q	FQZ	307	50,00	Innen	nicht gep...	...	...	15,0	22,5	kN
Radlastkraft Q	FQZ	307	99,85	Innen	nicht gep...	...	...	15,0	22,5	kN

Below the table, there are filter options and a 'Filter' section with 'Ausgewählte Filter' (FzgBez 4DGF-18, Ax_Last > 7 t) and 'Filterelemente' (FzgBez: 4DGF-18, Achslast: 7-9999). At the bottom, there are buttons for 'Auswertung speichern', 'Auswertung speichern und ausführen', and 'Abbrechen', along with checkboxes for 'RepStat automatisch schliessen' and 'Alle Ergebnisdaten löschen'.

Abbildung 25: AdStat Bedienoberfläche-Screenshot (rechter Teil)

Diese Beurteilungsgrößen setzen sich aus einem oder in der Regel mehreren Sensormessgrößen zusammen. Beispielsweise wird die vertikale Radaufstandskraft eines Rades auf die Schiene aus den elektrischen Spannungen von mehreren Dehnmessstreifen errechnet. Der Inhalt der „Gast.log“-Dateien wird durch das Programm AdStat ausgewertet, wobei verschiedene Einschränkungen gemacht werden können. Die wichtigste Einschränkung ist die Betrachtungsdauer, also wie viele Zugüberfahrten oder wie viele Tage sollen durchsucht werden, um die gestellten Fragen zu beantworten. Dabei wurde im vorliegenden Fall die Zeitdauer in Form des Datums des Beginns und des Endes des Betrachtungszeitraums angegeben.

Im nächsten Schritt werden die gewünschten Beurteilungsgrößen ausgewählt, z.B. die laterale Führungskraft Y (programmintern „FYY“ genannt) mit den möglichen Optionen bogeninnere oder bogenäußere Schiene, Perzentilwert oder diverse Differenzwerte.

Ein wichtiger Schritt ist das Setzen der Filter. Dabei können auf Zug-, Fahrzeug- und Achs-Ebene diverse Filter gesetzt werden, die großteils vorhanden sind oder selbst erstellt werden können. Hier erfolgt z.B. die Auswahl, um welche Fahrzeugbauform es sich handelt, welche freie Seitenbeschleunigung (auf Zugebene) betrachtet wird, wie hoch die Radsatzlast sein darf oder soll, je nachdem was für die aktuelle Fragestellung von Interesse ist.

Nach Abschluss der Einstellungen wird die Abfrage gestartet, die nun alle im gewählten Zeitraum liegenden Dateien durchsucht, je nach den gesetzten Beurteilungsgrößen und unter Berücksichtigung der Filter. Als Ergebnis erhält man eine Datei, die alle getroffenen Voreinstellungen protokolliert und eine Tabelle mit den Ergebnissen. In diesem Fall sind die Zeilen der Tabelle die einzelnen betrachteten Radsätze, auf die die Filterkriterien zutreffen, und in den Spalten sind die Werte der ausgewählten Beurteilungsgrößen zu finden.

Diese Datei wurde anschließend als CSV-Datei (comma-separated values) exportiert und vom Sekundärrechner auf den Bürocomputer verschoben. Die übertragenen CSV-Tabellen lassen sich mit dem Programm Microsoft Excel öffnen, wo auch die Weiterverarbeitung erfolgt. Darunter ist z.B. die Mittelwertbildung über alle Radsätze für ausgesuchte Beurteilungsgrößen und die anschließende graphische Darstellung in gemeinsamen Diagrammen mit den Ergebnissen anderer Auswertungen zu verstehen.

3.2. Einflussfaktoren auf die Messergebnisse

Welchen quantitativen Einflüssen unterliegen die Messergebnisse?

Die Messergebnisse der betrachteten Größen in der Messstelle sind von den zahlreichen nachfolgend behandelten Einflussfaktoren abhängig. In diesem Kapitel wird, wenn nicht anders angegeben, auf sogenannte zufällige Fehler eingegangen.

- *Rad/Schiene-Kontaktpunkt*

Einer der wichtigsten Einflüsse auf die Ergebnisse ist der Rad/Schiene-Kontaktpunkt. Die gemessenen Kräfte sind sehr stark davon abhängig, wo sich der tatsächliche Kontaktpunkt am Schienenkopf befindet. Bei einem aus der Schienenkopfmittle verschobenen Kraftangriffspunkt kommt es zur Ausbildung von zusätzlichen Torsionsmomenten auf die Schienen in deren Längsrichtung, die von den Dehnmessstreifen gemessen werden und somit bei der Auswertung der Sensordaten Einfluss auf die Ergebnisse nehmen. Diese Torsionsmomente können erfasst und herausgerechnet werden, im Einzelfall können diese bei ungünstigen Kraftangriffspunkten aber zu unrealistischen Ergebnissen führen.

Der tatsächliche Kontaktpunkt ist einerseits durch das Profil der Schiene, das einem Verschleiß unterliegt und sich daher langfristig ändert, sowie dem Laufflächenprofil des Rades abhängig. Speziell die Abnutzung jedes Rades ist an jedem Fahrzeug einzigartig. Infolge dessen kommt es bei fahrzeugbauartspezifischen Betrachtungen zu relativ großen Streuungen. Ein Beispiel stellen die Taurus-Lokomotiven (1116 und 1216) vor den Railjet-Garnituren dar. Sind diese Züge öfter auf der österreichischen

Südbahnstrecke unterwegs als auf der Westbahnstrecke, dann werden die Spurkränze auf der deutlich kurvenreicheren Südbahnstrecke stärker seitlich belastet als auf der Hochgeschwindigkeits-Neubaustrecke der Westbahnstrecke. Dies lässt sich am Spurkranzverschleiß erkennen. Daher gibt es keine zwei Schienenfahrzeuge, die das idente Belastungsspektrum während ihres Betriebes erfahren. (Ausnahme: nicht betrieblich trennbare Züge) Somit weist jedes Fahrzeug individuelle Kontaktpunkte auf der Schiene auf.

- *Dynamische Einflussfaktoren*

Einen weiteren Einfluss stellt die Gleislage im Bereich der Messstelle, unmittelbar sowie davor dar. Das dynamische Verhalten jedes Fahrzeuges wird durch die Kombination der Anregungen durch die räumliche Veränderung der Schienenlage, sowie dem Eigenverhalten des Fahrzeuges bestimmt. Die Gleislage kann für eine Betrachtungsdauer von einer Woche als gleichbleibend angesehen werden. Genau genommen wird durch jede Zugüberfahrt über einen Gleisabschnitt der Schotteroberbau leicht verändert, sodass bei jedem Zug andere Bettungsverhältnisse vorliegen. Diese Änderungen, insbesondere die Gleissetzung, sind aber so gering, dass diese für kurze Betrachtungsdauern (hier eine Woche), ebenso wie der Verschleiß der Schiene, vernachlässigt werden können. [15] Die Anregungen durch das Gleis sind also einheitlich für alle Züge, jedoch sind die Kontaktpunkte auf der Schiene verschieden. Die Anregung durch die Schiene kann als eine über dem Weg festgelegte Größe interpretiert werden. Das heißt aber, dass sich bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten die zeitliche Abfolge der Anregungen ändert. Das Eigenverhalten der Fahrzeuge ist einerseits von der Massenverteilung im Fahrzeug abhängig, andererseits von der Konstruktion des Drehgestells, sowie den Feder- und Dämpfer-Elementen. Auch letztere sind einem geringen Verschleiß bzw. einer Fertigungstoleranz unterworfen, sowie abhängig vom Wartungszustand des Fahrzeuges, sodass es zwischen allen bauähnlichen Fahrzeugen geringe Abweichungen gibt. Zum dynamischen Verhalten des Fahrzeuges auf der Schiene zählt auch der so genannte Wellenlauf (in der Literatur oft als Sinuslauf bezeichnet). Dieser findet im Bogen abhängig von der Fahrgeschwindigkeit und den daraus resultierenden seitlichen Belastungen nur mehr in sehr geringem bis vernachlässigbarem Maße statt. Es können gewisse wellenförmige Y-Kraft-Verläufe in längeren Zügen erfasst werden, die aber aufgrund der Zugsdynamik durch die vor- und nachlaufenden Triebfahrzeugen zustande kommen. Infolge dessen können sich die Y-Kräfte sehr stark über die Zuglänge ändern.

Einen weiteren Einfluss auf die gemessenen Werte stellen die Längskräfte im Rad/Schiene-Kontakt dar. Durch die Antriebs- oder Bremskräfte gibt es zusätzliche Verformungen an der Schiene, die wiederum jene Verformungen der Aufstands- oder Seitenführungskraft an den Dehnmessstreifen beeinflussen. Dadurch werden die ermittelten Y- und Q-Kräfte verfälscht. Da die Messstelle in Breitenstein nicht dafür ausgerüstet ist, auch Längskräfte zu messen, gibt es keine Möglichkeit diese Kräfte messtechnisch zu erfassen, zu quantifizieren und deren Einfluss auf die Y- und Q-Kräfte zu ermitteln. Dies stellt einen zufälligen Messfehler dar, der vor allem bei Triebfahrzeugen auftreten kann.

- *Reibungsverhältnisse*

Einen weiteren Einflussfaktor stellen die Reibungsverhältnisse dar. Vor der Messstelle ist wie bereits in Kapitel 2.2.1 erwähnt, in Regelfahrtrichtung eine Schienenkonditionieranlage vorhanden, die über alle Umweltbedingungen hinweg für einen gleichbleibenden Reibwert sorgen soll. Der Zustand dieser Anlage wird zwar elektronisch überwacht, wie die Reibungsverhältnisse sich aber tatsächlich einstellen, kann nicht direkt erfasst werden. Aber auch mit dem Wissen der Abgabemenge des Schmiermittels sind die Reibungsverhältnisse von den Umweltbedingungen, wie Regen und Feuchtigkeit, abhängig. Um den Reibwert messtechnisch zu erfassen, wird die Größe Y/Q an der Innenschiene betrachtet. Da das bogenäußere Rad üblicherweise am Spurkranz anläuft und somit das bogeninnere Rad ausschließlich mit der Lauffläche des Radprofils auf der Schienenkopfmittle aufliegt, kann die einzige zwischen Rad und Schiene übertragbare Kraft in y -Richtung (quer) nur eine reine Reibungskraft sein. Mit dem Verhältnis der Y - zur Q -Kraft kann somit der Reibwert über das Coulomb'sche Reibungsgesetz abgeschätzt werden. Ist der Reibwert hoch, so können sich auch an der Innenschiene hohe Y -Kräfte aufbauen.

- *Saisonale Umweltveränderungen*

Unabhängig vom Rad/Schiene-Kontakt kann es auch zu jahreszeitlichen Veränderungen des Unterbaus kommen. Hier sind vor allem die Veränderungen des Grundwasserspiegels durch Niederschlag und das Gefrieren des Bodens, sowie von möglichen vorhandenen Wasserlinsen im Winter für eine Veränderung der Steifigkeit des Unterbaus verantwortlich. Infolge dessen kann es zu örtlich veränderten Bettungssteifigkeiten kommen, die sich auf das Einsinkverhalten der Schwellen auswirken. Es können daher Gleisabschnitte mit geringer und mit höherer Bettungssteifigkeit direkt aufeinander folgen, was zu einer Anregung eines vertikalen Schwingungsverhalten (Tauchschwingung) der Fahrzeuge führen kann. Dabei würden sich die Aufstandskräfte (Q -Kräfte) wellenförmig über dem Weg ändern. Abhängig von den täglichen Temperaturdifferenzen, bzw. der Sonnenstrahlung können sich auch tageweise unterschiedliche Verhältnisse vor allem in den Schienen ergeben, da sich die Längsspannungen in den Schienen durch die Erwärmung verändern. Da die Messstelle erst bei Annäherung eines Zuges den Nullabgleich durchführt, sollten dadurch keine zusätzlichen Störeinflüsse auftreten. Die Dehnmessstreifen sind darüber hinaus mit einer Temperaturkompensation ausgestattet.

- *Zufällige Fehler im Messsystem*

Durch Fehler in den Sensoren bzw. der Signalauswertung kommt es selten zu unrealistischen Messwerten. Es kann passieren, dass einzelne Sensoren nur für eine Messfahrt ausfallen oder aber dauerhaft betriebsunfähig sind. Bei der Erkennung eines Fehlers wird der betreffende Sensor als solcher gekennzeichnet, und die Messwerte werden nicht weiter zur Ermittlung der Beurteilungsgrößen herangezogen. Dies kann z.B. ein Nulliniendrift sein oder ein zu großes Rauschen des Sensorsignals. Tritt während einer Messung ein Fehler auf und wird dieser nicht erkannt, oder wird eine ungünstige Belastungsrichtung erreicht, kann es zu unrealistischen Ergebnissen kommen, beispielsweise zu leichte oder zu schwere Fahrzeuge, wobei je nach betroffenen Sensoren nur gewisse Beurteilungsgrößen betroffen sind. Diese offensichtlich falschen Messergebnisse können gefunden und

ausgefiltert werden, wobei der Anteil an solchen auffindbaren Fehlern bei ca. 0,5% aller gemessenen Radsätze und somit auf vernachlässigbarem Niveau liegt. Ein bis zwei Sensoren hingegen messen ohne Fehlermeldung, aber die Ergebnisse passen nicht zu jenen der übrigen Sensoren. Diese wurden von der Auswertung ausgenommen.

Die Messgenauigkeit kann abgeschätzt werden, wenn dasselbe Fahrzeug unter gleichen Lastbedingungen und gleichen Umgebungsbedingungen mehrfach die Messstelle passiert. Hierfür können Messkampagnen herangezogen werden. Im Folgenden wird auf eine Messkampagne zur Erprobung von aktiven Drehdämpfern (ADD) eingegangen, in deren Verlauf ein Testzug fünfmal innerhalb eines Tages die Messstelle passierte. Dieser Testzug bestand aus einer antreibenden 1016, einem Messwagen und einer bremsenden 1016 bzw. 1116.



Abbildung 26: Testzug bei der Messfahrt [6]

Das führende Triebfahrzeug war zwecks Simulation einer Zuglast auf eine konstante Zugkraft von 270 kN eingestellt, die beiden Triebfahrzeuge am Zugende wurden auf das Einhalten der Fahrgeschwindigkeit von 60 km/h eingebremst. Um eine Überhitzung zu vermeiden, mussten dafür zwei Lokomotiven verwendet werden. In der folgenden Abbildung sind die Summe Y 50%-Kräfte für alle Radsätze und Messfahrten dargestellt. Diese Kräfte stellen die Summe der an Außen- und Innenschiene wirkenden Kräfte in y-Richtung dar, wobei es sich um einen gleitenden Mittelwert über die 50% Perzentilwerte handelt.

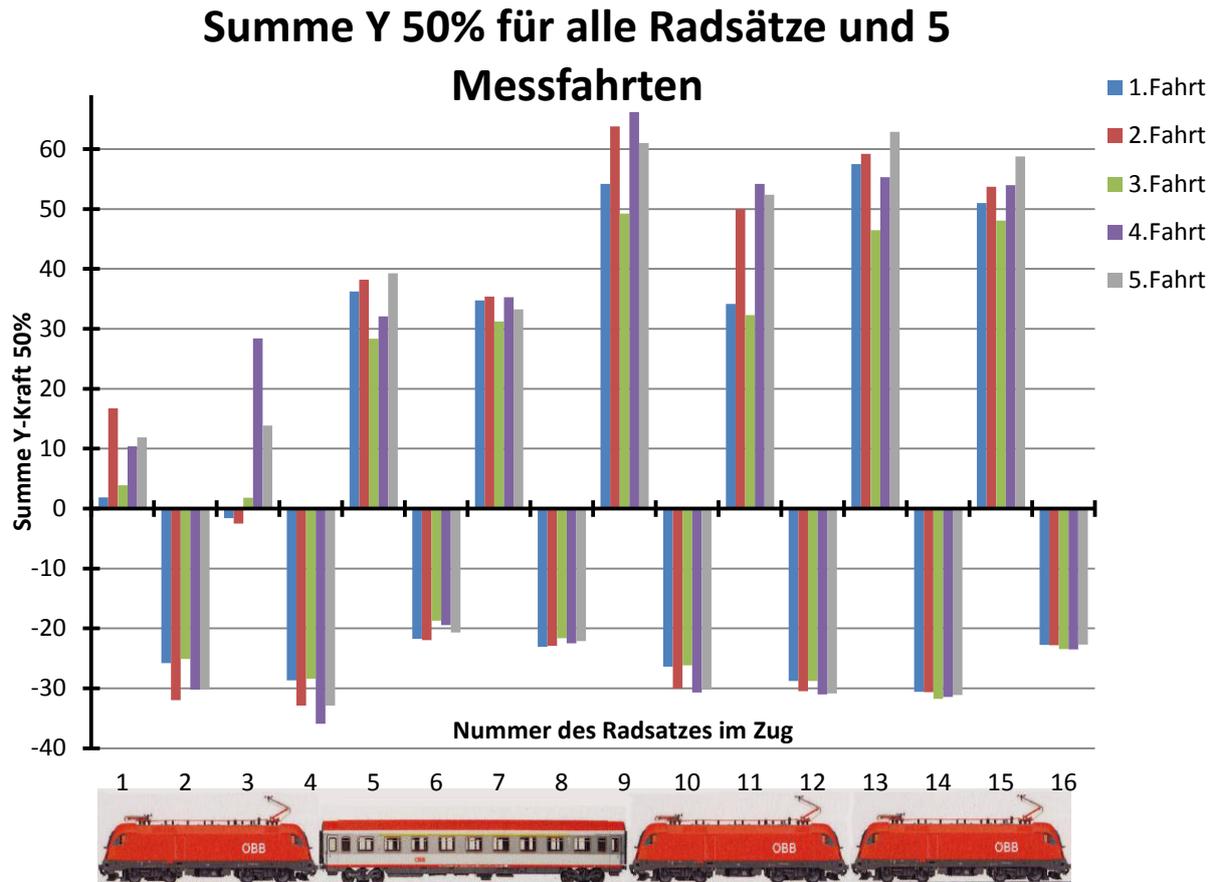


Abbildung 27: Summe Y 50%-Kraft für alle Radsätze und Messfahrten (Fahrzeugbilder [31])

Ohne auf die Wirkung der ADD einzugehen sind generelle Zusammenhänge sichtbar. Von besonderem Interesse sind das letzte Triebfahrzeug (bremsende 1116 ohne ADD, Radsätze 13-16), sowie der mitrollende Messwagen (Radsätze 5-8), da diese Fahrzeuge über keine Modifikationen an den Drehdämpfern verfügen.

Es ist zu erkennen, dass die jeweils nachlaufenden Radsätze der Drehgestelle der beiden betrachteten Fahrzeuge (Messwagen und Tzf. am Zugende) relativ gleichbleibende Summe Y 50%-Kräfte aufweisen. Die vorlaufenden Radsätze der Drehgestelle derselben Fahrzeuge hingegen weisen aber eine relativ große Streuung auf.

Auch unter getrennter Betrachtung der Y 50%-Kraft auf die Innen- bzw. Außenschiene ist dieses Verhalten zu erkennen. (nicht dargestellt)

Die Aufstandskräfte an beiden Schienen (Q-Kräfte, 50%) variieren für die beiden betrachteten Fahrzeuge über alle Fahrten um ca. 1%. Bei den modifizierten Fahrzeugen, besonders am antreibenden Tzf. weisen die Aufstandskräfte eine Abweichung von max. 2,7% auf. Dies ist auch der enorm hohen Zugkraft und der daraus resultierenden dynamischen Radsatzlastverlagerungen geschuldet.

Somit weisen die Y-Kräfte relativ starke Schwankungen auf, besonders an der Außenschiene, wohingegen die (hier nicht dargestellten) Aufstandskräfte (Q-Kräfte) nur geringen Schwankungen unterliegen.

Die ermittelten Daten sind also von einer Vielzahl von teilweise nicht quantifizierbaren Faktoren abhängig, zeigen aber vor allem in vertikaler Richtung (Q-Kraft) nur geringe Abweichungen auf. In horizontaler Richtung (Y-Kraft) sind die Abweichungen größer und auch von der Radsatzposition im Drehgestell

(vorlaufend/nachlaufend) abhängig. Um gesicherte Ergebnisse zu bekommen, werden die Zugfahrten einer gesamten Woche betrachtet, wodurch das gesuchte Lastkollektiv durch die möglichst große Anzahl an Radsätzen statistisch abgesichert wird.

- *Systematischer Fehler im Messsystem*

Die im Folgenden beschriebenen Fehler stellen einen systematischen Auswertefehler dar. In der Messstelle sind konstante Werte des Gleises und des Unterbaus hinterlegt, die zur Berechnung der Beurteilungsgrößen herangezogen werden. Dazu zählen z.B. die Bettungssteifigkeit, der Bogenradius und die Überhöhung.

Für die Bettungssteifigkeit ist ein Mittelwert über das ganze Jahr angenommen, der alle jahreszeitlichen Veränderungen des Ober- und Unterbaus berücksichtigt, aber somit nur unter bestimmten Bedingungen tatsächlich gilt. Der Bogenradius und die Überhöhung wurden bei Betriebsbeginn der Messstelle auf Basis der Trassierungsdaten eingegeben. Da sich die Gleislage durch die Zugüberfahrten aber langfristig ändert, bzw. es zu Überarbeitungen und Lagekorrekturen kommt, stellen diese Werte auch nur Bezugswerte dar. Bezogen auf eine Gleisvermessung gibt es daher bei allen berechneten Werten, die von den hinterlegten Größen abhängig sind, zu einer relativ konstanten Abweichung. Im Falle der freien Seitenbeschleunigung $a_{q,f}$ sind die von der Messstelle angegebenen Werte um $0,167 \text{ m/s}^2$ (Standardabweichung = $0,0009 \text{ m/s}^2$) zu hoch. Dies kann aus einem Vergleich der von der Messstelle errechneten freien Seitenbeschleunigung und der tatsächlichen, berechnet auf Basis der Fahrgeschwindigkeit und der gemessenen Trassierungsparameter, ermittelt werden.

Die hinterlegten Werte stellen somit Bezugswerte dar, sodass die Ergebnisse der Messung über längere Zeiträume hinweg vergleichbar sind. Würden nach jeder Gleisvermessung die hinterlegten Daten geändert werden, wären die Messergebnisse nicht mehr vergleichbar.

3.3. Statistische Auswertungen als Mittelwerte über die Messstelle

Im ersten Schritt der Bearbeitung des Themas wurden Auswertungen hinsichtlich der Mittelwerte der auftretenden Kräfte über die Messstelle durchgeführt, wobei jeweils in Bogenaußenschiene und Innenschiene unterschieden wurde. Es wurden mehrere Betrachtungsweisen verwendet, von den Gesamtbelastungen aller Überfahrten der Messstelle, über die Kräfte von verschiedenen Fahrzeugen auf die Schiene und speziell für zwei bestimmte Triebfahrzeuge bei unterschiedlichen freien Seitenbeschleunigungen bis zu den Summe Y-Kräften und der Bandbreite der Y-Kräfte.

Für die vorliegenden Ergebnisse, wurde ein Auswertzeitraum von einer Woche ausgewählt. Um eine durchschnittliche, aber vollständige Woche auszuwählen, musste auf etwaige Bauarbeiten und damit einhergehenden Betriebsunterbrechungen auf dem betrachteten Gleisabschnitt, sowie auf den Ausfall von Messgebern Rücksicht genommen werden.

Die Daten für die nachfolgenden Kapitel entstammen aus einer Woche Anfang Oktober 2016. In diesem Zeitraum haben 492 Züge die Messstelle passiert, wobei es

sich um eine Mischung aus überwiegend Güterzügen und Fernverkehrszügen, sowie wenigen Regionalzügen (und S-Bahnen) handelte.

Das Wetter ist, wie schon in Kapitel 3.2 angemerkt, ein Einflussfaktor auf das Laufverhalten der Schienenfahrzeuge. Die Wetterdaten für die nächstgelegene Wetterstation auf der Passhöhe Semmering zeigen für die sieben Tage 9. bis 15.10.2016 folgendes: mittlere Tageshöchsttemperatur: 8,1 °C, mittlere Tagestiefsttemperatur: 1,1 °C, Gesamtmenge an Niederschlag in den sieben Tagen: 25 mm, mittlere relative Luftfeuchtigkeit: 90% [37]

Aufgrund dieser Umweltbedingungen sind tendenziell geringe Reibwerte zu erwarten, da die Luftfeuchtigkeit relativ hoch ist und es geringen Niederschlag gegeben hat.

Ausgewertet wurden die Kräfte in Form von Perzentilen der Gesamtheit der Daten für eine bestimmte Kraftkomponente, betrachtet über die gesamte Messstrecke, die für jeden Radsatz und jede Seite (Innen- oder Außenschiene) vorliegen. Für die lateralen Führungskräfte in Y-Richtung wurden sowohl die unteren (0,15%) als auch die mittleren (50%) und oberen (99,85%) Perzentile betrachtet, da nicht nur die „Mittelwerte“ bzw. die Maximalwerte wichtig sind, sondern auch die Mindestbelastungen von Interesse sind. Zusätzlich wurden die dabei wirkenden vertikalen Aufstandskräfte (Q-Kräfte) mit ihren 50% und 99,85% Perzentilwerten ermittelt. Die positive Zählrichtung der Y-Kraft ist in Richtung bogenaußen definiert.

3.3.1. Auswertung der Gesamtheit der Überfahrten

Im Folgenden wurden über die gesamte Betrachtungsdauer von einer Woche die für die Auswertung interessanten Kraftkomponenten gemittelt über alle Fahrten ermittelt. Dabei wurden keine Filter oder Einschränkungen verwendet, sodass die wahre Belastung der Schienen über alle Schienenfahrzeuge und deren Geschwindigkeitsbereiche hinweg berechnet wurden.

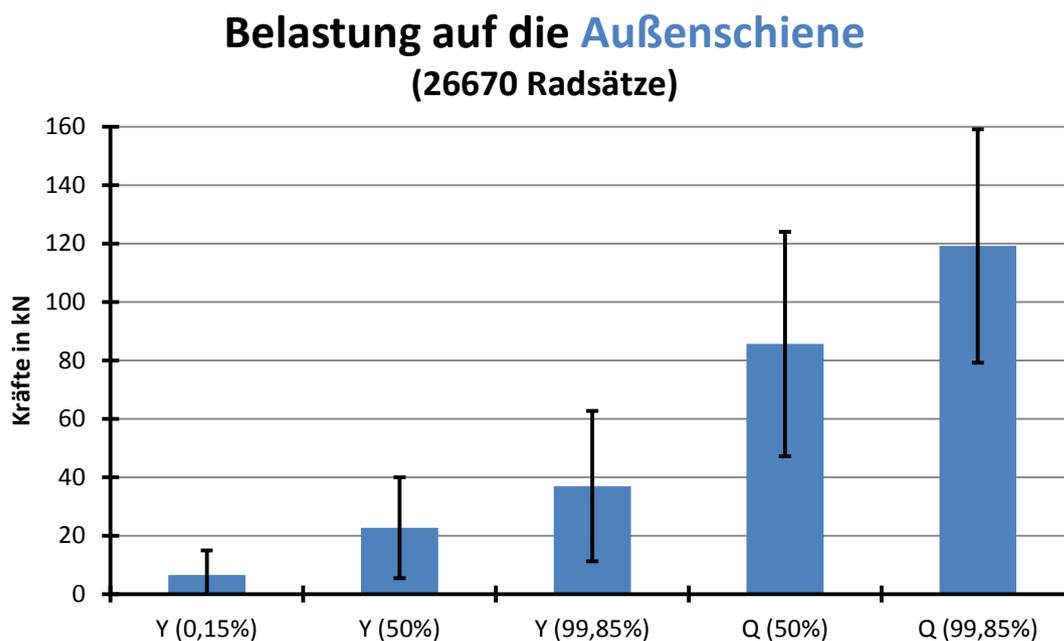


Abbildung 28: Belastung auf die Außenschiene (alle Überfahrten) mit einfacher Standardabweichung

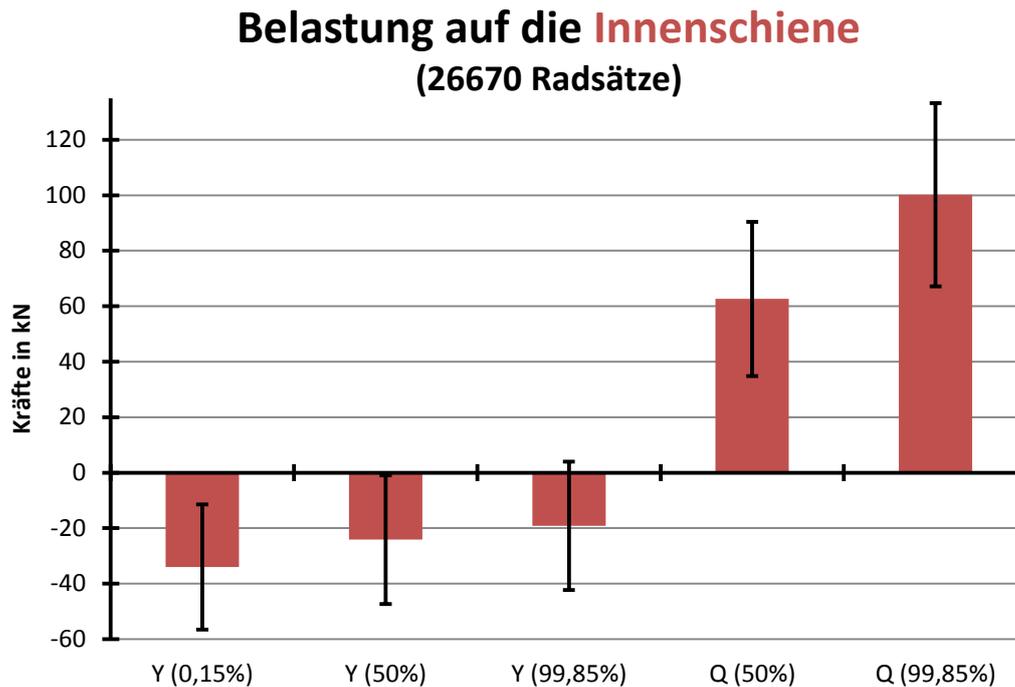


Abbildung 29: Belastung auf die Innenschiene (alle Überfahrten) mit einfacher Standardabweichung

Die Datengrundlage zu diesen Diagrammen stellen die 492 Zugüberfahrten der gesamten Betrachtungsdauer dar, das entspricht 26670 Radsätzen.

Aufgrund der an der Außenschiene höheren vertikalen Aufstandskräfte ist anzunehmen, dass die durchschnittliche Überfahrtgeschwindigkeit über die Messstelle in einem Bereich liegt, der eine tendenziell positive freie Seitenbeschleunigung aufweist. Die lateralen Führungskräfte (Y-Kräfte) liegen mit den jeweiligen Maximalwerten ungefähr auf betragsmäßig gleichem Niveau, die Minimalwerte hingegen sind an der Innenschiene deutlich höher als an der Außenschiene. Die durchschnittliche Y-Kraft auf die Schienen liegt bei rund ± 23 kN. Die durchschnittliche vertikale Aufstandskraft Q liegt an der Innenschiene bei 63 kN und an der Außenschiene bei 86 kN. An den relativ großen Standardabweichungen ist die Vielzahl an unterschiedlichen Fahrzeugen erkennbar, die die Messstelle passierten.

3.3.2. Auswertung nach spezifischen Fahrzeugen

Bei der fahrzeugspezifischen Auswertung wurden als Fahrzeuge drei Triebfahrzeugbauarten (Tfz-Typ-1, 2 und 3) ausgewählt, die den Großteil der Züge auf dieser Strecke bespannen. Dabei ist anzumerken, dass die Bauart aufgrund des Achsmusters bei der Überfahrt der Messstrecke, also an den Abständen der Radsätzen, erkannt wird. Darüber hinaus sind zwei Waggonbauformen von Interesse, zum einen die Reisezugwagen, zum anderen eine der gängigen Bauformen von Güterwagen. In der Messstelle werden Reisezugwagen als 4DGF-25 bezeichnet, was so viel bedeutet wie 4-achsiges Drehgestellfahrzeug mit 2,5 m Achsstand im Drehgestell. Die betrachtete Güterwagenbauform ist mit 4DGF-18 nach demselben Schema bezeichnet. Alternativ gibt es noch unzählige andere Bauformen für den Gütertransport, von zwei-achsigen Wagons, über die Drehgestellwagons mit zwei oder drei Drehgestellen bis zu Sonderbauformen

unterschiedlichster Ausprägung. Die gewählte Wagonbauart ist eine der am häufigsten verwendeten, weshalb diese dominierende Bauart als Vertreter aller Güterwagen herangezogen wurde. Da es sowohl Leerfahrten als auch schwer beladene Güterwagen gibt, wurde hinsichtlich der statischen Radsatzlast ($2Q_0$) unterschieden, ob es sich um ein unbeladenes oder ein beladenes Fahrzeug handelt. Dafür wurde eine Grenze von 7 t Radsatzlast festgesetzt. Darüber gilt der Wagen als beladen, darunter als unbeladen.

Auch für die Reisezugwagen wurden Radsatzlastgrenzen eingesetzt, wobei nur Radsätze mit einer Radsatzlast zwischen 11 und 15 t durch eine Datenfilterung berücksichtigt wurden. Ziel ist es, nur einen geringen Streubereich zuzulassen um möglichst gleiche Wagenarten zu erfassen. Der Fokus liegt hier auf internationalen Reisezugwagen und nicht auf den auch auf dieser Strecke verkehrenden Nahverkehrszügen (City Shuttle), die aber als Leichtbaufahrzeuge gelten. Durch die geringe Radsatzlast werden diese Fahrzeuge nicht vom Filter erfasst. Jüngere Reisezugwagen höherer Komfortstufe liegt zufolge schwererer Ausrüstungen am oberen Rand des Radsatzlastbereichs und weisen zudem meist höhere Passagieraufkommen auf. Die Anzahl der dadurch nicht berücksichtigten Fahrzeuge liegt aber auf vernachlässigbarem Niveau.

In den nachfolgenden Diagrammen sind die Mittelwerte über alle gemessenen Radsätze pro Kraftkomponente, jeweils an der Außen- und Innenschiene für bestimmte Fahrzeugarten dargestellt. Für diese Diagramme wurden keine weiteren Unterscheidungen der Betriebsparameter durchgeführt. Infolge dessen sind Kraftdaten zu unterschiedlichsten Fahrzuständen enthalten und stellen somit die Gesamtheit der Belastung je Fahrzeugbauform dar.

Belastung auf die Außenschiene (fahrzeugspezifisch)

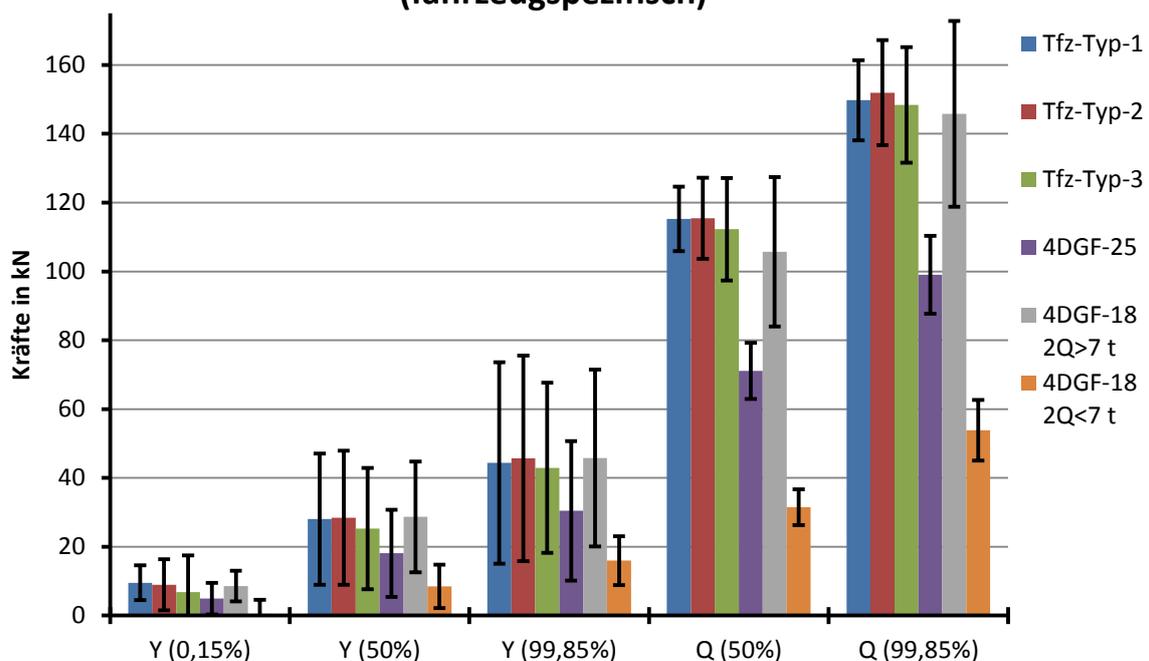


Abbildung 30: Belastung auf die Außenschiene (nach Fahrzeugen) mit einfacher Standardabweichung

Belastung auf die **Innenschiene** (fahrzeugspezifisch)

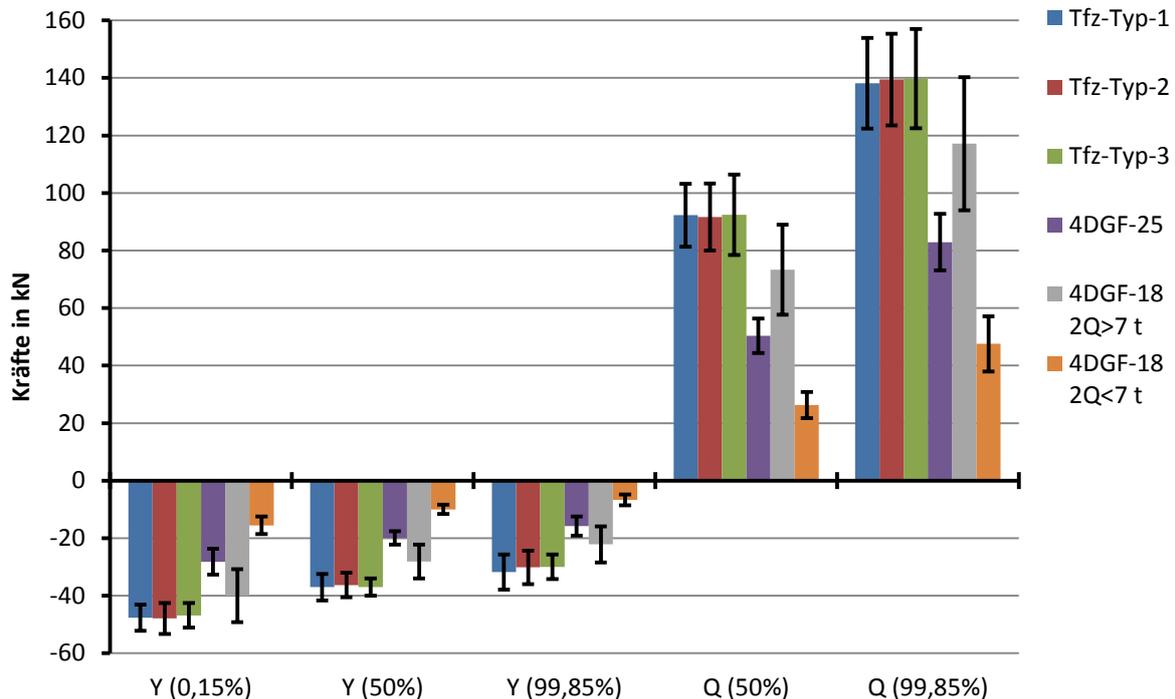


Abbildung 31: Belastung auf die Innenschiene (nach Fahrzeugen) mit einfacher Standardabweichung

Die diesen Diagrammen zugrundeliegenden Daten setzen sich wie folgt zusammen.

Tabelle 2: Datengrundlage Kräfte auf die Innen-/Außenschiene nach Fahrzeugart

Fahrzeugart	Tfz-Typ-1	Tfz-Typ-2	Tfz-Typ-3	4DGF-25	4DGF-18 2Q ₀ < 7 t	4DGF-18 2Q ₀ > 7 t
Anzahl der gemessenen Radsätze	1252	1342*	436	5180	1328	11445

* durch einen Auswertefehler wurden einem Tfz-Typ-2 zwei Achsen mehr zugerechnet

Die weiteren Betrachtungen basieren auf diesen 6 „Fahrzeugklassen“.

An dieser Aufstellung ist ersichtlich, dass die Mehrheit der Fahrzeuge an der Messstelle zur Klasse der beladenen Güterwagen zählt. Anzumerken ist, dass bei den Reisezug- und Güterwagen die Anzahl der gemessenen Radsätze nicht unbedingt ein ganzzahliges Vielfaches von vier sein muss. Es kann vorkommen, dass aufgrund der Radsatzlastfilter einzelne Radsätze eines Fahrzeuges nicht berücksichtigt werden, wenn z.B. nur ein Radsatz die gesetzten Filterkriterien überschreitet.

In den Diagrammen ist grundsätzlich zu erkennen, dass die unbeladenen Güterwagen bei allen betrachteten Kraftkomponenten die mit Abstand geringsten Werte aufweisen. Daher wird diese Fahrzeugbauform mit Radsatzlasten unter 7 t im Weiteren nicht gesondert betrachtet.

Alle betrachteten Triebfahrzeuge weisen generell ein sehr ähnliches Kraftniveau auf, sodass die Unterschiede in der Belastung auf die Schiene gering ausfallen. Es ist keine Triebfahrzeugbauform zu erkennen, die prinzipiell andere Kräfte auf die Schienen ausübt als die anderen Triebfahrzeuge. Einzig bei den betrachteten Y-Kräften weist Tfz-Typ-3 an der Außenschiene leicht geringere Werte auf. Auffallend ist aber, dass Tfz-Typ-3 im Allgemeinen eine geringere Standardabweichung bei den Y-Kräften aufweist als die beiden anderen betrachteten Baureihen.

Die Belastungen der Schienen durch Reisezugwagen erreichen rund 50 bis 70% jener von Triebfahrzeuge. Somit haben Reisezugwagen prinzipiell eine geringere schädigende Wirkung auf die Schiene als Triebfahrzeuge.

Beladene Güterwagen üben Belastungen aus, die an jene der Triebfahrzeuge heranreichen. Besonders durch die große Streuung der Radsatzlasten bei dieser Fahrzeugart können vor allem die Q-Kräfte auch jene von Triebfahrzeugen übersteigen.

Vergleicht man die Diagramme der Innen- und der Außenschiene, so erkennt man, dass die Standardabweichungen an der Innenschiene deutlich unter jenen der Außenschiene liegen. Dies liegt an den unterschiedlichen Rad/Schiene-Kontaktpunkten. Auf der Innenschiene liegen die Kontaktpunkte in Schienenkopfmittle bzw. im kegeligen Teil des Laufflächenprofils. Auf der Außenschiene liegt der Kontaktpunkt am bogeninneren Schienenkopfrand bzw. im Übergangsbereich von der Lauffläche zum Spurkranz. In diesem Bereich sind die genauen Kontaktverhältnisse sehr stark vom Verschleißbild der beiden Kontaktpartner abhängig, und daher sind die Berührungspunkte an jedem Rad unterschiedlich.

Auf der Datengrundlage der letzten beiden Diagramme kann auch die Bandbreite, also die Differenz zwischen dem 99,85%-Wert und dem 0,15%-Wert der Y-Kraft, berechnet werden. Dies stellt einen interessanten Wert dar, da diese Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Wert der Y-Kraft über die Messstrecke eine Aussage über die Schwankung der Y-Kraft auf den betrachteten 9,6 Metern Messstrecke zulässt, wie in Abbildung 32 schematisch ersichtlich ist.

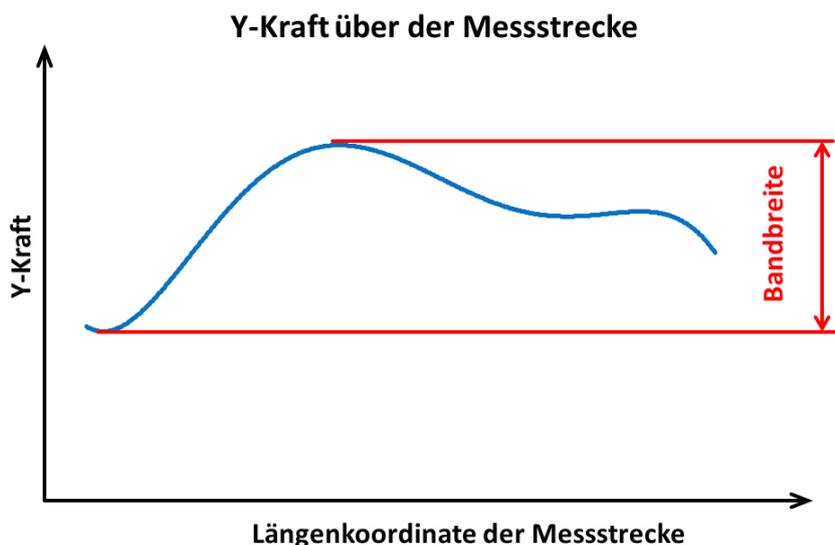


Abbildung 32: Bandbreite der Y-Kraft (schematisch)

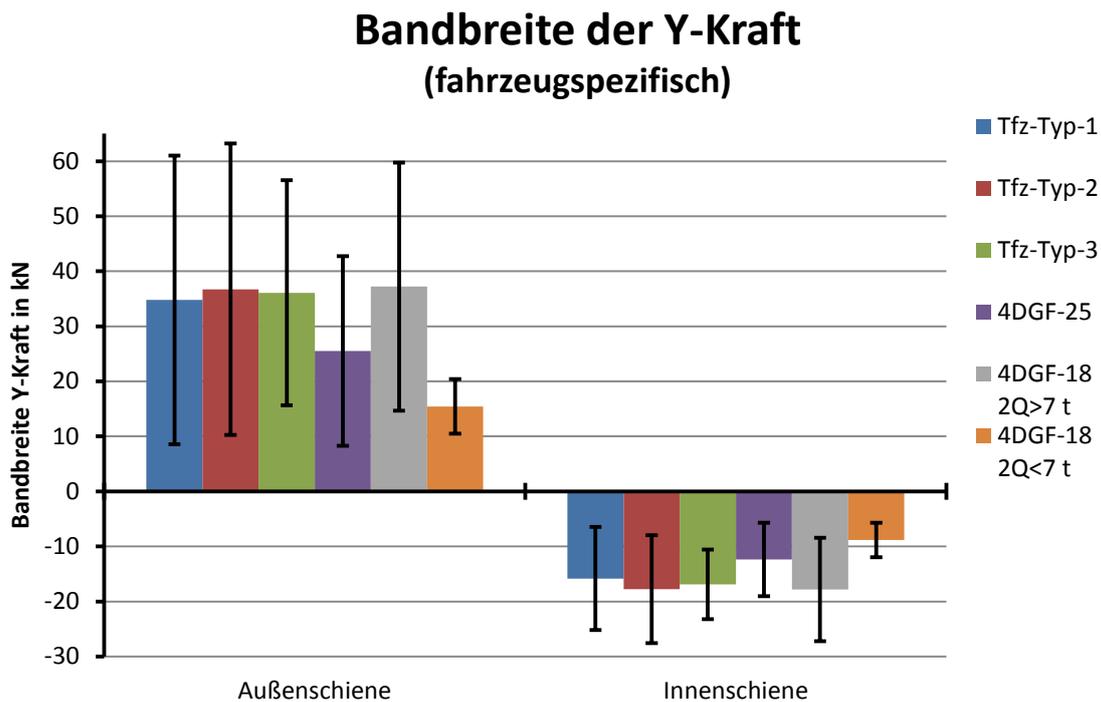


Abbildung 33: Bandbreite der Y-Kraft (nach Fahrzeugen) mit einfacher Standardabweichung

Die drei Triebfahrzeuge erreichen sehr ähnliche Werte auf hohem Kraftniveau, wobei Tfz-Typ-1 jeweils an der Außen- und Innenschiene die höchsten Werte liefert. Die beladenen Güterwagen erreichen das Kraftniveau der Triebfahrzeuge und stellen auch die Maximalwerte in dieser Betrachtung dar. Die Reisezugwagen erreichen geringere Werte, die unbeladenen Güterwagen erreichen auch hier das geringste Kraftniveau.

Anhand dieser Bandbreiten der Y-Kraft kann man erkennen, dass sich die Y-Kraft relativ stark über die Messstrecke hinweg ändern muss. Wie die Kraftverläufe im Detail aussehen wird in Kapitel 3.4 der vorliegenden Arbeit erläutert.

Eine andere, detailliertere Betrachtungsweise für die Kraftkomponenten stellt die Filterung nach freier Seitenbeschleunigung dar. Im Folgenden sind die Ergebnisse für die Triebfahrzeugbaureihen Tfz-Typ-1 und 2 dargestellt. Es wurde in drei Bereiche der freien Seitenbeschleunigung unterschieden: $a_{q,f} < 0 \text{ m/s}^2$, $0 < a_{q,f} < 0,5 \text{ m/s}^2$ und $a_{q,f} > 0,654 \text{ m/s}^2$. Der fehlende Bereich wurde zur besseren Abgrenzung der Ergebnisse gewählt.

Belastung auf die Außenschiene (Tfz-Typ-1 und 2 mit $a_{q,f}$ Bereichen)

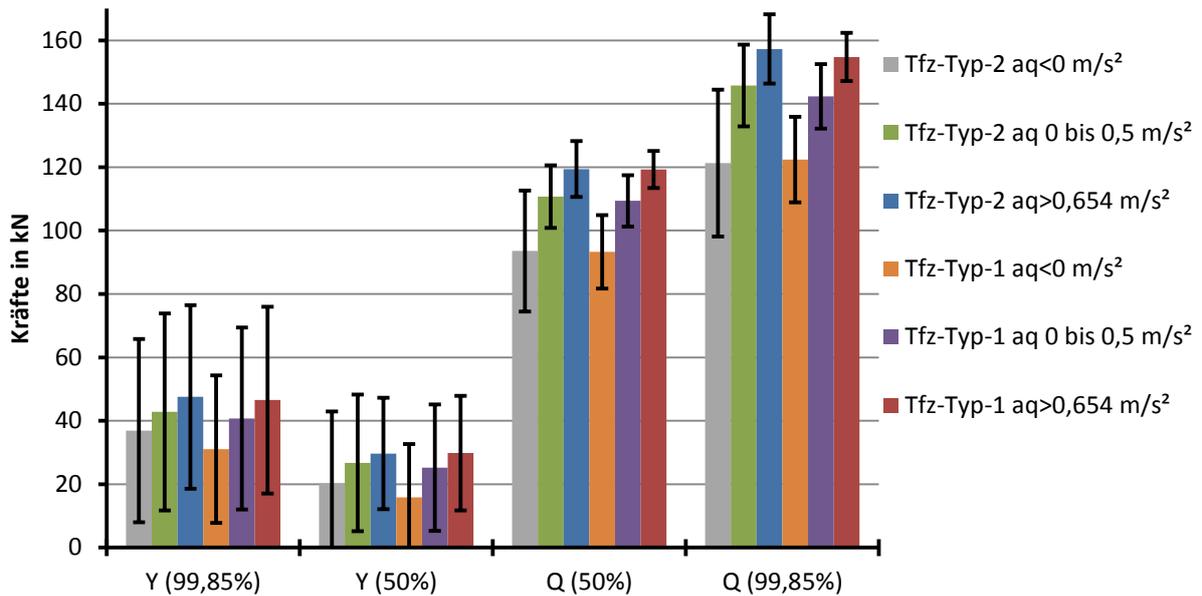


Abbildung 34: Belastung auf die Außenschiene für Triebfahrzeuge nach freier Seitenbeschleunigung mit einfacher Standardabweichung

Belastung auf die Innenschiene (Tfz-Typ-1 und 2 mit $a_{q,f}$ Bereichen)

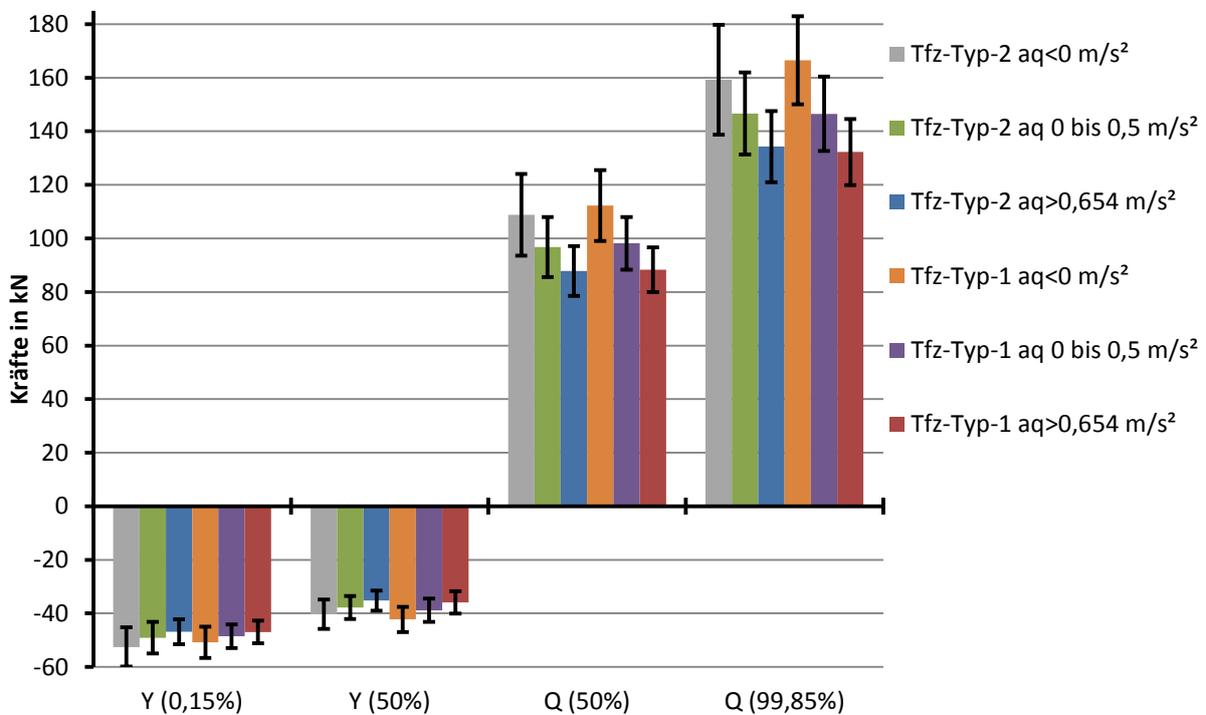


Abbildung 35: Belastung auf die Innenschiene für Triebfahrzeuge nach freier Seitenbeschleunigung mit einfacher Standardabweichung

Die diesen Diagrammen zugrundeliegenden Daten setzen sich wie folgt zusammen:

Tabelle 3: Datengrundlage nach freier Seitenbeschleunigung

Fahrzeugart	Tfz-Typ-1			Tfz-Typ-2		
freie Seitenbeschleunigung	$a_{q,f} < 0$ m/s ²	$0 < a_{q,f} < 0,5$ m/s ²	$a_{q,f} > 0,654$ m/s ²	$a_{q,f} < 0$ m/s ²	$0 < a_{q,f} < 0,5$ m/s ²	$a_{q,f} > 0,654$ m/s ²
Anzahl der gemessenen Radsätze	56	268	756	74	292	696

Die Ergebnisse der Diagramme entsprechen qualitativ den Aussagen aus der Theorie. Mit steigender freier Seitenbeschleunigung steigt die Y-Kraft an der Außenschiene und sinkt gleichzeitig an der Innenschiene. Weiters ist die Verlagerung der statischen Aufstandskräfte von der Innenschiene zur Bogenaußenschiene bei steigenden freien Seitenbeschleunigungen zu erkennen.

Quantitativ betrachtet steigt die Y-Kraft an der Außenschiene stärker an, als sie an der Innenschiene abnimmt. Die vertikalen Aufstandskräfte sind bei negativen freien Seitenbeschleunigungen an der Innenschiene höher, mit steigendem a_q gleichen sich diese aus, bis bei hohen positiven freien Seitenbeschleunigungen die Außenschiene stärker belastet wird.

Auch hier ist an der Innenschiene die deutlich geringere Standardabweichung zu erkennen.

Im Weiteren wurden die Ergebnisse für die Summe Y 50%-Kraft für die schon verwendeten Bereiche der freien Seitenbeschleunigung für Triebfahrzeuge betrachtet. Diese Kraft stellt die Summe der beiden (linke/rechte Schiene) Y 50% Kräfte als Mittelwert über die Messstelle für jeden Radsatz dar.

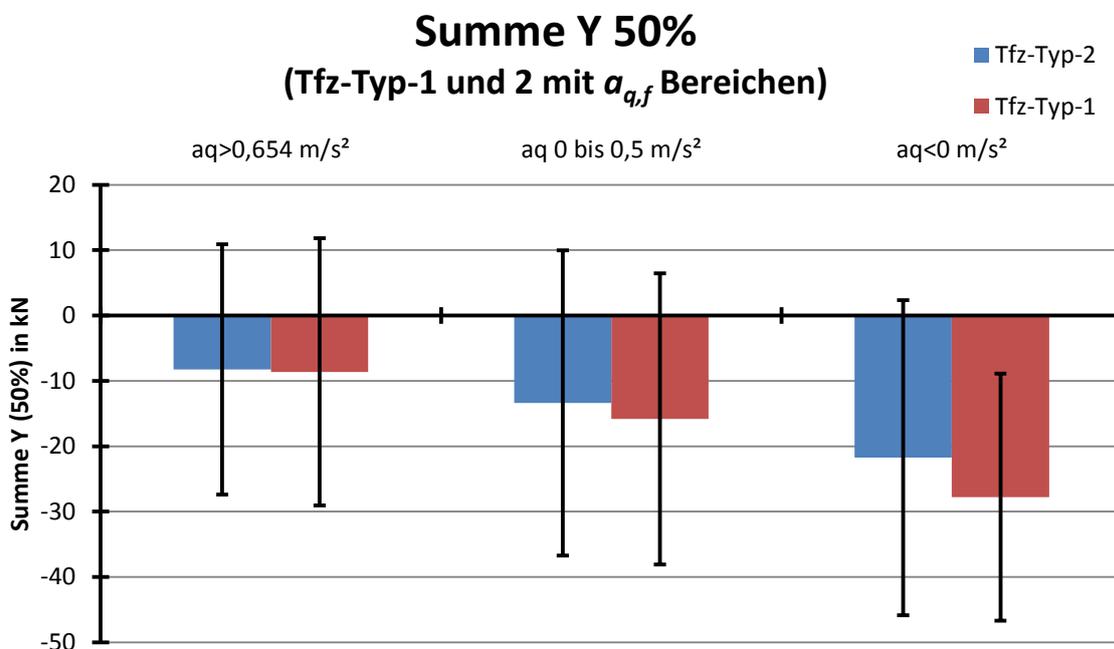


Abbildung 36: Summe Y (50%) für Triebfahrzeuge nach freier Seitenbeschleunigung mit einfacher Standardabweichung

Man erkennt am Vorzeichen der Summe Y-Kraft, dass diese überwiegend nach bogeninnen gerichtet ist. Mit steigender Fahrgeschwindigkeit und damit einhergehender steigender freier Seitenbeschleunigung (zunehmendem

Überhöhungsfehlbetrag) nimmt die Summe Y-Kraft in Richtung positiver Zählrichtung zu. Zu erkennen ist auch, dass die Summe Y-Kraft bei geringen freien Seitenbeschleunigungen bei Tfz-Typ-1 höher ausfällt als bei Tfz-Typ-2. Mit steigender freien Seitenbeschleunigung $a_{q,f}$ gleichen sich die Summenkräfte aber aneinander an.

Es ist anzumerken, dass die Standardabweichungen hier sehr groß ausfallen, wobei hier, wie auch bei den anderen Diagrammen dieses Kapitel, der arithmetische Mittelwert dargestellt ist.

Zu erwarten war ein Verhalten, dass eine nach bogenaußen gerichtete Summe Y-Kraft für Fahrgeschwindigkeiten mit Überhöhungsfehlbetrag ($a_{q,f} > 0 \text{ m/s}^2$) aufweist, sowie bei Überhöhungsüberschuss ($a_{q,f} < 0 \text{ m/s}^2$) eine nach bogeninnen gerichtete Summe Y-Kraft. Dieses aus der Theorie erwartete Verhalten ist nicht eingetroffen.

Der Grund dafür liegt in einem Zusammenspiel der örtlichen Gegebenheiten und der Zuglast. Die Messstelle, sowie der Streckenabschnitt vor der Messstelle, liegen in einem Abschnitt mit positiver Steigung. Dadurch ist die Zugkraft, die von den an der Zugspitze fahrenden Triebfahrzeugen aufzubringen ist, relativ hoch.

Diese Zugkraft am Zughaken zieht die Fahrzeuge in die so genannte innere Sehenstellung, (d.h. die Radsätze befinden sich im Spurkanal an der Bogeninnenschiene), sodass die Summe Y-Kräfte nach bogeninnen gerichtet sind. An der Außenschiene sind dadurch die Y-Kräfte geringer, da es zu keinem Spurkranzanzlauf kommt.

Die Zughakenkraft ist also in der Lage, die aus der Theorie erwarteten Summe Y 50%-Kräfte für Fahrgeschwindigkeiten mit Überhöhungsfehlbetrag in Richtung bogenaußen, mehr als nur zu kompensieren.

Dieses Verhalten tritt besonders bei schweren Güterzügen auf, sodass die gemittelten Kraftwerte für die betrachteten Triebfahrzeuge dahingehend beeinflusst werden. Da die Triebfahrzeuge der Baureihen Tfz-Typ-1 und 2 üblicher Weise an der Zugspitze der Güterzüge zu finden sind, als nachschiebende Lokomotiven aber meist Tfz-Typ-3 oder seltener Tfz-Typ-2 verwendet werden, sind diese Triebfahrzeuge besonders betroffen. Dieses Verhalten gilt auch für die Wagons der ersten Hälfte eines schweren Güterzuges wenn Nachschiebekraft vorhanden ist.

Die Abbildung 37 behandelt einen Güterzug mit einer 1016 an der Zugspitze und zwei nachschiebende 1142. Die Güterwagen (4DGF-18) sind alle bis knapp an die Maximalgrenze beladen (mittlere Fahrzeugmasse über alle Güterwagen 86,98 t). Diese Grafik wurde unmittelbar nach der Überfahrt des Zuges automatisch erstellt.

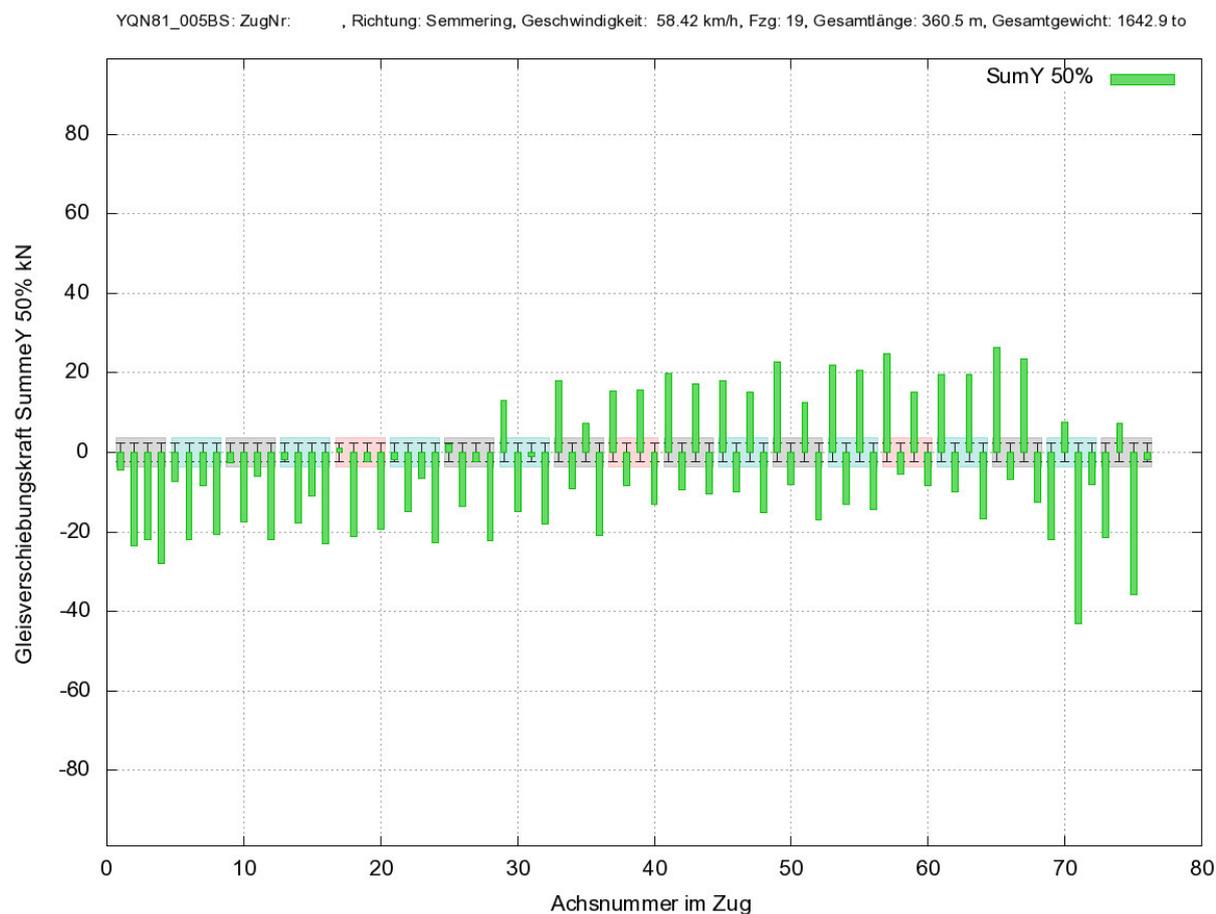


Abbildung 37: Summe Y 50%-Kraft für einen Güterzug [Originaldaten, Messstelle Breitenstein]

Es ist zu erkennen, dass die ersten sechs Wagen hinter dem führenden Triebfahrzeug an fast allen Radsätzen negative Summe Y 50%-Kräfte aufweisen. Dies stellt genau den oben beschriebenen Effekt der Zughakenkraft auf das Fahrverhalten der Fahrzeuge dar. Ab dem siebten Wagen hinter dem Spitzentriebfahrzeug stellen sich die Kräfte wie aus der Theorie erwartet ein, da ab dieser Stelle die Wagons durch die Druckkraft der beiden nachschiebenden Lokomotiven die Steigung überwinden und nicht durch die hohe Zughakenkraft des führenden Tzf. beeinflusst werden.

3.4. Schwellenfachspezifische Auswertungen

3.4.1. Theoretische Überlegungen zum Auswerteprozess

Im Folgenden werden die systematischen Fehler auf die Messungen und die theoretischen Überlegungen hinsichtlich der schwellenfachspezifischen Auswertung diskutiert.

Zur Ermittlung der vertikalen Q-Kräfte ist pro Schwellenfach und Schiene ein Messgeber der Bauform „Stegrosette“ (Abk. STS) vorhanden, der sich in der Mitte jedes Schwellenfaches, also zwischen den beiden Schwellen, befindet. Für die Ermittlung der horizontalen Y-Kraft werden je Schwellenfach zwei Messgeber der Bauform „Schienenfußrand“ (Abk. SFR) verwendet, wobei diese sich jeweils 110 mm in beiden Richtungen in Schienenlängsrichtung vom STS entfernt befinden. Dadurch

sind die Belastungsquerschnitte der Schiene, für die die Kräfte je Schwellenfach ermittelt werden, nicht dieselben für die Y- und die Q-Kraft.

Aus diesem Grund werden die Y-Kräfte der beiden SFR-Sensoren jedes Schwellenfaches arithmetisch gemittelt, um näherungsweise jenen Wert zu ermitteln, der sich im selben Belastungsquerschnitt befindet wie der Messgeber der Q-Kraft. Aufgrund dieser Vorgehensweise entsteht ein systematischer Fehler, da der Y-Kraftwert an der Stelle des Q-Kraft-Messgebers höchstwahrscheinlich zwischen den beiden Y-Kraft-Einzelwerten liegt, das arithmetische Mittel aber diesen Wert nur unzureichend annähert. Aus diesem Grund wird in den nachfolgenden Diagrammen auf die Unterschiede der Y-Kraftwerte zwischen den beiden SFR-Sensoren je Schwellenfach eingegangen.

Es wurden zwei Schwellenfächer ausgewählt, für die die gleiche Anzahl an Messwerten innerhalb des Betrachtungszeitraums vorliegen. Da ein Ablesen und Vergleichen der einzelnen Messwerte nicht zielführend ist, wurde im ersten Schritt eine Beurteilungsgröße V eingeführt, die die Differenz zwischen den beiden Sensorwerten je Schwellenfach auf den arithmetischen Mittelwert der beiden Sensorwerte bezieht. Sowohl die Differenz, als auch der Mittelwert werden als Absolutwerte verwendet.

$$V = \frac{|Wert1 - Wert2|}{\left| \frac{Wert1 + Wert2}{2} \right|} \quad (11)$$

Für diese Größe V wurde die Häufigkeit des Auftretens ermittelt und auf die Summe der Messwerte bezogen. Damit erhält man eine relative Häufigkeitsverteilung der Beurteilungsgröße V in Prozent. Die ermittelten Werte sollten möglichst klein sein (im Idealfall gleich Null), weil in diesem Fall die Differenz der beiden Werte viel kleiner ist als der Mittelwert und somit die bezogene Abweichung gering ist. In der nachfolgenden Abbildung ist die relative Häufigkeit der Beurteilungsgröße V für zwei verschiedene Schwellenfächer an der Außenschiene dargestellt.

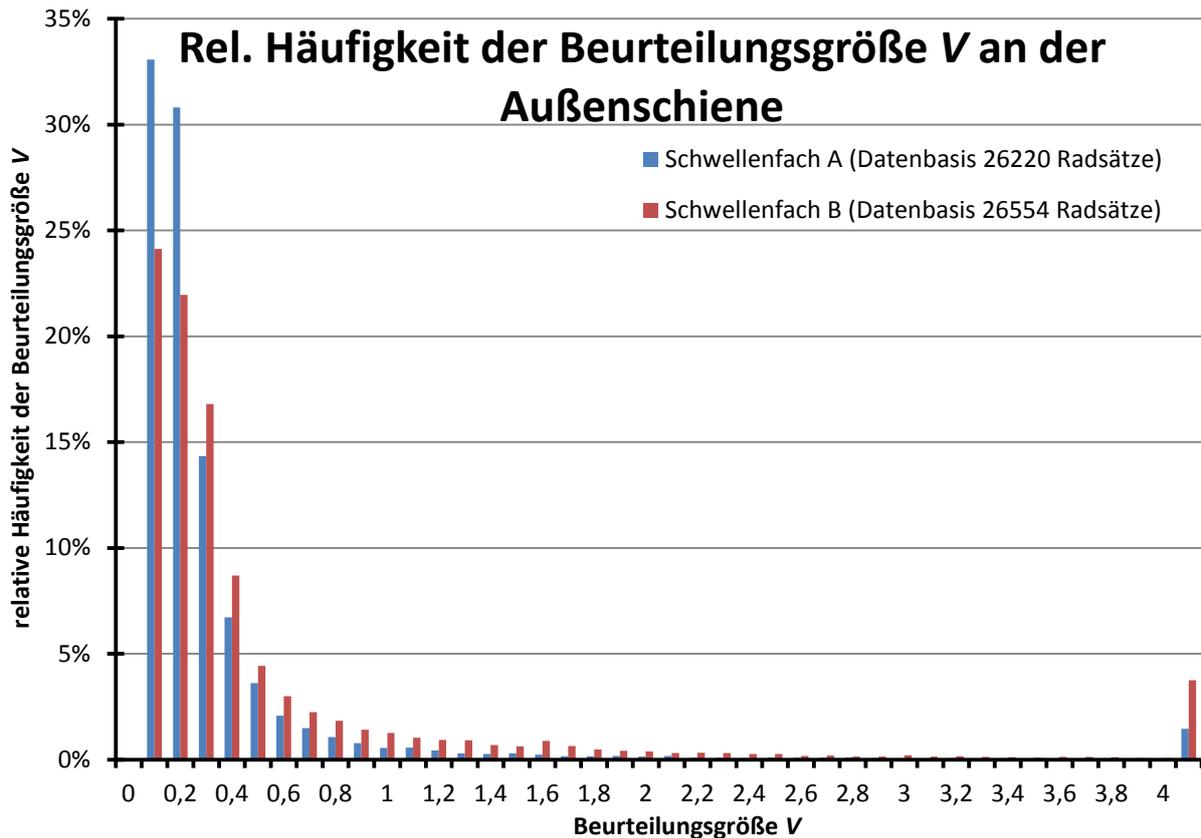


Abbildung 38: Relative Häufigkeit der Beurteilungsgröße V an der Außenschiene

Zu erkennen ist, dass die relative Häufigkeit eine abklingende Funktion darstellt. Es gibt eine Häufung im Bereich geringer Werte der Beurteilungsgröße, wobei eine Abweichung zwischen den beiden Schwellenfächern sichtbar ist. Die rel. Häufigkeit im Schwellenfach A nimmt höhere Werte bei geringen Beurteilungsgrößen V an, klingt aber schneller ab. Die rel. Häufigkeit des Schwellenfach B stellt eine breitere, aber nicht so hohe Häufigkeitsverteilung im Vergleich zum Schwellenfach A dar. Man kann erkennen, dass der Großteil der Messwerte nahe $V = 0$ liegt, aber nur 95% (Schwellenfach A) bzw. 86% (Schwellenfach B) aller Werte unter $V = 1$, also Differenz gleich groß dem Mittelwert, liegen. Es sind daher deutliche bezogene Abweichungen zwischen den beiden Sensoren jedes Schwellenfaches vorhanden. Die Häufigkeitswerte über $V = 4$ sind entweder Messfehler oder die beiden betrachteten Messwerte liegen auf beiden Seiten des Nullpunktes, was bei der Differenzbildung gemäß Formel (11) zu sehr großen Ergebnissen führen kann, oder die Messwerte sind so klein, dass das Problem der kleinen Zahlen auftritt. Alle diese Werte können vernachlässigt werden.

An der Innenschiene hingegen stellen sich prinzipiell breitere Häufigkeitsverteilungen ein, die nicht so schnell abklingen wie an der Außenschiene. Es liegen 93% bzw. 81% aller Messwerte unter $V = 1$, wobei es aufgrund der häufigen Vorzeichenwechsel der Y-Kraft-Messwerte zum vermehrten Auftreten von Beurteilungsgrößen im Bereich $V > 4$ kommt.

Zusammenfassend zeigt die Verteilung der relativen Häufigkeit der Abweichungen der beiden SFR-Sensoren eines Schwellenfachs eine für die Auswertung eher ungünstige Ausgangslage für die Annahme, dass mit dem arithmetischen Mittel der

beiden Sensoren gerechnet werden darf. Betrachtet man hingegen die absoluten Differenzen der beiden Sensoren, so zeigt sich das folgende Bild.

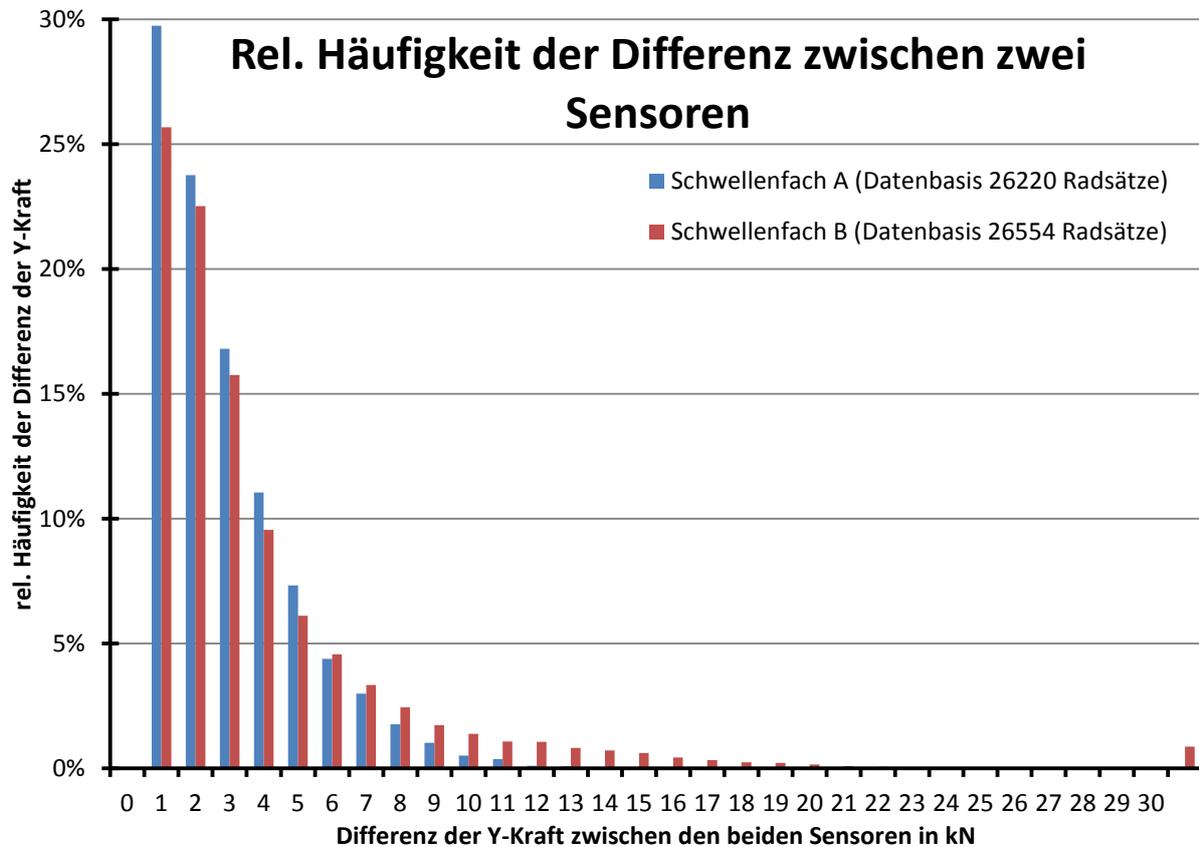


Abbildung 39: Relative Häufigkeit der Differenz zwischen zwei Sensoren

Die qualitative Verteilung der relativen Häufigkeit der Differenzkraft zwischen zwei SFR-Sensoren desselben Schwellenfaches, zeigt dasselbe abklingende Verhalten wie die Beurteilungsgröße V . Die Mehrheit (min. 50%) der auftretenden Kraftwertpaare weist eine Differenz von nur 2 bis 3 kN auf und 99% aller Wertepaare liegen unter 9 (Schwellenfach A) bzw. 19 kN (Schwellenfach B). Somit sind die absoluten Abweichungen der Y-Kraft zwischen zwei SFR-Messgebern an der Außenschiene relativ gering.

An der hier nicht graphisch aufbereiteten Innenschiene hingegen ergeben sich deutlich schneller abklingende Verläufe der rel. Häufigkeit über den Differenzkräften, sodass 99% aller Werte, je nach Schwellenfach, unter 6 bzw. 11 kN liegen. Somit sind die absoluten Abweichungen zwischen den beiden Messgebern geringer als an der Außenschiene.

Eine Kraftdifferenz von z.B. 9 kN innerhalb von 220 mm Schienenlänge erscheint vielleicht etwas groß, doch gibt es keine Aussage über die tatsächlichen Kontaktverhältnisse im Rad/Schiene-Kontaktpunkt, besonders an der Außenschiene durch den Spurkranzanlauf, sodass eine Mittelung der beiden Werte für die Umrechnung in die gleiche Belastungsebene wie die Q-Kraft zulässig erscheint.

Einen weiteren Grund für die Zulässigkeit der Vorgehensweise stellt die Messstelle selbst dar. Die Messfrequenz der Messstelle liegt bei 4800 Hz, wodurch auch zeitlich nur sehr kurz wirkende Kräfte aufgezeichnet werden können. Es entstehen dadurch

hochauflösende zeitliche Kraftverläufe, die zur Ermittlung von vielen Beurteilungsgrößen in der Messdatenauswertung in dieser Genauigkeit benötigt werden.

In der Norm für die fahrtechnische Zulassung von Schienenfahrzeugen (EN 14363-2016, [1]) wird hingegen eine Mindest-Abtastfrequenz von 200 Hz vorgegeben. Diese liegt somit deutlich unter derjenigen der Messstelle, wodurch die zeitlichen Sensorgrößen nicht alle kurzzeitig auftretenden Messwerte aufzeichnen können. Darüber hinaus ist in dieser Norm für die Berechnung der Rad/Schiene-Kontaktkräfte im Auswerteprozess ein Tiefpassfilter mit einer Eckfrequenz von 20 Hz vorgeschrieben. Somit werden kurzzeitig auftretende Messsignale hoher Frequenz, stark abgeschwächt und somit nicht berücksichtigt. Die Grenzwerte in der Norm sind hingegen auf diesen Mess- und Auswerteprozess ausgelegt, wodurch sich die Frage stellt, ob die gleichen Grenzwerte verwendet werden können, wenn das Messsystem eine um den Faktor 24 höhere Frequenzauflösung aufweist. Durch diese hohe Auflösung der Messstelle können vor allem die kurzzeitig sehr hohen Kraftspitzen erfasst werden, die sich dann auch in den vorliegenden Messdaten wiederfinden ohne ein Kriterium für die Sicherheit gegen Entgleisen im Sinne der oben genannten Norm darzustellen.

Hintergrund der unterschiedlichen Frequenzauflösungen ist offenbar die unterschiedliche Zielsetzung: Fokussiert die genannte Norm auf die fahrtechnische Zulassung von Schienenfahrzeugen und vernachlässigt folgerichtig alle für Laufgüte und Laufstabilität irrelevanten dynamischen Kraftspitzen, so verfolgt die hier betrachtete Messstelle das völlig andere Ziel, genau die tatsächlichen Belastungen auf die Schiene in hoher Auflösung zu ermitteln.

Aus diesem Grund wird der systematische Fehler bei der arithmetischen Mittelung in Kauf genommen, da die Messwerte der Messstelle genauer sind als jene für die Grenzwerte in der zum Vergleich herangezogenen Norm. Die Abweichung zwischen dem arithmetischen Mittel und dem wahren auftretenden Kraftwert im betrachteten Schienenquerschnitt wird als klein angesehen gegenüber dem Genauigkeitsverlust durch Verwendung eines weniger dynamischen Messsystems mit einem Tiefpassfilter.

Tatsache ist, dass durch diese höhere Auflösung genauere Aussagen über die tatsächliche Belastung der Schiene getätigt werden können.

3.4.2. Schwellenfachspezifische Auswertung

Im folgenden Kapitel wird auf die Ergebnisse der schwellenfachspezifischen Auswertung eingegangen. Die zugrundeliegenden Daten dieses Kapitels stellen alle entstandenen Messwerte ausnahmslos im Zeitintervall zwischen 9.10. und 15.10.2016 dar. Diese sieben Tage wurden im Hinblick auf die Verfügbarkeit der Messstelle, eine im Jahresvergleich durchschnittliche Zuganzahl und eine möglichst niedrige Anzahl von erkannten Fehlmessungen ausgewählt. Es wurden für die Q-Kräfte 18 Schwellenfächer betrachtet und für die Y-Kräfte 13 Schwellenfächer, soweit die Sensoren plausible Ergebnisse geliefert haben. Der Unterschied in der Anzahl der betrachteten Schwellenfächer liegt an verschieden ausgestatteten Sensorkapiteln im Verlauf der Messstelle.

Die in diesem Kapitel folgenden Häufigkeiten von Messgrößen wurden, wenn nicht anders angegeben, im Programm Microsoft Excel mithilfe der Funktion

„HÄUFIGKEIT“ ermittelt. Wie die damit erstellten Häufigkeits-Diagramme zu lesen sind, wird am Beispiel des ersten Häufigkeits-Diagramms erläutert. Zu den wichtigsten Diagrammen der relativen Häufigkeit sind im Anhang (Kapitel 8.2) die Grunddaten in Form von absoluten Häufigkeiten in Tabellenform angegeben.

- *Radsatzlast*

Um einen Überblick zu bekommen, welche Belastungen auf den betrachteten Schienenabschnitt wirken, wurde im ersten Schritt die Häufigkeit des Auftretens der Radsatzlasten ermittelt. Die Radsatzlast wird pro Radsatz durch eine Mittelung über die gesamte Messstelle ermittelt und stellt daher keine schwelienfachspezifische Größe dar.

In den Häufigkeits-Diagrammen wird hier immer die relative Häufigkeit (Anzahl der Werte je Klasse dividiert durch die Gesamtheit der betrachteten Werte) über den Klassen der Beurteilungsgröße dargestellt. Ein Balken im folgenden Diagramm unter dem z.B. 12 t Radsatzlast steht bedeutet, dass zwischen 12 t und der nächsten darunter liegenden Klasse (hier 11,5 t) eine gewisse Anzahl an Werten auftreten. (genauer: $11,5 \text{ t} < x \leq 12 \text{ t}$) Der erste Klassenbereich (von links) jedes Diagramms stellt alle unter diesem Wert liegende Messwerte dar. Im nachfolgenden Radsatzlastdiagramm wurde aber die Radsatzlast erst ab einer realistisch auftretenden Radsatzlast berücksichtigt, wodurch die Großteils aus Messfehlern bestehenden Werte unter 3,5 t im Diagramm nicht berücksichtigt werden.

Radsatzlasten zwischen 9.10. und 15.10.2016

(26632 Radsätze)

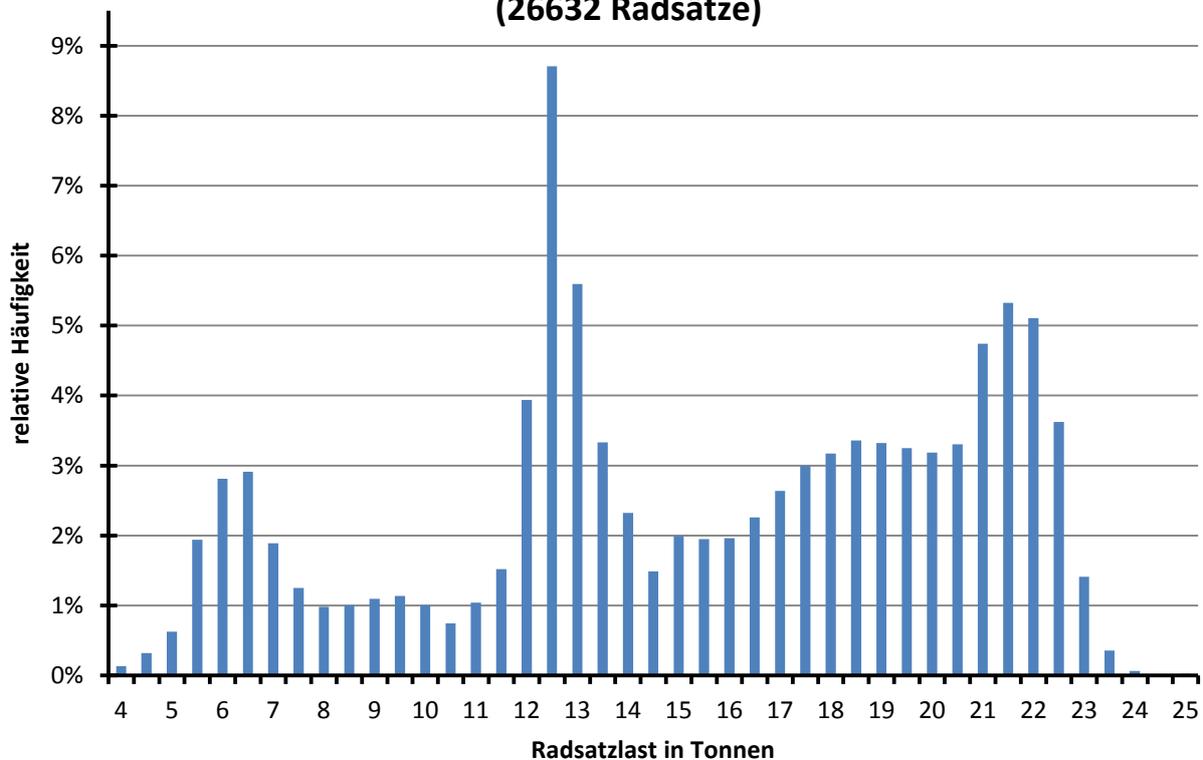


Abbildung 40: Verteilung der Radsatzlast über eine Woche

An dieser Häufigkeitsverteilung kann man sehr gut drei Radsatzlast-Bereiche erkennen an denen relative Maxima auftreten.

Die Häufung im Bereich 6 bis 7 Tonnen Radsatzlast wird durch die leeren Güterwagons erreicht. Darunter sind vor allem leere oder teilbeladene 6 achsige Jakobsdrehgestell Güterwagons für den Containertransport angesiedelt. Darüber gibt es einen relativ konstanten Bereich bis 11,5 t der durch leicht beladene Güterwagons, S-Bahn- Zwischenwagen (7020) und Steuerwagen (6020), und leichte Regionalzugwagons (City-Shuttle Wagons) gebildet wird.

Im Bereich 12 bis 13,5 Tonnen sind die Reisezugwagons angesiedelt, die vor allem durch die sehr häufig fahrenden Railjet-Garnituren gebildet werden. Auch die S-Bahn Züge (Talent 4024) fallen in diesen Bereich. Darüber gibt es einen großen Bereich in den fast ausschließlich die beladenen Güterwagons und die S-Bahn Triebwagen 4020 fallen.

Der Bereich von 20,5 bis 22,5 Tonnen beinhaltet Triebfahrzeuge und schwer beladene Güterwagons. Die Radsatzlasten über dem Grenzwert von 22,5 t entstehen durch überladene Güterwagen, sowie durch dynamische Radsatzlastverlagerungen bei Triebfahrzeugen mit sehr hohen Zugkräften.

Dieser Häufigkeitsverlauf ist für die Semmeringbahn charakteristisch und verändert sich auch im Verlauf des Jahres nur minimal.

- *Häufigkeit der Q Kraft*

Ab diesem Kapitel wird jeweils in **Außenschiene** und **Innenschiene** unterschieden. Die Dehnung messenden Sensoren haben, wie schon im Kapitel 3.2 erläutert, eine schwankende Verfügbarkeit. Darüber hinaus sind an den beiden Schienen teilweise unterschiedliche Anzahlen an Sensoren in Verwendung. Dadurch ergibt es sich, dass es sehr unterschiedliche Gesamtheiten an Messwerten zu einer bestimmten Beurteilungsgröße gibt, je nach Innen- oder Außenschiene.

Die hier betrachteten Sensoren an den Schienen messen nicht direkt die Kräfte, sondern die Dehnungen, angegeben in $\mu\text{m}/\text{m}$. Bei der schwellenfachspezifischen Auswertung werden nur diese Dehnungen je Sensor ausgegeben, und für jeden Sensor getrennt in einer Datei für alle Achsüberfahrten gespeichert. Somit ergeben sich über die gesamte Messstelle bis zu 26 Dateien je Schiene und Messgröße. (13 Schwellenfächer mit gleicher Ausstattung) Diese wurden in csv-Dateien konvertiert, um sie in Microsoft Excel weiter verarbeiten zu können. Für die Umrechnung von Dehnungen in Kräfte wurden für die Y-Kraft und die Q-Kraft konstante multiplikative Umrechnungsfaktoren verwendet.

Es ist aber zu bedenken, dass bei allen schwellenspezifischen Kraftwerten diese jeweils nur durch einen einzelnen Sensor ermittelt werden und nicht als Mittelwert oder Perzentilwert über die gesamte Messstelle. Es sind also auch die Messfehler in Form von zu großen, zu geringen oder falschen Werten enthalten.

Im Folgenden sind die relativen Häufigkeiten der Q-Kraft an der Außenschiene sowie an der Innenschiene ersichtlich. Es ist zu bedenken, dass bei Fahrgeschwindigkeiten abseits der ausgeglichenen freien Seitenbeschleunigung ($a_{q,f} = 0 \text{ m/s}^2$) es zu dynamischen Verlagerungen der Aufstandskräfte sowohl in Richtung der Außen-, als auch in Richtung der Innenschiene kommen kann.

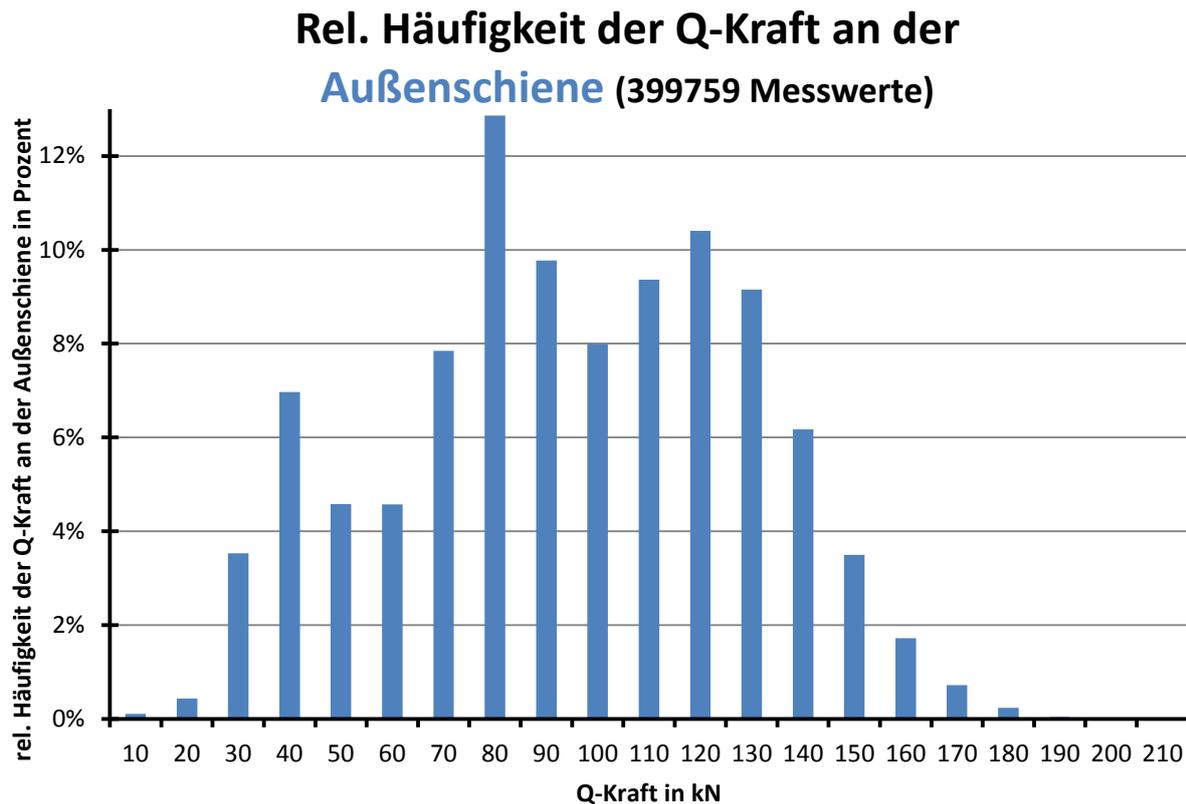


Abbildung 41: Relative Häufigkeit der Q-Kraft an der Außenschiene

In dieser Abbildung 41 der relativen Häufigkeit der Q-Kraft ist qualitativ der Verlauf der Radsatzlasten zu erkennen. Dies stellt keine Überraschung dar, sind doch die Aufstandskräfte die halben Radsatzlasten abzüglich/zuzüglich der dynamischen Verlagerungen je nach Fahrgeschwindigkeit. Bei geringen Q-Kräften im Bereich 10 kN ist die Häufigkeit von Messfehlern relativ hoch. Werte unter 0 kN sind generell von der Auswertung ausgeschlossen worden. Das erste relative Maximum bei 40 kN ist den leeren Güterwagons geschuldet, das Maximum bei 80 kN den Reisezugwagons und bei rund 120 kN sind die Triebfahrzeuge und voll beladenen Güterwagen entscheidend. Die besonders hohen Aufstandskräfte (größer 120 kN) werden durch Triebfahrzeuge und überladene Güterwagen erreicht, die am oberen Ende der Fahrgeschwindigkeitstoleranz liegen. Generell sind die Belastungen durch dynamische Effekte an der Außenschiene höher als jene an der Innenschiene, da der Großteil der Züge nahe der erlaubten Höchstgeschwindigkeit fahren.

Im nachfolgenden Diagramm sind die relativen Häufigkeiten der Aufstandskräfte an der Innenschiene dargestellt.

Rel. Häufigkeit der Q-Kraft an der Innenschiene (461264 Messwerte)

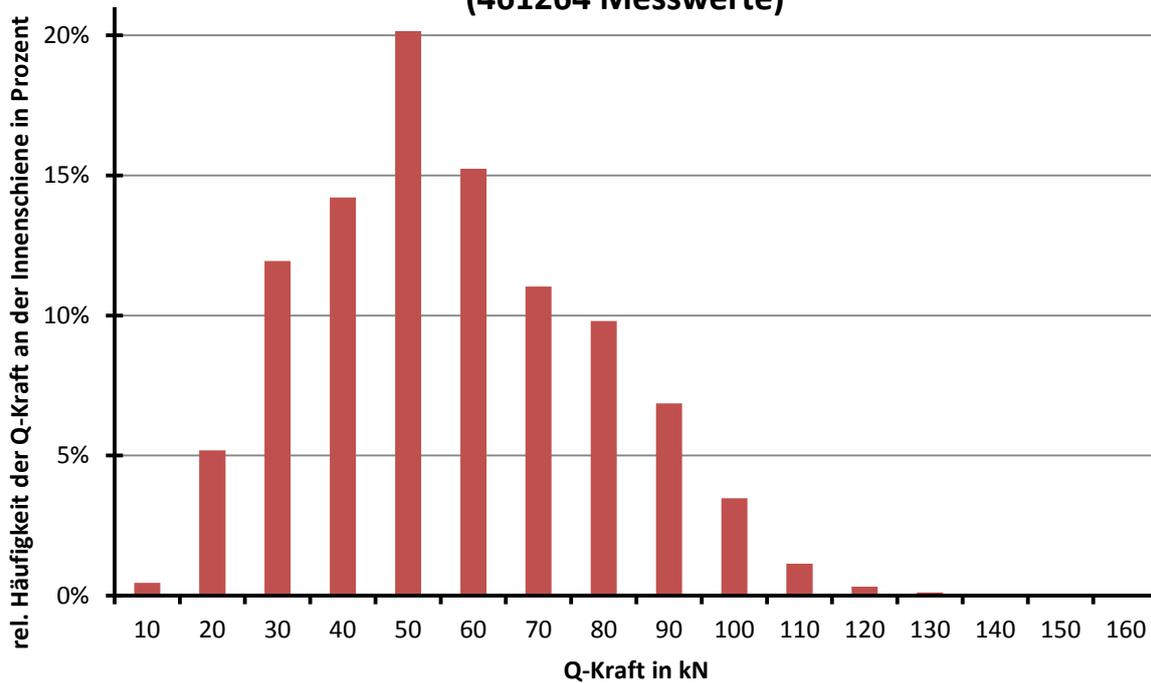


Abbildung 42: Relative Häufigkeit der Q-Kraft an der Innenschiene

An der relativen Häufigkeit des Auftretens der Aufstandskraft an der Innenschiene ist sofort zu erkennen, dass sich im Gegensatz zur Außenschiene die Charakteristik nach der Art der Radsatzlastverteilung nur sehr verschwommen einstellt. Es gibt ein ausgeprägtes Maximum bei Aufstandskräften zwischen 40 und 50 kN. Die höheren Kräfte (ab 80 kN) werden tendenziell durch schwere Fahrzeuge (Triebfahrzeuge und schwere Güterwagens), die nicht mit zulässiger Höchstgeschwindigkeit fahren sondern min. 10 km/h darunter. Bei noch geringeren Fahrgeschwindigkeiten wird die freie Querbeschleunigung deutlich negativ und die dynamische Verlagerung der Aufstandskraft von der Außen- zur Innenschiene findet statt.

Auffallend ist die deutlich höhere Anzahl an Messwerten. Dies hat den Grund, dass an der Innenschiene zwei Schwellenfächer mehr mit STS-Sensoren ausgestattet sind als an der Außenschiene.

Im Folgenden ist ein Vergleich der Aufstandskraft an der Außenschiene (Q_A) mit der Aufstandskraft an der Innenschiene (Q_I), sowie der halben Radsatzlast multipliziert mit der Normfallbeschleunigung ($9,81 \text{ m/s}^2$) ersichtlich. Damit kann eine genauere Beschreibung der Charakteristik der Aufstandskraft an der Innenschiene erfolgen. Als Darstellung wurden Kurvenverläufe anstatt Säulen verwendet um eine bessere Übersicht zu gewährleisten.

Vergleich Q-Kraft an der Außen- und Innenschiene mit der halben Radsatzlast

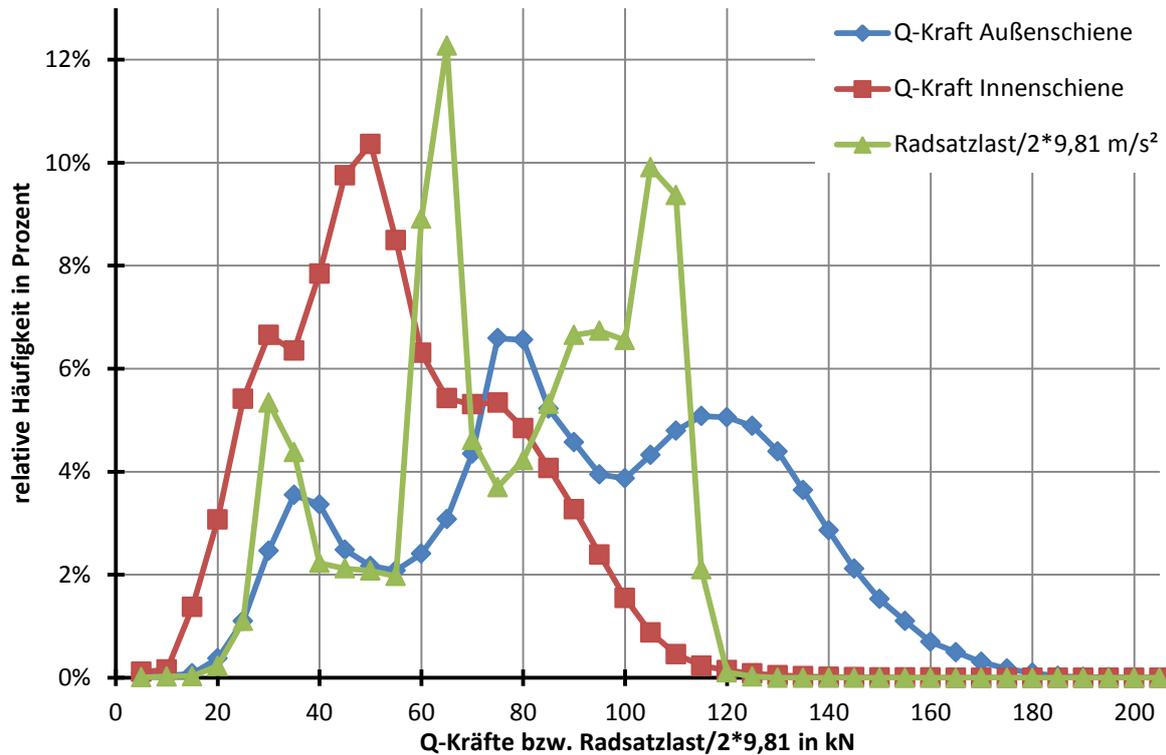


Abbildung 43: Vergleich der Q-Kraft an der Außen- und Innenschiene mit der halben Radsatzlast

Die Kurve der relativen Häufigkeit der Aufstandskraft an der Außenschiene zeigt das schon bekannte Verhalten. Die halbe Radsatzlastlast, umgerechnet auf eine Kraft zeigt auch die bekannte Charakteristik, aber mit deutlich ausgeprägten Maxima und Minima. Die relative Häufigkeit der Q-Kraft an der Innenschiene zeigt in dieser genaueren Darstellung (Klassenbreite 5 kN statt 10 kN) deutlicher die Extremwerte, aber gegenüber der Außenschiene sind diese weniger ausgeprägt.

Auffallend ist, dass die relative Häufigkeit der Q-Kraft an der Innenschiene höhere Werte annimmt als die Q-Kraft an der Außenschiene. Dies ist auf eine höhere Anzahl an Messwerten an der Innenschiene im Vergleich zur Außenschiene zurück zu führen, die aber noch dazu in einem deutlich geringeren Kraftbereich ihre Gesamtheit bilden. Der Verlauf für die Innenschiene ist also gegenüber dem der Außenschiene zu geringeren Werten hin zusammen geschoben. Das wirkt sich auch auf die Charakteristik der Kurve der Q-Kraft an der Innenschiene aus.

Weiters haben die Radsätze bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten die Messstelle passiert, wodurch es verschiedene freie Seitenbeschleunigungen gegeben hat, und dadurch die Aufstandskraftverlagerung in Querrichtung sowohl zu Gunsten der Außenschiene, als auch der Innenschiene ausgefallen sind. Um eine bestimmte Belastung z.B. an der Außenschiene zu erzeugen, kann entweder eine hohe Radsatzlast und eine geringe Fahrgeschwindigkeit gewählt werden, oder aber eine geringe Radsatzlast und eine hohe Fahrgeschwindigkeit. Beides kann die gleiche Belastung hinsichtlich der Aufstandskräfte ergeben. Genau gegengleich ist das Verhalten an der Innenschiene. Dort ist die Belastung aufgrund von Aufstandskräften geringer, je schneller das Fahrzeug fährt und je geringer die Radsatzlast ist. Bei gleichen Radsatzlasten und nur leicht abweichenden Fahrgeschwindigkeiten (ca. 10 km/h) können die Aufstandskräfte um über 20 kN variieren. Dadurch schwimmt

auch die Zuordenbarkeit der Radsatzlasten zu den jeweiligen Maxima im Verlauf der Aufstandskraft an der Innenschiene.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Form der Kurve der Aufstandskräfte an der Innenschiene stellt die Schwerpunkthöhe des Fahrzeuges dar. Dieser liegt bei einem typischen unbeladenen Güterwagon (z.B. Flachwagen) bei ca. 1 m, und bei dem gleichen Wagon, aber mit Beladung bei ca. 2 m über der Schienenoberkante. Dadurch ändern sich aufgrund der unterschiedlichen Schwerpunkthöhen deutlich die dynamischen Verlagerungen der Q-Kraft aufgrund der freien Seitenbeschleunigung.

- *Häufigkeit der Y-Kraft*

Die Y-Kraft wird auf Basis der Signale die SFR-Sensoren errechnet, wobei pro Schwellenfach zwei Sensoren vorhanden sind. Die Problematik dabei wurde schon im Kapitel 3.4.1 thematisiert. Sensoren, die keine plausiblen Werte lieferten, wurden von den folgenden Betrachtungen ausgeschlossen. Mit den zwei Messwerten pro Schwellenfach wurde ein arithmetischer Mittelwert gebildet, falls einer der beiden Sensoren nicht gemessen hat, wurde nur der verbleibende einzelne Messwert verwendet. Auch hier wurden die gemessenen Dehnungen mit einem konstanten multiplikativen Faktor auf Kräfte umgerechnet.

Generell sind in der Messstelle weniger Schwellenfächer mit SFR-Sensoren ausgestattet als mit STS-Sensoren. Dadurch, aber auch durch die deutlich schlechtere Verfügbarkeit der SFR-Sensoren im Gegensatz zu den STS-Sensoren, gibt es generell weniger Messwerte.

Das nachfolgende Diagramm zeigt die relative Häufigkeit der Y-Kraft an der Außenschiene.

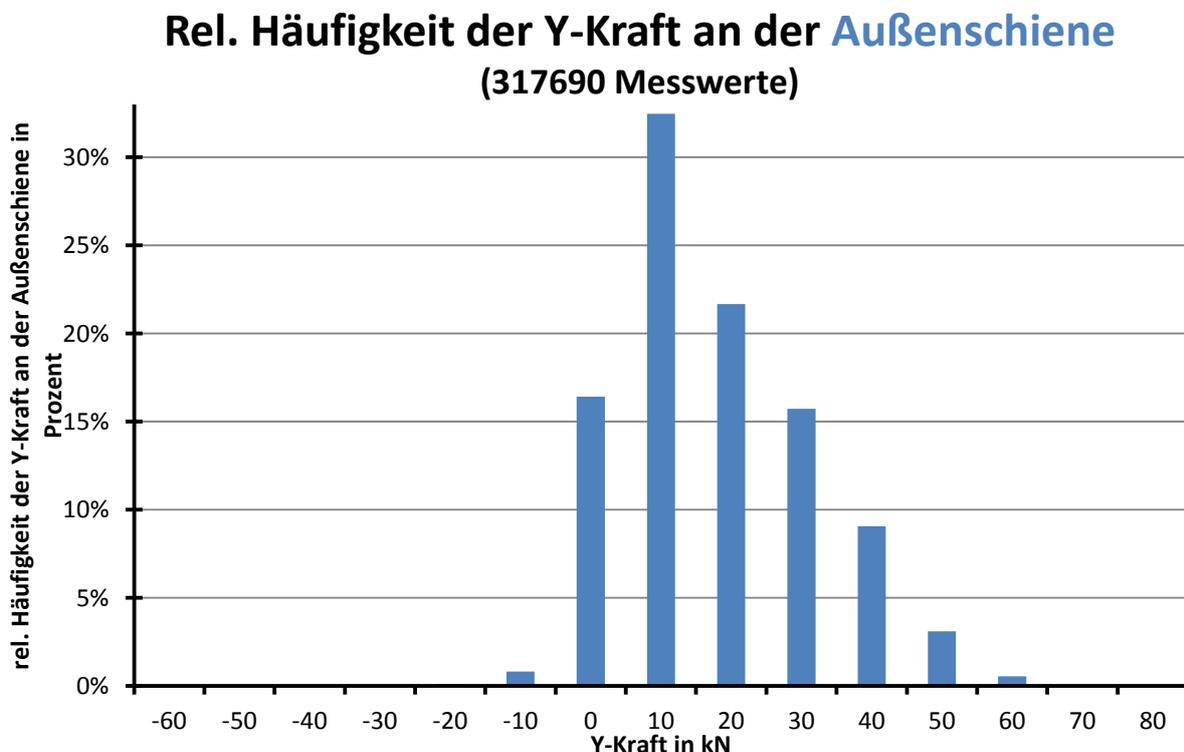


Abbildung 44: Relative Häufigkeit der Y-Kraft an der Außenschiene

Die Y-Kräfte an der Außenschiene weisen eine Verteilung in stark positiver Y-Richtung auf. Diese Charakteristik entsteht durch die häufigen Fahrgeschwindigkeiten mit positiver freien Seitenbeschleunigung und dem dadurch entstehenden Spurkranzanlauf an der Außenschiene. Dadurch können beginnend im Übergangsbereich des Rades von der Lauffläche zur Spurkranzflanke deutlich höhere Kräfte in seitlicher Richtung (y-Richtung) vom Rad auf die Schiene übertragen werden, als wenn nur die Reibung ausgenutzt werden könnte. Bei direktem Kontakt der Spurkranzflanke mit der Innenseite der Außenschiene können sehr hohe Kräfte entstehen. Dieser bogeninnenseitige Bereich des Schienenkopfes an der Außenschiene ist daher durch die hohen Kräfte und dem Spurkranzkontakt besonders hohen Belastungen und somit auch hohem Verschleiß unterworfen.

Im nachfolgenden Diagramm ist die relative Häufigkeit der Y-Kraft an der Innenschiene zu sehen. Es sei darauf hingewiesen, dass die Klassen der Y-Kraft in diesem Diagramm nur jeweils 5 kN breit sind, und nicht 10 kN wie bei den anderen Häufigkeitsdiagrammen.

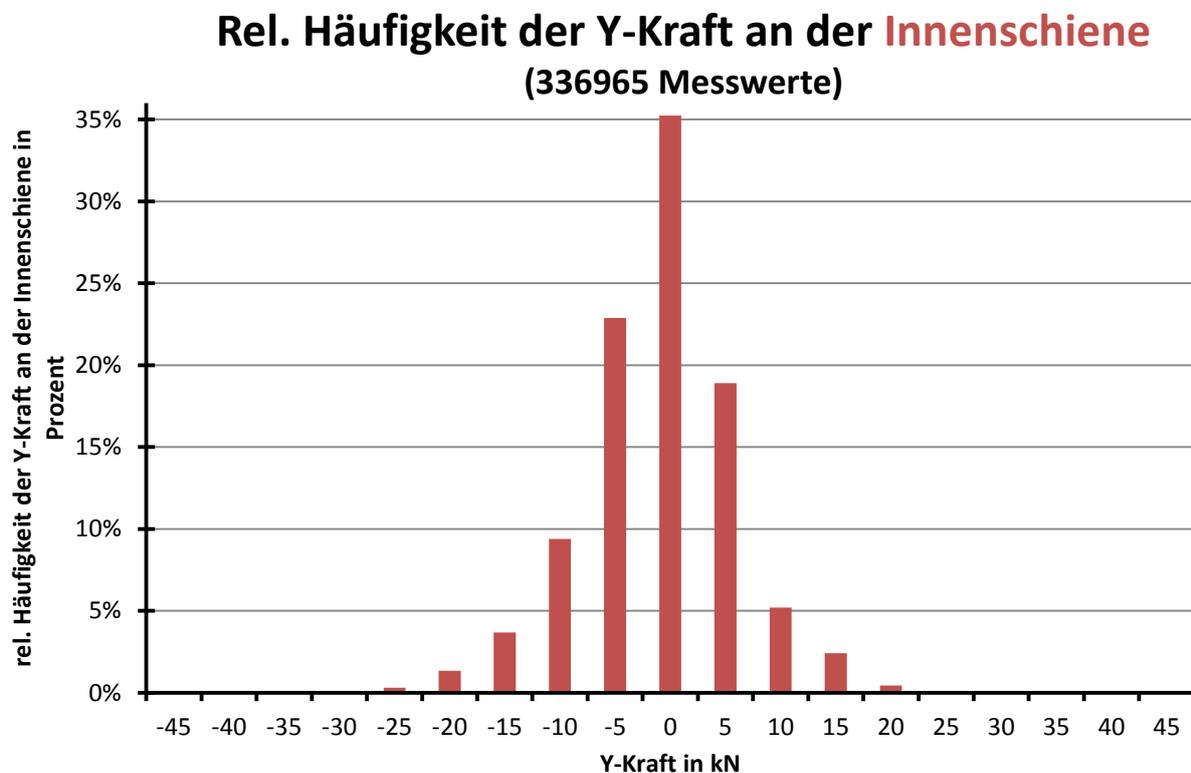


Abbildung 45: Relative Häufigkeit der Y-Kraft an der Innenschiene

Es ist zu erkennen, dass die Häufigkeitsverteilung relativ symmetrisch um den Nullpunkt der Y-Kraft auftritt, mit einer leichten Bevorzugung des negativen Bereiches. Wie schon erwähnt, liegt der Rad/Schiene-Kontaktpunkt an der Innenschiene meistens in der Mitte des Schienenkopfes bzw. auf der Lauffläche des Rades im kegelartigen Bereich. Daher können die Y-Kräfte fast ausschließlich nur durch die Reibungskräfte erzeugt werden. Je nach aktuellem Reibwert bei der Überfahrt eines Fahrzeuges, können diese Kräfte nur, im Vergleich zur Außenschiene, geringe Werte erreichen. Die Bandbreite der Y-Kräfte liegt zwischen -25 bis +20 kN, während an der Außenschiene -10 bis +60 kN erreicht werden. Da diese Belastungen an der Innenschiene verhältnismäßig gering sind und es in der Regel zu keinem Spurkranzanlauf kommt, gilt die Innenschiene generell als die

weniger stark belastete. Gleichzeitig sind die Q-Kräfte an der Innenschiene auch üblicher Weise geringer als an der Außenschiene.

- *Häufigkeit des Quotienten Y/Q*

Für die Berechnung des Quotienten Y/Q war eine exakte Zuordnung der jeweiligen Y-Kraft zur im gleichen Schwellenfach bei der gleichen Radsatzüberfahrt wirkenden Q-Kraft notwendig. Dafür wurde eine Tabelle angelegt, in der alle Radsätze mit ihren Zeitpunkten der Überfahrt der Messstelle hinterlegt waren. Die Rohdateien der STS- und SFR-Sensoren beinhalten dieselben Informationen, zusätzlich zu den Dehnungswerten. Jeweils eine Spalte mit Dehnungswerten aus den Rohdaten wurde in die Tabelle mit den Überfahrtszeitpunkten kopiert und mit der Excel-Funktion „SVERWEIS“ zeilenweise dem gleichen Zeitpunkt der Überfahrt zugeordnet. Dadurch entstanden für jeden Sensor die gleiche Anzahl an Ergebnissen, sodass die Berechnung des Y/Q -Quotienten alle richtig sortierten und zugeordneten Daten erfassen konnte. Wertepaarungen bei denen einer oder beide Werte nicht vorhanden waren, wurden dabei nicht berücksichtigt.

Das nachfolgende Diagramm enthält die relative Häufigkeit von Y/Q sowohl an der Außenschiene als auch an der Innenschiene. Es sei angemerkt, dass der erste Balken von links, entsprechend der zu Beginn des Kapitels erläuterten Leseweise der Diagramme, jener ist, der alle Y/Q -Werte zwischen 0 und 0,05 enthält, exklusive 0. Der Abstand der Klassen beträgt also 0,05.

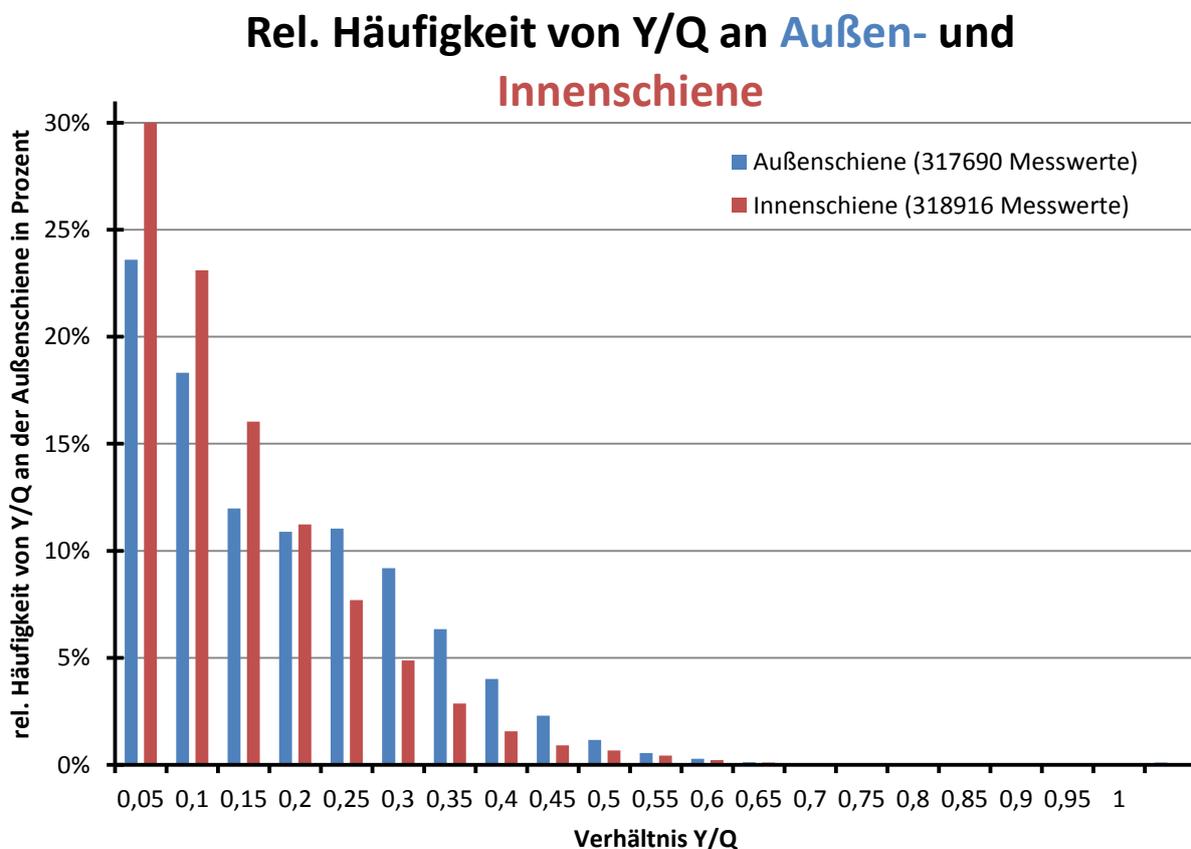


Abbildung 46: Relative Häufigkeit von Y/Q an der Außen- und Innenschiene

Der Quotient Y/Q an der Außenschiene zeigt ein nicht monoton sinkendes Verhalten. Auffallend ist der gleichbleibend hohe Bereich des Quotienten zwischen 0,15 und

0,25. In diesem Bereich befinden sich gut ein Drittel aller Werte. Diese Werte ergeben sich überwiegend durch einen Rad/Schiene-Kontaktpunkt im Übergangsbereich vor dem Spurkranzkontakt, wie er in der Regel nur an der Außenschiene auftritt. Auffallend ist, dass besonders die vorlaufenden Radsätze jedes Drehgestells zu höheren Y-Werten und somit höheren Quotienten tendieren, trotz höheren Q-Kräften (genauer Erklärung in Kapitel 3.4.4). Werte über $Y/Q = 0,3$ sind vor allem durch Fahrzeuge mit hoher freien Seitenbeschleunigung und dadurch eintretendem Spurkranzkontakt bzw. Spurkranzanlauf entstanden. Werte zwischen 0 und 0,1 werden tendenziell von den jeweils nachlaufenden Radsätzen jedes Drehgestells erzeugt. Die nachlaufenden Radsätze eines Drehgestells zeigen meist ein deutlich geringeres Y-Kraft Niveau und erreichen auch Werte um den Nullpunkt der Y-Kraft. Daher sind bei annähernd gleicher Aufstandskraft Q des nachlaufenden Radsatzes bezüglich des vorlaufenden Radsatzes die Quotienten Y/Q geringer.

An der Innenschiene fällt sofort auf, dass es sich im Gegensatz zur Außenschiene um einen streng monoton fallenden Verlauf handelt. Die ersten beiden Klassen enthalten schon mehr als die Hälfte aller Werte. Die geringen Y-Kräfte erreichen an der Innenschiene trotz leicht geringeren Aufstandskräften, durch die meist hohen Fahrgeschwindigkeiten, nur geringe Y/Q -Quotienten. Überraschend ist, dass der Verlauf für die Innenschiene bis zu Quotienten um $Y/Q = 0,6$ reicht. Hohe Quotienten (0,35 bis 0,6) können entstehen, wenn die Q-Kraft gering wird, aber die Y-Kraft durch lokal hohe Reibwerte relativ hoch ausfällt. Ein anderer oft auftretender Effekt tritt auf, wenn es an der Außenschiene zu einem Spurkranzanlauf kommt und in dessen Folge der Radsatz in Richtung der Innenschiene „durchgeschoben“ wird. Dabei entstehen überraschend hohe Y-Kräfte an der Innenschiene. (genauere Behandlung dieses Effektes im Kapitel 3.4.4)

An dieser Stelle sei auf die Möglichkeit der Abschätzung des Reibwertes an der Innenschiene (wie in Kapitel 3.2 beschrieben) verwiesen. Aufgrund der in der betrachteten Woche vorherrschenden Wetterbedingungen (siehe Seite 36) ist mit einem geringeren Reibwert zu rechnen gewesen. Die schon beschriebene Verteilung der Y/Q -Quotienten an der Innenschiene, zeigt ein dazu passendes, schnell abklingendes, Verhalten mit besonders großen Häufigkeiten bei geringen Quotienten.

- *Gleichzeitiges Auftreten der Y- und Q-Kraft*

Dieses Kapitel stellt den Kern dieser Arbeit dar. Es geht um den Zusammenhang der vertikalen Aufstandskräfte mit den gleichzeitig auftretenden horizontalen Seitenführungskräften. Für die Betrachtung der Gleichzeitigkeit des Auftretens von Y- und Q-Kraft, wurden die sortierten und jedem Radsatz zugeordneten Daten zugrunde gelegt, die schon bei der Berechnung des Quotienten Y/Q verwendet wurden. Anders als bei der Ermittlung der Häufigkeit des Auftretens einer Beurteilungsgröße, handelt es sich um eine dreidimensionale Häufigkeitsverteilung mit den beiden Beurteilungsgrößen Y- und Q-Kraft, sowie deren gemeinsame Häufigkeit des Auftretens in gewissen sich überschneidenden Klassen. Dafür wurden die zwei Achsen einer Tabelle für die Y- und die Q-Kraft in 10 kN Schritte eingeteilt und für die sich jeweils vertikal und horizontal überschneidenden Klassen-Bereiche mit Hilfe der Excel-Funktion „ZÄHLENWENN“ die Häufigkeit des Auftretens ermittelt. Dabei gelten die angegebenen Häufigkeiten wie schon gewohnt immer für den Bereich zwischen der Zahl bei der die Häufigkeit eingetragen ist, und jener die in der Klassenreihe den nächst niedrigeren Wert angibt.

Die nachfolgenden Diagramme sind in zweifacher Ausführung enthalten, da beide Darstellungsformen (3D-Balkendiagramm und Kontur-Plot) jeweils Vorteile bei der Interpretation bieten. Die den Diagrammen zugrundeliegenden Daten (absolute Häufigkeiten) sind in Tabellenform im Anhang 8.2 ersichtlich, wo diese auch zur besseren Lesbarkeit mit einem Farb-Code hinterlegt sind.

Die folgenden zwei Diagramme zeigen die Häufigkeit des Auftretens der Y- und Q-Kraft für die Gesamtheit der gemessenen Radsätze an der Außenschiene.

Rel. Häufigkeit von Y- und Q-Kraft an der Außenschiene (317592 Datenpaare)

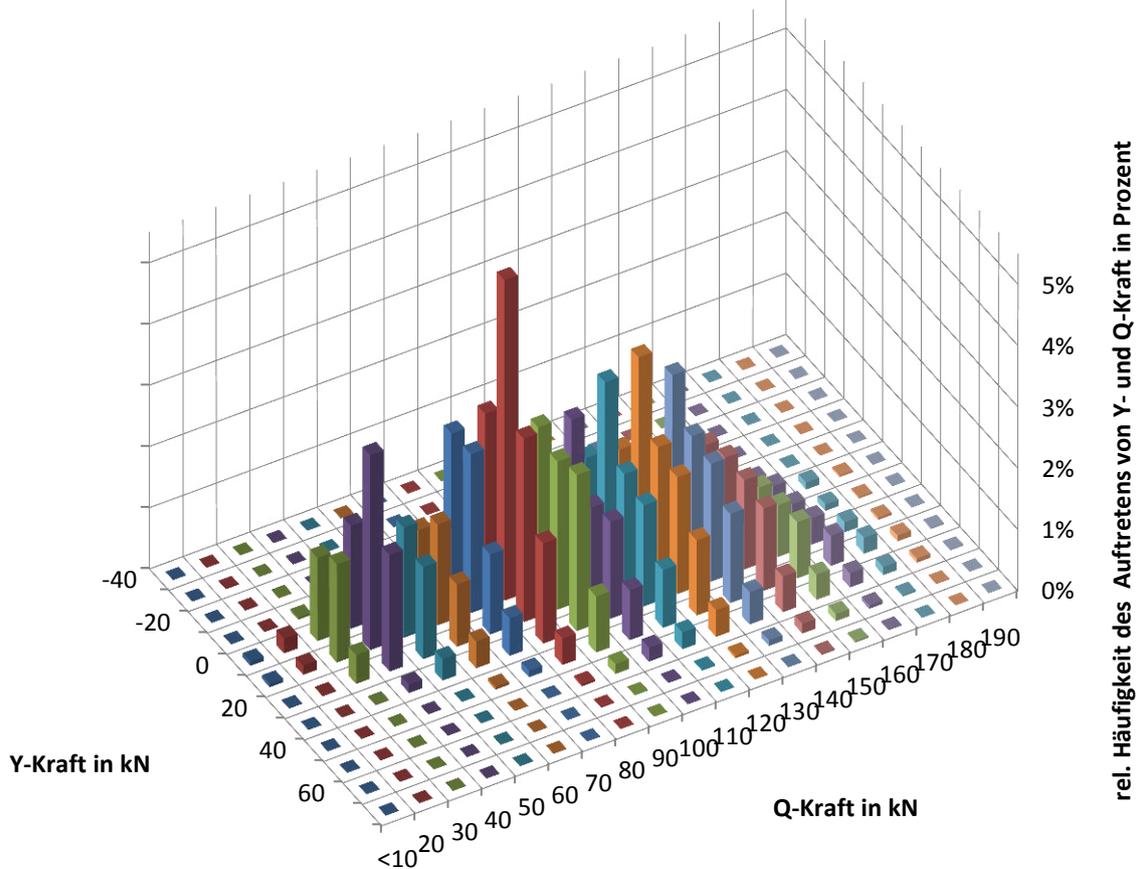


Abbildung 47: Relative Häufigkeit von Y- und Q-Kraft an der Außenschiene (Säulen)

Rel. Häufigkeit von Y- und Q-Kraft an der Außenschiene (317592 Datenpaare)

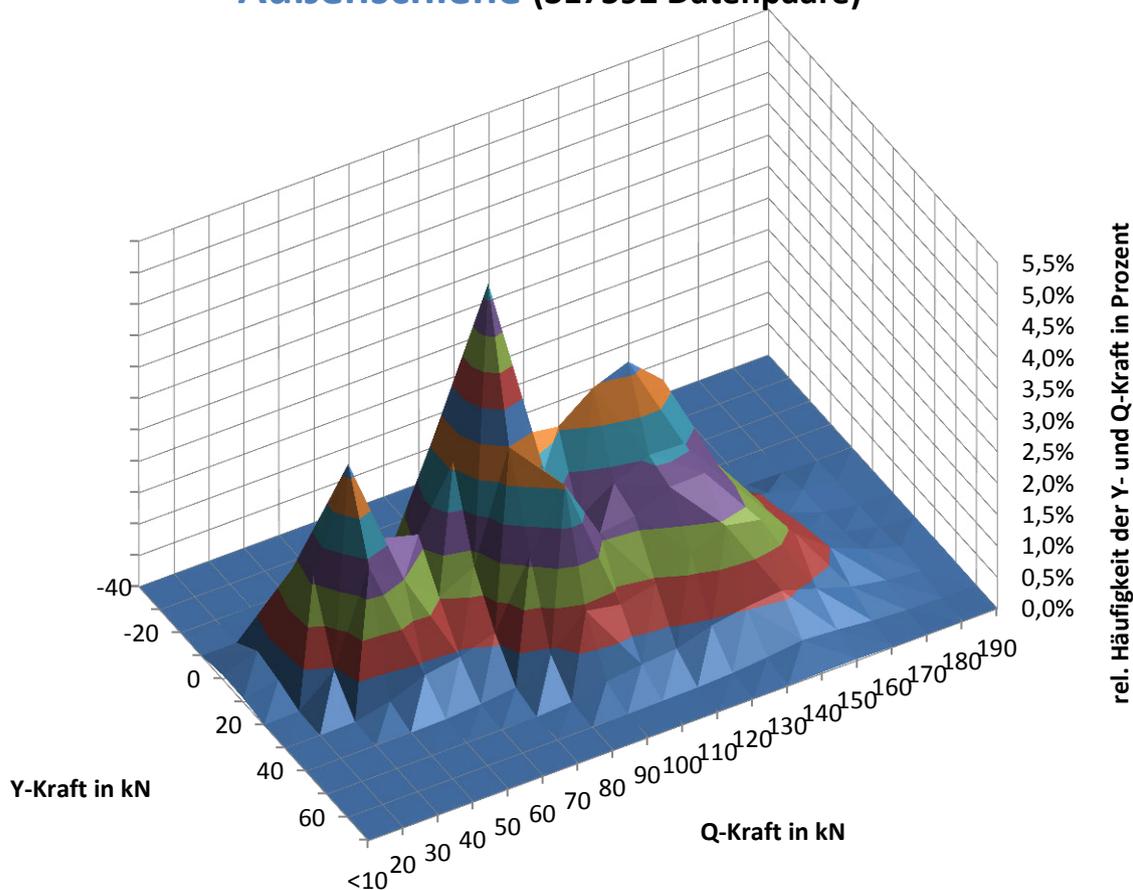


Abbildung 48: Relative Häufigkeit von Y- und Q-Kraft an der Außenschiene (Kontur)

Im Balkendiagramm sind die einzelnen relativen Häufigkeitswerte besser bestimmten Klassen-Bereichen zuordenbar, wogegen der Kontur-Plot die Verteilung der Werte durch die lineare Verbindung der Häufigkeitswerte realitätsnäher angibt. Speziell die Höhenlinien im Kontur-Plot stellen eine wichtige Informationsquelle dar. Diese entsprechen den relativen Häufigkeiten die an der vertikalen Achse aufgetragen sind.

Es sind drei ausgeprägte Maxima zu erkennen, sowie ein relativ großflächig abfallender Bereich in Richtung hoher Y-Kräfte.

Das erste relative Maximum bei geringen Q-Kräften (Klasse 40 kN) stellt die leeren Güterwagen dar. Aufgrund der geringen Q-Kraft sind auch trotz durchaus hohen auftretenden Fahrgeschwindigkeiten die Y-Kräfte nur in einem Bereich bis 30 kN.

Das absolute Maximum dieser relativen Häufigkeitsverteilung liegt im Bereich der Klassen $Q = 80$ kN und $Y = 10$ kN. Die dort befindlichen Radsätze gehören zum Großteil zu den Reisezugwagen (vor allem Railjet), und zu wenigen Radsätzen zu S-Bahn Zügen (Talent). Auffallend ist im Gegensatz zu den unbeladenen Güterwagen, dass eine gewisse Verteilung in Richtung hoher Y-Kräfte vorliegt. Dies ist den meist schnell fahrenden Reisezügen geschuldet, die üblicherweise die zulässige Höchstgeschwindigkeit erreichen, wohingegen die Güterzüge diese nicht so oft erreichen.

Ab dem absoluten Maximum fällt die Häufigkeit in Richtung hoher Q-Kräfte ab, bildet aber einen „Bergrücken“ mit stabil hohen Häufigkeiten der Q-Kraft bis zu $Q = 130$ kN

und einem relativen Maximum bei $Q = 120$ kN, der in Richtung hoher Y-Kräfte abfällt. Dieses Gebiet stellt die kritischste Belastung für die Schiene selbst dar, da die Kombination aus hohen Q-Kräften mit gleichzeitig hohen Y-Kräften die größte resultierende Kraft auf die Rad/Schiene Kontaktfläche ausübt. Dieser Bereich wird durch schwer beladene Güterwagen und Lokomotiven gebildet. In diesem Bereich kommt es auch zu dem für den Verschleiß der Schiene ungünstigen Spurkranzanlauf.

Allgemein ist ein grober Zusammenhang ersichtlich, je höher die Q-Kraft desto höher fällt auch die Y-Kraft aus. Zusätzlich können Fahrgeschwindigkeiten nahe der zulässigen Höchstgeschwindigkeit die Y-Kraft zusätzlich erhöhen.

Die beiden nachfolgenden Diagramme zeigen die relative Häufigkeit an der Innenschiene.

Rel. Häufigkeit von Y- und Q-Kraft an der Innenschiene (318875 Datenpaare)

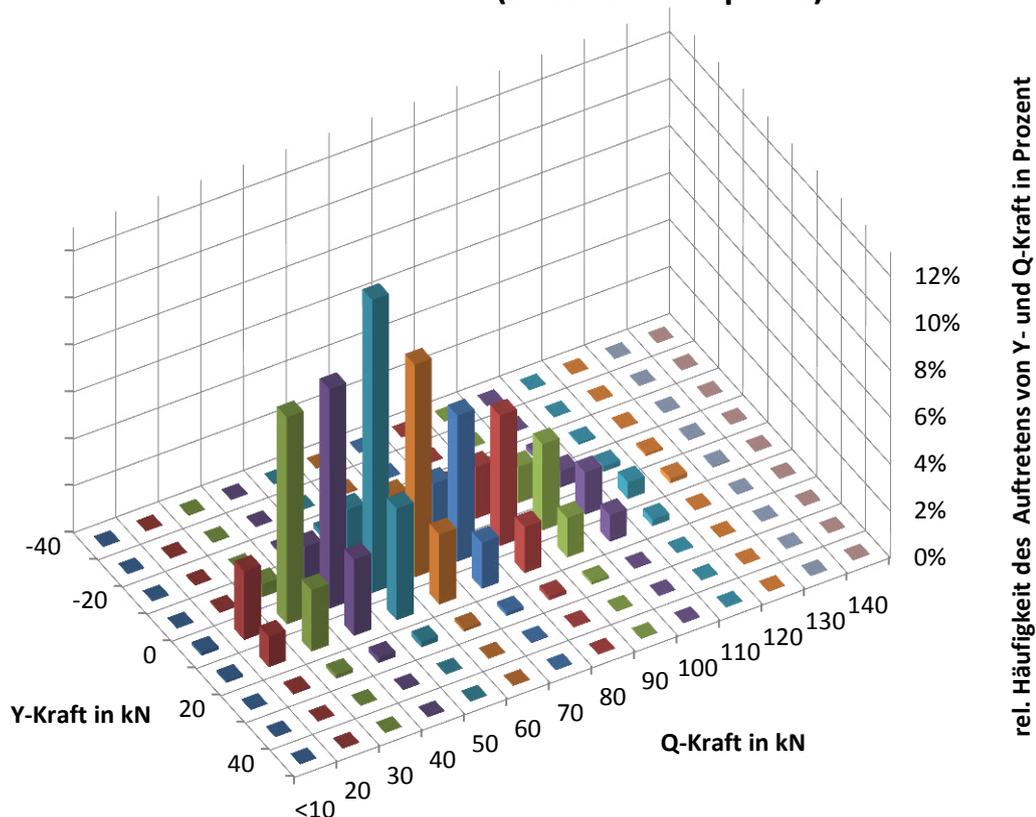


Abbildung 49: Relative Häufigkeit von Y- und Q-Kraft an der Innenschiene (Säulen)

Rel. Häufigkeit von Y- und Q-Kraft an der Innenschiene (318875 Datenpaare)

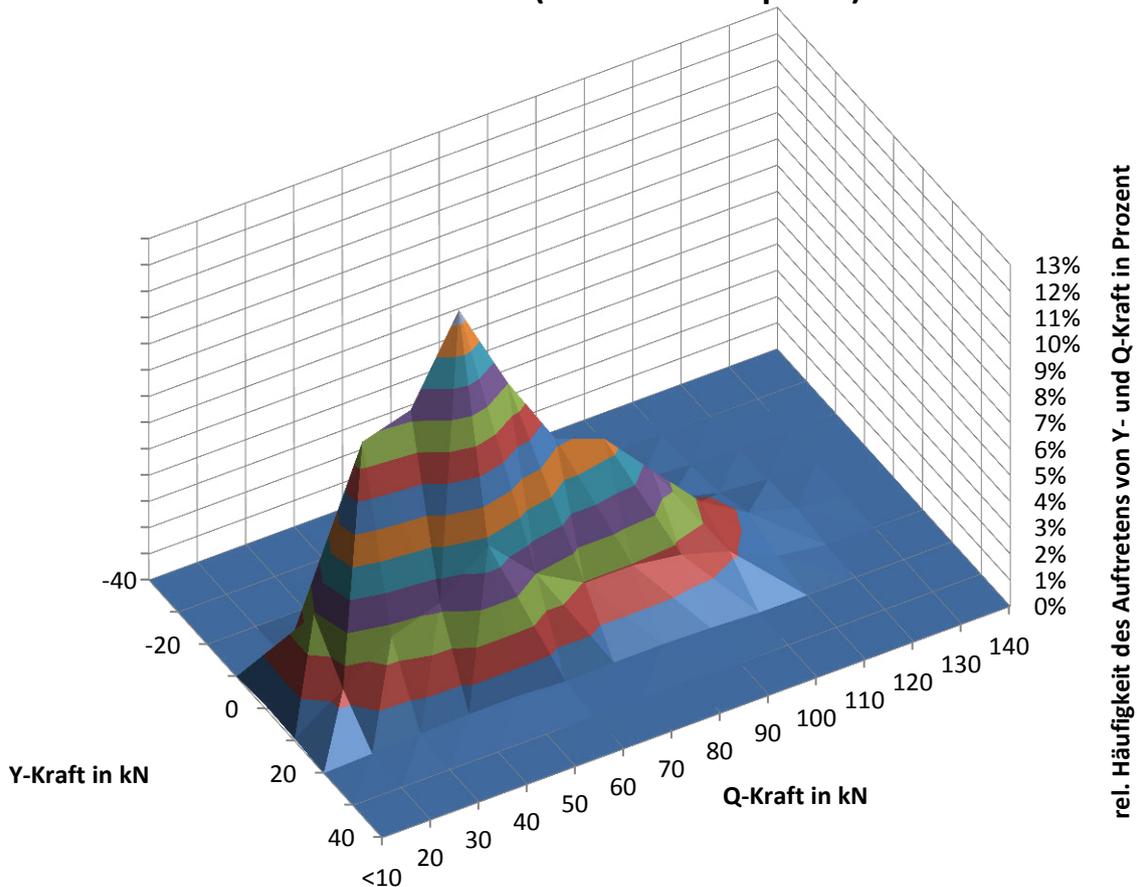


Abbildung 50: Relative Häufigkeit von Y- und Q-Kraft an der Innenschiene (Kontur)

Die völlig abweichende Charakteristik der Belastung der Innenschiene im Vergleich mit der Außenschiene ist auffällig. Die Häufigkeitswerte befinden sich fast ausschließlich in einem vergleichsweise engen Bereich zwischen $Y = \pm 20$ kN und $Q = 130$ kN. Dieses Verhalten ist auf den so gut wie nie auftretenden Spurkranz-anlauf an der Innenschiene zurückzuführen. Da, wie schon in Kapitel 3.2, erklärt, die Y-Kräfte an der Innenschiene nur durch die Reibungskräfte zwischen der Lauffläche der Räder und der Mitte des Schienenkopfes erzeugt werden. Die Verteilung der Häufigkeiten zeigt nur ein ausgeprägtes Maximum, das die höchste Stelle des „Bergrückens“ kennzeichnet. Dieses Maximum liegt in den Klassen $Q = 50$ kN und $Y = 0$ kN. Betrachtet man nur die Kontur des „Bergrückens“, so erkennt man die Häufigkeitsverteilung der Q-Kraft an der Innenschiene, wie diese in Abbildung 42 schon dargestellt wurde. Die Stufe im Verlauf bei 30 bis 40 kN Q-Kraft weist auf die leeren Güterwagen hin, während die Stufe bei 70 bis 80 kN Q-Kraft auf die Häufung der Triebfahrzeuge und schweren Güterwagens hinweist. Aus den schon erläuterten Gründen sind diese „Stufen“ nicht so ausgeprägt wie die Maxima an der Außenschiene. Die Y-Kräfte zeigen im Bereich des absoluten Maximums auch die breiteste Verteilung, wohingegen bei geringeren aber auch besonders bei höheren Q-Kräften die Y-Kräfte nicht so oft höhere Werte annehmen. Speziell die relativ geringen Häufigkeiten im Bereich $Q = 80$ bis 100 kN und $Y = 10$ bis 20 kN sind überraschend. Befinden sich in diesem Bereich doch die Lokomotiven und die schweren Güterwagen, während bei gleichen Y-Kräften aber geringeren Q-Kräften (Bereich $Q = 40$ bis 70 kN) die Häufigkeiten ansteigen. In diesem Bereich liegen die

Reisezugwagen, die aber durchwegs mit zulässiger Höchstgeschwindigkeit fahren, während die schweren Güterzüge diese nicht immer erreichen.

Eine genauere Betrachtung der Häufigkeitsverteilung, speziell im Balkendiagramm, zeigt, dass die Verteilung hinsichtlich der Y-Kraft Richtung relativ symmetrisch ausfällt mit der Symmetrielinie bei $Y = 0$ kN, wobei die positiven Y-Kräfte leicht bevorzugt sind. Dies stellt eine deutliche Abweichung im Vergleich zur Außenschiene dar, wo die Verteilung in Y-Richtung doch sehr einseitig in Richtung positiver Y-Kräfte vorliegt. Warum es annähernd gleich viele Y-Kräfte mit gleichem Betrag aber unterschiedlichem Vorzeichen gibt, liegt an einem Effekt, der erst in Kapitel 3.4.4 bei genauerer Betrachtung der Y-Kraft über der Messstelle erläutert werden kann.

3.4.3. Parametervariationen zur Betrachtung zukünftiger Radsatzlasten

Auf Basis der vorliegenden Daten wurde eine Parametervariation durchgeführt, mit dem Ziel, eine Aussage zu erlangen, um wie viel langsamer muss ein Fahrzeug mit 25 t Radsatzlast in Zukunft in so einem engen Bogen fahren, damit es die gleiche Belastung auf die Schiene erzeugt wie ein aktuelles Fahrzeug mit 22,5 t Radsatzlast.

Dafür wurden die einzelnen vorliegenden Messwerte zusätzlich mit der Radsatzlast und der mittleren Durchfahrtsgeschwindigkeit der Radsätze über die Messstelle verknüpft, um die Messwerte nach Radsatzlast und Fahrgeschwindigkeit sortieren zu können.

Die Vorgangsweise war wie folgt: Nach dem Sortieren der Messwerte nach Radsatzlast, wurden diese in den gewissen ausgewählten Radsatzlastbereichen zu je einer halben Tonne eingeteilt und danach nach der Fahrgeschwindigkeit sortiert. Dadurch konnten Messwertreihen mit gewählten Radsatzlastbereichen und Fahrgeschwindigkeitsbereichen (je 5 km/h) erstellt werden, die so wie die im vorangegangenen Kapitel gezeigten dreidimensionalen Diagramme nach ihrer Häufigkeit dargestellt werden konnten. Um eine relativ einfache Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, werden im Folgenden nicht die Diagramme gezeigt, sondern Ausschnitte aus den Berechnungstabellen, auf deren Basis die Diagramme erstellt werden. Diese sind mit einem Farb-Code hinterlegt und können so optisch relativ gut verglichen werden.

Da derzeit noch keine Fahrzeuge mit zugelassenen Radsatzlasten bis 25 t auf der betrachteten Strecke fahren dürfen, wurden zwei Radsatzlastbereiche betrachtet, die um 2,5 t voneinander entfernt sind. Auf dieser Basis können die dort gemachten Ergebnisse extrapoliert werden, bzw. lässt sich eine gewisse Abhängigkeit erkennen.

Der erste betrachtete Bereich war eine Radsatzlast von 19,5 bis 20 t bei einer Fahrgeschwindigkeit von 55 bis 60 km/h. Der betrachtete zweite Bereich enthielt Radsatzlasten von 22 bis 22,5 t, wobei jene Geschwindigkeit gesucht wurde, bei der diese Radsatzlasten im Bereich 22,5 t die gleiche Belastung auf die Schienen ausüben wie die Radsatzlasten im Bereich 20 t bei zulässiger Höchstgeschwindigkeit. Dazu wurden die Geschwindigkeitsbereiche 55 bis 60 km/h, 50 bis 55 km/h sowie 45 bis 50 km/h betrachtet. Für alle in diesem Kapitel angegebenen Bereiche gilt: Es wurden alle Messwerte inklusive den Bereichsgrenzen verwendet. Betrachtet werden im Folgenden zuerst die Belastungen an der Außenschiene und danach die Belastungen an der Innenschiene.

Der folgende Ausschnitt der Ergebnistabelle stellt jenen der „Referenzbelastung“ an der Außenschiene dar, die von den nachfolgenden Darstellungen erreicht werden sollen. Die Referenzlasten sind: Radsatzlast 19,5 bis 20 t und Fahrgeschwindigkeit 55 bis 60 km/h.

Tabelle 4: Relative Häufigkeit von Y- und Q-Kraft an der Außenschiene bei 19,5-20 t Radsatzlast und 55-60 km/h Fahrgeschwindigkeit (4531 Datenpaare)

		Q-Kraft in kN										
		90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
Y-Kraft in kN	-40	0,00%	0,02%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	-30	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	-20	0,13%	0,18%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	-10	0,11%	0,13%	0,11%	0,11%	0,07%	0,07%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	0	0,04%	0,55%	2,07%	1,79%	1,46%	0,68%	0,09%	0,07%	0,00%	0,00%	0,00%
	10	0,07%	1,10%	4,90%	7,61%	4,72%	2,58%	1,13%	0,15%	0,00%	0,00%	0,00%
	20	0,00%	0,66%	3,24%	6,33%	4,06%	2,96%	1,61%	0,15%	0,00%	0,00%	0,00%
	30	0,00%	0,38%	2,54%	6,53%	7,42%	3,24%	2,12%	0,88%	0,13%	0,02%	0,00%
	40	0,02%	0,04%	1,41%	4,94%	6,14%	3,97%	2,65%	0,95%	0,07%	0,00%	0,00%
	50	0,00%	0,02%	0,42%	1,68%	2,30%	1,41%	0,49%	0,29%	0,00%	0,00%	0,00%
	60	0,00%	0,00%	0,07%	0,20%	0,33%	0,20%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	70	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Um die Vergleichbarkeit der Tabellen zu erleichtern, ist bei allen Tabellen dieses Kapitels jeweils dieselbe Zeile und Spalte mit Rahmen gekennzeichnet.

Man erkennt in Tabelle 4, dass die Spitzen der Referenzbelastung im Bereich von Q = 120 bis 130 kN liegen mit Y-Kräften bis 40 kN.

In den folgenden Tabellenausschnitten sind die relativen Häufigkeiten der Fahrgeschwindigkeitsvariationen für eine Radsatzlast von 22 bis 22,5 t ersichtlich.

Tabelle 5: Relative Häufigkeit von Y- und Q-Kraft an der Außenschiene bei 22-22,5 t Radsatzlast und 55-60 km/h Fahrgeschwindigkeit (5400 Datenpaare)

		Q-Kraft in kN										
		90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
Y-Kraft in kN	-40	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	-30	0,00%	0,00%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	-20	0,00%	0,00%	0,06%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	-10	0,00%	0,02%	0,07%	0,19%	0,02%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	0	0,00%	0,02%	0,54%	2,72%	1,93%	0,57%	0,19%	0,11%	0,07%	0,02%	0,00%
	10	0,06%	0,07%	0,43%	3,17%	7,13%	3,74%	1,59%	1,19%	0,54%	0,04%	0,00%
	20	0,00%	0,04%	0,31%	1,30%	3,52%	4,61%	2,96%	1,72%	0,50%	0,13%	0,04%
	30	0,00%	0,04%	0,61%	1,59%	3,43%	6,09%	5,57%	3,02%	1,17%	0,24%	0,04%
	40	0,00%	0,00%	0,41%	1,89%	3,46%	5,15%	6,37%	3,24%	2,61%	0,72%	0,02%
	50	0,00%	0,02%	0,15%	0,89%	2,00%	2,54%	2,76%	1,74%	1,07%	0,46%	0,11%
	60	0,00%	0,00%	0,02%	0,15%	0,57%	0,96%	0,54%	0,33%	0,09%	0,06%	0,00%
	70	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%	0,04%	0,07%	0,07%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tabelle 6: Relative Häufigkeit von Y- und Q-Kraft an der Außenschiene bei 22-22,5 t Radsatzlast und 50-55 km/h Fahrgeschwindigkeit (1620 Datenpaare)

		Q-Kraft in kN										
		90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
Y-Kraft in kN	-40	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	-30	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	-20	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	-10	0,00%	0,43%	0,56%	0,37%	0,06%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	0	0,00%	0,37%	5,74%	9,14%	2,65%	0,68%	0,19%	0,12%	0,00%	0,00%	0,00%
	10	0,19%	0,56%	2,59%	7,35%	6,11%	3,09%	1,42%	0,12%	0,00%	0,00%	0,00%
	20	0,00%	0,06%	0,99%	3,09%	5,12%	5,06%	3,15%	0,99%	0,00%	0,00%	0,00%
	30	0,00%	0,25%	1,23%	2,96%	4,81%	4,01%	2,65%	1,79%	0,06%	0,00%	0,00%
	40	0,00%	0,06%	1,30%	1,85%	2,84%	4,20%	1,30%	0,86%	0,19%	0,00%	0,00%
	50	0,00%	0,25%	0,12%	1,48%	1,73%	2,22%	0,12%	0,56%	0,12%	0,00%	0,00%
	60	0,00%	0,00%	0,00%	0,68%	1,11%	0,74%	0,19%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	70	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,12%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tabelle 7: Relative Häufigkeit von Y- und Q-Kraft an der Außenschiene bei 22-22,5 t Radsatzlast und 45-50 km/h Fahrgeschwindigkeit (180 Datenpaare)

		Q-Kraft in kN										
		90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
Y-Kraft in kN	-40	0,56%	1,11%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	-30	1,11%	0,56%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	-20	1,67%	0,00%	0,56%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	-10	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	0	0,00%	2,78%	16,11%	8,89%	1,67%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	10	0,00%	2,78%	7,22%	10,00%	2,22%	0,56%	0,56%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	20	0,00%	0,56%	4,44%	8,33%	6,11%	2,78%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	30	0,00%	0,00%	1,67%	3,89%	2,22%	4,44%	0,56%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	40	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,56%	2,22%	0,56%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1,11%	1,11%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	60	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	70	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Vergleicht man nun die Tabelle 5 mit derselben Geschwindigkeit aber höherer Radsatzlast als die Referenztable (Tabelle 4) mit dieser, so erkennt man, dass durch die um 5 t erhöhten Radsatzlasten zu einer Verschiebung der Spitzenbelastungen um ca. 20 kN in Richtung größerer Q-Kräfte verursacht werden. Die Verteilung der Y-Kräfte hingegen bleibt in ähnlichen Größenordnungen wie bei der Referenzbelastung.

Wird die Fahrgeschwindigkeit nun um 5 km/h bei gleichbleibender Radsatzlast verringert, so ergibt sich Tabelle 6. Man erkennt sofort, dass die Spitzen der relativen Häufigkeit sich bei der Q-Kraft um rund 20 kN in Richtung niedrigerer Werte verschoben haben und gleichzeitig die Verteilung in Y-Richtung deutlich an Breite verloren hat. Die Spitzen der Y-Kraft liegen nur mehr bei 10 kN, verglichen mit den 40 kN bei um 5 km/h erhöhter Fahrgeschwindigkeit.

Eine weitere Reduktion der Fahrgeschwindigkeit um 5 km/h (Bereich 45 bis 50 km/h) bei Radsatzlasten von 22 bis 22,5 t ist in Tabelle 7 zu sehen. Es ist ein weiteres Absinken der Belastungsspitzen in den Bereich Q = 110 kN zu erkennen, sowie eine

weitere Verringerung der Y-Kraft Verteilung zu geringeren positiven Werten. Vor allem die Bandbreite der Y-Kraft ist in dieser Tabelle 7 verglichen mit den beiden davor ersichtlichen schon deutlich reduziert.

Vergleicht man nun die drei Variationen (Tabelle 5, Tabelle 6 und Tabelle 7) mit der Referenztafel (Tabelle 4), so erkennt man die folgenden Zusammenhänge.

Je höher die Radsatzlast, desto höher sind die Q-Kräfte an der Außenschiene. Bei gleicher Fahrgeschwindigkeit aber unterschiedlichen Radsatzlasten sind die Belastungsspitzen der Y-Kraft in den gleichen Y-Kraftbereichen.

Reduziert man die Fahrgeschwindigkeit schrittweise, so verringern sich die Y-Kräfte von ca. 40 kN auf ca. 0 bis 10 kN innerhalb von 10 km/h Geschwindigkeitsreduktion. Dies ist dem nicht mehr so starken Drängen des Fahrzeuges in Richtung bogenaußen zuzuschreiben. Gleichzeitig sinken die Häufigkeitsspitzen der Q-Kraft um 10 bis 20 kN je 5 km/h Reduktion der Fahrgeschwindigkeit. Dies wiederum geschieht durch die sich reduzierende positive freie Seitenbeschleunigung, somit bildet sich die dynamische Aufstandskraft-Verlagerung zwischen Innen- und Außenschiene zurück.

Welche Fahrgeschwindigkeit erzeugt nun bei 19,5 bis 20 t Radsatzlast die gleiche Belastung an der Außenschiene wie bei 22 bis 22,5 t Radsatzlast?

Aufgrund des dominanten Einflusses der Fahrgeschwindigkeit ist eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit um nur 5 km/h nötig um eine Belastung zu erreichen, die sogar unter jener des Referenzfalles liegt.

An der Innenschiene sehen die Verhältnisse anders aus. Daher wird diese in den nachfolgenden Tabellen genauso wie die Außenschiene behandelt.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Referenzbelastung für die Innenschiene mit 19,5 bis 20 t Radsatzlast und 55 bis 60 km/h Fahrgeschwindigkeit.

Tabelle 8: Relative Häufigkeit von Y- und Q-Kraft an der Innenschiene bei 19,5-20 t Radsatzlast und 55-60 km/h Fahrgeschwindigkeit (4561 Datenpaare)

		Q-Kraft in kN											
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Y-Kraft in kN	-40	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	-30	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	-20	0,00%	0,00%	0,04%	0,53%	0,22%	0,26%	0,24%	0,04%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%
	-10	0,00%	2,30%	5,11%	3,64%	2,81%	4,69%	1,75%	0,46%	0,07%	0,00%	0,00%	0,00%
	0	0,53%	5,11%	8,51%	8,75%	9,01%	11,58%	5,85%	1,23%	0,07%	0,00%	0,00%	0,00%
	10	0,22%	0,75%	1,29%	2,50%	5,99%	7,78%	4,17%	0,55%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	20	0,00%	0,00%	0,02%	0,22%	1,49%	1,45%	0,44%	0,09%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	30	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%	0,07%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
40	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%	0,09%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	

Die Referenzbelastung auf die Innenschiene in Tabelle 8 zeigt erwartungsgemäß eine anderer Häufigkeitsverteilung als an der Außenschiene. Auffallend ist die geringe Bandbreite der Y-Kräfte, die sich im Bereich $Y = \pm 10$ kN befinden. Die

Häufigkeitsspitzen der Q-Kraft verteilen sich hingegen über einen relativ großen Bereich.

Tabelle 9: Relative Häufigkeit von Y- und Q-Kraft an der Innenschiene bei 22-22,5 t Radsatzlast und 55-60 km/h Fahrgeschwindigkeit (5463 Datenpaare)

		Q-Kraft in kN											
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Y-Kraft in kN	-40	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	-30	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	-20	0,00%	0,00%	0,07%	0,48%	0,92%	0,82%	0,53%	0,31%	0,07%	0,02%	0,00%	0,00%
	-10	0,02%	1,56%	3,90%	3,40%	2,93%	2,93%	3,37%	1,87%	0,33%	0,02%	0,00%	0,00%
	0	0,40%	3,24%	6,50%	4,74%	5,27%	7,40%	9,08%	5,42%	1,23%	0,09%	0,00%	0,00%
	10	0,04%	0,73%	1,17%	1,17%	2,29%	5,91%	7,51%	6,32%	1,45%	0,07%	0,00%	0,00%
	20	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,51%	1,57%	1,87%	1,85%	0,49%	0,05%	0,00%	0,00%
	30	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,05%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	40	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tabelle 10: Relative Häufigkeit von Y- und Q-Kraft an der Innenschiene bei 22-22,5 t Radsatzlast und 50-55 km/h Fahrgeschwindigkeit (1625 Datenpaare)

		Q-Kraft in kN											
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Y-Kraft in kN	-40	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	-30	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,06%	0,06%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	-20	0,00%	0,00%	0,18%	0,74%	1,29%	0,74%	1,11%	1,29%	0,18%	0,00%	0,00%	0,00%
	-10	0,00%	0,06%	0,68%	4,06%	4,12%	2,89%	2,77%	3,32%	1,42%	0,43%	0,00%	0,00%
	0	0,00%	0,06%	2,58%	4,55%	5,17%	6,28%	11,02%	9,29%	5,66%	1,60%	0,06%	0,00%
	10	0,00%	0,06%	0,98%	0,86%	0,98%	3,51%	5,60%	6,95%	5,23%	0,74%	0,18%	0,00%
	20	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,43%	1,17%	1,05%	0,43%	0,12%	0,00%	0,00%
	30	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	40	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tabelle 11: Relative Häufigkeit von Y- und Q-Kraft an der Innenschiene bei 22-22,5 t Radsatzlast und 45-50 km/h Fahrgeschwindigkeit (182 Datenpaare)

		Q-Kraft in kN											
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Y-Kraft in kN	-40	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	-30	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	-20	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,55%	1,10%	1,10%	0,00%	0,00%	0,55%	0,00%	0,00%
	-10	0,00%	0,00%	0,00%	1,10%	3,85%	1,65%	2,20%	1,10%	0,55%	0,55%	1,10%	0,55%
	0	0,00%	0,00%	0,00%	4,40%	6,59%	4,40%	14,84%	7,14%	12,09%	2,75%	0,55%	0,00%
	10	0,00%	0,00%	0,55%	0,00%	0,00%	3,85%	6,04%	2,20%	13,19%	3,85%	0,00%	0,00%
	20	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,55%	0,55%	0,55%	0,00%	0,00%	0,00%
	30	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	40	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

In Tabelle 9 sind die relativen Häufigkeiten von Radsatzlasten 22 bis 22,5 t bei der gleichen Fahrgeschwindigkeit ersichtlich wie in der Referenztablelle Tabelle 8 der Referenzbelastung. Es fällt auf, dass sich das Maximum der Verteilung um rund 10 kN in Richtung höherer Q-Kräfte geändert hat, gleichzeitig stellt sich die Y-Kraft mit einer breiteren Verteilung ein. Bei gleicher Fahrgeschwindigkeit steigt also, wie erwartet, die Belastung, wenn die Radsatzlast erhöht wird.

Die Tabelle 10 zeigt die gleiche Radsatzlast wie Tabelle 9, aber bei um 5 km/h reduziertem Geschwindigkeitsbereich. Es ist ersichtlich, dass sich die Belastungsspitzen weiter zu höheren Q-Kräften verschieben. Dieses Verhalten ist dem schon mehrfach genannten Effekt der Aufstandslastverlagerung aufgrund der freien Seitenbeschleunigung geschuldet.

Wird die betrachtete Fahrgeschwindigkeit um weitere 5 km/h reduziert bei gleicher Radsatzlast, so stellt sich eine Häufigkeitsverteilung wie in Tabelle 11 ersichtlich ein. Der Trend der vorangegangenen Tabellen setzt sich fort, da sich die Maxima der Häufigkeitsverteilung weiter zu höheren Q-Kräften verschieben. Absolut betrachtet hat sich bei gleicher Radsatzlast (22 bis 22,5 t) bei einer Reduktion der Fahrgeschwindigkeit um gut 10 km/h die Belastung durch die Q-Kraft an der Innenschiene um rund 20 kN erhöht.

Welche Fahrgeschwindigkeit erzeugt nun bei 19,5 bis 20 t Radsatzlast die gleiche Belastung an der Innenschiene wie bei 22 bis 22,5 t Radsatzlast?

Diese Frage für die Innenschiene stellt nun einen Widerspruch zur Beantwortung an der Außenschiene dar. An der Außenschiene wurde ermittelt, dass eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit um 5 km/h ausreichen würde. Gleichzeitig steigt aber die Belastung auf die Innenschiene wenn die Fahrgeschwindigkeit reduziert wird.

Prinzipiell gilt, eine Radsatzlast zwischen 22 und 22,5 t kann bei keiner Geschwindigkeit an der Innenschiene die gleiche Belastung erreichen wie eine Radsatzlast von 19,5 bis 20 t. Die Belastung ist immer höher.

Da aber die Belastung der Innenschiene generell geringer ist als jene der Außenschiene und innen auch nur geringe Y-Kräfte auftreten, ist die Außenschiene die kritischer zu betrachtende Schiene. Daher stellt die Außenschiene das strengere Kriterium zur Reduktion der Fahrgeschwindigkeit dar.

Die Beantwortung der Frage, um wie viel muss ein Fahrzeug mit 22 bis 22,5 t Radsatzlast langsamer fahren als ein Fahrzeug mit 19,5 bis 20 t, lautet aufgrund der erläuterten Tatsachen: rund 5 km/h.

Die eigentliche Aufgabenstellung dieses Kapitels war, um wie viel muss ein zukünftiges Fahrzeug mit 25 t Radsatzlast langsamer fahren als ein Fahrzeug mit 22,5 t Radsatzlast, um die gleiche Belastung auf die Schienen zu erzeugen.

Unter der Annahme eines linearen Verhaltens zwischen der Belastung der Schienen, der Fahrgeschwindigkeit und der Radsatzlast kann man angeben, dass bei einer linearen Extrapolation von den Radsatzlasten 20 t und 22,5 t auf 25 t eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit von rund 5 km/h erforderlich scheint.

Berücksichtigt man aber, dass die freie Seitenbeschleunigung mit dem Quadrat der Fahrgeschwindigkeit steigt und somit nach der Theorie die Belastungen von der freien Seitenbeschleunigung abhängig sind (siehe Kapitel 2.1.1), so liegt die Annahme eines quadratischen Verhaltens zwischen der Fahrgeschwindigkeit, der Radsatzlast und der Belastung auf die Schiene nahe.

Um diese neue Annahme mit entsprechenden Sicherheitsreserven einfließen zu lassen, lautet aus diesem Grund die **Empfehlung** für eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit bei Steigerung der Radsatzlast von 22,5 t auf 25 t, **10 km/h**.

Diese Empfehlung gilt auf Basis der vorliegenden Daten der Messstelle in einem engen Bogen ($R = 183 \text{ m}$).

3.4.4. Betrachtung der Kraftverläufe über der Messstelle

Im Folgenden werden einzelne Züge bei der Überfahrt über die Messstelle betrachtet, wobei für jede Beurteilungsgröße (Q- und Y-Kraft an der Innen- und Außenschiene) in einem eigenen Diagramm alle Radsätze dargestellt sind.

Dadurch kann man bestimmte Abhängigkeiten zwischen Innen- und Außenschiene, aber auch zwischen vorlaufendem und nachlaufendem Radsatz eines Drehgestells erkennen.

In den folgenden Diagrammen fehlen gewisse Messwerte in einem oder mehreren Schwellenfächern. Dies ist auf die dauerhaften oder zufälligen Ausfälle von einzelnen Messgebern zurückzuführen, bzw. gibt es nicht an jeder Schiene die gleiche Anzahl von Sensoren. Dass alle Sensoren gleichzeitig plausible Messwerte liefern, tritt eigentlich nie auf.

Als interessantes Beispiel wurde ein Railjet erachtet, da dieser mehrmals täglich die Messstelle passiert. Das Wagenmaterial ist bekannt, bestehend aus einer führenden Lokomotive der Taurus-Familie und nahezu baugleichen Reisezugwagen, die in der vorliegenden Zugkonfiguration kurzgekuppelt wahrscheinlich den gleichen Wartungszustand aufweisen und das gleiche Belastungsspektrum in deren bisherigen Einsatzzeit erfahren haben. Es wurde eine Zugsüberfahrt ausgesucht, bei der der Railjet mit zulässiger Höchstgeschwindigkeit (Radsatz-Durchfahrtsgeschwindigkeit im Mittel $59,60 \text{ km/h}$) unterwegs war und nur eine geringe Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem schnellsten und dem langsamsten Radsatz erkennbar war ($\Delta v = 1,36 \text{ km/h}$).

In den beiden nachstehenden Diagrammen (Abbildung 51 und Abbildung 52) sind die Aufstandskräfte (Q-Kräfte) an der Außen- und der Innenschiene dargestellt.

Anmerkung:

Erwartungsgemäß liegen einige der 32 Kraftverläufe derartig eng beisammen, dass deren Darstellung in einem Diagramm keine Lesbarkeit der einzelnen Werte ermöglicht. Da es Ziel der Arbeit ist die auftretenden Kräfte je Schwellenfach zu ermitteln bzw. ein Lastkollektiv zu aufzustellen und die Erklärung der verschiedenen Verläufe stark von der gewählten Art der Darstellung profitiert, wurde daher dieser Form der Ergebnisdarstellung gegenüber einer anderen Diagrammform bzw. einer Tabellenauswertung, die alle ca. $13 \cdot 32$ Werte (Anzahl der Schwellenfächer mal Anzahl der Radsätze des Zuges) erkennen ließe, der Vorzug gegeben. Die Diagramme dieses Kapitels sollen nur die groben Zusammenhänge der Kraftverläufe von Zügen darstellen und sind absichtlich nicht zur Betrachtung einzelner Radsätze geeignet.

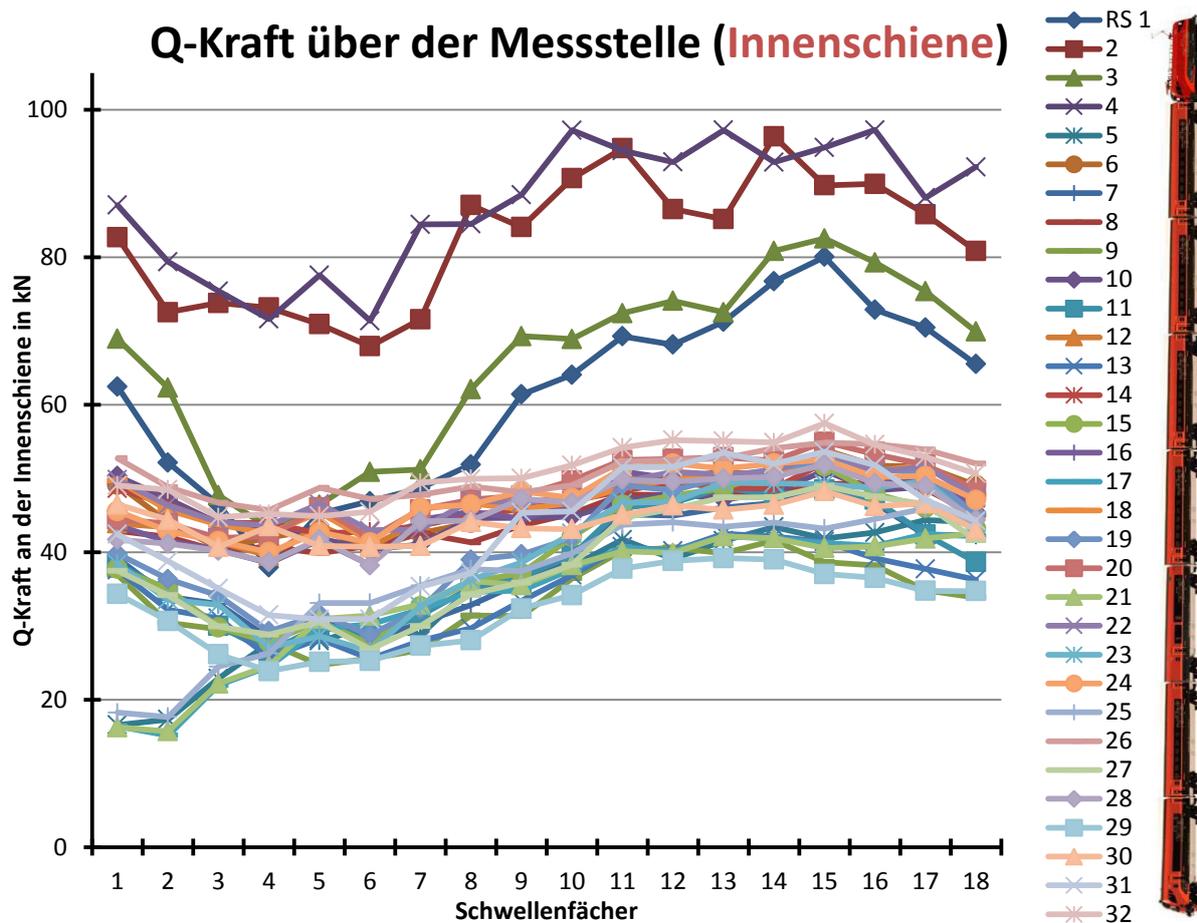


Abbildung 52: Q-Kraft an der Innenschiene über der Messstelle, Railjet-Zug (Fahrzeugbilder [32])

Bei der Betrachtung der Messwertkurven für jeden Radsatz sind gewisse Zusammenhänge ersichtlich. Die ersten vier Radsätze gehören der Lokomotive der Bauart 1216. Diese vier Radsätze heben sich aufgrund der im Vergleich zu den Reisezugwagons höheren Radsatzlasten deutlich von den übrigen Kurven ab.

Interessant ist vor allem die Betrachtung nach Farbe der Radsätze, Blau- und Grüntöne kennzeichnen vorlaufende Radsätze eines Drehgestells, während Rot-, Orange- und Violettöne nachlaufende Radsätze kennzeichnen. Vergleicht man das Diagramm der Außenschiene mit der Innenschiene, so befinden sich die Kurvenscharen der beiden Farbgruppen jeweils an unterschiedlichen Positionen im gegenseitigen Vergleich. An der Außenschiene erreichen die vorlaufenden Radsätze höhere Aufstandskräfte, während an der Innenschiene die nachlaufenden Radsätze höhere Aufstandskräfte ausüben.

Diese Beobachtung gilt sowohl für Reisezugwagons, als auch für Triebfahrzeuge. Der Grund für dieses Verhalten liegt in der Stellung des Drehgestells bei der Fahrt in einem Bogen mit Überhöhung. Fährt ein Drehgestell in einem überhöhten Bogen, so nimmt das Drehgestell üblicher Weise eine Freilaufstellung ein. Das heißt, der vorlaufende Radsatz läuft bogenaußen an der Schiene an, während der nachlaufende Radsatz weder bogeninnen, noch bogenaußen anläuft. Aufgrund des Anlaufes bogenaußen kommt es an dieser Stelle zur Vergrößerung der Aufstandskraft, da das Rad am Übergangsbereich der Lauffläche in den Spurkranz beginnt aufzuklettern. Dabei kommt es zu einer Schrägstellung der Radsatzachse bezüglich der Schienenoberkante. Da das nachlaufende Rad bogenaußen eine Freilaufstellung einnimmt und somit mit dem kegelartigen Bereich der Lauffläche auf

der Außenschiene aufliegt, stellt sich eine nicht so stark ausgeprägte Schrägstellung des nachlaufenden Radsatzes bezüglich der Schienenoberkante ein. Nachdem die Schrägstellungen der Radsätze an vor- und nachlaufendem Radsatz unterschiedlich sind, kommt es zu einer Verwindung des Drehgestells. Dadurch ist die Aufstandskraft, also die Federkraft der Primärfederung, des nachlaufenden Rades bogenaußen geringer als des vorlaufenden Rades.

Durch dieses Verhalten nimmt das Drehgestell eine um die Hochachse verdrehte Stellung bezüglich der Tangente an die Gleismittellinie im überhöhten Bogen ein. Dadurch nimmt das Rad am vorlaufenden Radsatz bogenaußen in vertikaler Richtung den höchsten Berührungspunkt auf der Schiene ein, verglichen mit den anderen Rädern des Drehgestells. Das Rad an dem nachlaufenden Radsatz bogeninnen hingegen stellt vertikal gesehen den niedrigsten Kontaktpunkt des Drehgestells mit der Schiene dar. Da das bogenäußere Rad des nachlaufenden Radsatzes weniger belastet ist als das vorlaufende Rad bogenaußen, kann nur das bogeninnere Rad des nachlaufenden Radsatzes diese Belastung auf die Schiene übertragen. Somit nimmt das Drehgestell einen diagonal belasteten Zustand ein. Das heißt, die Räder vorlaufend, bogenaußen und nachlaufend, bogeninnen stellen die „Auflager“ des Drehgestells auf der Schiene dar. Durch diese diagonale Belastung des Drehgestells und dessen Verdrehung bezogen auf das Gleis verwindet sich der Drehgestellrahmen, sodass die beiden Räder vorlaufend, bogeninnen und nachlaufend bogenaußen geringere Aufstandskräfte aufweisen. Dieses Verhalten ist auch von der Konstruktion des Drehgestells vor allem dessen Rahmen und Anbindungen zum Wagenkasten abhängig, trotzdem tritt dieses Verhalten aber prinzipiell an jedem Drehgestell auf.

Vergleicht man die Diagramme der Aufstandskraft (Abbildung 51 und Abbildung 52) für die Außenschiene mit jenen der Innenschiene, so erkennt man, dass die Aufstandskraft-Unterschiede an der Innenschiene prozentuell höher ausfallen als an der Außenschiene. Absolut gesehen ist auf die unterschiedliche Skalierung der beiden Diagramme zu achten, sodass der Abstand zwischen den betrachteten Kurven gleicher Farbgruppen absolut gesehen annähernd gleich ist.

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 53 und Abbildung 54) zeigen die Y-Kraft an der Außen- und Innenschiene über der Messstelle. Es sind im Unterschied zu den Aufstandskräften weniger Schwellenfächer mit Sensoren für die Seitenführungskräfte ausgewertet worden. Auch ist die Verfügbarkeit bei diesen Sensortypen geringer. Aufgrund der deutlich unterschiedlichen Charakteristiken der Y-Kraft Diagramme an Außen- und Innenschiene werden diese getrennt interpretiert.

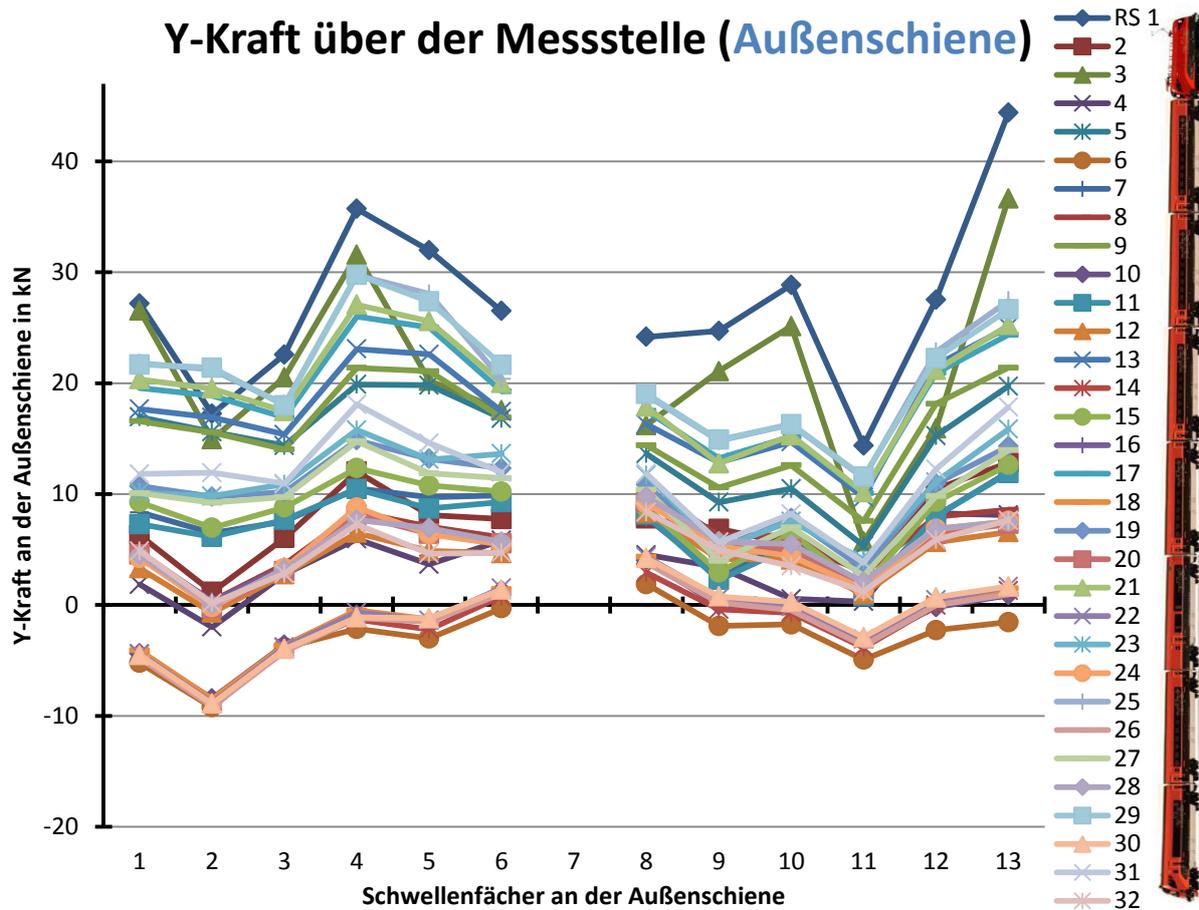


Abbildung 53: Y-Kraft an der Außenschiene über der Messstelle, Railjet-Zug (Fahrzeugbilder [32])

An der Außenschiene zeigen die Kurvenscharen der Y-Kraft ein aufgrund der vorangegangenen Interpretation der Aufstandskräfte schlüssiges Verhalten. Die vorlaufenden Radsätze der Drehgestelle (Farbgruppe: grün/blau) erzeugen hohe Y-Kräfte, weil diese Radsätze an der Außenschiene anlaufen. Die nachlaufenden Radsätze hingegen (Farbgruppe: rot/orange/violett) kommen aufgrund der Freilaufstellung nicht in den Zustand des Spurkranzanlaufes. Daher sind die Y-Kräfte der nachlaufenden Radsätze rund um den Nullpunkt gruppiert und weichen von diesem nur um rund ± 10 kN ab. Die Kraftverläufe der Taurus-Lokomotive ragen im Vergleich mit den Reisezugwagons nicht so stark heraus wie bei den Aufstandskräften.

Ob es sich im Bereich der Messstelle um einen stationären Bogenlauf handelt, kann nicht gesagt werden. Die Messstelle liegt am Ende des Bogens mit einer laut Trassierungsplan konstanten Überhöhung, doch weist der gemessene Verlauf der Überhöhung im Kapitel 2.2.3 ein leicht sinkendes Verhalten auf. Daher kann auf Basis der Gleislage nicht von einem stationären Verhalten ausgegangen werden.

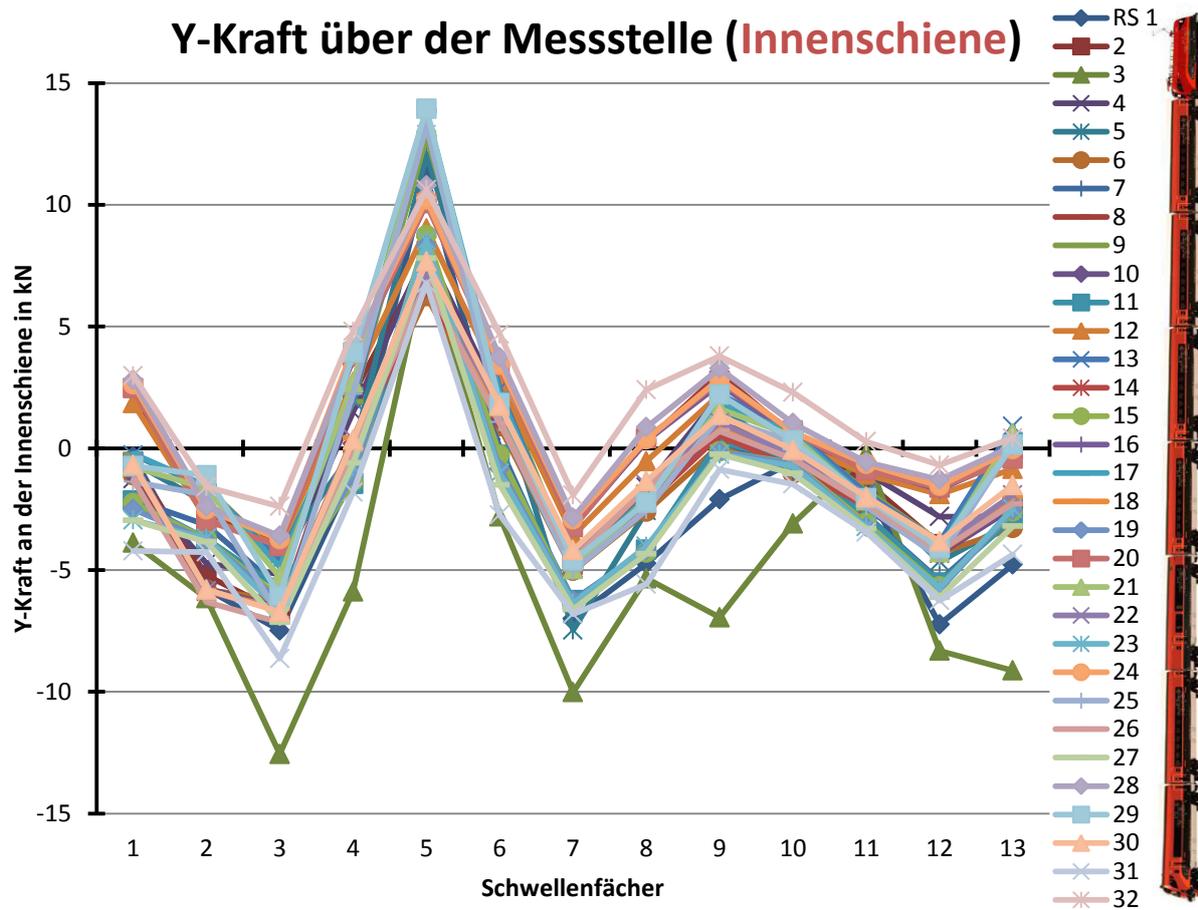


Abbildung 54: Y-Kraft an der Innenschiene über der Messstelle, Railjet-Zug (Fahrzeugbilder [32])

Das Verhalten der Y-Kraft an der Innenschiene in Abbildung 54 erscheint auf den ersten Blick überraschend. Es bildet sich bei allen Radsätzen ein wellenartiger Kraftverlauf aus. Den bekannten Wellenlauf (in der Literatur oft auch Sinuslauf bezeichnet) aufgrund der kegelförmigen Laufflächen der Räder eines Radsatzes vermutet man in so einem engen Bogen eigentlich nicht. Dieser Wellenlauf stellt sich normalerweise nur im geraden Gleis bzw. in Bögen mit großen Radien ein. Der hier auftretende Effekt hat damit aber nichts zu tun.

Aufgrund der Tatsache, dass der klassische Wellenlauf eine Wellenlänge von rund 200 m nach der Klingel'schen Formel [15] aufweist, die hier dargestellten Kurven aber eine Wellenlänge von rund 4 Schwellenfächern aufweisen (mit einem Schwellenabstand von 0,6 m ergeben sich 2,4 m Wellenlänge), kann es sich hier nicht um dieses bekannte Phänomen handeln. Es ist aber zu bedenken, dass die Formel von Klingel eine theoretische Näherung darstellt, da die äquivalente Konizität ein fester Parameter ist, in der Realität aber die Radprofile (z.B. S1002) eine äquivalente Konizität in Abhängigkeit der Spurweite und der Querverschiebung aufweisen. In mehreren Messserien der ÖBB wurden die tatsächlichen Wellenlängen, sowohl im geraden Gleis, als auch im Bogen gemessen. Im geraden Gleis wurden Wellenlängen im Bereich 12 bis 14 m gemessen, in einem Bogen 6 bis 7 m. [6]

Wie schon in vorhergehenden Kapiteln mehrfach erwähnt, werden die Y-Kräfte an der Innenschiene fast ausschließlich durch die Reibungskräfte in Querrichtung zwischen dem Rad und der Schiene erzeugt. Daher muss es eine Ursache in Form einer Kraft in Querrichtung geben, die zu diesem Verhalten führt.

Als Ursache kommt der Spurkranzanlauf an der Außenschiene in Betracht: Wenn das vorlaufende Rad des Drehgestells an der Außenschiene anläuft, so steigert sich im Übergangsbereich zwischen der Lauffläche und dem Spurkranz bzw. an der Spurkranzflanke die Y-Kraft so weit, dass die Y-Kräfte den Radsatz nach Richtung bogeninnen schieben. Dies geschieht, wenn das Maximum der Y-Kraft in positiver Richtung an der Innenschiene erreicht wird. Daraufhin beginnen die Radsätze nach bogeninnen zu wandern, wobei der Widerstand dieser Bewegung durch die Reibkraft im Rad/Schiene-Kontakt behindert wird. Dadurch entstehen die negativen Y-Kräfte an der Innenschiene (bzw. das Minimum des Verlaufes). Danach beginnen sich die Radsätze wieder in Richtung der Massenträgheit nach bogenaußen zu bewegen. Dies geschieht so lange, bis die Y-Kraft an der Außenschiene groß genug wird, um den Radsatz wieder nach bogeninnen zu schieben.

An der Außenschiene erkennt man dieses Verhalten an dem Abnehmen der Y-Kraft an den vorlaufenden Radsätzen, sobald Spurkranzanlauf eintritt. Vor dem nächsten Anlauf steigt die Y-Kraft wieder an. Dieses Verhalten ist auch an den jeweils vorlaufenden Radsätzen in Abbildung 53 zu sehen. An den nachlaufenden Radsätzen ist an der Außenschiene dieses Verhalten nicht so stark ausgeprägt. Es sei aber auf die unterschiedlichen Skalierungen der Y-Kraft-Achsen in Abbildung 53 und Abbildung 54 hingewiesen.

Der Unterschied zwischen vorlaufendem und nachlaufendem Radsatz ist an der Innenschiene nicht so stark ausgeprägt wie an der Außenschiene aber dennoch vorhanden. Die wellenartigen Bewegungen finden an beiden Radsätzen der Drehgestelle an den gleichen Messpunkten statt. Dieses Verhalten ist auch unabhängig vom Achsstand der Radsätze im Drehgestell. (Die Reisezugwagen weisen einen Achsabstand von 2,5 m auf, während der Taurus 3 m Achsabstand aufweist.) Die nachlaufenden Radsätze zeigen nicht so hohe Amplituden der wellenartigen Bewegung wie die vorlaufenden Radsätze. Dies liegt daran, dass an der Außenschiene der vorlaufende Radsatz anläuft und nicht der nachlaufende.

Dieser wellenartige Verlauf scheint aber gedämpft zu sein, da die Amplituden über der Messstelle abnehmen. Dies kann aber auch am beginnenden Übergangsbogen nach der Messstelle liegen, wodurch der Spurkranzanlauf nicht mehr so stark auffällt. Dies ist auch ein Hinweis dafür, dass es sich in diesem Bereich um keinen stationären Bogenlauf handelt.

Dies sind die Gründe für die charakteristischen relativen Häufigkeiten der Y-Kraft in den vorangegangenen Kapiteln, deren Verhalten mit den dort zur Verfügung stehenden Messwerten nicht erklärbar war.

Ein anderes interessantes Beispiel stellt ein willkürlich herausgegriffener gemischter Güterzug dar. Der betrachtete Zug bestand aus zwei Lokomotiven (1142 und 1116), 5 vierachsigen Drehgestell-Güterwagen (4DGF-18, Drehzapfenabstand zweimal 15,9 m und dreimal 16,5 m) mit hoher Beladung und 13 zweiachsigen Güterwagons (Achsabstand 8,9 oder 9 m), wobei zwei davon nur gering beladen waren (Radsätze 17 bis 20), die anderen 11 schwerbeladen. Der Zug erreichte eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 51,19 km/h ($\Delta v = 5,92$ km/h, vordere Fahrzeuge langsamer, hintere schneller, was auf einen Beschleunigungszustand schließen lässt) und wies ein Zuggesamtgewicht von 1100 t auf. Bei den Güterwagons handelt es sich nach der UIC-Nummer zu schließen um in Deutschland bzw. Österreich beheimatete Wagons in der Bauform „gedeckter Güterwagen in Sonderbauart“.

Die folgenden Diagramme zeigen die Q-Kräfte an der Außen- bzw. Innenschiene.

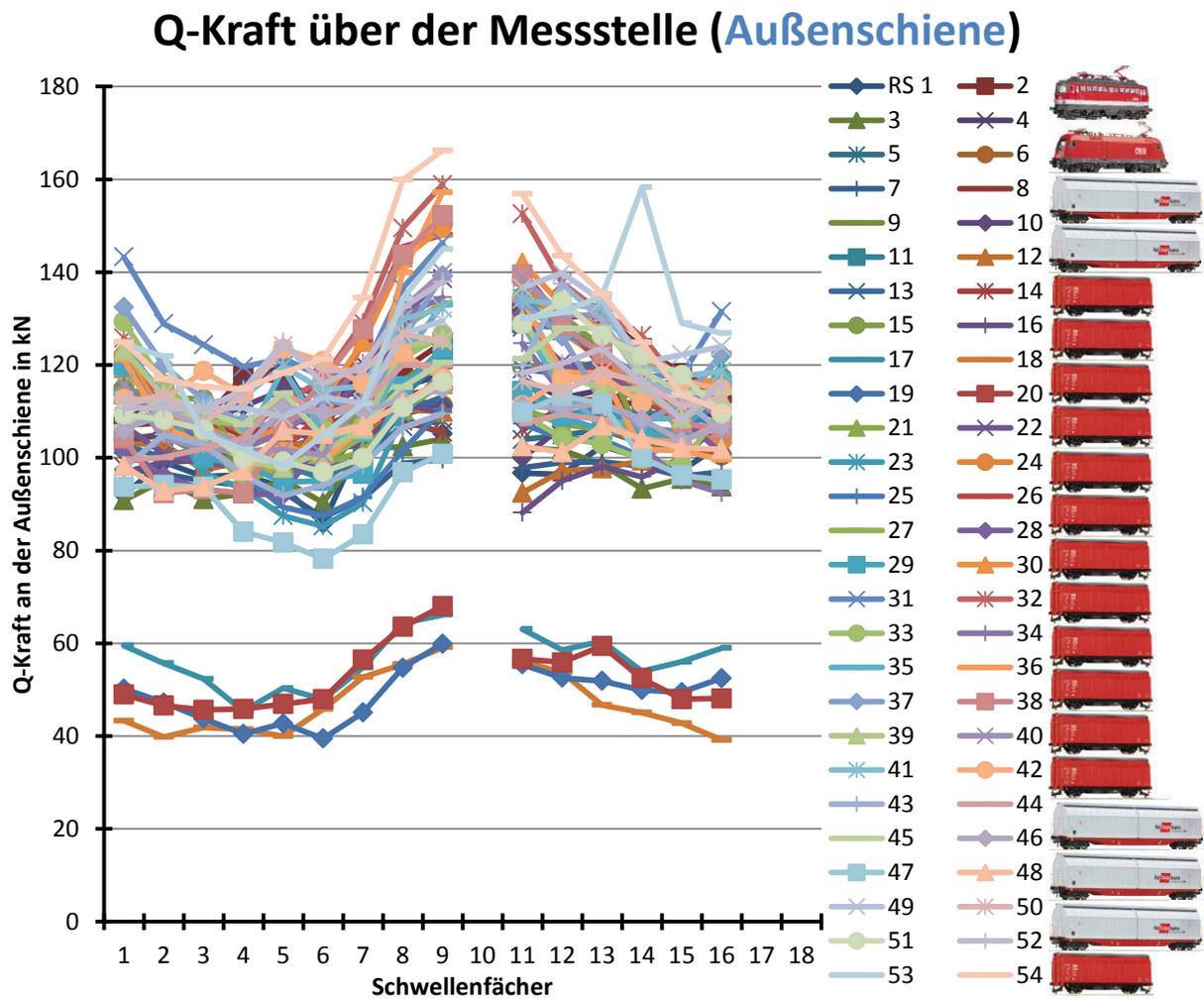
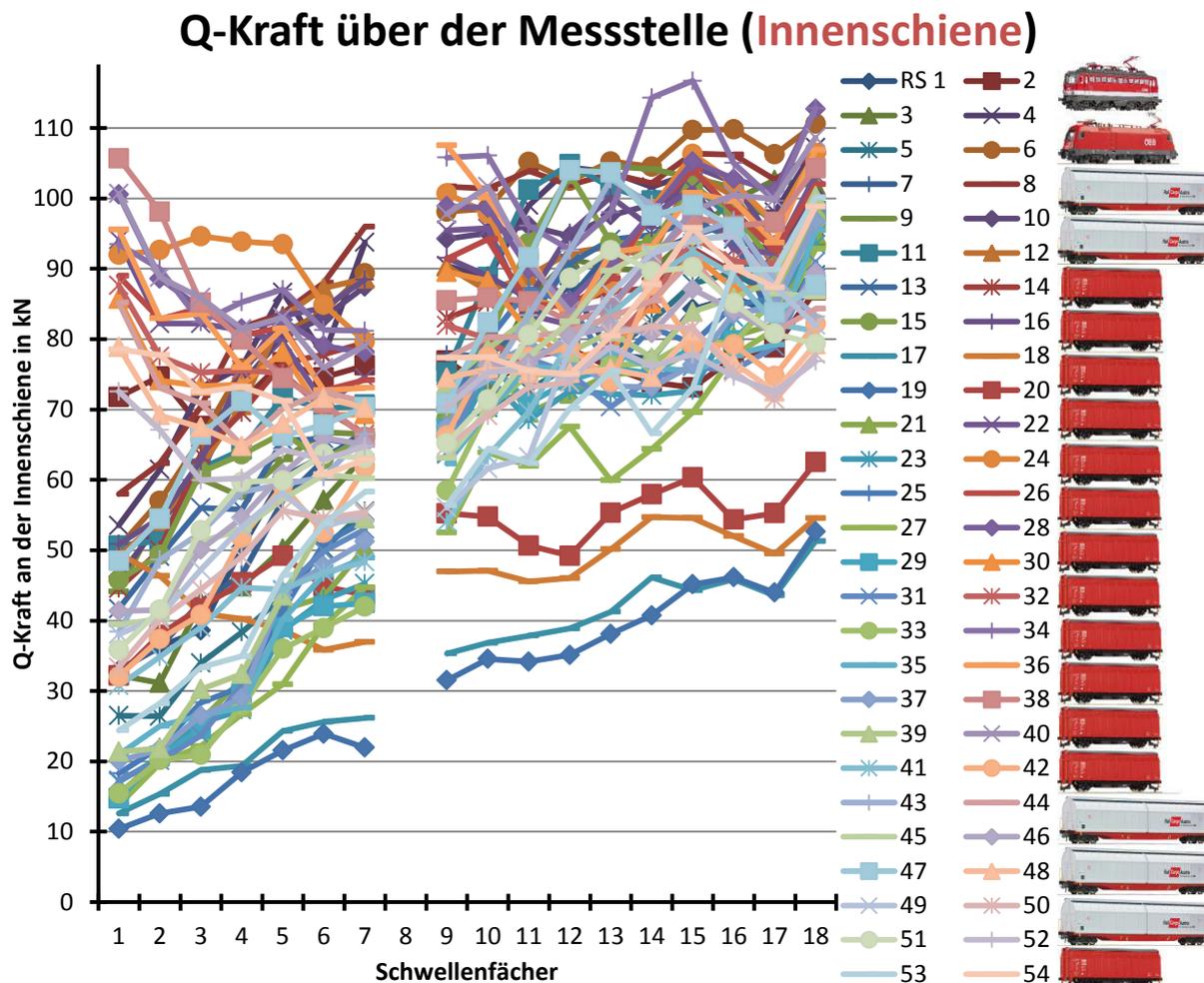


Abbildung 55: Q-Kraft an der Außenschiene über der Messstelle, Güterzug (Fahrzeugbilder: [33], [34], [35], [36])



**Abbildung 56: Q-Kraft an der Innenschiene über der Messstelle, Güterzug
(Fahrzeugbilder: [33], [34], [35], [36])**

Aufgrund des sehr inhomogenen Wagenmaterials und der unterschiedlichen Beladung ergeben sich erwartungsgemäß sehr stark streuende Kraftverläufe. An der Außenschiene fallen in Abbildung 55 die beiden unbeladenen zweiachsigen Wagons auf, da diese deutlich geringere Aufstandskräfte erzeugen. Die beiden Lokomotiven an der Zugspitze erzeugen Aufstandskräfte in der Größenordnung der beladenen Güterwagons und gehen daher in den Kurvenscharen unter.

An der Innenschiene sind in Abbildung 56 die beiden unbeladenen zweiachsigen Wagons auch hier mit den geringsten Aufstandskräften ersichtlich.

Die Y-Kräfte sind in den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 57 und Abbildung 58) ersichtlich.

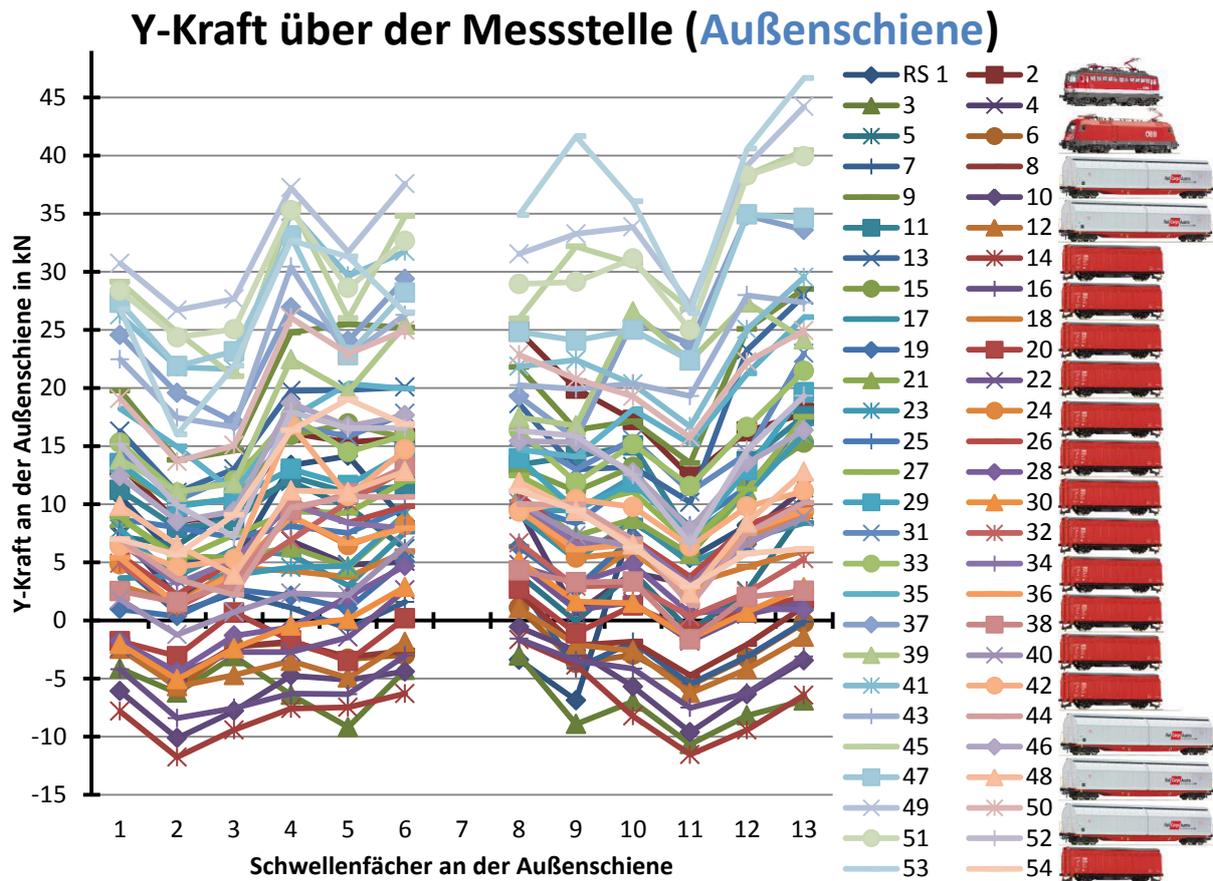


Abbildung 57: Y-Kraft an der Außenschiene über der Messstelle, Güterzug (Fahrzeugbilder: [33], [34], [35], [36])

An der Außenschiene sind die Y-Kräfte wieder ähnlich wie bei dem schon betrachteten Railjet-Zug nach vorlaufendem und nachlaufendem Radsatz gruppiert. Die vorlaufenden Radsätze (Farbgruppe grün/blau) erreicht höhere Kräfte, während die nachlaufenden Radsätze sich im Bereich um $Y = 0$ kN befinden. Dies gilt nicht für die zweiachsigen Güterwagons, diese erreichen Kraft-Bereiche zwischen -10 und +20 kN Y-Kraft.

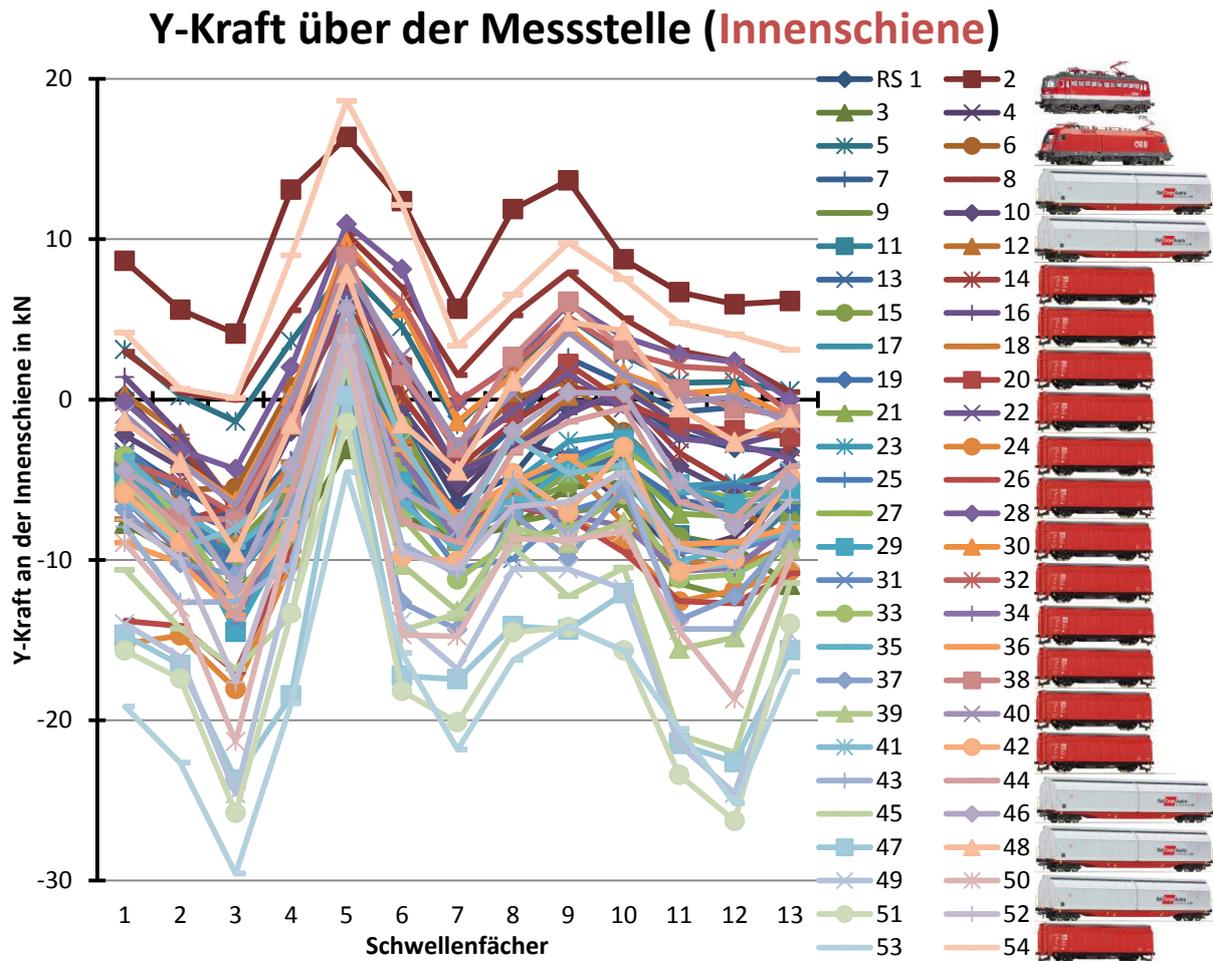


Abbildung 58: Y-Kraft an der Innenschiene über der Messstelle, Güterzug (Fahrzeugbilder: [33], [34], [35], [36])

Abbildung 58 lässt den bereits vorne beschriebenen wellenartigen Kraftverlauf der Y-Kraft an der Innenschiene auch bei diesem Güterzug erkennen, wenn auch nicht bei allen Radsätzen in gleich starker Ausprägung. So gibt es Radsätze die sich durchwegs im negativen bzw. positiven Y-Kraftbereich befinden und einen geringen wellenförmigen Kraftverlauf aufweisen. Die beiden unbeladenen zweiachsigen Güterwagen sind hier nicht mehr aufzufinden, erreichen also sehr ähnliche Kraftverläufe wie die beladenen zweiachsigen bzw. die vierachsigen Wagons. Durch die um ca. 10 km/h geringere mittlere Fahrgeschwindigkeit sieht man die schon beginnende Verschiebung des Mittelwertes der Kraftverläufe in Richtung negativer Y-Kräfte.

4. Schlussbetrachtung

In dieser Arbeit wurde versucht, die in mehrjährigem Einsatz einer Messstelle der ÖBB-Infrastruktur AG gesammelten Kraftmesswerte so aufzubereiten und zu analysieren, dass man den tatsächlichen Kräften zwischen dem Rad und der Schiene in einem engen Bogen nahekommt.

Neben der Erläuterung der zufälligen und systematischen Abweichungen der Messgrößen erfolgten die Auswertungen der Messdaten in mehreren Schritten.

Im Ersten Schritt wurden in Kapitel 3.3 die Kräfte statistisch über der ganze Messstelle betrachtet. Die Ergebnisse wurden sowohl fahrzeugspezifisch als auch nach dem Parameter der freien Seitenbeschleunigung aufgeschlüsselt dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, welche Kräfte einzelnen Fahrzeugarten unter bestimmten Betriebsbedingungen im Durchschnitt zugeordnet werden können. Dadurch bekommt man einen Überblick, wie die Schienen durchschnittlich belastet werden. Auch gab es erste Hinweise auf noch unklar erscheinende Ergebnisse.

In Zweiten Schritt wurden in Kapitel 3.4.2 die relativen Häufigkeiten für die Y- und Q-Kräfte im gleichen Belastungsquerschnitt der Schiene betrachtet. Man kann an den gezeigten Diagrammen erkennen, wie groß die Häufigkeit des Auftretens einer bestimmten Y- und Q-Kräftepaarung ist. Diese Häufigkeiten stellten die wichtigen Ergebnisse für eine Betrachtung hinsichtlich der Lebensdauerabschätzung der Schienen dar. Je nachdem, wie oft bei besonders hohen Q-Kräften eine hohe Y-Kraft auftritt, kann sich die Liegedauer einer Schiene bzw. die Häufigkeit der Nacharbeitung entscheidend verändern.

Weiters konnten auf Basis der Parametervariationen der Radsatzlast und der Fahrgeschwindigkeit Abschätzungen getroffen werden, um wie viel in Zukunft Fahrzeuge mit Radsatzlasten um 25 t langsamer fahren müssen, damit die Belastung auf die Schienen bei sonst gleichen konstruktiven Parametern gleich groß ist wie bei der Überfahrt eines Fahrzeuges mit 22,5 t Radsatzlast. Die angegebene Reduktion der Fahrgeschwindigkeit um 10 km/h inklusive der Berücksichtigung der Unsicherheit bei der Extrapolation ist, wie schon angegeben, unter den getroffenen Annahmen für einen engen Bogen eine zutreffende Empfehlung.

Darüber hinaus haben die schwellenfachspezifisch vorliegenden Messdaten einen Einblick geben können, wie die tatsächlichen Verläufe der Aufstands- und Seitenführungskraft in einem engen Bogen aussehen. Die Ergebnisse in Kapitel 3.4.4 sind schlüssig bis überraschend ausgefallen. Vor allem die wellenförmigen Y-Kraftverläufe an der Innenschiene sind genau betrachtet worden, waren diese doch nicht in dieser Form erwartet worden.

Die vorliegenden Ergebnisse der tatsächlichen Belastung der gleichzeitig auftretenden Y- und Q-Kraft an Schienenquerschnitten in einem engen Bogen können nun als Eingangsgröße für die Festigkeitsberechnung von Schienen z.B. in Form einer Finite Elemente-Berechnungen herangezogen werden. Damit wird eine genauere Lebensdauerabschätzung der Schienen ermöglicht, als unter der Verwendung bisheriger Lastannahmen.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Norm: EN 14363:2016, Bahnanwendungen – Versuche und Simulationen für die Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften von Eisenbahnfahrzeugen - Fahrverhalten und stationäre Versuche, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [2] Bildmaterial des Autors
- [3] Mittermayr, P., Maicz, D., Zottl, W.: Argos® - Ein Jahrzehnt Betriebserfahrung in der ortsfesten Zugsüberwachung, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau (62) 3/2013
- [4] Website: <https://www.bing.com/maps>, Satellitenaufnahme von BING maps © Microsoft, aufgerufen am 8.11.2016
- [5] Norm: EN 13674-1:2011, Bahnanwendungen – Oberbau – Schienen – Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [6] ÖBB interne Quellen, wie: nichtöffentliche Forschungsergebnisse, interne Richtlinien, Bild- und Datenmaterial zu Messfahrten und Erfahrungen/Meinungen von Fachexperten der betreffenden Abteilungen
- [7] Website: <https://de.wikipedia.org/wiki/Semmeringbahn>, aufgerufen am 29.10.2016
- [8] Website: <http://members.nanet.at/jirout/index.htm>, Informationsseite zur Semmeringbahn, aufgerufen am 29.10.2016
- [9] Website: http://austria-forum.org/af/Wissenssammlungen/Biographien/Ghega_Karl_Ritter_von, Austria-Forum, Abbildung © Ch. Brandstätter Verlag, Wien, für AEIOU, aufgerufen am 23.11.2016
- [10] Website: <http://www.n-line.at/test/?p=663>, Harry's Eisenbahnseiten, Abbildung © Harald Nauschnegg, aufgerufen am 17.11.2016
- [11] Schuhböck, C. (Herausgeber): Alliance for Nature - Österreichs Welterbe – Kulturdenkmäler und Landschaften unter dem Schutz der UNESCO, Verlag Christian Brandstätter, Wien, 1. Auflage, 2002
- [12] Roßmanith, S.: Vision und Realität in der Entwicklung des Verkehrswesens in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts, dargestellt an den Veröffentlichungen des ÖIAV und anderer zeitgenössischer Quellen, Diplomarbeit, Universität Wien, 1998
- [13] Stephanides, J., Presle, G., Mittermayr, P., Zottl, W.: Örtliche Messstellen des Zuglaufes – Stand der Technik, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau (58) 12/2013
- [14] Matthews, V.: Bahnbau, B.G. Teubner Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 7. Auflage, 2007

- [15] Lichtberger, B.: Handbuch Gleis, DVV Media Group GmbH | Eurailpress, Hamburg, 3. Auflage, 2010
- [16] Fendrich, L.; Fengler, W. (Herausgeber): Handbuch Eisenbahninfrastruktur, Springer Vieweg-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2. Auflage, 2013
- [17] Europäischen Kommission: Verordnung der Kommission über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge – Lokomotiven und Personenwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union, Amtsblatt der Europäischen Union (2014/1302/EG), Brüssel, 2014
- [18] Europäischen Kommission: Entscheidung der Kommission über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge“ des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems, Amtsblatt der Europäischen Union (2008/232/EG), Brüssel, 2008
- [19] ORE Frage C 138, Zulässige Höchstwerte der Y- und Q-Kräfte und Entgleisungskriterien, Forschungs und Versuchsamt des Internationalen Eisenbahnverbandes, Utrecht, 1986
- [20] Zimmermann H.: Berechnung des Eisenbahnoberbaues, Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin, 3. Auflage, 1941
- [21] Dörr, J.: Der unendliche gebettete Balken unter dem Einfluss einer gleichförmig bewegten Last, Ingenieur-Archiv Band XIV, 1943
- [22] Fastenrath, F.: Die Eisenbahnschiene, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, München, Düsseldorf, 1977
- [23] Eisenmann, J.: Beanspruchung der Schiene als Träger, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau (18) 8/1969
- [24] Eisenmann, J.: Theoretische Betrachtung über die Beanspruchungen des Schienenkopfes am Lastangriffspunkt, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau (14) 1/1965
- [25] Eisenmann, J.: Schienenkopfbeanspruchung: Vergleich zwischen Theorie und Praxis, ETR - Eisenbahntechnische Rundschau (16) 10/1967
- [26] Schramm, G.: Oberbautechnik – Oberbauwirtschaft, Verlag Otto Ernst, 1973
- [27] Fricke, H.: Asymmetrische Schienenprofile, EI – Der Eisenbahningenieur (36) 9/1985
- [28] Jörg, A.: Ein Beitrag zur Bewertung der Bruchsicherheit von Eisenbahnschienen, Dissertation, Technische Universität Graz, 2010
- [29] Esveld, C.: Modern Railway Track (Second Edition), MRT-Productions, Zaltbommel (Niederlande), 2001
- [30] Website: <http://www.fahrgast.at/ioebbpl2.jpg>, Fahrgast - Die österreichische Fahrgastvertretung, aufgerufen am 13.12.2016
- [31] Die ÖBB in Zahlen – Österreich besser bewegen – Zahlen Daten Fakten (Broschüre), ÖBB Holding AG, 2. Auflage, 2015

- [32] Website: http://www.modellbahnshop-lippe.com/article_data/images/81/223273_b.jpg, aufgerufen am 31.3.2017
- [33] Website: http://www.modellbau-wiki.de/wiki/Datei:Roco_62589.jpg, Bild von ÖBB 1142, © Roco, aufgerufen am 22.3.2017
- [34] Website: http://www.modellbau-wiki.de/wiki/Datei:1016_004-2_Roco63676.jpg, Bild von ÖBB 1016, © Roco, aufgerufen am 22.3.2017
- [35] Website: http://www.modellbau-wiki.de/wiki/Datei:Roco_67560.jpg, Bild von vierachsigem Güterwagen, © Roco, aufgerufen am 22.3.2017
- [36] Website: http://www.modellbau-wiki.de/wiki/Datei:Roco_37540_Hbillns_DB_AG_01_80_245_7_512-0.jpg, Bild von zweiachsigem Güterwagen, © Roco, aufgerufen am 22.3.2017
- [37] Website: www.wetteronline.de/wetter/semmering, aufgerufen am 30.1.2017

6. Formelverzeichnis

Formel (1)	Schwerpunktsatz in Querrichtung	Seite 2
Formel (2)	Freie Seitenbeschleunigung	Seite 2
Formel (3)	Seitenneigung	Seite 3
Formel (4)	Überhöhungsfehlbetrag	Seite 3
Formel (5)	Neigung bei ausgeglichener Seitenbeschleunigung	Seite 3
Formel (6)	Grenzwert Summe Y Gleisverschiebekraft	Seite 4
Formel (7)	Y/Q-Grenzwert	Seite 5
Formel (8)	Mittelwert	Seite 26
Formel (9)	Standardabweichung	Seite 26
Formel (10)	Genauigkeit	Seite 27
Formel (11)	Beurteilungsgröße V zur Abschätzung der Abweichungen	Seite 46

7. Abkürzungsverzeichnis

$2Q_0$	statische Radsatzlast
4DGF-18	vierachsiges Drehgestellfahrzeug mit 1,8 m Achsstand
4DGF-25	vierachsiges Drehgestellfahrzeug mit 2,5 m Achsstand
Δv	Geschwindigkeitsdifferenz zwischen schnellstem und langsamstem Radsatz eines Zuges bei der Überfahrt über die Messstelle
Abk.	Abkürzung
AS	Aufmerksamkeitsschwelle
BIS	Betriebliches Informationssystem
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CSV	comma-separated values, Dateiformat mit Beistrich getrennten Werten
d.h.	das heißt
DB	Deutsche Bahn
DMS	Dehnmessstreifen
EN	europäische Norm
ES	Eingriffsschwelle
GLG	Gleisgeometrie (Soll-Wert der Krümmung oder Überhöhung aus den Streckenplänen)
min.	mindestens
NGO	Non-governmental organization, nichtstaatliche Organisation
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
oG/uG	oberer/unterer Grenzwert
ORE	Office de Recherches et d, Forschungs- und Versuchsamt des Internationalen Eisenbahnverbandes
rel.	relativ(e)
RFID	Radio Frequency Identification
RS	Radsatz
SDEV	Standard deviation, Standardabweichung
SES	Soforteingriffsschwelle
SFR	Schienenfußbrand
SNCF	Société Nationale des Chemins de fer Français, Nationale Gesellschaft der französischen Eisenbahnen
SOK	Schienenoberkante
STS	Stegrosette
SVA	Sachverständigen Ausschuss
Tfz.	Triebfahrzeug
TSI	Technische Spezifikationen für die Interoperabilität
UIC	Union Internationale des Chemins de fer, internationaler Verband von Eisenbahnunternehmen
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation, Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur
VzG	Verzeichnis örtlich zulässiger Geschwindigkeiten
z.B.	zum Beispiel

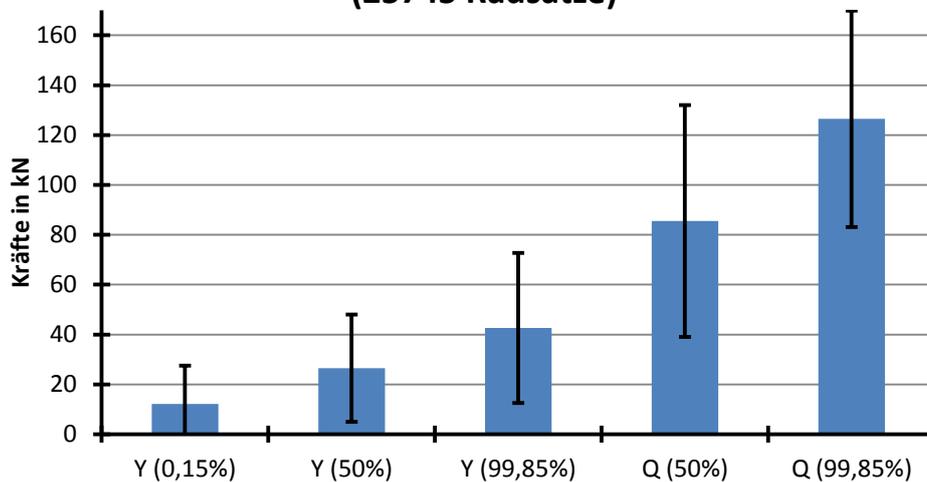
8. Anhang

8.1. Zusätzliche Diagramme von einer Woche im Juni 2016

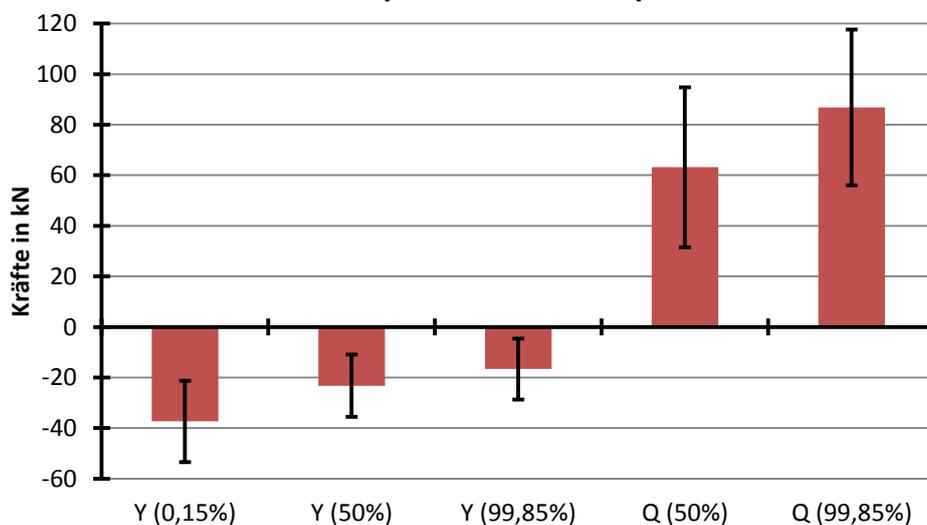
Für die 7 Tage 20. bis 26.6.2016 wurden dieselben Mittelwert-Betrachtungen erstellt, wie sie in Kapitel 3.3 für eine Woche im Oktober 2016 beschrieben sind. Die im Folgenden dargestellten Diagramme dienen zum Vergleich und zur Absicherung der Ergebnisse. Eine zusätzliche Interpretation wird nicht angegeben.

Die Wetterdaten für die nächstgelegene Wetterstation auf der Passhöhe Semmering zeigen für die sieben Tage 20. bis 26.6.2016 folgendes: mittlere Tageshöchsttemperatur: 22,9 °C, mittlere Tagestiefsttemperatur: 13 °C, Gesamter Niederschlag in den sieben Tagen: 34 mm, mittlere relative Luftfeuchtigkeit: 81% [37]

Belastung auf die **Außenschiene** (25745 Radsätze)



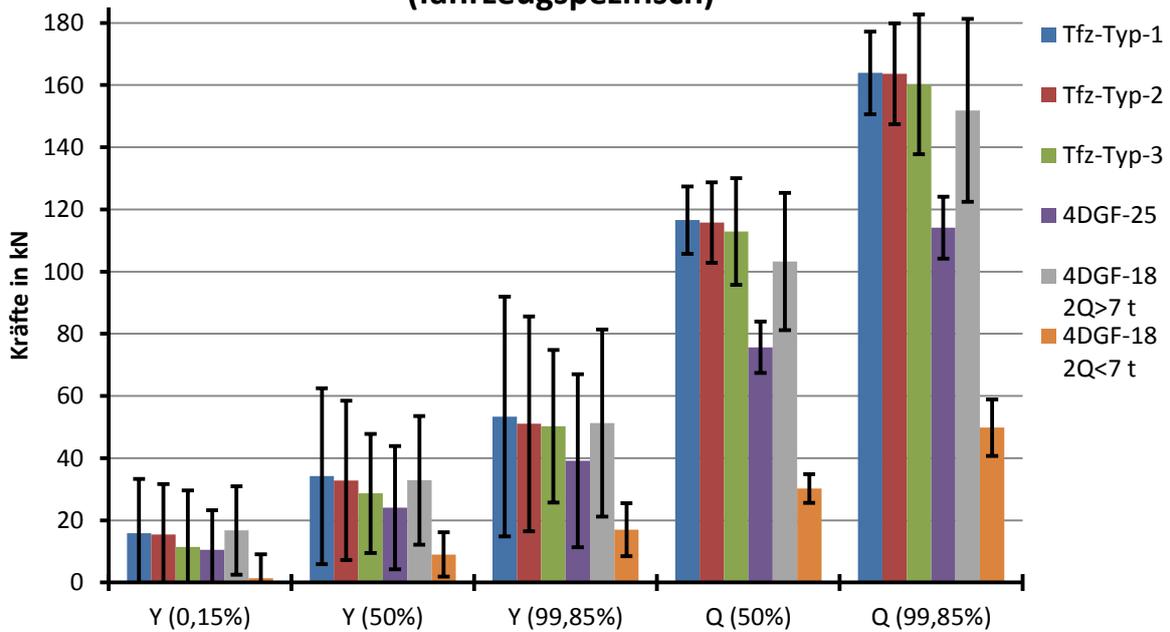
Belastung auf die **Innenschiene** (25745 Radsätze)



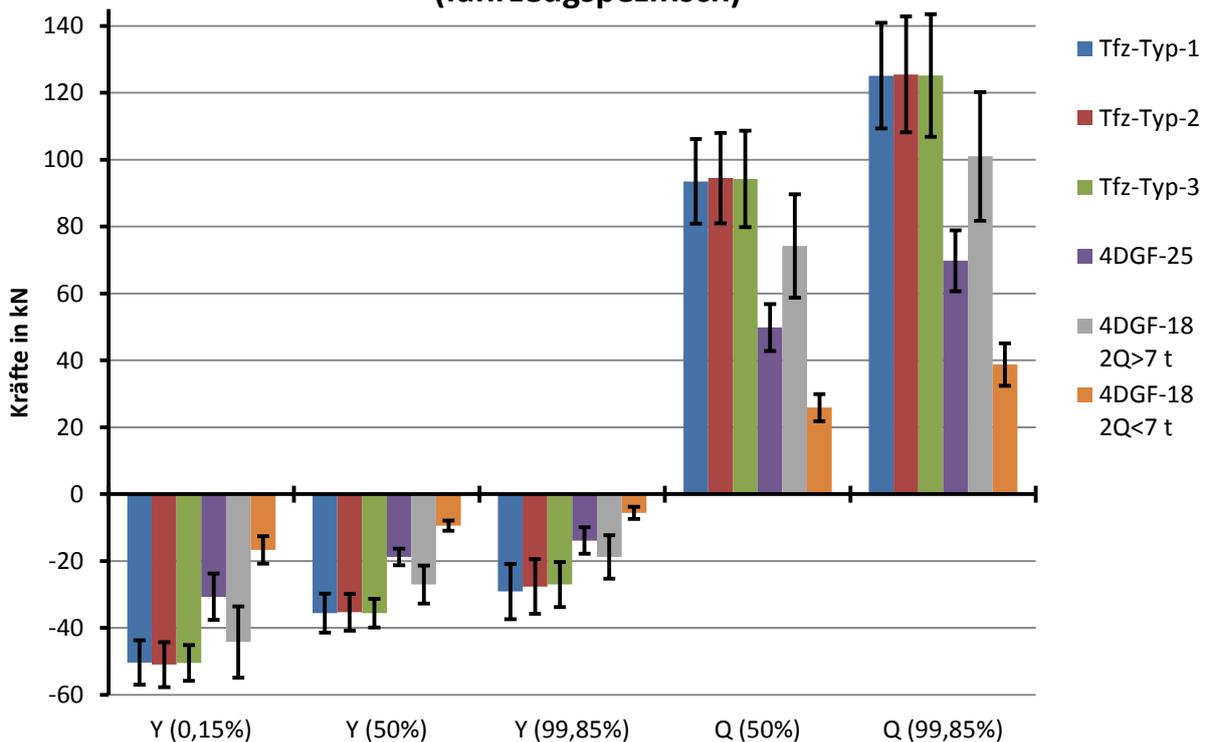
Datenbasis für die nachfolgenden drei Diagramme:

Fahrzeugart	Tfz-Typ-1	Tfz-Typ-2	Tfz-Typ-3	4DGF-25	4DGF-18 2Q ₀ < 7 t	4DGF-18 2Q ₀ > 7 t
Anzahl der gemessenen Achsen	1334	1100	512	4758	1622	11050

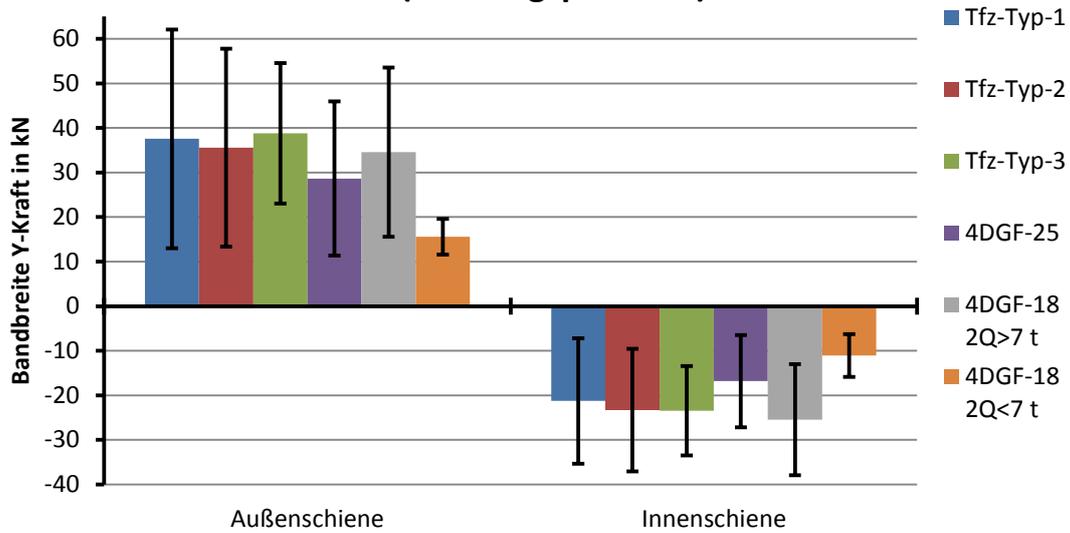
Belastung auf die Außenschiene (fahrzeugspezifisch)



Belastung auf die Innenschiene (fahrzeugspezifisch)



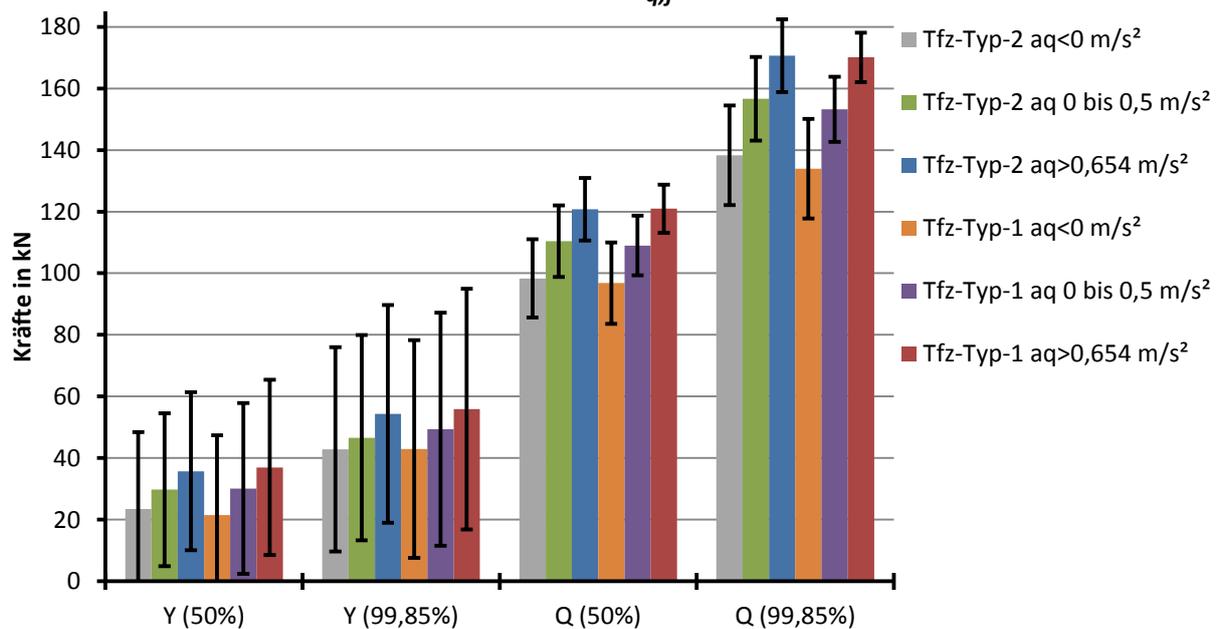
Bandbreite der Y-Kraft (fahrzeugspezifisch)



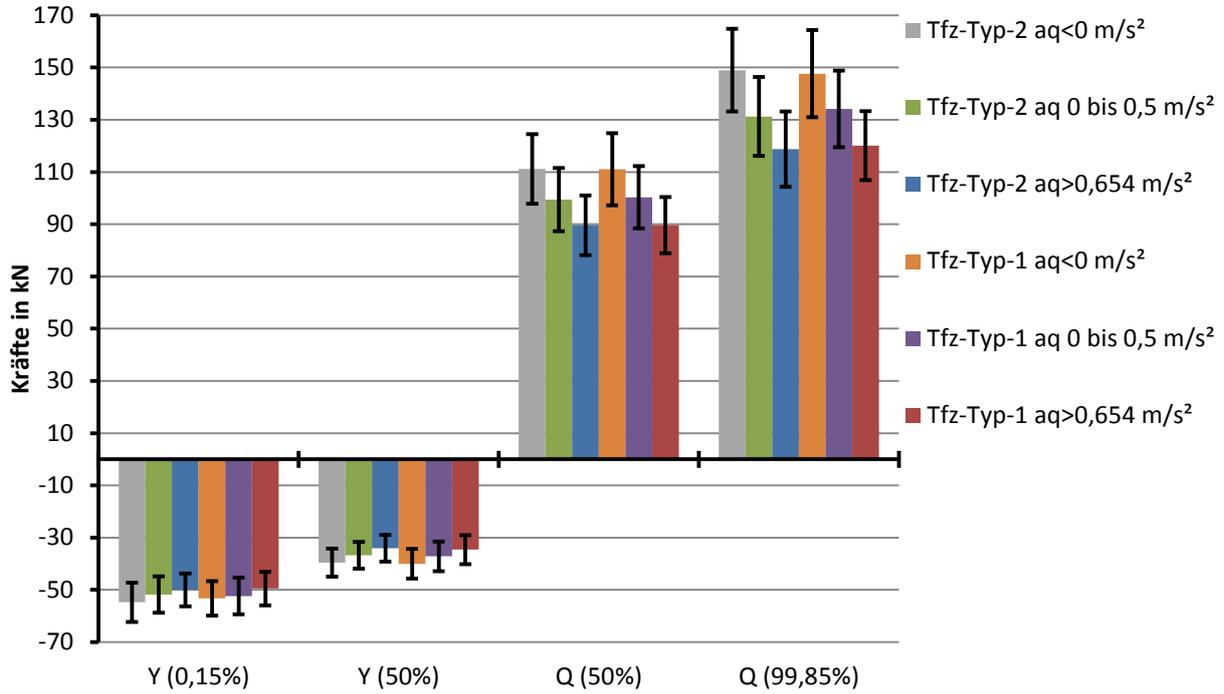
Datenbasis für die zwei nachfolgenden Diagramme

Fahrzeugart	Tfz-Typ-1			Tfz-Typ-2		
	$a_{q,f} < 0$ m/s ²	$0 < a_{q,f} < 0,5$ m/s ²	$a_{q,f} > 0,654$ m/s ²	$a_{q,f} < 0$ m/s ²	$0 < a_{q,f} < 0,5$ m/s ²	$a_{q,f} > 0,654$ m/s ²
freie Seitenbeschleunigung						
Anzahl der gemessenen Achsen	68	264	792	100	256	560

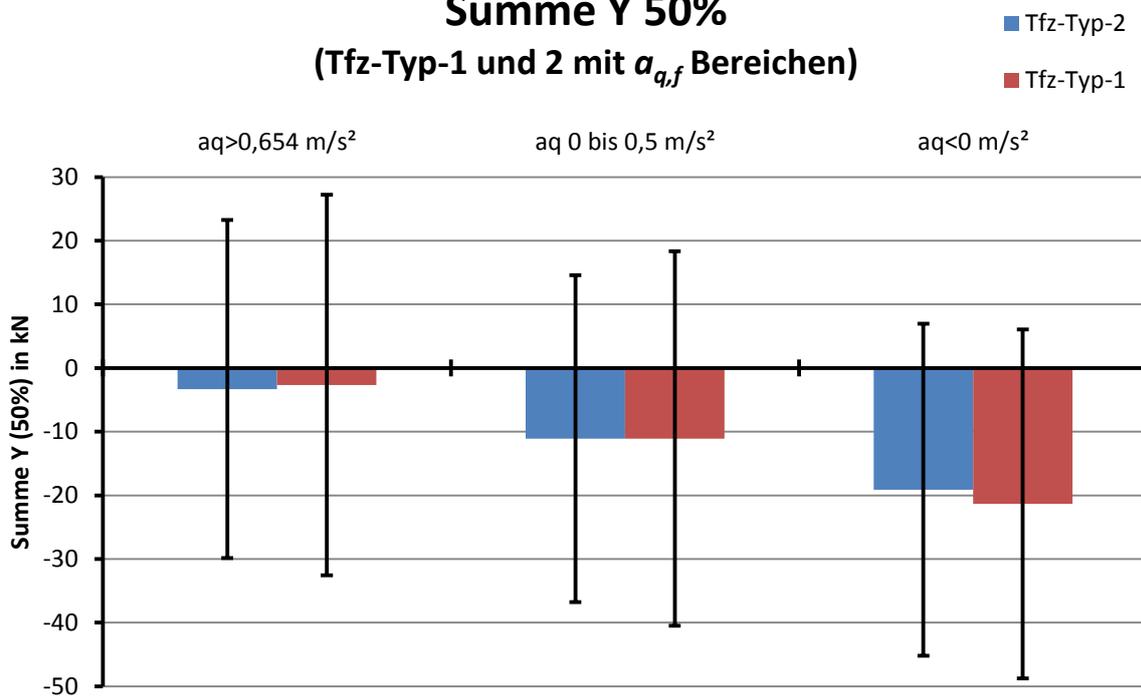
Belastung auf die Außenschiene (Tfz-Typ-1 und 2 mit $a_{q,f}$ Bereichen)



Belastung auf die **Innenschiene** (Tfz-Typ-1 und 2 mit $a_{q,f}$ Bereichen)



Summe Y 50% (Tfz-Typ-1 und 2 mit $a_{q,f}$ Bereichen)



8.2. Absolute Häufigkeiten zu den Diagrammen in Kapitel 3.4.2

Hier werden in Tabellen die absoluten Häufigkeiten der in Kapitel 3.4.2 dargestellten Diagramme wiedergegeben.

Abbildung 40, Radsatzlast

Radsatzlast in t	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5
Abs. Häufigkeit	36	85	167	517	750	777	504	334	262	268
	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5
	292	303	268	198	278	405	1050	2322	1492	888
	14	14,5	15	15,5	16	16,5	17	17,5	18	18,5
	620	397	532	520	524	603	704	800	846	896
	19	19,5	20	20,5	21	21,5	22	22,5	23	23,5
	886	867	849	881	1265	1420	1362	966	376	95
	24	24,5	25							
	17	4	6							

Abbildung 41, Q-Kraft **Außenschiene**

Klasse in kN	Abs. Häufigkeit
10	429
20	1729
30	14120
40	27871
50	18321
60	18293
70	31359
80	51411
90	39081
100	31970
110	37442
120	41593
130	36588
140	24667
150	13972
160	6877
170	2889
180	950
190	167
200	28
210	2

Abbildung 42, Q-Kraft **Innenschiene**

Klasse in kN	Abs. Häufigkeit
10	2113
20	23928
30	55078
40	65567
50	92944
60	70296
70	50888
80	45217
90	31662
100	16056
110	5245
120	1501
130	525
140	176
150	57
160	11

Abbildung 44, Y-Kraft **Außenschiene**

Klasse in kN	Abs. Häufigkeit
-60	2
-50	4
-40	11
-30	48
-20	287
-10	2618
0	52172
10	103142
20	68859
30	49959
40	28798
50	9844
60	1744
70	198
80	4

Abbildung 45, Y-Kraft **Innenschiene**

Klasse in kN	Abs. Häufigkeit
-45	1
-40	7
-35	28
-30	234
-25	1040
-20	4539
-15	12397
-10	31630
-5	77112
0	118732
5	63697
10	17539
15	8111
20	1490
25	254
30	110
35	37
40	6
45	1

Abbildung 46, Y/Q **Außenschiene**

Klasse	Abs. Häufigkeit
0,05	74956
0,1	58185
0,15	38067
0,2	34588
0,25	35068
0,3	29173
0,35	20128
0,4	12771
0,45	7308
0,5	3683
0,55	1765
0,6	921
0,65	389
0,7	175
0,75	89
0,8	52
0,85	28
0,9	15
0,95	4
1	4
>1	321

Y/Q **Innenschiene**

Klasse	Abs. Häufigkeit
0,05	95688
0,1	73675
0,15	51135
0,2	35844
0,25	24551
0,3	15544
0,35	9154
0,4	4977
0,45	2902
0,5	2122
0,55	1381
0,6	728
0,65	353
0,7	206
0,75	168
0,8	105
0,85	62
0,9	31
0,95	32
1	22
>1	236

Abs. Häufigkeit zu den Diagrammen des Auftretens von Y- und Q-Kraft an der **Außenschiene** in Abbildung 47 und Abbildung 48

		Q-Kraft in kN																		
		<10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
Y-Kraft in kN	-40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-20	0	1	6	0	1	10	18	43	42	73	69	22	2	0	0	0	0	0	0
	-10	21	30	113	66	106	304	493	267	287	360	352	156	38	24	1	0	0	0	0
	0	221	775	4312	5322	3068	3813	8196	8576	3198	3348	4362	4154	1988	570	170	65	31	3	0
	10	188	473	5086	10107	5699	5227	8233	16614	8346	8086	9400	10058	8492	4228	1643	812	356	90	4
	20	17	50	1498	6041	4768	3229	4138	9506	7689	4647	5749	6503	6431	4680	2485	993	331	82	19
	30	2	1	38	427	1112	1385	1938	5189	8089	5018	5238	6057	6112	4616	2685	1368	523	129	25
	40	1	1	0	3	32	151	340	1357	2907	2584	2994	3894	4620	4262	2911	1560	818	303	53
	50	0	0	0	0	0	0	13	116	506	715	869	1384	1672	1843	1305	733	418	221	43
	60	0	0	0	0	0	0	0	0	12	35	64	143	294	501	375	191	76	35	12
70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	21	59	76	31	6	0	0	

Abs. Häufigkeit zu den Diagrammen des Auftretens von Y- und Q-Kraft an der **Innenschiene** in Abbildung 49 und Abbildung 50

		Q-Kraft in kN													
		<10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Y-Kraft in kN	-40	0	0	0	0	0	0	1	3	2	1	1	0	0	0
	-30	0	0	0	0	6	25	65	39	31	45	25	16	5	4
	-20	1	0	12	252	666	756	823	1047	993	663	229	73	38	13
	-10	12	181	1747	4686	7655	7387	6896	6987	4910	2248	731	296	145	49
	0	406	9290	28142	29841	39813	28905	19859	17728	11701	5758	2253	629	149	54
	10	276	4155	8341	10365	15157	9524	6268	6240	5371	3620	896	88	14	1
	20	11	231	507	708	728	365	479	526	371	73	7	0	0	0
30	0	0	1	0	2	36	97	89	19	3	1	0	0	0	
40	0	0	0	0	0	3	7	2	0	0	0	0	0	0	