

**ANSÄTZE ZUR EFFIZIENTEN VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND
AUTOMATISIERTEN EVALUIERUNG BEI FAHRTECHNISCHEN
VERSUCHEN AN SCHIENENFAHRZEUGEN NACH EN 14363**

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades Diplom-Ingenieur

vorgelegt von: Lorenz Pietsch
Begutachter: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Veit
(TU Graz, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft)
Betreuer: Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Joch
(PJ Messtechnik GmbH)

Graz, im September 2012

Eidesstattliche Erklärung

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

Graz, am

(Unterschrift)

Statutory Declaration

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

date

(signature)

Kurzfassung

In dieser Arbeit soll das Thema fahrtechnischer Versuche an Schienenfahrzeugen nach der europäischen Norm EN 14363 behandelt werden. Die EN 14363 regelt die Versuche, welche im Rahmen der Fahrzeugzulassung zu absolvieren sind. Zuerst wird ein Überblick der EN 14363 gegeben und wichtige Themenbereiche werden detaillierter besprochen. Dann wird der Ablauf von Streckenversuchen in der Praxis analysiert und die dabei entstehenden Anforderungen für eine automatisierte Evaluierungsroutine aufgezeigt. Als nächstes wird die Erstellung einer solchen Routine dokumentiert und die Funktionen der einzelnen Module Schritt für Schritt erklärt. Anschließend wird die Praxiserprobung der automatisierten Evaluierung mittels realer Testdaten beleuchtet. Außerdem wird eine Validierung der Auswerterroutine durchgeführt indem die erhaltenen Resultate mit schon vorhandenen, gültigen Ergebnissen verglichen werden. Schließlich werden noch zukünftige Verbesserungsmöglichkeiten und im Zuge der Arbeit gewonnene Erkenntnisse präsentiert.

abstract

This thesis covers the topic of testing of running behaviour of railway vehicles according to the european standard EN 14363. The EN 14363 governs the testing for the acceptance of running characteristics of railway vehicles. At first an overview of the standard is given and important topics of the standard are discussed in detail. Then the process of on-track tests in practice is analysed and the arising requirements for an automated evaluation routine are shown. Next the creation of this evaluation routine is documented and the mode of operation of the modules of the routine is described. Afterwards field tests of the automated evaluation are conducted. In addition the evaluation routine is validated by comparing its results with existing, already validated results. Finally the future potential for improvement and findings in the course of work are presented.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Geltende Regelwerke - Die EN 14363	4
2.1	Entstehung der EN 14363	4
2.2	Anwendungsbereich der EN 14363	6
2.3	Stationäre Prüfungen der EN 14363	7
2.3.1	Sicherheit gegen Entgleisen beim Befahren der Gleisverwindungen	7
2.3.2	Sicherheit gegen Entgleisen unter Längskrafteinfluss in S-Bögen .	10
2.3.3	Prüfung des Wankverhaltens	10
2.3.4	Prüfung des Ausdrehwiderstands zwischen Drehgestell und Wa- genkasten	11
2.3.5	Messung der statischen Radkraft	11
2.4	Dynamische Prüfungen - Streckenversuche	11
2.4.1	Arten der Streckenversuche	11
2.4.2	Arten der Messverfahren	12
2.4.3	Beurteilungsgrößen	13
2.4.4	Grenzwerte der Beurteilungsgrößen	15
2.4.5	Definition des Überhöhungsfehlbetrages	19
3	Praktische Umsetzung	23
3.1	Analyse der Situation	23
3.1.1	Versuchsplanung	23
3.1.2	Auswahl und Installation der Sensorik	27
3.1.3	Überprüfung der Messtechnik	31
3.1.4	Durchführung der Streckenversuche	33
3.2	Zielsetzung der Arbeit	34
3.3	Erstellung der Funktionsmodule	36
3.3.1	Eingabe	36
3.3.2	Berechnung der Krümmung der Strecke	39
3.3.3	Bildung der Auswertungsabschnitte	39
3.3.4	Vorabkontrolle der Auswertungsabschnitte	44
3.3.5	Filterung und Aufbereitung der Beurteilungsgrößen	48

3.3.6	Statistische Bewertung der Beurteilungsgrößen	55
3.3.7	Ausgabe und grafische Darstellung	73
3.4	Testen und Optimieren der Algorithmen	74
4	Ergebnisse	79
4.1	Ergebnisse - Eingabe	79
4.2	Ergebnisse - Krümmungsberechnung	80
4.3	Ergebnisse - Unterteilung der Vollbögen, Übergangsbögen und Geraden .	80
4.4	Ergebnisse - Abschnittsbildung	81
4.5	Ergebnisse - Kontrolle der Abschnitte auf a_Q und V	82
4.6	Ergebnisse der Bewertung der Beurteilungsgrößen	82
5	Erkenntnisse und Ausblick	83
Anhang A	- Tabellen und Diagramme der EN 14363	92
Anhang B	- Anforderungen an Sensoren	97
Anhang C	- Beispiele und Messschriebe	100
Anhang D	- Ergebnisse einer vollständigen Auswertung	104

1 Einleitung

Das System Eisenbahn zählt zu den spurgebundenen Verkehrsmitteln, das bedeutet die Aufgabe der Spurführung wird durch das technische Zusammenspiel von Fahrzeug und Gleiskörper übernommen. Das System Rad/Schiene ist somit ein charakteristisches Element jedes Schienenfahrzeugs. Die Aufgaben des Systems Rad/Schiene lassen sich nach [Knothe und Stichel, 2003] in drei Funktionen einteilen:

- Tragfunktion
- Führungsfunktion
- Antriebsfunktion und Bremsfunktion

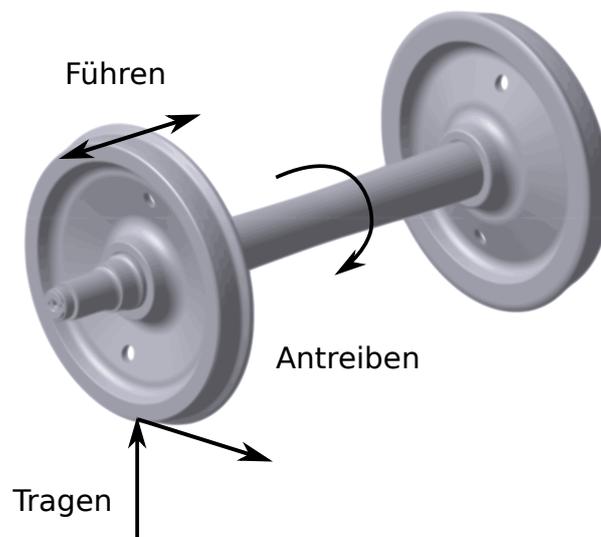


Abbildung 1.1: Aufgaben des Systems Rad/Schiene

Wie in Abbildung 1.1, S. 1 erkennbar, beschreibt die Tragfunktion das Abstützen des Fahrzeuggewichtes auf den Schienen. Als Führungsfunktion wird die Spurführung an sich bezeichnet, durch welche das Fahrzeug der Trassierung der befahrenen Strecke folgt. Nicht weniger wichtig sind die Antriebsfunktion und die Bremsfunktion, welche die Übertragung der Antriebskräfte und der Bremskräfte sicherstellen. Diese essentiellen Aufgaben sind Kernpunkte des Rad/Schiene Kontaktes und müssen jederzeit erfüllt sein, um einen sicheren Betrieb zu garantieren.

Wie in vielen Bereichen der Technik, in denen das Versagen der Funktion eines Systems zur Gefährdung der Betriebssicherheit führen kann, untersteht auch der Schienenverkehr strengen Auflagen die zur Sicherheit beitragen. Der Verkehr auf der Schiene hat auf Grund der zahlreichen Sicherheitsvorkehrungen und anderen systembedingten Sicherheitsmechanismen schon jetzt, im Vergleich zu anderen Verkehrsarten, ein relativ hohes Verkehrssicherheitsniveau erreicht. Zum Erhalt dieses hohen Sicherheitsniveaus und Zuverlässigkeitsniveaus im Eisenbahnverkehr ist es notwendig, neue Fahrzeuge vor ihrer Verwendung im Fahrbetrieb nach den vorgeschriebenen Regelwerken auf ihre Sicherheit zu überprüfen.

Dieser Fahrzeugzulassungsvorgang ist durch Regelwerke festgelegt. Die Zulassung zum Verkehr ist notwendig um Eisenbahnfahrzeuge auf einem bestimmten Streckennetz im Fahrbetrieb einsetzen zu können. Ein wichtiger Teil des Zulassungsprozederes ist die fahrtechnische Prüfung des dynamischen Verhaltens eines Fahrzeuges. Dabei werden speziell die Fahrsicherheit (Entgleisungssicherheit), die Beanspruchung des Fahrwegs, sowie der Fahrkomfort des Fahrzeuges geprüft. Schon während der fahrdynamischen Auslegung eines neuen Schienenfahrzeuges muss, im Hinblick auf die Zulassungsfähigkeit des Fahrzeuges, auf die fahrtechnische Prüfung Rücksicht genommen werden. Hierbei kann mittels Werkzeugen wie Mehrkörper-Simulations Programmpaketen schon früh im Entwicklungsprozess die Fahrdynamik optimiert werden. Neue Regelungen in den Normen (z.B. EN 14363:2010, Anhang B) erlauben mittlerweile auch schon einen teilweisen Ersatz der Messdaten durch Simulationsdaten. Von dieser Möglichkeit wird beispielsweise in Großbritannien schon seit längerer Zeit Gebrauch gemacht und sie wird in Zukunft auch im europäischen Raum sicher noch stärker genutzt werden, da so die Dauer der kostenintensiven Streckenversuche verkürzt werden kann.

Bei Neubeschaffungen durch Eisenbahnverkehrsunternehmen ist die Zulassung oft Teil des Vertrages, und daher von großer Wichtigkeit. Die eigentlichen Streckenversuche und die Evaluierung der erfassten Daten zur Beurteilung des dynamischen Fahrverhaltens, werden von unabhängigen Prüfstellen durchgeführt. Diese Prüfstellen sind zum Teil private Unternehmen, weiters gibt es aber sowohl bei Bahnen als auch bei Schienenfahrzeugherstellern eigene Abteilungen die sich diesen Aufgaben widmen. Prüfstellen welche eine Akkreditierung¹ nach EN ISO 17025 haben, sind durch folgende Formulierung in der Norm EN ISO 17025 verpflichtet unparteiisch zu sein.

“Wenn das Laboratorium als unabhängiger Dritter (third party) anerkannt werden möchte, sollte es in der Lage sein nachzuweisen, dass es unparteiisch ist und dass es

¹ *“Der Begriff Akkreditierung bedeutet die formelle Anerkennung der technischen Kompetenz zur Durchführung einer konkreten, im Geltungsbereich beschriebenen Dienstleistung.”*[ISO17025, 2007]

und sein Personal frei sind von jeglichen unzulässigen kommerziellen, finanziellen und sonstigen Einflüssen, die ihr technisches Urteil beeinträchtigen könnten. Das Prüf- oder Kalibrierlaboratorium als unabhängiger Dritter sollte sich nicht mit Tätigkeiten befassen, die das Vertrauen in die Unabhängigkeit der Beurteilung und in die Integrität bezüglich seiner Prüf- oder Kalibriertätigkeit gefährden könnten.” [ISO17025, 2007]

Der reibungslose Ablauf einer Zulassung setzt immer eine enge Zusammenarbeit aller drei Parteien (Schienenfahrzeughersteller, Bahnverwaltung und Prüfstelle) voraus. Das wird schnell klar wenn man sich den organisatorischen Aufwand vor Beginn der eigentlichen Versuche vor Augen führt. Es müssen Spezifikationen erstellt werden, Trassen und Traktion für die Versuchsfahrten sind zu reservieren, das Versuchsfahrzeug muss mit der benötigten Messtechnik ausgerüstet werden und viele andere Dinge sind zu beachten. Wie schon erwähnt gestalten sich die eigentlichen Streckenversuche als kostenintensiv. Das ist einer der Beweggründe das Versuchsprogramm zeitlich möglichst optimal zu gestalten.

Auf Grund dieser Vorgaben ist vorab eine genaue Planung des Versuchsprogramms unumgänglich. Diese beinhaltet sowohl die Streckenplanung und Trassenreservierung, als auch das Erstellen eines Geschwindigkeitsprofils mit dem die Abschnitte der Versuchsstrecke befahren werden müssen. Im weiteren Verlauf der Versuche, beziehungsweise im Anschluss daran ist eine zeitnahe Bewertung der bei den Versuchen erfassten Messdaten gefordert. In der Praxis ist es sogar notwendig schon während der Versuche, durch eine Vorab-Evaluierung der Daten, feststellen zu können ob denn schon genügend Abschnitte mit der passenden Kombination aus Geschwindigkeit und Überhöhungsfehlbetrag durchfahren wurden.

All diese Anforderungen lassen erkennen, dass eine schnelle, exakte und übersichtliche Evaluierung der bei den Versuchen erfassten Daten wichtig ist. Die dabei zu verarbeitende Menge an Daten und die hohen Anforderungen an die Genauigkeit der Evaluierung machen eine manuelle Verarbeitung der Daten schwierig. Aus diesen Gründen werden rechnergestützte Verfahren angewendet.

Das Ziel dieser Arbeit ist es Lösungsmöglichkeiten für die oben genannten Problemstellungen zu entwickeln. Dabei wird der theoretische Hintergrund, vor allem die mitgeltenden Normen und die Theorie der Spurführungstechnik, besprochen. In weiterer Folge wird die Vorgehensweise bei der Erstellung der Routinen und deren Funktion erklärt. Anschließend wird das Testen und die Validierung der Routinen an Hand eines konkreten Projektes beschrieben. Zuletzt werden die Erkenntnisse aus dieser Arbeit dargestellt und mögliche Entwicklungspotenziale aufgezeigt.

2 Geltende Regelwerke - Die EN 14363

Wie schon in der Einleitung erwähnt wird der Prozess der fahrtechnischen Zulassung durch Normen geregelt. Zu den in Mitteleuropa geltenden Regelwerken zählt im Wesentlichen die europäische Norm EN 14363:2010, die in Österreich durch die Anerkennung als ÖNORM EN 14363:2010 den Status einer nationalen Norm innehat.

2.1 Entstehung der EN 14363

Sie wurde von der WG 10 *Zusammenwirken Fahrzeug/Fahrweg* des Technischen Komitees CEN/TC 256 *Eisenbahnwesen* erarbeitet. Die EN 14363:2010 geht von vorhandenen Regeln, Verfahrensweisen und der Betriebspraxis aus. Folgende Grundsätze wurden bei der Erstellung angewendet [EN14363, 2010]:

1. *“Das System Eisenbahn setzt umfassende technische Regeln voraus, damit ein störungsfreies Zusammenwirken der Systemkomponenten Fahrzeug und Fahrweg sichergestellt werden kann.”*
2. *“Aufgrund zahlreicher nationaler und internationaler Regelwerke mussten bisher neue Eisenbahnfahrzeuge vor ihrer Inbetriebnahme immer geprüft und zugelassen werden. Zusätzlich mussten die Voraussetzungen für eine Erweiterung bestehender Zulassungen geprüft werden.”* (Anmerkung des Verfassers: Das soll nicht heißen, dass dies in der EN 14363:2010 nicht mehr so geregelt ist. Doch gibt es unter besonderen Umständen, wie z.B. Bauartgeschwindigkeit ≤ 60 km/h, Spezialfahrzeuge, nur geringfügige konstruktive Änderungen, usw., Möglichkeiten die Prüfungen in eingeschränktem Umfang durchzuführen oder sogar überhaupt darauf zu verzichten.)
3. *“Die zunehmende Bedeutung des grenzüberschreitenden Eisenbahnverkehrs, insbesondere des Hochgeschwindigkeitsverkehrs, verlangt die Vereinheitlichung vorhandener Regelwerke und macht zum Teil zusätzliche Regeln erforderlich. Dazu bedingen erhebliche Verbesserungen der eisenbahnspezifischen Mess-, Auswertungs- und Datenverarbeitungstechnik eine Fortschreibung vorhandener Regelwerke.”*

4. *“Es ist von besonderer Bedeutung, dass das bestehende Sicherheits- und Zuverlässigkeitsniveau bei steigenden Anforderungen hinsichtlich Fahrzeugkonstruktion und Betriebsbedingungen nicht beeinträchtigt wird, z. B. bei der Einführung höherer Fahrgeschwindigkeiten, größerer Radkräfte usw.”*

“Die EN 14363:2010 beschreibt den Stand der Technik bezüglich Versuchsdurchführung und Auswertung der stationären Versuche und Streckenversuche. Sie wurde in wesentlichen Teilen aus dem UIC-Merkblatt 518 abgeleitet.” [EN14363, 2010]

Bei der Erstellung der Norm wurden aber auch weitere UIC Merkblätter und nationale Normen berücksichtigt. Dazu gehören die UIC-Merkblätter 518, 515, 615, 505, 610, der ORE-Bericht B55 RP8, der Entwurf der DIN 5550 und die britische Untersuchungsvorschrift GM/RT2141. Eine Übersicht der in der EN 14363:2010 berücksichtigten Regelwerke findet sich in Abbildung 2.1, S. 5. Eine Neuerung in der EN 14363:2010 ist,

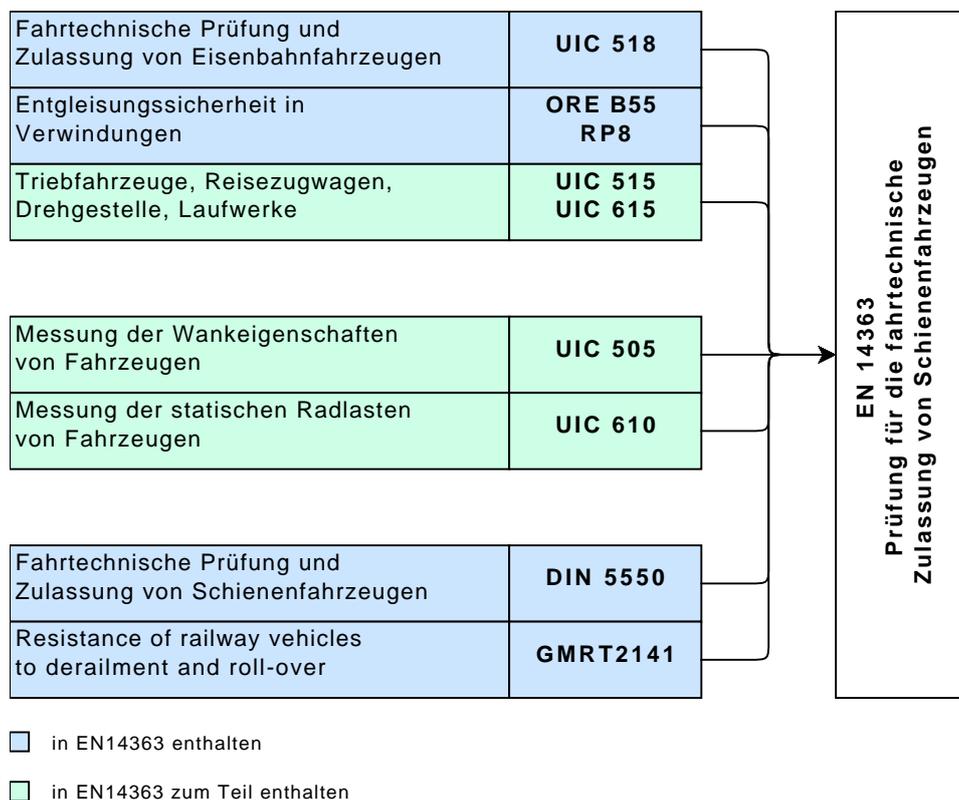


Abbildung 2.1: Zusammenführung bisheriger Normen in der EN 14363 [Kolbe u. a., 2007]

im Hinblick auf die Vorgängernormen, die erstmalige Beschreibung der stationären Versuche und des Streckenversuchs in einem gemeinsamen Dokument. Ein Anliegen der Arbeitsgruppe beim Erstellen der EN 14363:2010 war auch die übersichtliche Darstellung der aus dem Merkblatt UIC 518 übernommenen Bestimmungen. Deswegen ist das Dokument in separate Abschnitte für Beurteilungsgrößen, Grenzwerte, Prüfbedingungen, Bewertung und Dokumentation gegliedert. Einzig die vielen Möglichkeiten wie sich

der Versuchsaufwand unter bestimmten Voraussetzungen reduzieren lässt, sind auf den ersten Blick nicht sehr übersichtlich. Die wesentlichen Beurteilungskriterien wurden aber besser beschrieben als in den vorherigen Regelwerken.

2.2 Anwendungsbereich der EN 14363

Die in der EN 14363:2010 beschriebene fahrtechnische Prüfung ist Teil einer Bauartprüfung für neu entwickelte Fahrzeugbauarten, entscheidend geänderte Fahrzeugbauarten oder Fahrzeuge mit deutlich geänderten Betriebsbedingungen. Der Anwendungsbereich dieser europäischen Norm beschränkt sich auf Eisenbahnen des öffentlichen Verkehrs, welche auf Gleisen der Regelspur (1435 mm) verkehren. Es können jedoch auch fahrtechnische Prüfungen auf z.B. Inselnetzen welche sich durch Trassierung oder Spurweite von den Bedingungen in der Norm unterscheiden, in Anlehnung an die Regeln dieser Norm durchgeführt werden.

Die Prüfverfahren der EN 14363:2010 verfolgen drei Zwecke:

- Das Prüfen fahrtechnisch relevanter Fahrzeugparameter
- Das Prüfen der Fahrfähigkeit
- Das Prüfen des Fahrverhaltens

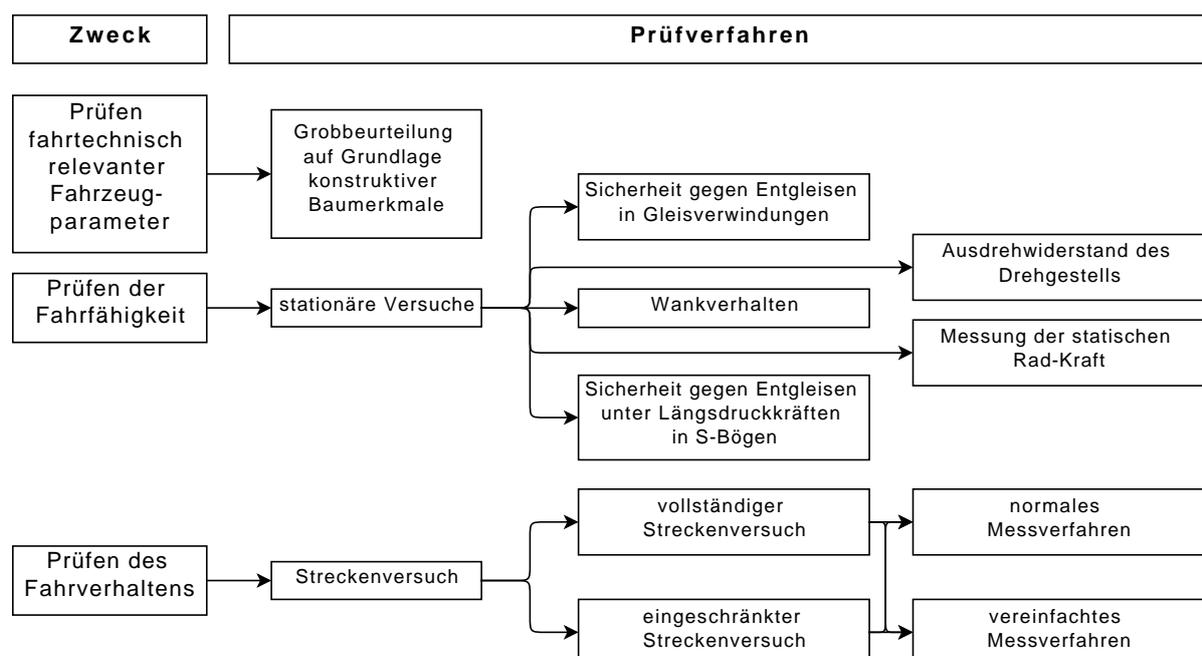


Abbildung 2.2: Gliederung der Prüfverfahren EN14363 [EN14363, 2010]

Wie schon erwähnt besteht die EN 14363:2010 sowohl aus stationären Prüfungen als auch aus dynamischen Prüfungen. Eine übersichtliche Gliederung dieser Prüfverfahren ist in Abbildung 2.2, S. 6 dargestellt. In dieser Arbeit soll hauptsächlich auf den Punkt *Prüfen des Fahrverhaltens* eingegangen werden, da der Streckenversuch an sich und die Bewertung der Daten aus den Streckenversuchen im Mittelpunkt stehen. In der EN 14363:2010 wird auch darauf eingegangen, dass die Kombination der geforderten Prüfbedingungen nicht immer erreicht wird. In diesen Fällen können bestehende Regeln dann Ausnahmen erfordern, die gegenüber der Zulassungsstelle begründet werden müssen. Die geänderten Prüfbedingungen sind anzugeben. Bei Abweichen von den festgelegten Regeln muss mindestens die gleiche Sicherheit wie bei Einhaltung dieser Regeln nachgewiesen werden.

2.3 Stationäre Prüfungen der EN 14363

Bei den stationären Prüfungen überprüft man die Sicherheit gegen Entgleisen in Gleisverwindungen, die Entgleisungssicherheit unter Längsdruckkräften, das Wankverhalten, den Ausdrehwiderstand und die Radentlastung. Auf Grund dieser Prüfungen ist ersichtlich, dass das Hauptanliegen der betrachteten Norm der sichere Verkehr des Fahrzeugs auf der Strecke mit allen ihren Trassierungselementen ist. Eine Ausnahme stellt hier die Durchfahrt durch Weichen dar, welche im Prüfprogramm nicht inbegriffen ist.

Stationäre Versuche	Entgleisungssicherheit in Verwindungen
	Entgleisungssicherheit unter Längsdruckkräften
	Wankverhalten
	Ausdrehwiderstand
	Statische Radkräfte

Abbildung 2.3: Prüfumfang der stationären Versuche nach [Kolbe u. a., 2007]

2.3.1 Sicherheit gegen Entgleisen beim Befahren der Gleisverwindungen

Der Versuch zum Nachweis der Sicherheit gegen Entgleisen in Gleisverwindungen muss bei der erstmaligen Zulassung eines neuen Fahrzeugs durchgeführt werden. Soll die Zulassung später erweitert werden, muss man den Versuch wiederholen, wenn die geänderten

Parameter die Entgleisungsgefahr erhöhen. Dieser Versuch wird in einem Gleisbogen mit 150 m Radius und unter Einfluss einer eingebrachten Fahrzeugverwindung durchgeführt. Dabei müssen die Rad-Schiene Kräfte gemessen werden. Das Verhältnis zwischen Führungskraft Y und Radkraft Q wird dabei als Maß für das Risiko eines Aufkletterns des Spurkranzes auf die Schiene verwendet.

Der Grenzwert $(Y/Q)_{lim}$ für beginnendes Aufklettern des Spurkranzes wird beeinflusst von:

- Spurkranzflankenwinkel γ ,
- den Reibkräften zwischen Rad und Schiene.

Der Quotient aus Führungskraft und Radkraft als Beurteilungsgröße wurde erstmals von Nadal im Jahr 1908 vorgeschlagen.

Als Gleisverwindung bezeichnet man einen Gleisabschnitt in dem die beiden Schienen unterschiedlich stark um die Querachse (d.h. quer zur Fahrtrichtung) geneigt sind. Sie können sich durch Höhenlagefehler ergeben, oder planmäßig beim Übergang von nicht überhöhtem Gleis auf überhöhtes Gleis in sogenannten Übergangsbögen. Das Trassierungselement Übergangsbogen ist als Überleitung zwischen der geraden Strecke und dem Vollbogen notwendig, wobei Vollbogen den Bereich des Gleisbogens mit konstantem Radius bezeichnet. Im Übergangsbogen ändert sich der Radius vom Wert unendlich, das entspricht gerader Strecke, auf den konstanten Wert des Radius der im Vollbogen vorliegt. Fährt ein Schienenfahrzeug mit einer bestimmten Geschwindigkeit durch einen Gleisbogen so wirkt auf das Fahrzeug, abhängig von Radius und Geschwindigkeit, eine gewisse Beschleunigung quer zur Fahrtrichtung. Diese Beschleunigung lässt sich teilweise ausgleichen indem die bogenäußere Schiene angehoben, beziehungsweise die bogeninnere Schiene abgesenkt wird. Ein vollständiger Ausgleich der Seitenbeschleunigung ist jedoch nicht möglich, da erstens ein Halt in dem Bogen noch ohne Umkippen des Fahrzeugs möglich sein muss, und zweitens durchfahren verschiedene Fahrzeuge den Bogen mit verschiedenen Geschwindigkeiten. Das Anheben/Absenken der Schiene wird als Überhöhung bezeichnet und nur in Gleisbögen durchgeführt. Somit muss sich im Übergangsbogen nicht nur die Krümmung der Strecke sondern wie schon erwähnt auch die Überhöhung ändern.

Das gleichzeitige Auftreten von Führungskraft und Radentlastung an einem vorlaufenden Rad kann in einem Gleisbogen zu einer Entgleisung führen. Voraussetzung dafür ist, dass beide Faktoren über eine ausreichende Distanz vorliegen. Einflüsse welche die Radentlastung beeinflussen, können entweder dem Fahrzeug, oder dem Fahrweg zugeordnet werden. Zu den fahrzeugseitigen Einflüssen zählen [EN14363, 2010]:

- Verwindungshärte des Fahrzeugkastens kombiniert mit Verwindungshärte der Federung
- Verwindungshärte des Drehgestellrahmens kombiniert mit Verwindungshärte der Primärfederung
- Exzentrizität des Fahrzeugschwerpunktes
- Torsionsreibung

Dem Fahrweg lassen sich folgende Einflüsse zuordnen [EN14363, 2010]:

- Verwindung im Übergangsbogen
- zusätzliche Verwindung infolge von Fehlern in der gegenseitigen Höhenlage der Schienen
- Überhöhungsüberschuss

Die Einflüsse auf die Führungskraft können ebenso wieder in fahrzeugseitige Faktoren und fahrwegseitige Faktoren unterteilt werden. Fahrzeugseitige Einflüsse auf die Führungskraft sind [EN14363, 2010]:

- Radsatzabstand im Drehgestell beziehungsweise Radsatzabstand bei Fahrzeugen mit zwei Radsätzen
- Ausdrehwiderstand des Drehgestells
- Längssteifigkeit der Radsatzführung der Primärfederung

Als fahrwegseitige Einflüsse sind die folgenden zu nennen [EN14363, 2010]:

- die durch die Trassierung bedingten Bogenradien
- Richtungsfehler der Gleislage
- Reibungsbedingungen im Berührungspunkt zwischen Rad und Schiene (abhängig von Witterungsbedingungen, Schmierung und Verunreinigungen)
- Berührgeometrie (beeinflusst durch Radprofil, Schienenprofil, Schienenneigung und Spurspiel)

Zum Nachweis der Sicherheit gegen Entgleisen in Gleisverwindungen stehen in der EN 14363:2010 zwei Verfahren zur Auswahl:

1. **Prüfung in verwundenem Messgleisbogen**

Versuche in einem Versuchsgleisbogen mit vorgegebenen Verwindungen.

2. Prüfung auf Verwindeprüfstand und ebenem Messgleisbogen

- Messung der minimalen Radkraft $Q_{a,min}$ auf einem Verwindeprüfstand,
- Messung der Führungskraft Y_a auf einem geeigneten Messgleisbogen,
- Berechnung des Verhältnisses $(Y/Q)_a$.

Ein drittes Verfahren darf nur unter bestimmten Bedingungen (siehe EN 14363:2010, Abschnitt 4.1.3.4.1) angewendet werden.

3. Prüfung auf Verwindeprüfstand und Ausdrehprüfstand

- Messung der minimalen Radkraft $Q_{a,min}$ auf einem Verwindeprüfstand,
- Messung des Ausdrehmomentes und der mittleren Radkraft in einem kleinen Gleisbogenhalbmesser.

2.3.2 Sicherheit gegen Entgleisen unter Längskrafteinfluss in S-Bögen

Dieses Thema wird in der EN 14363:2010 nur kurz gestreift, da das Risiko des Entgleisens auf Grund von Längskräften in S-Bögen für konventionelle Fahrzeuge als gering eingeschätzt wird. Eine Ausnahme stellen Züge für den Güterverkehr dar. Diese werden im UIC Kodex 530-2 behandelt.

2.3.3 Prüfung des Wankverhaltens

Dieser Versuch dient zur Feststellung der seitlichen Bewegung (in Richtung der y-Achse) und der Wankbewegung (um die x-Achse) des Wagenkastens, unter Einfluss einer Querschleunigung. Daten über das Wankverhalten können einerseits notwendig sein um die kinematische Begrenzungslinie des Fahrzeugs zu verifizieren. Andererseits kann mit dem Versuch die Querverschiebung zwischen Stromabnehmer und Fahrdraht untersucht werden. So kann nachgewiesen werden, dass das Risiko eines Kontaktverlusts zur Oberleitung gering ist. Die EN 14363:2010 beschreibt wiederum zwei Verfahren zur Ermittlung des Wankverhaltens:

1. Versuch am Prüfstand

Wankwinkel und Querverschiebung werden auf einem Prüfstand gemessen, der überhöhtes Gleis simuliert. Aus diesen Messdaten wird der Neigekoeffizient berechnet.

2. Streckenversuch

Aus den Beschleunigungsmessdaten von Wagenkasten, Drehgestell und Radsatzlager oder den Wegen zwischen diesen Komponenten lässt sich ebenfalls der Neigekoeffizient bestimmen.

2.3.4 Prüfung des Ausdrehwiderstands zwischen Drehgestell und Wagenkasten

Mit diesem Versuch soll das Ausdrehmoment zwischen Drehgestell und Wagenkasten des Testobjekts bestimmt werden. Dieses Ausdrehmoment tritt auch bei der Fahrt durch Bögen, Weichen und Kreuzungen auf und ist somit ein wichtiger sicherheitsrelevanter Fahrzeugparameter. Der Versuch ist in beide Drehrichtungen durchzuführen. Zur Berechnung des zu testenden Ausdrehwinkels wird in der Norm folgende Formel angegeben:

$$\Delta\psi = \frac{a^*}{R_{min}} + \frac{0.02}{2a^+} \quad (2.1)$$

a^* ...Drehzapfenabstand

R_{min} ...kleinster für das Fahrzeug festgelegter Bogenradius

a^+ ...Radsatzabstand im Drehgestell

Als Ausdrehgeschwindigkeit wird in der Norm $1^\circ/s$ über mindestens 75% des gesamten Ausdrehbereiches verlangt.

2.3.5 Messung der statischen Radkraft

Die Messung der statischen Radkraft soll dazu dienen die Fahrzeugmasse zu bestimmen und deren Verteilung auf die einzelnen Räder. Das Fahrzeug soll während der Messung nicht verwunden oder verspannt sein und Einflüsse der Reibung sollen soweit wie möglich eingeschränkt werden um die Messergebnisse nicht zu verfälschen.

2.4 Dynamische Prüfungen - Streckenversuche

Die in diesem Abschnitt beschriebenen dynamischen Prüfungen werden Streckenversuche genannt, da das Fahrverhalten des zu testenden Fahrzeugs auf einem beziehungsweise mehreren realen Streckenabschnitten geprüft wird.

2.4.1 Arten der Streckenversuche

In welchem Umfang die Prüfungen stattzufinden haben, hängt von mehreren Faktoren ab. Abbildung 2.4, S. 12 zeigt die Unterschiede zwischen vollständigem Streckenversuch und eingeschränktem Streckenversuch. Um die Auswahl des anzuwendenden Streckenversuchs zu erleichtern wird in der EN 14363:2010 das in Abbildung A.1, S. 95 gezeigte Ablaufdiagramm verwendet. Grundsätzlich ist aber bei der erstmaligen Zulassung eines Fahrzeuges immer der vollständige Streckenversuch notwendig. Eine Ausnahme bilden Fahrzeuge mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit ≤ 60 km/h. Bei diesen Fahrzeugen

sind Streckenversuche nicht vorgeschrieben. Weiters kann auf Streckenversuche verzichtet werden wenn es sich um eine Erweiterung der Zulassung handelt. Dazu müssen aber folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Erstzulassung mit normalem Messverfahren, oder Bedingungen für das vereinfachte Messverfahren erfüllt
- Sicherheitsfaktor $\lambda \geq 1.1$ bei Erstzulassung²
- Änderung der Fahrzeugparameter im Hinblick auf Erstzulassung innerhalb der in Tabelle A.1, S. 93 und Tabelle A.2, S. 94 angegebenen Bereichen

Gründe die eine Erweiterung der Zulassung erfordern sind:

- Änderungen an der Konstruktion des Fahrzeugs oder des Drehgestells
- Änderung der zulässigen Fahrzeughöchstgeschwindigkeit oder der zulässigen freien Seitenbeschleunigung a_Q
- Verwendung eines zugelassenen Drehgestells unter einem neuen Wagenkasten

Streckenversuch	Vollständiger Streckenversuch	Eingeschränkter Streckenversuch
Zweck	Prüfen von Fahrzeugen mit konventioneller Fahrzeugtechnologie oder neuartiger Fahrzeugtechnologie für die: -erstmalige Zulassung oder -erweiterte Zulassung	Prüfen von Fahrzeugen mit konventioneller Fahrzeugtechnologie und erfüllten Anwendungsvoraussetzungen für die: -erweiterte Zulassung
Prüfumfang	vollständiger Prüfumfang	reduzierter Prüfumfang

Abbildung 2.4: Merkmale der Streckenversuche nach [EN14363, 2010]

Die Bereiche in denen Fahrzeugparameter eines bereits zugelassenen Fahrzeugtyps geändert werden können, sodass noch ein Verzicht auf Streckenversuche oder die Anwendung des eingeschränkten Streckenversuchs erlaubt ist, zeigen Tabelle A.1, S. 93 sowie Tabelle A.2, S. 94.

2.4.2 Arten der Messverfahren

Unabhängig von der gewählten Versuchsvariante können die Versuche mit zwei verschiedenen Messverfahren absolviert werden, nämlich:

² Der Sicherheitsfaktor λ ist als Verhältnis des Grenzwerts einer Beurteilungsgröße zum Maximalwert des Vertrauensbereiches dieser Beurteilungsgröße definiert. $\lambda = \frac{y_{lim}}{Y(PA)_{max}}$

- dem normalen Messverfahren und
- dem vereinfachten Messverfahren.

Die beiden Messverfahren unterscheiden sich durch die verwendeten Beurteilungsgrößen. Beim normalen Messverfahren werden die Kräfte zwischen Rad und Schiene, sowie die Beschleunigungen an Wagenkasten und Fahrwerkrahmen gemessen. Für das vereinfachte Messverfahren ist nur die Messung der Beschleunigungen am Wagenkasten und am Fahrwerkrahmen sowie die Messung der Radsatzlagerquerkräfte notwendig. In bestimmten Fällen kann die Messung der Radsatzlagerquerkräfte entfallen. In Abbildung 2.5, S. 13 sind das normale Messverfahren und das vereinfachte Messverfahren sowie deren Beurteilungsgrößen dargestellt. Im Unterschied zum normalen Messverfahren erlaubt das

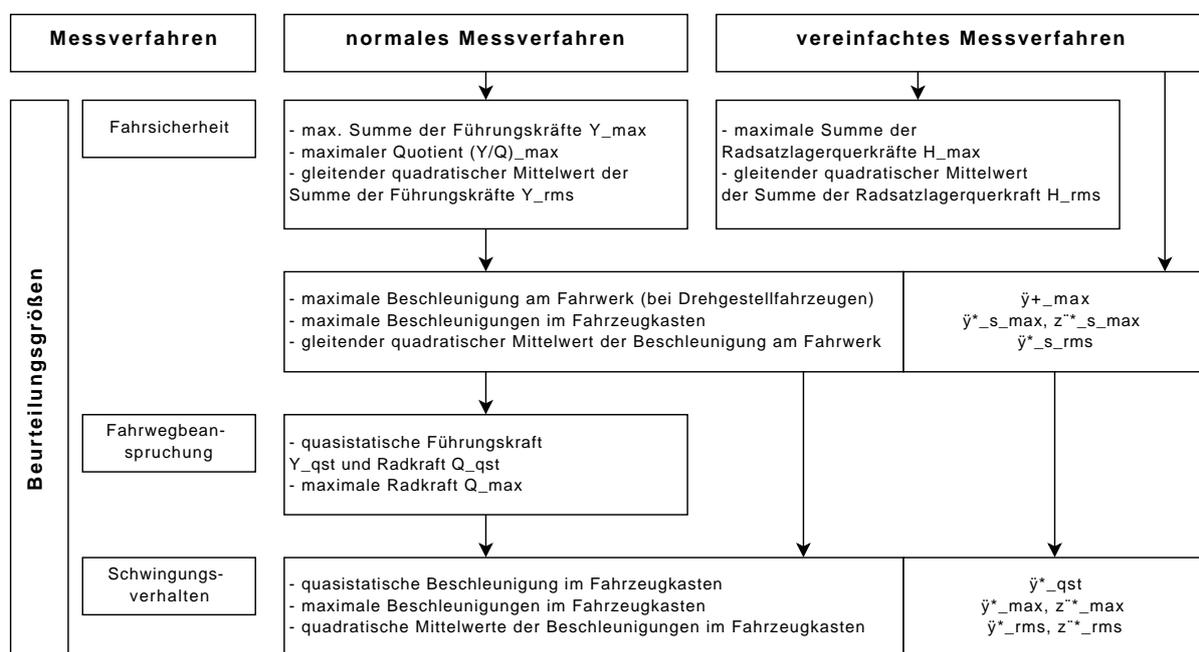


Abbildung 2.5: Messverfahren und Beurteilungsgrößen nach [EN14363, 2010]

vereinfachte Messverfahren keine Beurteilung der Fahrwegbeanspruchung. Welches Messverfahren im einzelnen Fall zu verwenden ist, kann mit dem im Anhang in Abbildung A.2, S. 96 gezeigten Ablaufdiagramm ermittelt werden.

2.4.3 Beurteilungsgrößen

Als Beurteilungsgrößen werden physikalische Größen bezeichnet die, mit am Fahrzeug angebrachter Sensorik, erfasst werden und zur Beurteilung des Fahrzeuges im Rahmen der Versuche dienen. Sie setzen sich aus Kräften zwischen Rad und Schiene, Kräften am Fahrwerk und aus Beschleunigungen zusammen.

Zu den Kräften zwischen Rad und Schiene zählen:

- die Führungskraft Y , Messrichtung quer zur Fahrtrichtung,
- die Radaufstandskraft Q , Messrichtung senkrecht zur Fahrtrichtung,
- die Summe der Führungskräfte $\sum Y$ eines Radsatzes, Messrichtung quer zur Fahrtrichtung
- Quotient Y/Q aus Führungskraft und Radkraft.

Wie schon erwähnt ist bei Anwendung des vereinfachten Messverfahrens in bestimmten Fällen die Messung der Kräfte am Fahrwerk erforderlich. Dies wird durch die Beurteilungsgröße

- Summe der Radsatzlagerquerkräfte H

erfasst.

Weiters werden noch folgende Beschleunigungen gemessen:

- Beschleunigung am Radsatz \ddot{y} , Messrichtung quer für Fahrzeuge ohne Drehgestelle,
- Beschleunigungen am Drehgestell \ddot{y}^+ , Messrichtung quer,
- Beschleunigung im Fahrzeugkasten \ddot{y}^* und \ddot{z}^* , Messrichtung quer und senkrecht.

Die verschiedenen Beurteilungsgrößen lassen sich den drei Bereichen Fahrsicherheit, Fahrwegbeanspruchung (entfällt bei vereinfachtem Messverfahren) und Schwingungsverhalten zuordnen. Die beiden abgeleiteten Größen $\sum Y$ und Y/Q werden zur Beurteilung der Fahrsicherheit herangezogen. Bei den fahrtechnischen Prüfungen wird den Beurteilungsgrößen der Fahrsicherheit besondere Beachtung geschenkt, da sie den sicheren Lauf des Fahrzeuges auf den Gleisen beurteilen. Die Größe $\sum Y$ wird zur Beurteilung der Sicherheit gegen Verschieben des Gleises durch das Fahrzeug verwendet. Der Quotient aus Führungskraft und Radkraft Y/Q wird zur Beurteilung der Sicherheit gegen Entgleisen durch Aufklettern des Spurkranzes auf die Schiene benötigt. Die Beurteilung der Fahrwegbeanspruchung erfolgt mit den Größen Y und Q . Dabei geht es darum nachzuweisen, dass durch das zu prüfende Fahrzeug die Elemente des Oberbaus nicht zu stark beansprucht werden. Dies würde nämlich auch eine stärkere Abnutzung des Fahrweges und in weiterer Folge höhere Instandhaltungskosten für die Infrastruktur bedeuten. Zur Beurteilung des Schwingungsverhaltens des zu prüfenden Fahrzeugs werden die Beschleunigungen \ddot{y}^* und \ddot{z}^* im Wagenkasten herangezogen. Es ist klar, dass hier Beschleunigungen im Wagenkasten betrachtet werden, da ja der Komfort von Reisenden beziehungsweise die Schwingungsbelastung auf empfindliches Ladegut beurteilt werden soll.

2.4.4 Grenzwerte der Beurteilungsgrößen

Beurteilungsgrößen und Grenzwerte der Fahrsicherheit

Je nachdem ob das normale oder vereinfachte Verfahren zur Anwendung kommt, werden verschiedene Beurteilungsgrößen verwendet. Bei Anwendung des normalen Messverfahrens sind das die Größen $\sum Y$ und Y/Q . Für das vereinfachte Messverfahren mit Messung der Radsatzlagerquerkräfte werden die Größen H , \ddot{y}_s^* und \ddot{z}_s^* zur Bewertung herangezogen, wobei \ddot{y}_s^* nur bei Fahrzeugen ohne Drehgestelle verwendet wird. Beim vereinfachten Messverfahren bei Fahrzeugen mit Drehgestellen ohne Messung der Radsatzlagerquerkräfte sind die Größen \ddot{y}^+ , \ddot{y}_s^* und \ddot{z}_s^* relevant. Für Fahrzeuge ohne Drehgestelle unter Anwendung des vereinfachten Messverfahrens werden schließlich die Größen \ddot{y}_s , \ddot{y}_s^* und \ddot{z}_s^* berücksichtigt.

Der sicherheitsrelevante Grenzwert gegen Gleisverschiebung wird mit Formel (2.2) berechnet.

$$\sum Y_{max,lim} = k_1 \left(10 + \frac{2Q_0}{3}\right) \text{ in kN} \quad (2.2)$$

Der Faktor k_1 wird für Lokomotiven, Triebköpfe, Triebwagen und Reisezugwagen mit $k_1 = 1,0$ und für Güterwagen mit $k_1 = 0,85$ angegeben. In der EN 14363:2010 findet sich folgende Anmerkung dazu.

“Der Faktor k_1 berücksichtigt die Größtwerte der Summe der Führungskräfte eines Radsatzes, die ein Gleis noch ohne bleibende Querverschiebung ertragen kann. Der Grenzwert $\sum Y_{max,lim}$ bezieht sich auf ein Gleis mit Schotteroberbau, Holzschwellen mit einem Schwellenabstand $\leq 0,65m$ und Schienen mit einem Metergewicht $\geq 46kg$ bei dem die Gleislage unmittelbar vorher durch Stopfen instand gesetzt wurde. Für Güterwagen gilt zur Berücksichtigung der größeren Streuung der geometrischen Abmessungen und des Instandhaltungszustandes ein abgeminderter Faktor k_1 . Bei Fahrzeugen mit sehr kleinem Radsatzabstand erhöht sich durch die Wirkung der Radkräfte der benachbarten Radsätze die Summe der Führungskräfte $\sum Y$, die ein Gleis ohne bleibende Querverschiebung ertragen kann. Dies kann durch erweiterte Berechnungsverfahren bei derartigen Fahrzeugen berücksichtigt werden.” [EN14363, 2010]

Der sicherheitsrelevante Grenzwert für den Quotienten aus Führungskraft und Radkraft $(Y/Q)_{max}$ ist für den Geltungsbereich $R \geq 250m$ angegeben mit:

$$(Y/Q)_{max,lim} = 0,8 \quad (2.3)$$

Zu den Werten in Übergangsbögen wird in der EN 14363:2010 folgendermaßen Stellung genommen.

“In Übergangsbögen können höhere Werte als 0,8 auftreten. Derzeit kann kein eigener Grenzwert für die Übergangsbögen definiert werden. Allerdings darf die Beurteilungsgröße den Wert 1,2 nicht überschreiten. Wenn der Wert 0,8 überschritten wird, muss dieser Fall speziell untersucht und erläutert werden. Der Grenzwert von 1,2 (bei einem Spurkranzwinkel von 70°) beim quasistatischen Versuch zur Prüfung der Entgleisungssicherheit nach Abschnitt 4.1 der EN14363:2010 muss eingehalten werden.” [EN14363, 2010]

Für den Grenzwert der Summe der Radsatzlagerquerkräfte H_{max} gilt Formel (2.4).

$$\sum H_{max,lim} = k_2 \left(10 + \frac{2Q_0}{3} \right) \text{ in kN} \quad (2.4)$$

Faktor k_2 ist gleich wie der Faktor k_1 vom Fahrzeugtyp abhängig. Für Lokomotiven, Triebköpfe, Triebwagen und Reisezugwagen und Spezialfahrzeuge gilt $k_2 = 0,9$, für beladene Güterwagen mit $k_2 = 0,8$ und für leere Güterwagen $k_2 = 0,75$.

Der Grenzwert für die maximale Beschleunigung am Drehgestell \ddot{y}_{max}^* wird nur für das vereinfachte Messverfahren ohne Messung der Radsatzlagerquerkräfte benötigt. Die Formel (2.5) gibt den Grenzwert an.

$$\sum y_{max,lim,vereinfacht}^+ = 12 - \frac{m^+}{5} \text{ in } m/s^2 \quad (2.5)$$

m^+ ...Drehgestellmasse in t

Wenn auf Grund der Umstände bei der Zulassung nur der eingeschränkte Streckenversuch mit dem vereinfachten Messverfahren durchzuführen ist, so wird ein verminderter Grenzwert $\ddot{y}_{max,lim}^+$ angewendet. Der Grenzwert ergibt sich als der Wert bei einem Drittel des Abstands zwischen maximalem Erwartungswert und dem Grenzwert wie in (2.6) gezeigt.

$$\ddot{y}_{max,lim,vereinfacht}^+ = \max(Y(PA)_{max,normal}) + \frac{\ddot{y}_{lim,vereinfacht}^+ - \max(Y(PA)_{max,normal})}{3} \quad (2.6)$$

Der Term $\max(Y(PA)_{max,normal})$ bezeichnet dabei den größten maximalen Erwartungswert aller Prüfbedingungen während des vollständigen Streckenversuchs.

Für die Beurteilungsgröße $\ddot{y}_{S,max}^*$ ist der Grenzwert $\ddot{y}_{S,max,lim}^*$ nur beim vereinfachten Verfahren ohne Messung der Radsatzlagerquerkräfte relevant. Die Grenzwerte für die maximalen Beschleunigungen im Fahrzeugkasten $\ddot{y}_{S,max}^*$ und $\ddot{z}_{S,max}^*$ sind in Tabelle 2.1, S. 17 enthalten.

Tabelle 2.1: Grenzwerte der maximalen Beschleunigungen im Wagenkasten [EN14363, 2010]

Fahrzeug	Prüfbedingungen	Grenzwert in m/s^2	
		$\ddot{y}_{S,max,lim}^*$	$\ddot{z}_{S,max,lim}^*$
Lokomotiven, Triebköpfe, Triebwagen und Reisezugwagen	einstufig gefederter Fahrzeugkasten	-	5
	zweistufig gefederter Fahrzeugkasten	-	3
	Prüfbereiche 1 und 2	3	
	Prüfbereich 3	2,8	
	Prüfbereich 4	2,6	
Güterwagen, beladen und Spezialfahrzeuge			5
Güterwagen, leer			5
Güterwagen, Spezialfahrzeuge mit Drehgestellen		3	-
Güterwagen, Spezialfahrzeuge ohne Drehgestelle	$2Q_0 < 60kN$	4	-
	$60kN \leq 2Q_0 \leq 200kN$	$4,43 - 2Q_0/140$	-
	$2Q_0 > 200kN$	3	-

Wie auch bei den maximalen Beschleunigungen am Drehgestell muss auch hier bei Anwendung des eingeschränkten Streckenversuches ein verminderter Grenzwert $\ddot{y}_{S,max,lim,vereinfacht}^*$ angewendet werden. Die Definition dieses Grenzwertes ist analog wie für die maximalen Beschleunigungen am Drehgestell wie in (2.7) gezeigt.

$$\ddot{y}_{S,max,lim,vereinfacht}^+ = \max(Y(PA)_{max,normal}) + \frac{\ddot{y}_{S,lim,vereinfacht}^+ - \max(Y(PA)_{max,normal})}{3} \quad (2.7)$$

Für das Instabilitätskriterium, welches auch zum Bereich der Fahrsicherheit gezählt wird, sind die Grenzwerte folgendermaßen definiert. Es wird zwischen Fahrzeugen ohne Drehgestell und Fahrzeugen mit Drehgestell unterschieden. Außerdem sind wieder unterschiedliche Grenzwerte für die unterschiedlichen Messverfahren angegeben.

- Normales Messverfahren:

Beurteilungsgröße Summe der Führungskräfte:

$$\sum Y_{rms,lim} = \frac{\sum Y_{max,lim}}{2} \quad (2.8)$$

- Vereinfachtes Messverfahren und Messung der Radsatzlagerquerkräfte:
Beurteilungsgröße Summe der Radsatzlagerquerkräfte:

$$H_{rms,lim} = \frac{H_{max,lim}}{2} \quad (2.9)$$

- Vereinfachtes Messverfahren ohne Messung der Radsatzlagerquerkräfte:
a) Fahrzeuge ohne Drehgestell:
Beurteilungsgröße Beschleunigungen am Radsatz:

$$\ddot{y}_{rms,lim} = 5m/s^2 \quad (2.10)$$

- b) Fahrzeuge mit Drehgestell:
Beurteilungsgröße Beschleunigungen am Drehgestellrahmen:

$$\ddot{y}_{rms,lim}^+ = \frac{\ddot{y}_{max,lim}^+}{2} \quad (2.11)$$

Beurteilungsgrößen und Grenzwerte der Fahrwegbeanspruchung

Die in der EN 14363:2010 angegebenen Grenzwerte sind für Fahrzeuge mit einer Radsatzlast bis 22,5t bestimmt. Übersteigt die Radsatzlast des zu prüfenden Fahrzeugs diesen Wert so können die Grenzwerte für den Betrieb auf ausgewählten Gleisen erhöht werden.

Die quasistatische Führungskraft Y_{qst} ist limitiert auf:

$$Y_{qst,lim} = 60kN \quad (2.12)$$

Der Geltungsbereich dieses Grenzwertes erstreckt sich auf die Prüfbereiche 2, 3 und 4 ausgenommen der Übergangsbögen.

Die quasistatische Radkraft Q_{qst} ist begrenzt auf:

$$Q_{qst,lim} = 145kN \quad (2.13)$$

Auch der Geltungsbereich dieses Grenzwertes erstreckt sich auf die Prüfbereiche 2, 3 und 4 ausgenommen der Übergangsbögen.

Schließlich wird noch die maximale Radkraft Q_{max} begrenzt:

$$Q_{max,lim} = 90 + Q_0 \text{ in } kN \quad (2.14)$$

Zusätzlich wird die maximale Radkraft Q_{max} abhängig von der Fahrzeughöchstgeschwindigkeit V_{zul} auf folgende Werte begrenzt.

$$\begin{array}{ll}
 V_{zul} \leq 160 \text{ km/h:} & Q_{max,lim} \leq 200 \text{ kN} \\
 160 \text{ km/h} < V_{zul} \leq 200 \text{ km/h:} & Q_{max,lim} \leq 190 \text{ kN} \\
 200 \text{ km/h} < V_{zul} \leq 250 \text{ km/h:} & Q_{max,lim} \leq 180 \text{ kN} \\
 250 \text{ km/h} < V_{zul} \leq 300 \text{ km/h:} & Q_{max,lim} \leq 170 \text{ kN} \\
 V_{zul} > 300 \text{ km/h:} & Q_{max,lim} \leq 160 \text{ kN}
 \end{array}$$

Beurteilungsgrößen und Grenzwerte des Schwingungsverhaltens

Die Beurteilungsgrößen des Schwingungsverhaltens sind die quasistatischen Beschleunigungen im Wagenkasten \ddot{y}_{qst}^* , die maximalen Beschleunigungen im Wagenkasten \ddot{y}_{max}^* , \ddot{z}_{max}^* und die quadratischen Mittelwerte der Beschleunigungen im Wagenkasten \ddot{y}_{rms}^* , \ddot{z}_{rms}^* .

Tabelle 2.2: Grenzwerte des Schwingungsverhaltens [EN14363, 2010]

Fahrzeugtyp	Grenzwerte der Beschleunigungen im Fahrzeugkasten in m/s^2				
	$\ddot{y}_{qst,lim}^*$	$\ddot{y}_{max,lim}^*$	$\ddot{z}_{max,lim}^*$	$\ddot{y}_{rms,lim}^*$	$\ddot{z}_{rms,lim}^*$
Lokomotiven, Triebköpfe	1,5	2,5	2,5	0,5	1
Triebwagen, Reisezugwagen	1,5	2,5	2,5	0,5	0,75
Güterwagen, Spezialfahrzeuge mit Drehgestellen	1,3	3	5	1,3	2
Güterwagen, Spezialfahrzeuge ohne Drehgestelle	1,3	4	5	1,5	2

^a Anwendbar nur in den Prüfbereichen 2, 3 und 4 (Gleisbögen)

Zu den Grenzwerten in Tabelle 2.2, S. 19 wird in der EN 14363:2010 noch folgendes angemerkt:

“Die angeführten Grenzwerte sind Werte für ein gutes Schwingungsverhalten. Wenn größere Werte auftreten, muss deren Einfluss auf die Sicherheit der Passagiere und der Ladung sowie auf die Festigkeit des Fahrzeugs und daran befestigter Teile betrachtet werden. Anzahl und Dauer der Überschreitungen dieser Grenzwerte müssen zusammen mit dem Betriebs- und Instandhaltungskonzept des Fahrzeugs betrachtet werden.”[EN14363, 2010]

2.4.5 Definition des Überhöhungsehlbetrages

Fährt ein Schienenfahrzeug durch einen Gleisbogen so wirkt wie bei jeder kreisförmigen Bewegung eine Zentrifugalbeschleunigung auf das Fahrzeug. Diese wirkt in radialer

Richtung nach außen und hängt ab von der Winkelgeschwindigkeit ω der Kreisbewegung und dem Radius R der Kreisbahn. Sie lässt sich auch mit Radius und Fahrzeuggeschwindigkeit v ausdrücken.

$$a_r = \omega^2 R = \frac{v^2}{R} \quad \text{mit } v = \omega R \quad (2.15)$$

Durch die sogenannte *Überhöhung* u , sie bezeichnet ein Anheben beziehungsweise Absenken der bogenäußeren beziehungsweise der bogeninneren Schiene des Gleisbogens, wird die Wirkung der Seitenbeschleunigung teilweise kompensiert. In Abbildung 2.6, S. 20 ist die Überhöhung dargestellt wobei u die Überhöhung bezeichnet und b den Messkreisabstand. Bei einer Spurweite von 1435 mm beträgt b 1500 mm.

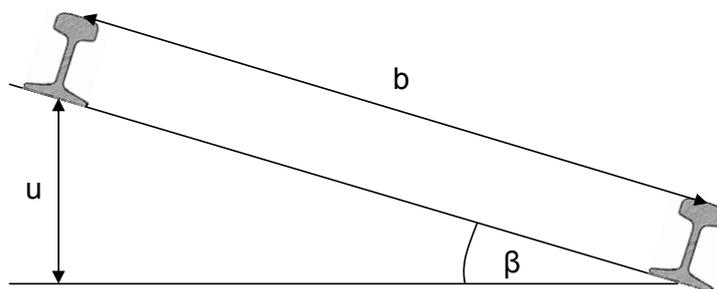


Abbildung 2.6: Definition der Überhöhung

Eine vollständige Kompensation der Zentrifugalbeschleunigung a_r ist wie schon früher erwähnt nicht möglich, da verschiedene Fahrzeuge mit verschiedenen Geschwindigkeiten denselben Bogen durchfahren. Außerdem müssen Fahrzeuge auch noch im Bogen halten können ohne dabei umzukippen. Abbildung 2.7, S. 21 zeigt den Zusammenhang zwischen Überhöhung u , Seitenbeschleunigung a_r und der freien Seitenbeschleunigung a_Q . Es gelten die folgenden Beziehungen.

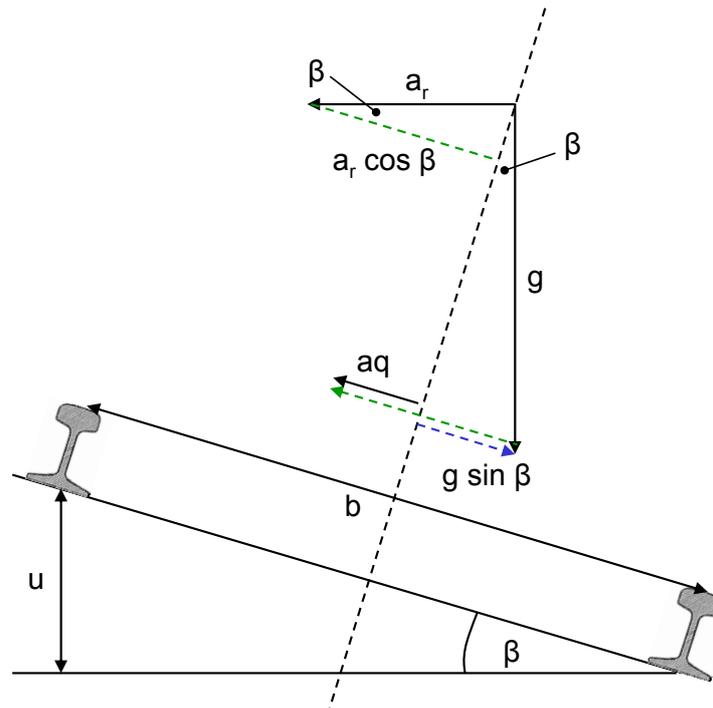
$$a_Q = a_r \cos \beta - g \sin \beta \quad \text{mit } \sin \beta = \frac{u}{b}, \quad \cos \beta = \frac{\sqrt{b^2 - u^2}}{b} \approx 1 \quad \text{und } a_r = \frac{v^2}{R} \quad (2.16)$$

$$a_Q = \frac{v^2}{R} - g \frac{u}{b} \quad (2.17)$$

Die Vereinfachung $\cos \beta = 1$ ist auf Grund der Werte, welche die Größen u und b im Normalfall annehmen, zulässig. Beispielsweise ergibt sich mit $b = 1500 \text{ mm}$, was dem Messkreisabstand³ bei Normalspurweite von 1435 mm entspricht, und einer Überhöhung⁴ $u = 160 \text{ mm}$ für $\cos \beta = 0.994$. Somit ist der Fehler für die Annahme $\cos \beta = 1$ ca. 0,6% und dies ist für eine Abschätzung der freien Seitenbeschleunigung hinreichend genau.

³ Der Messkreisabstand entspricht dem Abstand der Radien auf denen der betrachtete Radsatz bei Normalspurweite im nicht ausgelenkten Zustand, d.h. $y = 0$ läuft

⁴ Die maximale Überhöhung u_{max} ist in Österreich mit 160 mm begrenzt. In Deutschland und der Schweiz gilt derselbe Grenzwert. In Frankreich sind aber beispielsweise 180 mm zulässig.

Abbildung 2.7: Definition der freien Seitenbeschleunigung a_Q

Die freie Seitenbeschleunigung a_Q lässt sich auch mit dem Überhöhungsfehlbetrag uf ausdrücken. Dabei wird die Überhöhung u_0 berechnet welche notwendig wäre um die Seitenbeschleunigung komplett zu kompensieren, d.h. a_Q wäre gleich Null.

$$a_Q = 0 = \frac{v^2}{R} - g \frac{u_0}{b} \rightarrow u_0 = \frac{v^2 b}{Rg} \quad (2.18)$$

Der Überhöhungsfehlbetrag ergibt sich dann aus der Differenz zwischen der Überhöhung u_0 und der tatsächlichen Überhöhung u im Gleisbogen, welche sich durch Umformen der Gleichung (2.17) ergibt. Der Überhöhungsfehlbetrag uf wird üblicherweise in mm angegeben.

$$u = \frac{v^2 b}{Rg} - a_Q \frac{b}{g} \quad (2.19)$$

$$uf = u_0 - u = \frac{v^2 b}{Rg} - \frac{v^2 b}{Rg} + a_Q \frac{b}{g} = a_Q \frac{b}{g} \quad (2.20)$$

Die Normalspurweite von 1435 mm ist die weltweit am weitesten verbreitete Spurweite. Sie ist auf den meisten Schienennetzen Europas, in den USA, in China und in Australien anzutreffen. Ausnahmen bilden Indien, Pakistan, Bangladesch und Sri Lanka mit der "indischen Breitspur" (1676 mm), Spanien und Portugal mit der "iberischen Breitspur" (1668 mm) welche durch Mittelung der portugiesischen Spurweite (1665mm) und der spanischen Spurweite (1672 mm) entstand und Irland mit der "irischen Breitspur" (1600 mm). Weitere Breitspurnetze gibt es in Russland, der Ukraine, Weißrussland und

den Baltikum Staaten mit einer Spurweite von 1524 mm. Diese Aufzählung ist nicht vollständig, sie soll nur verdeutlichen, dass durchaus von der Normalspur abweichende Spurweiten existieren und diese auch im Rahmen der Streckenversuche zu berücksichtigen sind. Grund dafür ist die Korrelation zwischen Spurweite und Messgrößen wie z.B. der nicht kompensierten Seitenbeschleunigung a_Q . Dort wirkt sich eine größere Spurweite beziehungsweise der dadurch auch größere Messkreisabstand b direkt aus, wie in Formel (2.17) ersichtlich ist. Dieser Umstand wirkt sich auch auf die Trassierung der Strecke aus. Um bei veränderter Spurweite die gleiche unkompenzierte Seitenbeschleunigung a_Q zu erhalten wie bei Normalspurweite muss, unter der Voraussetzung gleichbleibenden Bogenradius R und gleichbleibender Geschwindigkeit V , die Überhöhung u angepasst werden. Mit Formel (2.17) bei gleichbleibendem a_Q und geändertem Messkreisabstand b' erhält man folgende Beziehung.

$$a_Q = \frac{v^2}{R} - g \frac{u}{b} = \frac{v^2}{R} - g \frac{u'}{b'} \quad (2.21)$$

Die Überhöhung u' bei geänderter Spurweite folgt aus

$$u' = u \frac{b'}{b} \quad (2.22)$$

3 Praktische Umsetzung

3.1 Analyse der Situation

Wie schon in der Einleitung erwähnt ergeben sich bei der Planung und der Durchführung fahrtechnischer Versuche Herausforderungen, die an dieser Stelle nochmals kurz besprochen werden. In der Planung und Vorbereitung fahrtechnischer Versuche ist als erstes der Prüfumfang zu klären, d.h. welche Versuche mit welchem Messverfahren lt. Norm notwendig sind. Als nächstes kann, unter Einbeziehung der Streckendaten (Bogenradien, zulässige Geschwindigkeit, usw.) die Auswahl der Strecken vorgenommen werden. Dabei gilt es die Streckenauswahl dahingehend zu optimieren, sodass die erforderlichen Auswertungsabschnitte mit möglichst wenigen zu fahrenden Trassenkilometer erreicht werden. Die Strecken müssen Elemente aus allen Prüfbereichen enthalten und müssen es ermöglichen die geforderten Fahrzustände, welche durch Geschwindigkeit, Bogenradius und dem daraus resultierenden Überhöhungsfehlbetrag definiert sind, bei den Versuchsfahrten zu erreichen.

3.1.1 Versuchsplanung

Der Überbegriff mit dem die Streckenführung bezeichnet wird, ist die Trassierung. Sie wird unter anderem durch die Parameter Bogenradius und Überhöhung beschrieben. Die Trassierung kann bei den Versuchen als gegeben betrachtet werden, denn sie ändert sich praktisch nicht während des Zeitraums in dem die Versuche durchgeführt werden.

Die Fahrgeschwindigkeit hingegen kann in bestimmten Grenzen variiert werden und somit lässt sich die notwendige freie Querschleunigung (a_Q) einstellen. Diese Grenzen werden einerseits durch das Fahrverhalten des zu testenden Fahrzeugs gesetzt und andererseits werden sie durch das Beschleunigungs- bzw. Bremsvermögen des eingesetzten Triebfahrzeugs bestimmt.

Das Fahrverhalten des Testobjekts bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Querschleunigungen, die beim Befahren der Teststrecke wirken, ist zu Beginn der Versuche noch unbekannt. Aus diesem Grund werden die Versuche mit sogenannten *Hochtastfahr-*

ten begonnen, in denen die Fahrgeschwindigkeit schrittweise gesteigert wird. Gleichzeitig wird mit Hilfe der installierten Sensorik die Einhaltung der für die Fahrsicherheit relevanten Grenzwerte überwacht. So können eventuelle Überschreitungen sofort erkannt werden und kritische Situationen vermieden werden. Dies ist vor allem wichtig wenn die Trassierung der Strecke nicht exakt erfasst ist, oder was auch manchmal der Fall ist, auf Grund von verschiedenen Zuständigkeiten nur schwer zu bekommen ist. Durch die Trennung von Eisenbahnverkehrsunternehmen und Infrastruktur ergeben sich nämlich teilweise Interessenskonflikte.

Hier zeigt sich einer der Vorteile der Erfassung der Trassierung vom Fahrzeug aus. Diese wird mit Hilfe von am Fahrzeug angebrachten Drehratensensoren bewerkstelligt, welche die Winkelgeschwindigkeit des Wagenkastens messen. Dadurch lässt sich, in Kombination mit der Fahrgeschwindigkeit, die Krümmung und sogar die Überhöhung der befahrenen Strecke erfassen. Diese Daten werden zeitsynchron mit den Daten aller anderen Messstellen erfasst und können so für die weitere Evaluierung der Daten ohne aufwändige Synchronisation verwendet werden.

Zum besseren Verständnis der behandelten Prozesse ist ein beispielhafter Ablauf in Abbildung 3.1, S. 25 dargestellt. Wie dort gezeigt wird steht am Anfang die schon besprochene Versuchsplanung. Das Ergebnis der Versuchsplanung ist die Spezifikation. Darin enthalten ist u.a. der Terminplan der Versuchsfahrten, welcher für die Trassenbestellung und die zeitgerechte Bereitstellung des Testobjektes wichtig ist. Die Konfiguration des Fahrzeugs (Beladezustand, Ausfallszustände, Radprofil) und auch die zu befahrenden Strecken sind ebenfalls in der Spezifikation definiert. Schließlich enthält die Spezifikation noch den Messstellenplan in dem die Positionen der Sensoren am Fahrzeug und die damit zu erfassenden Größen festgelegt werden. Dabei ist es notwendig zumindest die für eine Zulassung nach EN 14363:2010 erforderlichen Beurteilungsgrößen zu erfassen. Die zu messenden Größen sind abhängig vom Messverfahren, was in Abbildung 3.2, S. 26 ersichtlich ist.

“Für Streckenversuche mit normalem Messverfahren ist die direkte Messung von Führungskraft Y und Radkraft Q , von Beschleunigungen am Fahrwerk \dot{y}^+ und den Beschleunigungen \dot{y}^ und \dot{z}^* im Fahrzeugkasten erforderlich. Für Streckenversuche mit vereinfachten Messverfahren ist zunächst festzulegen ob die Radsatzlagerquerkraft H gemessen werden muss und zusammen mit Beschleunigungen am Radsatz \dot{y} bei Fahrzeugen ohne Drehgestelle, Beschleunigungen am Fahrwerk \dot{y}^+ bei Drehgestellfahrzeugen und Beschleunigungen im Fahrzeugkasten \dot{y}^* und \dot{z}^* zu messen ist. Außer den Messgrößen sind die Fahrgeschwindigkeit V und der Überhöhungsfehlbetrag u_f zu messen.”*[EN14363, 2010]

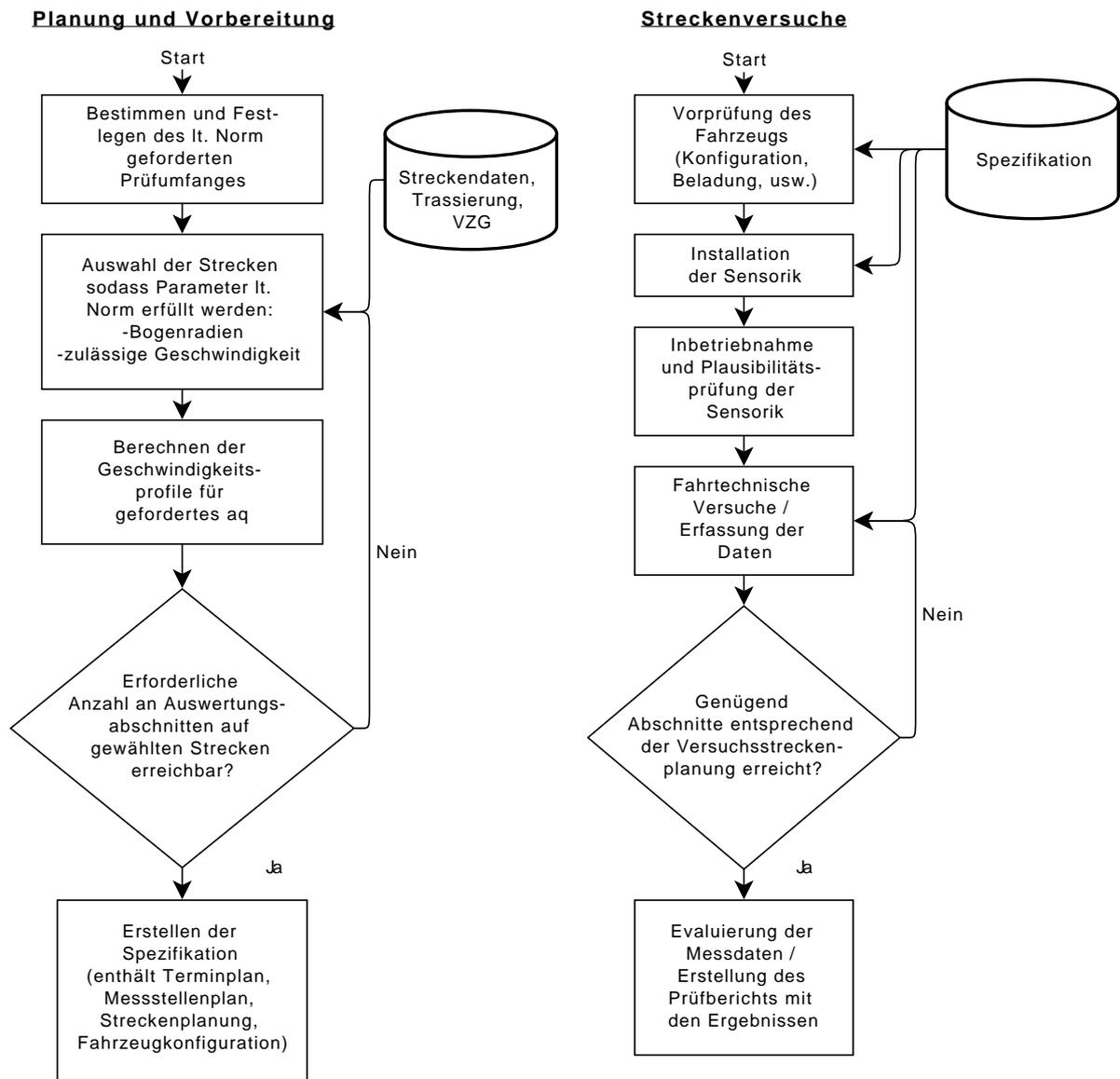


Abbildung 3.1: Ablauf der Versuchsvorbereitung und der Streckenversuche

Zur Positionierung und Anzahl der Messstellen gibt es in der EN 14363:2010 die folgenden Vorgaben: *“Kräfte zwischen Rad und Schiene sowie Radsatzlagerquerkräfte müssen mindestens an den beiden äußeren Radsätzen eines Fahrzeugs mit Einzelradsätzen oder des Drehgestells bei Fahrzeugen mit Drehgestellen gemessen werden, je nachdem, wie das Fahrzeug ausgestattet ist. Messstellen der Beschleunigungen im Fahrzeugkasten liegen auf dem Fußboden eines Fahrzeuges. Bezugsort ist bei Wagen die Mitte über dem Fahrwerk, bei Triebfahrzeugen der Führerraum. Bei Triebwagen oder Reisezugwagen sind zusätzlich Beschleunigungen in der Mitte des Fahrzeugkastens zu messen. Messstellen der Beschleunigungen am Drehgestell sind am Drehgestellrahmen oberhalb der beiden äußeren Radsätze anzubringen. Für Fahrzeuge mit besonderen Fahrwerken, mehrgliedrige Transporteinheiten oder Triebzüge ist der Messumfang den Erfordernissen anzupassen.”*[EN14363, 2010]

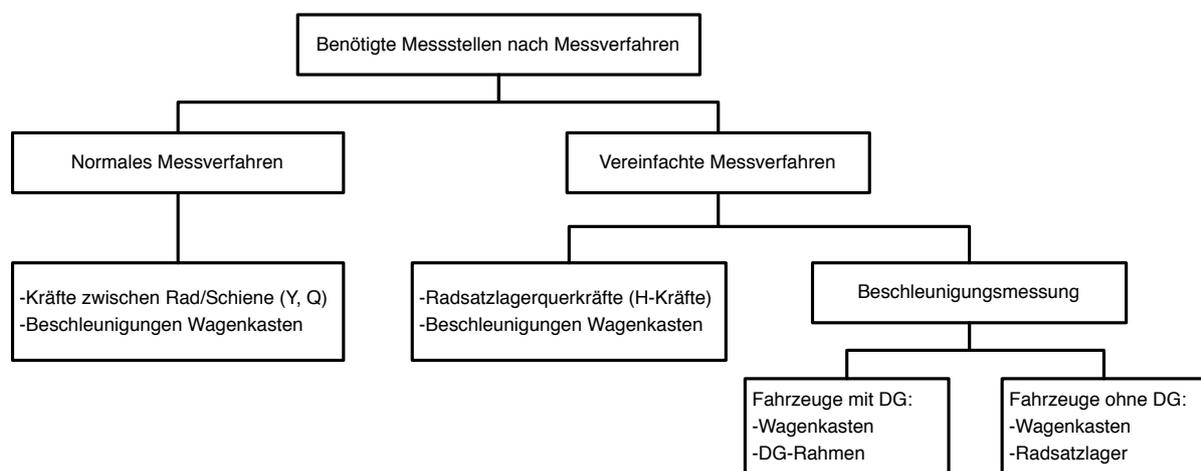


Abbildung 3.2: Messgrößen für verschiedene Messverfahren

Darüber hinaus können weitere Messgrößen erfasst werden um zusätzliche Daten zum Fahrzeug zu erhalten. Zu diesen optionalen Messgrößen zählen beispielsweise Signale aus einem Global-Positioning-System, Betriebsbeanspruchungen welche mittels Dehnmessstreifen erfasst werden oder auch der Bremszylinderdruck. Auf die nach EN 14363:2010 geforderten Beurteilungsgrößen soll hier nicht mehr im Detail eingegangen werden, da diese schon in Abschnitt 2.4.3, S. 13 behandelt wurden. Sie seien hier nur kurz erwähnt aber nicht näher erläutert. Es sind dies die Kräfte zwischen Rad und Schiene, sowohl in vertikaler Richtung als auch quer zur Fahrtrichtung (Y, Q). Weiters die Beschleunigungen quer zur Fahrtrichtung am Radsatzlager, dem Drehgestellrahmen und dem Wagenkasten (\ddot{y} , \ddot{y}^+ und \ddot{y}^*). Und zum Schluss die Beschleunigungen vertikal zur Fahrtrichtung am Wagenkasten (\ddot{z}^*).

3.1.2 Auswahl und Installation der Sensorik

Als nächster Schritt ist die Installation der Messtechnik, also der verwendeten Sensoren und des Zubehörs, vorgesehen. Bei der Auswahl der Sensoren sind die teilweise rauen Einsatzbedingungen (Erschütterungen, Umwelteinflüsse, elektrische und magnetische Störeinflüsse, Temperaturschwankungen, Schmutz usw.) zu beachten. Die Aufnehmer müssen auch unter diesen Bedingungen fähig sein die zu messenden Größen mit der geforderten Genauigkeit zu erfassen. Die Anforderungen an die verwendeten Beschleunigungsaufnehmer, Drehratensensoren und Sensoren zur Messung der Geschwindigkeit, sind in Tabelle B.1, S. 98, Tabelle B.2, S. 98 und Tabelle B.3, S. 99 im Anhang detailliert aufgelistet.

Für die Messung der Radkräfte werden Radsätze zu sogenannten Messradsätzen umgebaut. Dabei werden an bestimmten Stellen der Radscheibe Dehnmessstreifen appliziert und zu einer Wheatstoneschen Messbrücke⁵ verschalten. Je nachdem an welcher Stelle der Radscheibe die Dehnmessstreifen appliziert werden ist die Schaltung entweder auf Q-Kräfte (Radkräfte) oder Y-Kräfte (Führungskräfte) sensitiv. Natürlich ist immer ein gewisses Übersprechen vorhanden, d.h. selbst wenn der Radsatz nur mit Q-Kräften belastet wird, misst man trotzdem ein Signal an der Y-sensitiven Brücken. Dieser Fehler lässt sich jedoch durch geschicktes Platzieren der Dehnmessstreifen und durch Kalibrierung mit definierten Kräften und Belastungsrichtungen minimieren. Weiters werden die Messstellen an den Messradsätzen mit speziellen Abdeckmitteln vor Umwelteinflüssen, mechanischen, elektrischen und magnetischen Störungen geschützt. Auch bei der Verlegung der Schalllitzen zwischen den Dehnmessstreifen muss unbedingt darauf geachtet werden, dass es nicht auf Grund von Leiterschleifen zur Induktion von Störströmen kommt. Die Applikation der Messradsätze und DMS-Applikationen im Allgemeinen sind deshalb so empfindlich auf elektrische und magnetische Störungen, weil sich die gemessenen Spannungsunterschiede im Millivolt-Bereich bewegen. Die Messung der Radsatzlagerquerkräfte kommt eher seltener vor. Hierbei werden zu Kraftaufnehmern umgebaute Messbolzen in den Radsatzlagern eingebaut um die dort wirkenden Kräfte zu messen. Weiterführende Literatur zum Thema Messradsätze findet sich hier [Weber, 1961], [Berg u. a., 1996], [Kanehara und Ohno, 2003] sowie bei [Corazza u. a., 2004].

Zur Messung der Beschleunigungen können verschiedene Typen von Sensoren eingesetzt werden, die sich hauptsächlich durch Messprinzip, Messbereich und Genauigkeit unterscheiden. Eine gute Übersicht der Messprinzipien und Sensortypen geben [Reif, 2010] und [Czichos, 2008]. Wichtige Eigenschaften eines Sensors, für den hier behan-

⁵ Die Wheatstonesche Messbrücke erlaubt die Messung kleiner Widerstandsänderungen, wie sie bei Dehnmessstreifen als Signal auftreten. Eine genaue Beschreibung dieser Schaltung gibt z.B. [Hoffmann, 1987]

delten Anwendungsfalls, sind eine geringe Nullpunktdrift sowie geringes Übersprechen durch Beschleunigungen welche nicht in Messrichtung wirken. Abbildung 3.3, S. 28 zeigt einen Beschleunigungssensor am Wagenkastenboden.

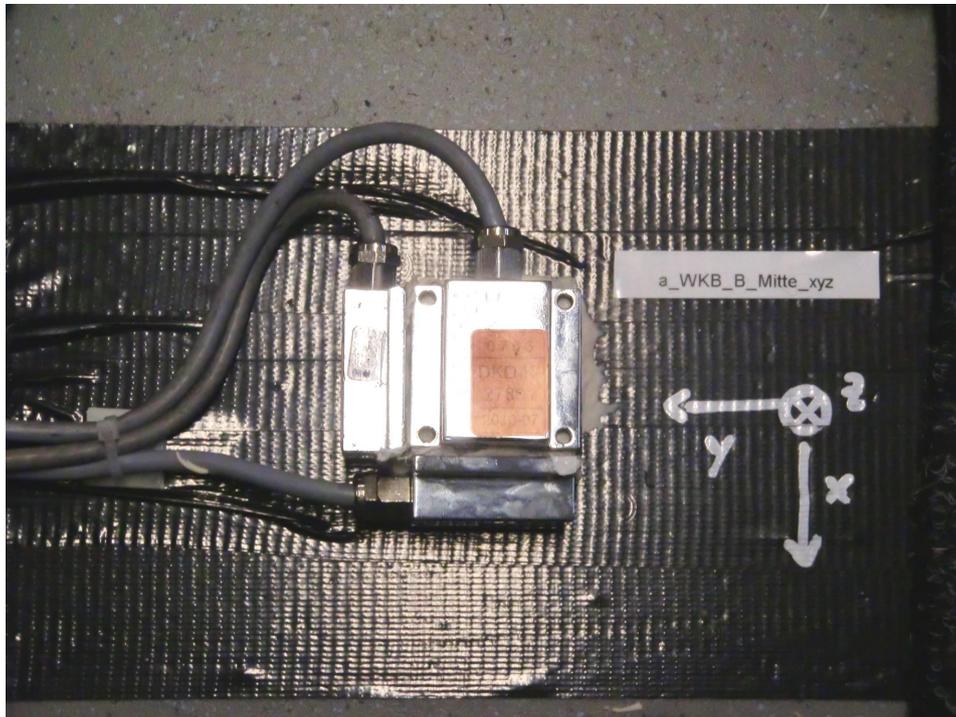


Abbildung 3.3: Beschleunigungssensoren im Wagenkasten

In Abbildung 3.4, S. 29 ist ein Beschleunigungssensor am Drehgestellrahmen mit Messrichtung quer zur Fahrtrichtung (y-Achse) dargestellt.

Abbildung 3.5, S. 29 zeigt schließlich einen am Radsatzlager angebrachten Beschleunigungsaufnehmer mit Messrichtung quer zur Fahrtrichtung (y-Achse). Mit diesem Aufnehmer wird gleichzeitig die freie Seitenbeschleunigung erfasst. Gerade an Messstellen wie dem hier gezeigten Radsatzlager sind die Beschleunigungsaufnehmer starken Vibrationen ausgesetzt. Am Radsatzlager können immerhin in Folge von Gleislagefehlern vertikale Beschleunigungen in der Größenordnung von bis zu 300 m/s^2 auftreten. Trotz dieser Belastungen müssen die Sensoren Nullpunktstabilität und geringes Übersprechen aufweisen. Man sieht also, dass die Anforderungen an die Sensorik hoch sind.

Unumgänglich ist auch die Erfassung der Fahrgeschwindigkeit. Diese kann je nach Fahrzeug entweder direkt aus der Fahrzeugsteuerung entnommen werden (z.B. bei Triebfahrzeugen, Triebzügen oder ähnlichen Fahrzeugen), oder es wird ein Sensor zur Bestimmung der Fahrgeschwindigkeit angebracht. Weitere Sensoren, die bei fahrtechnischen

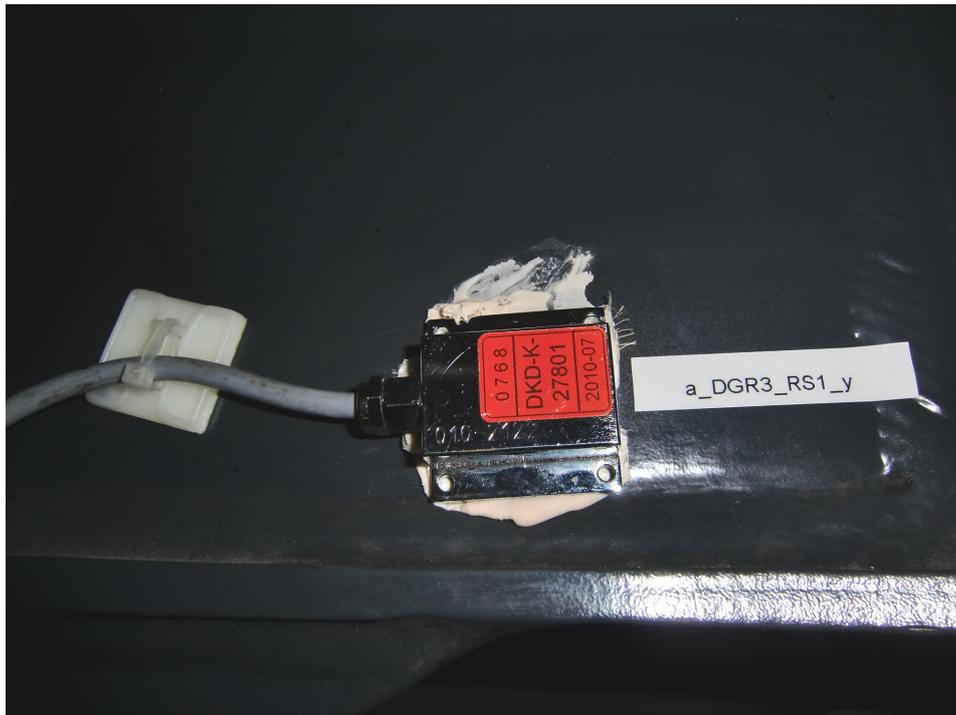


Abbildung 3.4: Beschleunigungssensor am Drehgestellrahmen

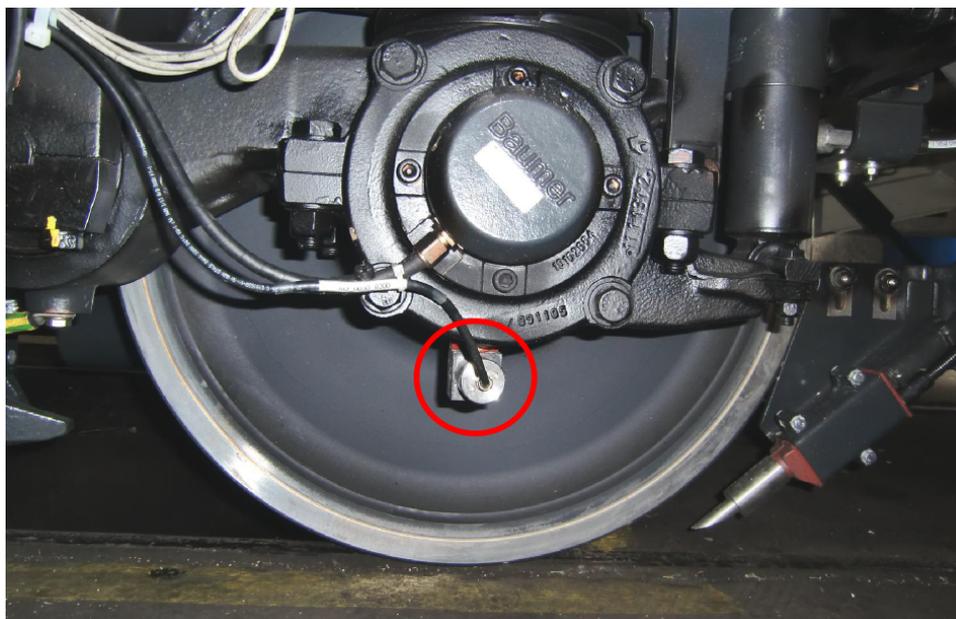


Abbildung 3.5: Beschleunigungssensor am Radsatzlager

Versuchen zum Einsatz kommen, sind Kreisel zur Messung der Winkelgeschwindigkeit (auch Drehrate genannt), oft wird auch ein Global-Positioning-System installiert um eine örtliche Zuordnung der erfassten Daten zu ermöglichen. Aus den Signalen der Drehraten-sensoren und der Fahrgeschwindigkeit lässt sich die Krümmung und die Überhöhung der befahrenen Strecke berechnen. Somit wird klar, dass die beiden Größen Fahrgeschwindigkeit und Drehrate von äußerster Wichtigkeit für die Evaluierung der Daten sind und daher die Funktionstüchtigkeit dieser Sensoren während der gesamten Messkampagne unbedingt notwendig ist.

Das Anbringen der Sensoren selbst wird vor den Streckenversuchen vom Messteam in einer geeigneten Umgebung (Depot, Werkstatt, oder Ähnlichem) erledigt. Dabei werden die Sensoren teilweise geklebt, teilweise geschraubt, oder auch auf andere Art und Weise am Fahrzeug angebracht. Wichtig ist vor allem beim Messen der Beschleunigungen, dass der Sensor fest mit dem Messobjekt verbunden ist, d.h. es sollten keine weichen oder dämpfenden Zwischenlagen verwendet werden. Wird dies nicht beachtet kann es zu einer Dämpfung der Beschleunigungen, welche auf den Sensor wirken, kommen. Eine weitere mögliche Fehlerquelle ist auch das Anbringen der Aufnehmer auf einer Abdeckung oder Verkleidung, denn so kann es vorkommen, dass die erfassten Schwingungen nichts mit den eigentlichen Beschleunigungen der Strukturbauteile zu tun haben. Die beschriebenen Effekte führen zu einer Verfälschung der Messergebnisse und schließlich zu nicht gültigen Ergebnissen bei der Evaluierung der Messdaten. Weiters ist bei der Installation der Sensoren darauf zu achten, dass unter keinen Umständen das Lichtraumprofil für die zu befahrende Strecke verletzt wird. Wird dies nicht berücksichtigt kann es nicht nur zur Beschädigung der Messausrüstung sondern auch zur Beschädigung von Signaleinrichtungen oder anderen Elementen des Oberbaus kommen. Beim Verlegen der Kabel der Sensoren muss ebenso auf das Lichtraumprofil geachtet werden. Weiters kommt es zwischen den einzelnen Komponenten des Fahrzeugs wie z.B. Radsatz, Drehgestell und Wagenkasten zu Relativbewegungen welche auch schon bei der Verkabelung berücksichtigt werden müssen. Außerdem hat es sich bewährt die Kabel nicht in direkter Nähe von potenziellen Störquellen (Fahrmotor, Bordnetz, Zugheizung, Zugsicherung, usw.) zu verlegen. Die hierbei verwendeten Kabel sind zwar mehrfach geschirmt und äußerst kapazitätsarm, aber trotzdem kann es durch starke elektrische oder magnetische Felder zu Einstreuungen kommen. Man sieht also, dass für ein einwandfreies Funktionieren der Sensorik während der Streckenversuche schon bei der Instrumentierung große Sorgfalt und genaues Arbeiten notwendig ist. Abbildung 3.6, S. 31 zeigt eine schematische Darstellung des Messkette.

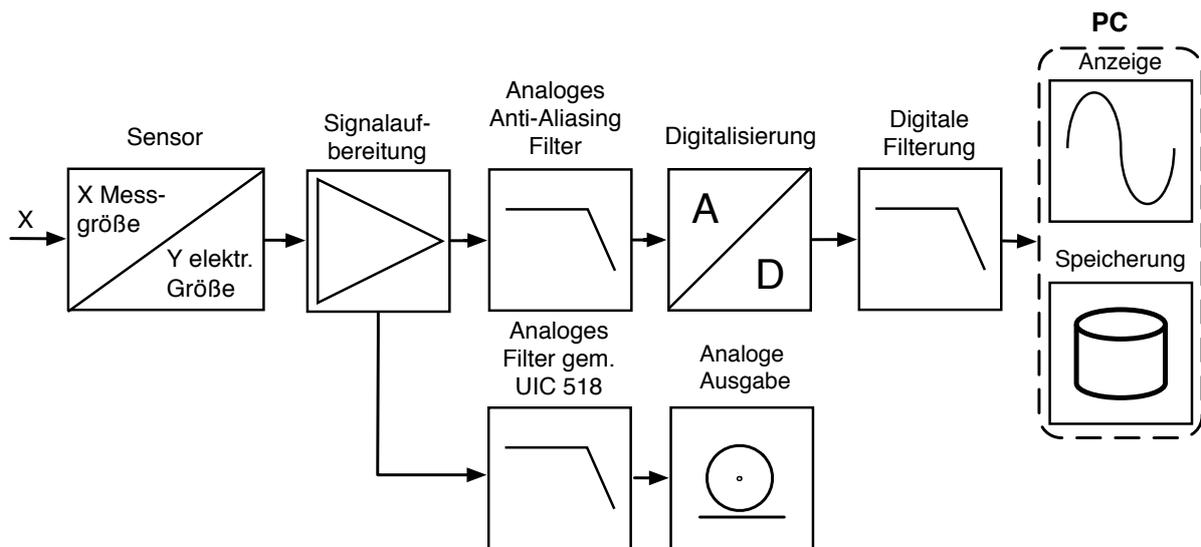


Abbildung 3.6: Darstellung der Messkette

3.1.3 Überprüfung der Messtechnik

Nachdem alle Sensoren angebracht sind wird das Messsystem aktiviert und eine Probefahrt zur Überprüfung der Messtechnik durchgeführt. Dabei sollte wenn möglich ein Stück gerade Strecke und ein Gleisbogen befahren werden, damit eine Querbeschleunigung und Führungskräfte an den Radsätzen wirken. Mittels der Geschwindigkeit und des Drehratensignals kann so ein rascher Funktions- und Plausibilitätstest der Sensorik durchgeführt werden.

Die Funktion der Drehrate kann überprüft werden indem eine Tiefpass-Filterung des Drehraten-Signals auf 1 Hz vorgenommen wird und anschließend mit den aus dem GPS-Kurs berechneten Werten für die Drehrate verglichen wird. Dazu wird wie in (3.3) die erste Ableitung des GPS-Kurs gebildet welche der Drehrate entspricht. Die Plausibilität der gemessenen Geschwindigkeit kann ebenfalls mit Hilfe des GPS überprüft werden.

Zur Überprüfung der Messradsätze gibt es mehrere Möglichkeiten. Die Richtigkeit der Q-Kraft Messung lässt sich überprüfen durch den Vergleich der Summe aller Q-Kräfte bei gleichmäßiger Fahrt auf gerader Strecke mit den Werten aus dem Verwiegeprotokoll. Ein weiterer Funktionstest der ebenfalls eine Überprüfung der Q-Kräfte erlaubt nutzt den Umstand, dass die Summe aller Q-Kräfte eines Drehgestells annähernd konstant ist, unabhängig davon ob gerade Strecke oder ein Gleisbogen befahren wird. Schließlich muss bei den Q-Kräften einer Drehgestellseite noch der Effekt zu beobachten sein, dass im Gleisbogen die Q-Kräfte der bogenäußeren Räder ansteigen und die der bogeninneren Räder sinken. Um die Plausibilität der Messwerte der Y-Kräfte zu prüfen kann die nicht kompensierte Querbeschleunigung a_Q herangezogen werden. Nach $F = m \cdot a$ ergibt sich

nämlich aus der Summe der Y-Kräfte geteilt durch die Fahrzeugmasse, welche sich aus der Summe der Q-Kräfte berechnen lässt, die Seitenbeschleunigung a_Q .

$$\sum Y = m_{Fzg} a_Q = \frac{\sum Q}{g} a_Q \rightarrow g \frac{\sum Y}{\sum Q} = a_Q \quad (3.1)$$

Der Quotient Y/Q lässt sich in Gleisbögen überprüfen. Nach den in der Norm verwendeten Koordinatensystemen ist die Krümmung eines Rechtsbogens als positiv definiert. Wird ein Rechtsbogen durchfahren so muss der Quotient Y/Q des linken vorlaufenden Rades höhere Amplituden zeigen als der Y/Q Quotient des rechten Rades. Bei einem Linksbogen ist es genau umgekehrt. Diesen ausgeprägten Unterschied gibt es nur beim vorlaufenden Radsatz, daher kann die Überprüfung der nachlaufenden Radsätze bei Fahrt in die Gegenrichtung durchgeführt werden. Die Y-Kräfte der einzelnen Radsätze lassen sich auf dieselbe Art und Weise überprüfen, dazu müssen aber Bögen mit engen Radien durchfahren werden, da sonst die Amplituden der Führungskraft nicht sehr ausgeprägt sind.

Nun zur Kontrolle der Messwerte der Beschleunigungsaufnehmer. Als Erstes sollte die Nullpunktstabilität überprüft werden. Diese lässt sich durch Mittelwertbildung der Messwerte bei Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit auf geraden Streckenabschnitten kontrollieren. Die Mittelwerte sollten auch für verschiedene Messfahrten konstant bleiben. Eine weitere Möglichkeit zur Erkennung von Fehlfunktionen der Aufnehmer ist eine Klassierung der Messwerte auf gerader Strecke. Dabei müsste sich annähernd eine Normalverteilung um Null ergeben. Ist die Verteilung in den positiven oder negativen Bereich verschoben, deutet dies auf einen Offset des Aufnehmers hin. Eine Kontrolle der maximalen gemessenen Amplituden lässt sich mit Erfahrungswerten bewerkstelligen. Auf jeden Fall müssen jedoch die Größenordnungen der Amplituden bei verschiedenen Messfahrten mit den gleichen Randbedingungen (Fahrzeug, Geschwindigkeit) gleich bleiben. Ob das Vorzeichen bei Horizontalbeschleunigungen der Konvention lt. Norm entspricht, lässt sich durch Vergleich mit dem Drehratensignal kontrollieren. Bei Fahrtrichtung "vorlaufend" sollten die Vorzeichen nämlich gleich sein und bei Fahrtrichtung "nachlaufend" sollten die Vorzeichen von Drehrate und Horizontalbeschleunigung entgegengesetzt sein. Sind am Testobjekt Beschleunigungsaufnehmer zur Messung der Horizontalbeschleunigung auf Körpern angebracht, welche durch vertikale Federstufen (z.B. Radsatzlager, Drehgestellrahmen und Wagenkasten) getrennt sind, so werden die Amplituden in der Regel von Federstufe zu Federstufe mit zunehmender Entfernung vom Gleis größer. Der Grund dafür ist, dass sich der Wagenkasten und auch das Drehgestell in Gleisbögen wegen der Zentrifugalbeschleunigung nach bogenaußen neigen und somit die Wirkung der Überhöhung verringern. Diese Regel gilt naturgemäß nicht für Fahrzeuge mit Neigetechnik. Funktioniert bei diesen Vorversuchen die Messtechnik wie gewünscht so kann mit

den eigentlichen Streckenversuchen begonnen werden.

3.1.4 Durchführung der Streckenversuche

Die Streckenversuche werden meist auf bestimmten Strecken durchgeführt von denen bekannt ist, dass einerseits die Parameter wie Gleislagequalität und äquivalente Konizität in den durch die Norm geforderten Bereichen liegen und sie andererseits möglichst alle benötigten Prüfbereiche enthalten. Dies ist natürlich nicht immer auf einem zusammenhängenden Streckenabschnitt möglich und so kann es vorkommen, dass an verschiedenen Versuchstagen unterschiedliche Strecken befahren werden. Beispielsweise ist es für die Stabilitätsbewertung notwendig, gerade Streckenabschnitte und Abschnitte sehr großer Radien mit Fahrzeughöchstgeschwindigkeit zu befahren. Zur Beurteilung des Fahrverhaltens in Bögen ist jedoch eher eine Strecke mit vielen Bögen unterschiedlicher Radien erwünscht. Da schon während der Versuchsplanung die benötigten Trassen reserviert werden müssen ist es vorteilhaft wenn es bei den eigentlichen Versuchen nicht durch Ausfall des Messequipments oder Problemen bei der Datenerfassung zu Verzögerungen kommt. Eine Änderung der benötigten Trassen ist nämlich mit Zusatzkosten verbunden. Unter diesen Aspekten ist eine effiziente Evaluierung der erfassten Daten nötig, bzw. ist eine "Vorabauswertung" direkt nach Abschluss einer Versuchsfahrt ungemein hilfreich. So lassen sich nämlich gleich Aussagen treffen ob weitere Fahrten auf diesem Streckenabschnitt notwendig sind oder ob schon genügend Daten für die Evaluierung vorhanden sind. Während der Versuchsfahrten werden die Daten aller Messstellen zeitsynchron erfasst und je nach Beurteilungsgröße mit den in der Norm festgelegten Filtern gefiltert. Die Daten werden online auf einem an den Messverstärker angeschlossenen Rechner vom Messteam mitverfolgt.

Die Ausgabe bestimmter Messsignale auf einem Datenschreiber in Papierform, wie es früher üblich war erscheint nicht mehr zeitgemäß. Trotzdem verlangt das UIC Merkblatt 518: *"Sämtliche für die Sicherheit des Versuchszuges maßgebenden Messsignale sind zur Sofortauswertung mit einem geeigneten Schreibgerät zu registrieren."* [UIC518, 2009]. In der EN 14363:2010 findet sich dazu keine dezidierte Angabe. Dort wird lediglich die Speicherung aller Messsignale, welche zur späteren Auswertung bestimmt sind, auf maschinell lesbaren Datenträgern gefordert. Zwei Beispiele für die Zeitschriebe der sicherheitsrelevanten Beurteilungsgrößen ist in Abbildung C.1, S. 101 und Abbildung C.2, S. 101 im Anhang zu sehen.

Es besteht außerdem eine Funkverbindung zum Triebfahrzeugführer um jederzeit kommunizieren zu können. Auf dieses Art und Weise kann sofort eingegriffen werden wenn

Grenzwerte der Beurteilungsgrößen überschritten werden. Weiters ist so eine kontinuierliche Überwachung der Messwerte und somit der Plausibilität und Funktion der Sensorik möglich. Die erfassten Messdaten werden auf dem am Messverstärker angeschlossenen Rechner gespeichert und vom Messteam nach Abschluss jeder Messfahrt auf einem separaten Datenträger gesichert. So ist die Sicherheit der Daten gewährleistet.

Nach Abschluss der Versuche geht es darum die Daten der Streckenversuche zu bewerten und nachzuweisen ob das Fahrzeug die in der Norm geforderten Bedingungen erfüllt. Sind alle Bedingungen erfüllt so ist der dynamische Teil der Prüfungen nach EN 14363:2010 abgeschlossen. Falls es in den Ergebnissen zu Überschreitungen bestimmter Grenzwerte kommt so ist zu prüfen ob Einzelfehler in der Gleislage die Gründe dafür sind oder ob die Überschreitungen am dynamischen Verhalten des Fahrzeugs liegen. In bestimmten Fällen sind Überschreitung der Grenzwerte tolerierbar (z.B. zu hohe quasi-statische Führungskräfte $\sum Y_{qst}$, im Prüfbereich 4), diese Ausnahmen sind aber in der Norm genau beschrieben. Die Ergebnisse der Streckenversuche werden nach Abschluss der Evaluierung der Daten in einem Bericht dokumentiert. In diesem Bericht sind auch die technischen und fahrdynamisch relevanten Daten des Testobjekts festgehalten. Der Bericht umfasst auch die ausführliche Dokumentation des Messaufbaus und der einzelnen Messfahrten. Eine genaue Dokumentation der Versuche ist schon im Vorfeld und während der gesamten Dauer der Versuche wichtig, damit Fragen, welche bei der Datenauswertung oder auch nach Abschluss der Fahrzeugzulassung auftauchen, beantwortet werden können.

Diese Analyse dient dazu die Anforderungen an die Auswerteroutine und die Notwendigkeit einer solchen aufzuzeigen. Zusammenfassend sollen nochmals die Kernpunkte erwähnt werden:

- rasche und unkomplizierte Plausibilitätsprüfung der erfassten Daten nach jeder Messfahrt
- Überprüfung ob schon genügend Daten für die Evaluierung erfasst wurden
- zeitnahe Bereitstellung der Ergebnisse nach Abschluss der Versuche
- grafische Aufbereitung der Ergebnisse

3.2 Zielsetzung der Arbeit

Zur Zielsetzung der Arbeit wurden schon im vorhergehenden Abschnitt mehrere Kernpunkte angeschnitten, die in diesem Abschnitt noch näher ausgeführt werden sollen.

Die Arbeit soll sich mit *der automatisierten Evaluierung der Messdaten aus fahrtechnischen Versuchen nach EN 14363:2010* beschäftigen. Der praktische Teil der Arbeit besteht aus der Beschäftigung mit den geltenden Regelwerken, mit der Identifizierung der Anforderungen die in der Praxis auftreten und der Erstellung einer Routine zur computergestützten Evaluierung der erfassten Daten.

Ein Grund für die in der Norm genau definierten Prüfbereiche und Prüfbedingungen unter denen die Versuche durchzuführen sind, ist die Vergleichbarkeit der Versuche. So sollte es prinzipiell möglich sein, die Versuche auf unterschiedlichen Streckennetzen zu fahren und dabei zu vergleichbaren Ergebnissen zu kommen. Natürlich nur unter der Voraussetzung, dass die Anforderungen an die Versuchsstrecken und die Prüfbedingungen lt. EN 14363:2010 eingehalten werden. Ein Überblick über die Parameter welche als Prüfbedingungen genau definiert werden zeigt Abbildung 3.7, S. 35.

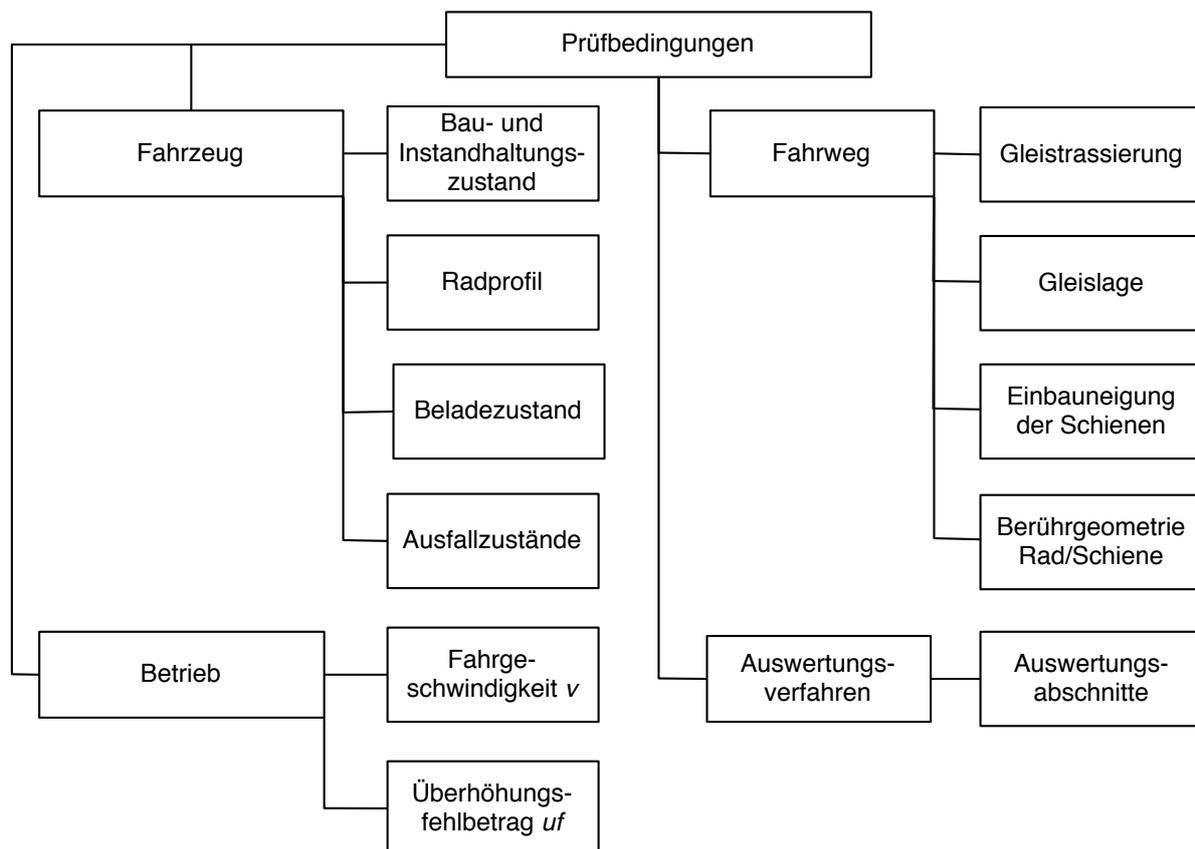


Abbildung 3.7: Prüfbedingungen, aus [EN14363, 2010]

Auf Grund des Status der EN 14363:2010 als europäische Norm ist sie im gesamten europäischen Raum anwendbar. Darüber hinaus kann diese Norm als Grundlage für Versuche in anderen Gebieten herangezogen werden. Dies ist natürlich nur in Übereinstimmung mit der für die Zulassung zuständigen Behörde möglich. Nachdem bisher das

UIC Merkblatt 518 international große Bedeutung bei der fahrtechnischen Zulassung von Schienenfahrzeugen hatte, ist davon auszugehen, dass dies in Zukunft auch bei der EN 14363:2010 so sein wird. Schließlich wurde in der EN 14363:2010 die im UIC Merkblatt 518 beschriebene Vorgehensweise für Streckenversuche zu großen Teilen übernommen.

Der Ansatz der statistischen Auswertung von dem in der EN 14363:2010 ausgegangen wird, berücksichtigt den Lauf eines Schienenfahrzeuges als stochastischen Prozess. Das soll nicht bedeuten man könnte nicht sagen ob denn jetzt das Fahrzeug in einem Bogen dem Verlauf der Strecke folgen wird oder nicht. Viel mehr lässt sich nicht genau vorhersagen wie die Wechselwirkungen zwischen Rad und Schiene auf kleinerem Maßstab verlaufen werden. Das hat mehrere Gründe. Zum einen ist der Bewegung des Schienenfahrzeuges in Fahrtrichtung eine durch den sogenannten *Sinuslauf* hervorgerufene periodische Querbewegung überlagert. Das heißt man kann nicht genau sagen mit wie viel Querauslenkung ein Schienenfahrzeug in einen Gleisbogen fährt. Zum anderen sind die Gleislagefehler auch stochastisch auf der Strecke verteilt. Weiters sind auch eventuelle Unrundheiten oder Fehler auf der Lauffläche über den Umfang der Radscheibe verteilt. Die genaue Paarung die in den Berührungspunkten zwischen Rad und Schiene beim Durchlaufen eines Gleisbogens auftritt ist also eine Kombination der genannten stochastischen Prozesse und wird auch bei mehrmaligem Durchfahren desselben Bogens niemals identisch sein. Somit sind auch die dabei auftretenden Messgrößen stochastische Größen. Um in der Lage zu sein diese Größen zu bewerten, und Aussagen zu treffen werden statistische Methoden angewandt, deren Funktion und Umsetzung in Abschnitt 3.3.6, S. 55 ausführlich beschrieben ist.

3.3 Erstellung der Funktionsmodule

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Module der Auswerteroutine (siehe Abbildung 3.8, S. 37) vorgestellt und deren Funktionsweise besprochen und auch anhand von Ablaufdiagrammen verdeutlicht.

3.3.1 Eingabe

Vor Beginn der Auswertung werden die dafür notwendigen Parameter bestimmt. Sie sind abhängig von der Art des Fahrzeugs (Triebfahrzeug, Triebzug, Reisezugwagen oder Güterwagen), von der Art des Streckenversuches (normal oder vereinfacht) und von der Art des Messverfahrens (normal oder vereinfacht).

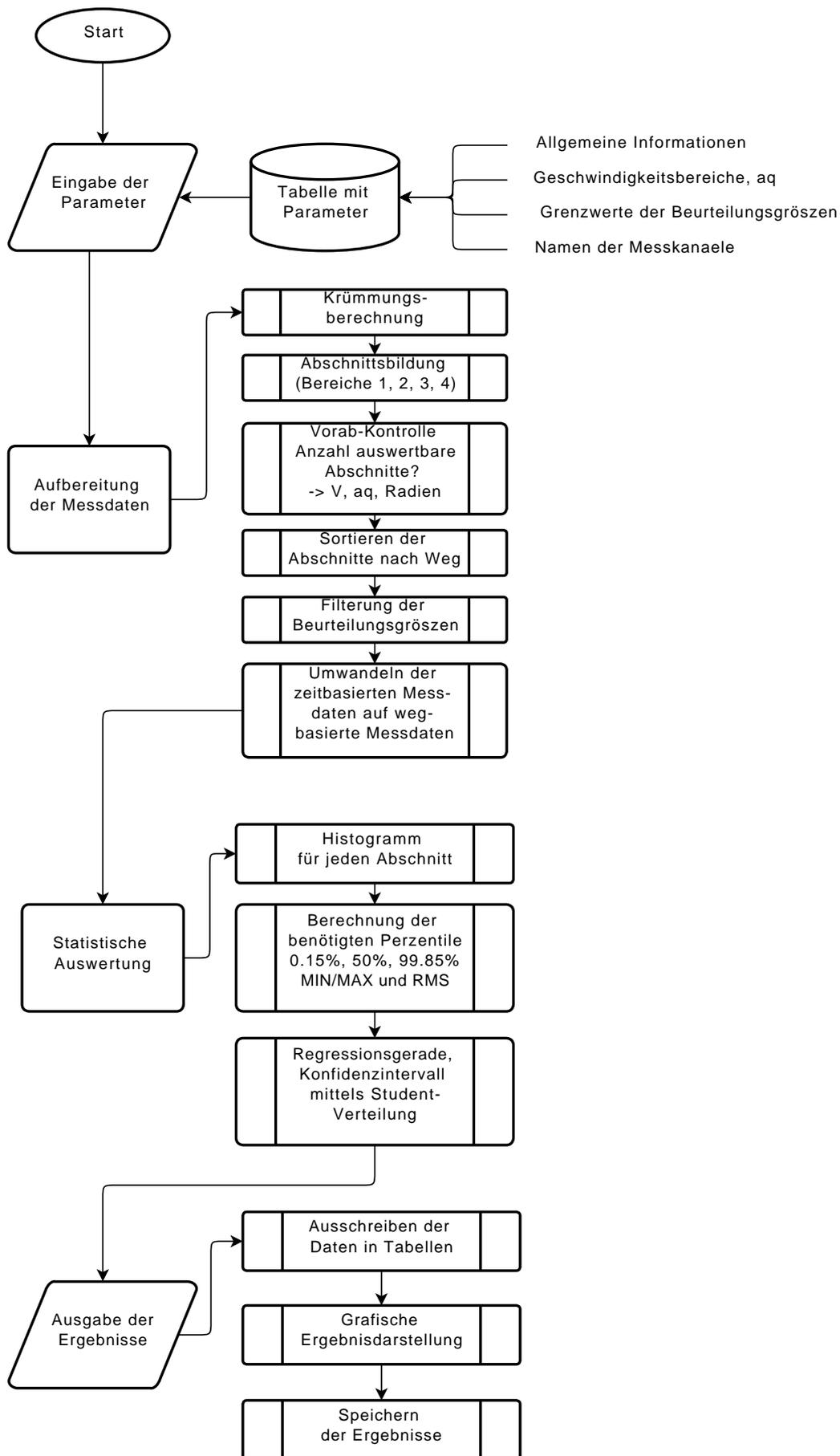


Abbildung 3.8: Übersicht der Funktionsmodule der Routine

Die Parameter lassen sich in fahrzeugseitige Parameter und fahrwegseitige Parameter einordnen. Zu den fahrzeugseitigen Parametern zählen:

- die maximal zulässige Fahrzeuggeschwindigkeit,
- die Masse des gesamten Fahrzeuges,
- die Masse des Drehgestelles,
- die Anzahl der Drehgestelle und Anzahl der Radsätze,
- und die Radsatzlast.

Die fahrwegseitigen Parameter sind:

- die zulässige Überhöhungsfehlbetrag (obwohl er sich eigentlich in Kombination mit der Fahrzeuggeschwindigkeit ergibt)
- und die Gleislagequalität der Streckenabschnitte (ausgedrückt in Qualitätsniveau).

Aus diesen Parametern lassen sich mit den in der Norm angegebenen Formeln und Tabellen die für die Evaluierung ebenfalls benötigten Grenzwerte der Beurteilungsgrößen berechnen. Die Grenzwerte hängen natürlich auch vom Typ der Fahrzeuges ab. So sind für Reisezugwagen und Triebfahrzeuge klarerweise niedrigere Grenzwerte für das Schwingungsverhalten, welches den Komfort mitbestimmt, definiert als für Güterwagen oder Spezialfahrzeuge. Außerdem wird bei den Grenzwerten der Fahrsicherheit der, im Vergleich zu Triebfahrzeugen und Reisezugwägen, oft schlechtere Wartungszustand der Güterwagen mit einem Sicherheitsfaktor berücksichtigt. Unbeladene Güterwagen sind wegen ihrer Neigung zu instabilem Lauf und geringen Radaufstandskräften eher entgleisungsgefährdet. Dieser Umstand wird daher bei bestimmten Beurteilungsgrößen ebenfalls mit einem eigenen Sicherheitsfaktor berücksichtigt. Weiters bestimmen Parameter wie die Fahrzeughöchstgeschwindigkeit und der zulässige Überhöhungsfehlbetrag andere Parameter wie die Abschnittslänge und die nötige freie Seitenbeschleunigung in den Prüfbereichen.

Diese Eingabeparameter werden in Form einer Excel Tabelle übergeben. Wie im Ablaufdiagramm Abbildung 3.8, S. 37 angegeben, enthält die Tabelle allgemeine Informationen, V_{max} , a_Q , Grenzwerte der Beurteilungsgrößen und die Namen der benötigten Messkanäle. Die Routine liest die benötigten Werte aus dieser Tabelle aus und legt sie zur weiteren Verarbeitung im Speicher ab. Während des Einlesevorgangs werden die Werte soweit wie möglich auf Plausibilität geprüft und so mögliche Eingabefehler vermieden. In diesem Funktionsmodul werden auch den Messkanälen die für die Evaluierung notwendigen, standardisierten Namen zugewiesen.

3.3.2 Berechnung der Krümmung der Strecke

Am Beginn der Auswertung steht die Krümmungsberechnung. In diesem Modul wird aus dem Drehratensignal (Winkelgeschwindigkeit) um die Hochachse oder auch aus dem Kurs des Global-Positioning-Systems unter Einbeziehung der Fahrzeuggeschwindigkeit die Krümmung der Strecke berechnet. Die Krümmung ist als Kehrwert des Radius der Strecke definiert und hat die Einheit [1/m]. Diese Größe wird deswegen verwendet weil damit die Trassierung der Strecke besser darstellbar ist. Würde der Radius über dem Weg oder der Zeit aufgetragen, so ginge dieser bei gerader Strecke gegen unendlich, was die Darstellung wenig übersichtlich macht. Wenn das Drehratensignal in [°/s] erfasst wird, so lässt sich die Krümmung mit folgender Formel berechnen:

$$K = \frac{oz}{v} \cdot \frac{2\pi}{360} \quad (3.2)$$

K ...Krümmung der Strecke in [1/m]

oz ...Drehratensignal in [°/s] um die Hochachse (z-Achse) des Fahrzeugs

v ...Fahrzeuggeschwindigkeit in [m/s]

Soll die Krümmung der Strecke aus dem GPS-Signal berechnet werden, so wird der Kurs (auch Heading genannt) benötigt. Der Kurs ist definiert als Winkel zwischen der Richtung in der sich das Fahrzeug gerade bewegt und dem geographischen Nordpol. Ein Kurs von 90° bedeutet also, dass sich das Fahrzeug nach Osten bewegt. Mit dieser Information lässt sich auf folgende Art und Weise die Krümmung bestimmen:

$$K = \frac{dc}{dt} \cdot \frac{1}{v} \cdot \frac{2\pi}{360} \quad (3.3)$$

K ...Krümmung der Strecke in [1/m]

c ...Kurs in [°]

v ...Fahrzeuggeschwindigkeit in [m/s]

3.3.3 Bildung der Auswertungsabschnitte

Liegt die Krümmung der Strecke vor, so kann mit der Abschnittsbildung begonnen werden. Unter Auswertungsabschnitt versteht man einen Teil der Versuchsstrecke. Der Sinn dieser Vorgehensweise wird später klarer, wenn die statistische Auswertung der Messdaten besprochen wird. Die während der Versuchsfahrt kontinuierlich aufgezeichneten Messdaten werden ebenso in Auswertungsabschnitte unterteilt. Man kann sich das in etwa so vorstellen: Es werden Datenpakete gebildet in denen die genau in diesem Auswertungsabschnitt erfassten Daten enthalten sind. Nach welcher Vorgehensweise die ge-

messene Strecke in Abschnitte unterteilt wird ist in Abbildung 3.9, S. 40 dargestellt. Als Erstes wird die Strecke in die Trassierungselemente Gerade, Übergangsbogen und Vollbogen unterteilt. Der Übergangsbogen ist der Teil der Strecke, vor und nach einem Vollbogen, in dem sich die Krümmung von 0 (gerade Strecke) auf den konstanten Wert im Vollbogen und umgekehrt ändert. Die Geraden (Prüfbereich 1) werden weiters in Abschnitte (G_1, G_2, \dots, G_n) mit bestimmter Länge, welche vorher in Abhängigkeit der Höchstgeschwindigkeit zu bestimmen ist, unterteilt.

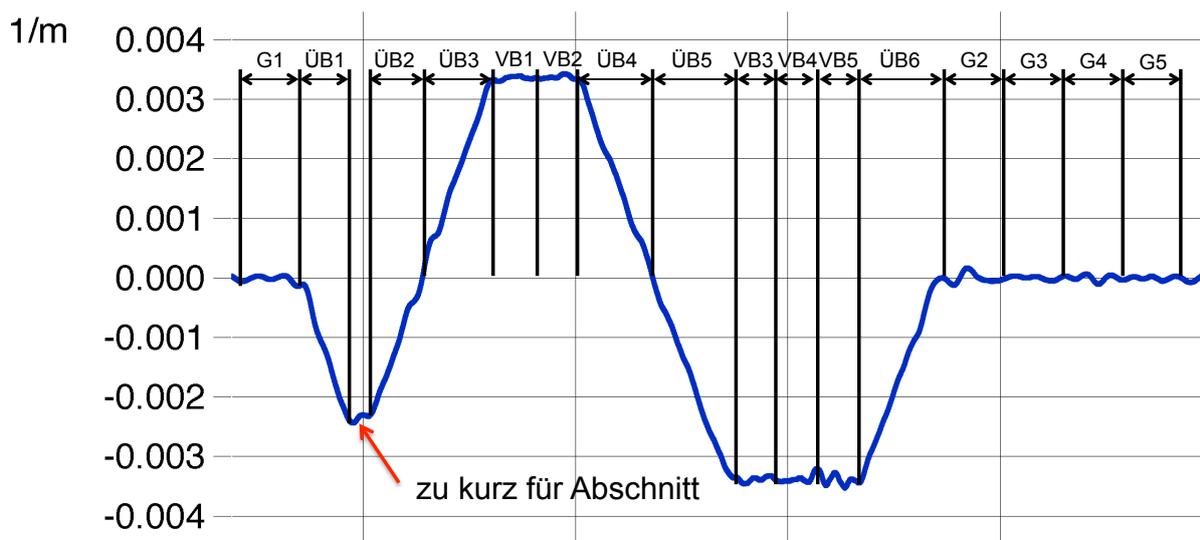


Abbildung 3.9: Abschnittsbildung für Geraden, Übergangsbögen und Vollbögen

Die Übergangsbögen werden nicht weiter unterteilt sondern bilden jeweils einen eigenen Auswerteabschnitt ($\ddot{U}B_1, \ddot{U}B_2, \dots, \ddot{U}B_n$). Die Vollbögen werden ebenso in Abschnitte (VB_1, VB_2, \dots, VB_n) unterteilt. Zusätzlich werden sie abhängig von ihrem Radius und/oder dem Überhöhungsfehlbetrag in die verschiedenen Prüfbereiche (Prüfbereich 2, 3 oder 4) eingeteilt. Die Prüfbereiche 3 und 4 sind durch den vorliegenden Bogenradius und den Überhöhungsfehlbetrag definiert. Die in Abbildung 3.9, S. 40 dargestellten Vollbögenabschnitte würden vom Radius her ($R \approx 300m$) in den Prüfbereich 4 fallen, vorausgesetzt der Überhöhungsfehlbetrag erfüllt auch die Kriterien für Prüfbereich 4. Der Prüfbereich 2 stellt eine Ausnahme dar, denn in der EN 14363:2010 gibt es für diesen Prüfbereich keine Angabe zu einem Radiusbereich der diesem Prüfbereich zugewiesen ist. Vielmehr wird dieser Prüfbereich ausschließlich durch die Grenzen für Überhöhungsfehlbetrag und die Grenzen für die Fahrzeuggeschwindigkeit festgelegt. Dies kann unter Umständen dazu führen, dass sich Auswertungsabschnitte sowohl dem Prüfbereich 2 als auch dem Prüfbereich 3 zuordnen lassen.

Ein Beispiel dafür wäre die Zulassung eines Güterwagens für eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von $V_{zul} = 100 \text{ km/h}$ und einem zulässigen Überhöhungsfehlbetrag von

$uf = 130\text{mm}$. Für Prüfbereich 2 muss lt. Tabelle 3.1, S. 42 die Fahrgeschwindigkeit V zwischen 100 km/h und 110 km/h liegen und für den Überhöhungsfehlbetrag uf gilt $0,75 uf_{zul} \leq uf \leq 1,1 uf_{zul}$ also in Zahlenwerten $97,5\text{mm} \leq uf \leq 143\text{mm}$. Für Auswertungsabschnitte in Prüfbereich 3 gilt, der Bogenradius muss im Bereich 400 m und 600 m liegen, weiters gilt $V \leq 1,1 V_{zul}$ d.h. die Fahrgeschwindigkeit muss im konkreten Fall kleiner 110 km/h sein und für den Überhöhungsfehlbetrag gilt dieselbe Bestimmung wie für Prüfbereich 2. Mit einem Zahlenbeispiel lässt sich die Überschneidung der Prüfbereiche demonstrieren. Die schon gezeigte Formel

$$uf = a_Q \frac{b}{g} \quad (3.4)$$

lässt sich mit

$$a_Q = \frac{V^2}{R} - g \frac{u}{b} \quad (3.5)$$

umformen zu

$$uf = \frac{V^2 b}{R g} - u \quad (3.6)$$

Für $R = 580\text{ m}$, $V = 105\text{ km/h}$, $b = 1,5\text{ m}$, $g = 9,81\text{ m/s}^2$ und $u = 0,1\text{ m}$ ergibt sich $uf = 124,27\text{ mm}$.

Die Bedingung für den Überhöhungsfehlbetrag $97,5\text{ mm} \leq uf \leq 143\text{ mm}$ ist somit für beide Bereiche erfüllt. Mit $V = 105\text{ km/h}$ ist sowohl die Bedingung für Prüfbereich 2 nämlich $100\text{ km/h} \leq V \leq 110\text{ km/h}$ als auch die Bedingung für Prüfbereich 3 mit $V \leq 110\text{ km/h}$ erfüllt. Der Bogenradius schlussendlich liegt mit $R = 580\text{ m}$ ebenso in dem für Prüfbereich 3 angegebenen Bereich von $400\text{ m} \leq R \leq 600\text{m}$. Da für Prüfbereich 2 keine Beschränkung der Bogenradien angegeben ist und die restlichen Parameter die Kriterien beider Prüfbereich erfüllen, würde sich ein solcher Auswertungsabschnitt Prüfbereich 2 und 3 zuordnen lassen. Diese Problematik tritt hauptsächlich bei Prüfungen von Fahrzeugen mit Höchstgeschwindigkeiten bis 160 km/h auf.

Die Parameter Fahrgeschwindigkeit und Überhöhungsfehlbetrag müssen sich in gewissen Bereichen bewegen, damit ein Abschnitt für die Evaluierung herangezogen werden kann. Diese Kriterien sind in Tabelle 3.1, S. 42 aufgelistet. Die Länge der Abschnitte unterscheidet sich auch abhängig vom Prüfbereich, dem die Abschnitte zugeordnet werden.

Die bei der Auswertung gebildeten Abschnitte werden abhängig von den Parametern Radius, Überhöhungsfehlbetrag und Fahrgeschwindigkeit in vier verschiedene Prüfbereiche, die das Fahrverhalten in unterschiedlichen Situationen prüfen sollen, eingeteilt. Der Zweck der einzelnen Prüfbereiche ist in Abbildung 3.10, S. 43 abgebildet.

Tabelle 3.1: Prüfbedingungen für Fahrgeschwindigkeit und Überhöhungsfehlbetrag

	Prüfbereich 1 Gerades Gleis und Gleisbogen mit sehr großem Radius	Prüfbereich 2 Gleisbogen mit großem Radius	Prüfbereich 3 Gleisbogen mit kleinem Radius $400\text{m} \leq R \leq 600\text{m}$	Prüfbereich 4 Gleisbogen mit sehr kleinem Radius $250\text{m} \leq R \leq 400\text{m}$
Fahrgeschwindigkeit V	$V = \max(1.1 + V_{zul}, V_{zul} + 10 \text{ km/h})$	$V_{zul} \leq v \leq 1.1 * V_{zul}$	$v \leq 1.1 * V_{zul}$	
Überhöhungsfehlbetrag uf	$uf \leq 40 \text{ mm}$	$0.75 * uf_{zul} \leq uf \leq 1.1 * uf_{zul}$		
Toleranz	$+/- 5 \text{ km/h}$	$+/- 5 \text{ km/h},$ $+/- 0.05 * uf_{zul}$	$+/- 0.05 * uf_{zul}$	

In Prüfbereich 1 wird das Fahrzeug im Bereich der zulässigen Fahrzeughöchstgeschwindigkeit geprüft. Daher werden diesem Prüfbereich vor allem gerade Streckenabschnitte und Streckenabschnitte sehr großer Radien zugeordnet. In diesem Prüfbereich soll das dynamische Verhalten des Fahrzeugs bei hohen Geschwindigkeiten und dem Einwirken von stochastischen Gleislagestörungen untersucht werden. Außerdem wird die Stabilität des Fahrzeugs überprüft, da Stabilitätsprobleme tendenziell auf gerader Strecke und bei höheren Geschwindigkeiten auftreten.

Der Prüfbereich 2 umfasst lt. EN 14363:2010 Streckenbereiche in Gleisbögen mit großem Radius ist aber streng genommen nur über Geschwindigkeit und Überhöhungsfehlbetrag definiert (siehe Beispiel für die Zulassung eines Güterwagens). Hier sind ebenfalls Fahrgeschwindigkeiten im Bereich der Fahrzeughöchstgeschwindigkeit zu erwarten. Weiters treten hier auch große Überhöhungsfehlbeträge und somit auch große Querbeschleunigungen auf. Dies hat eine Überlagerung der dynamischen und quasistatischen⁶ Anteile bei allen Beurteilungsgrößen zur Folge.

Die Prüfbereiche 3 und 4 umfassen Gleisbögen mit kleinem und sehr kleinem Radius. Prüfbereich 3 deckt dabei den Bereich von 400 m bis 600 m ab und in Prüfbereich 4 fallen Abschnitte mit Radien zwischen 250 m und 400 m. Dabei wird das Fahrzeug im Bereich des zulässigen Überhöhungsfehlbetrags geprüft. In diesen Prüfbereichen sind geringere dynamische Anteile in den Beurteilungsgrößen zu erwarten, der quasistatische Anteil in

⁶ Der Ausdruck *quasistatisch* bedeutet, der Messwert einer Beurteilungsgröße bleibt über einen, fahrdynamisch gesehen, längeren Zeitraum (einige Sekunden) annähernd konstant. Als Beispiel sei die Querbeschleunigung im Vollbogen (konstanter Radius) bei konstanter Fahrgeschwindigkeit und konstanter Überhöhung genannt.

beispielsweise den Führungskräften und den Radkräften steigt hingegen an.

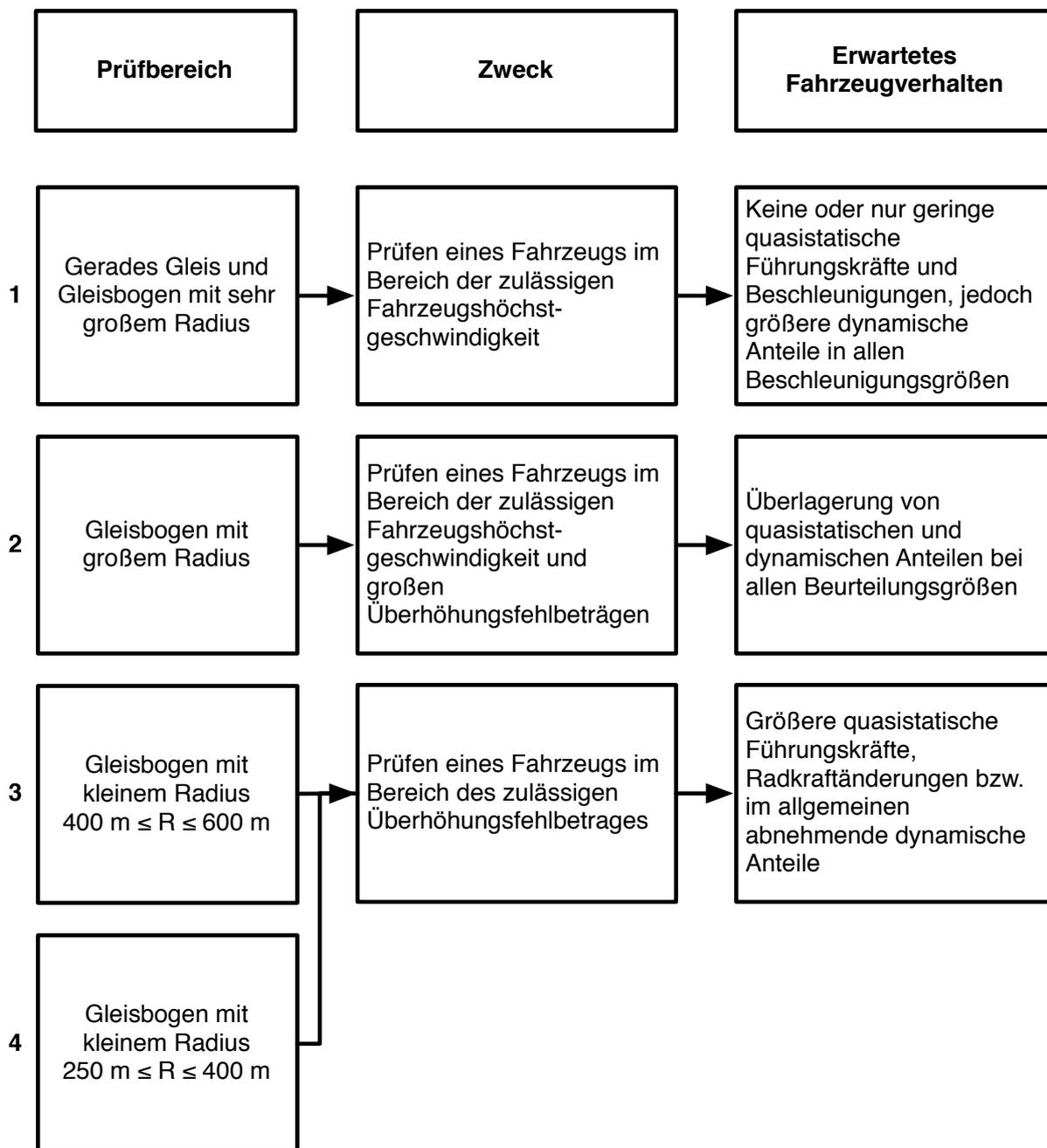


Abbildung 3.10: Prüfbereiche der fahrtechnischen Versuche, aus [EN14363, 2010]

Nach den Prüfbereichen soll nun wieder genauer auf die Auswerteroutine und deren Ablauf eingegangen werden. Die schon vorher erwähnten Abschnitte liegen mittlerweile vor. Nun wird noch überprüft ob nicht Abschnitte doppelt vorhanden sind, was zum Beispiel durch mehrmaliges Befahren derselben Strecke vorkommen kann. Prinzipiell dürfen Abschnitte doppelt bewertet werden wenn die zweidimensionale Evaluierung laut EN 14363:2010 angewendet wird. Das zweidimensionale Bewertungsverfahren verlangt,

dass die Ergebnisse über der freien Seitenbeschleunigung (a_Q) aufgetragen werden. So kann gleich eine Korrelation zwischen der Querbeschleunigung und der betrachteten Beurteilungsgröße festgestellt werden. Doppelte Abschnitte müssen sich jedoch durch die Fahrgeschwindigkeit bzw. den Überhöhungsfehlbetrag unterscheiden. Für jene Abschnitte die Übergangsbögen repräsentieren gilt dies jedoch nicht und so müssen zumindest die doppelten Übergangsbögenabschnitte erkannt und entfernt werden.

3.3.4 Vorabkontrolle der Auswertungsabschnitte

Für die Streckenversuche ist es wichtig das Fahrzeug in genau definierte Fahrzustände, entsprechend den Prüfbereichen 1 bis 4, zu bringen. Die Planung wo diese Fahrzustände auf der Versuchsstrecke zu erreichen sind und mit welcher Geschwindigkeit diese dafür auf einem bestimmten Abschnitt befahren werden muss geschieht vor den Versuchen bei Erstellung der Spezifikation und der Trassenplanung. Als nächster Schritt der Auswertung erfolgt daher die *Vorabkontrolle* der Abschnitte indem die Abschnitte in einem Balkendiagramm über dem Krümmungsschrieb der Strecke dargestellt werden. Die Abschnitte in Bögen werden als Balken in einem Diagramm dargestellt auf dessen Abszisse (x-Achse) die Strecke aufgetragen ist und auf dessen Ordinate (y-Achse) kann die freie Seitenbeschleunigung (a_Q) abgelesen werden. Also stellt die Höhe des Balkens den Mittelwert der, in diesem Abschnitt herrschenden, freien Seitenbeschleunigung dar. Weiters zeigt die Farbe des Balkens ob der Abschnitt auswertbar ist (grün), oder ob a_Q in diesem Abschnitt zu hoch (rot) oder zu niedrig (gelb) ist. In Abbildung 3.11, S. 45 ist die eben beschriebene Grafik für Abschnitte des Prüfbereichs 4 dargestellt.

Abschnitte auf gerader Strecke (Prüfbereich 1) werden ebenfalls als Balken über der Strecke gezeigt. Hierbei wird jedoch auf der Ordinate die Fahrgeschwindigkeit aufgetragen, da in Prüfbereich 1 der Überhöhungsfehlbetrag ohnehin auf 40 mm begrenzt ist und daher keine nennenswerten quasistatischen Querbeschleunigungen zu erwarten sind. Deshalb wird als Kriterium die Fahrgeschwindigkeit herangezogen. Eine Übersicht der Anzahl der gültigen Abschnitte in den einzelnen Prüfbereichen ist in der Darstellung auch zu finden. Als Beispiel ist in Abbildung 3.12, S. 45 eine solche Grafik dargestellt. Diese Funktion der Auswerteroutine lässt sich auch schon während der Messfahrten nutzen. So kann nämlich zum Beispiel geprüft werden wie viele, für die Evaluierung verwendbare, Abschnitte auf der aktuellen Messfahrt erreicht wurden. Dies hilft bei der Durchführung der Streckenversuche und trägt dazu bei den zeitlichen Aufwand zu verkürzen.

Die hier gezeigten Ergebnisse der Vorabkontrolle wurden mit Daten aus Simulationsrechnungen berechnet, daher sind auch kaum ungültige Auswertungsabschnitte enthal-

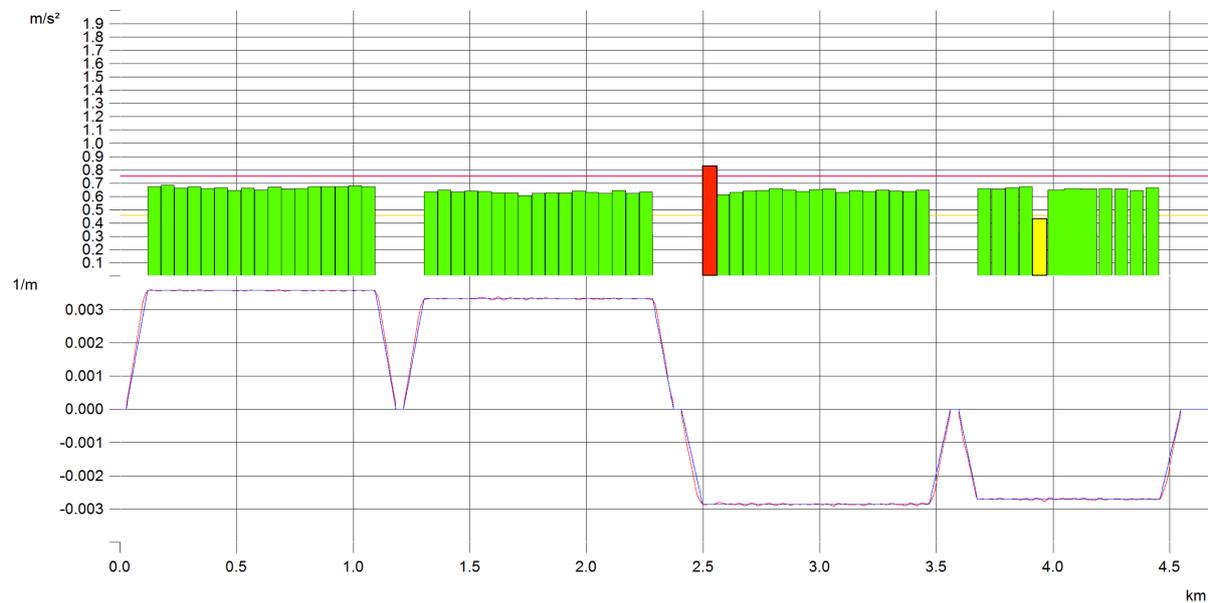


Abbildung 3.11: Kontrolle der Abschnitte für Prüfbereich 4

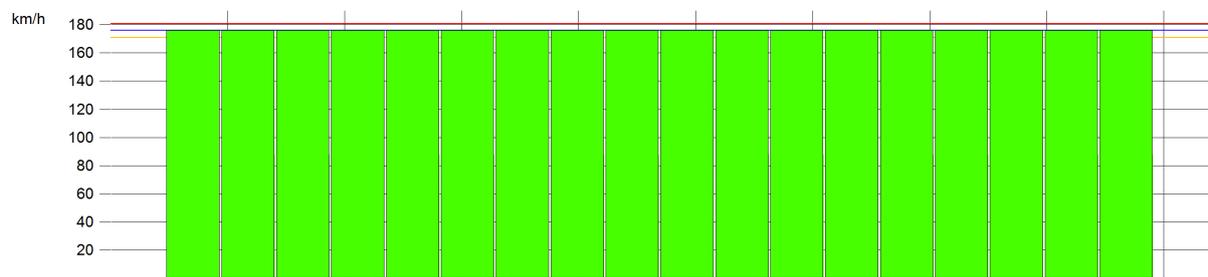


Abbildung 3.12: Kontrolle der Abschnitte für Prüfbereich 1

ten. In der Realität ist es meist komplizierter die gewünschten Fahrzustände an den gewünschten Stellen der Strecke zu erreichen. Zur Verdeutlichung sind im Anhang zwei Resultate einer Vorabauswertung angefügt, die während realer Versuche erzeugt wurden (siehe Abbildung C.3, S. 102 und Abbildung C.4, S. 102).

In der EN 14363:2010 sind für die Prüfbereiche 1 und 2 als Mindestanzahl an Abschnitten 25 angegeben. Für Prüfbereich 3 werden 50 gültige Auswertungsabschnitte gefordert und für Prüfbereich 4 wiederum 25. Die Mindestlänge der aufsummierten Auswertungsabschnitte ist nur für die Prüfbereiche 1 und 2 mit jeweils 10 km angegeben. Das ist deswegen notwendig, da in diesen Prüfbereichen die Abschnittslängen je nach maximal zulässiger Fahrzeughöchstgeschwindigkeit variieren. Die Länge der Auswertungsabschnitte in Prüfbereich 1 beträgt 250 m für eine Fahrzeughöchstgeschwindigkeit kleiner als oder gleich 220 km/h. Ist die Fahrzeughöchstgeschwindigkeit größer als 220 km/h so sind in Prüfbereich 1 Abschnitte mit einer Länge von 500 m gefordert. In Prüfbereich 2 wird die Abschnittslänge auch durch die Fahrzeuggeschwindigkeit bestimmt. Bei Geschwindigkeiten kleiner als 140 km/h ist die Länge der Auswertungsabschnitte 100 m, bei Geschwindigkeiten zwischen 140 km/h und inklusive 220 km/h beträgt sie 250 m und bei Geschwindigkeiten über 220 km/h schließlich 500m. Die Länge der Auswertungsabschnitte in Prüfbereich 3 ist mit 100 m und in Prüfbereich 4 mit 70 m festgesetzt. Diese Angaben sind für den Prüfbereich 1 in Tabelle 3.2, S. 46 aufgelistet.

Tabelle 3.2: Mindestlänge und Anzahl Abschnitte Prüfbereich 1, aus [EN14363, 2010]

Prüfmerkmal	Prüfbereich 1 Gerades Gleis und Gleisbogen mit sehr großem Gleisbogenhalbmesser ($uf \leq 40mm$)
Länge der Auswertungsabschnitte L_{AA}^a a) $V \leq 220$ km/h b) $V \geq 220$ km/h	250 m 500 m
Mindestanzahl der auszuwertenden Auswertungsabschnitte $n_{AA,min}$	25
Mindestlänge der aufsummierten Auswertungsabschnitte $\sum L_{AA,min}$	10 km
^a Toleranz für die Länge des einzelnen Auswerteabschnittes: $+/- 10\%$	

Da in den Prüfbereichen 2, 3 und 4 noch weitere Parameter bei der Abschnittsbildung berücksichtigt werden müssen, sind die Angaben zu den Auswertungsabschnitten in Ta-

belle 3.3, S. 47 getrennt von jenen des Prüfbereichs 1 dargestellt.

Tabelle 3.3: Mindestlänge und Anzahl der Abschnitte in den Prüfbereichen 2, 3 und 4, aus [EN14363, 2010]

Prüfmerkmal	Prüfbereich 2	Prüfbereich 3 $400 \text{ m} \leq R \leq 600 \text{ m}$	Prüfbereich 4 $250 \text{ m} \leq R \leq 400 \text{ m}$
Länge der Auswertungsabschnitte L_{AA}^a	variabel s.u.	100 m	70 m
a) $V \leq 100 \text{ km/h}$ b) $140 \text{ km/h} < V \leq 220 \text{ km/h}$ c) $V > 220 \text{ km/h}$	100 m 250 m 500 m		
Mindestanzahl der auszuwertenden Auswertungsabschnitte $n_{AA,min}$	25	50	25
Mindestlänge der aufsummierten Auswertungsabschnitte $\sum L_{AA,min}$	10 km		
Durchschnittlicher Gleisbogenhalbmesser aller Auswertungsabschnitte R_{mwa}^b		500 m +/- 50 m	300 m +50 m, -20 m
<p>^a Toleranz für die Länge des einzelnen Auswerteabschnittes: +/- 20%</p> <p>^b Bei nationalen oder grenzüberschreitendem Betrieb können die Gleisbogenhalbmesser für die Prüfung in den Prüfbereichen 3 und 4 angepasst werden. In diesem Fall muss der durchschnittliche Gleisbogenhalbmesser R_{mwa} aus der mittleren Krümmung der beiden Grenzradien berechnet werden.</p>			

Ergibt die Vorabkontrolle der Auswertungsabschnitte, dass für eine Evaluierung genügend Daten vorhanden sind, so kann mit der Evaluierung fortgefahren werden. Für die weitere Auswertung werden die gebildeten Auswertungsabschnitte nach aufsteigendem Weg sortiert. Dann werden ausgewählte Daten der Abschnitte in eine Tabelle ausgeschrieben. Dies hat den Sinn, dass die gebildeten Abschnitte nochmals kontrolliert werden können. Inhalt dieser Tabelle sind die Messfahrtnummer, die Abschnittsnummer, der Abschnittsindex über den jeder Abschnitt einem Prüfbereich zugeordnet werden kann und andere Größen wie z.B. die mittlere freie Seitenbeschleunigung des Abschnitts. Diese Tabelle wird später auch noch zur Erstellung der Statistik über alle Auswertungsabschnitte benötigt, die zusammen mit den Ergebnissen der Auswertung in den Prüfbericht aufgenommen wird.

3.3.5 Filterung und Aufbereitung der Beurteilungsgrößen

Als nächster Schritt in der Evaluierung der Messdaten folgt die Filterung der Signale der Beurteilungsgrößen. Eine Filterung der Signale ist notwendig, weil trotz genauer Arbeit bei der Installation der Messtechnik und der Verwendung von technisch hochwertiger und präziser Sensorik nicht vermeiden lässt, dass die eigentlichen Messsignale mit Störungen überlagert sind. Diese Störungen können viele Ursachen haben. Grob lassen sie sich in

- elektrische Störeinflüsse
- magnetische Störeinflüsse
- mechanische Störeinflüsse und
- Störungen durch Anregung von Resonanzfrequenzen.

einteilen. Elektrische und magnetische Störeinflüsse treten meist bei höheren Frequenzen (≥ 50 Hz) auf. Nachdem sich der für die Evaluierung der Daten relevante Frequenzbereich nur bis circa 40 Hz erstreckt, können diese oder noch hochfrequentere Störungen gut durch Filterung mit einem Tiefpassfilter unterdrückt werden.

Zu den mechanischen Störungen können Umwelteinflüsse zählen oder Schwingungen die durch zusätzliche Fahrzeugkomponenten wie z.B. Kompressoren oder andere schwingungsanregende Komponenten erzeugt werden. Diese Einflüsse sind zu eliminieren, da sonst die Messergebnisse verfälscht werden. Eine andere Art von Schwingungen kann auftreten wenn Teile des Messobjekts durch äußere Anregung (Gleislagefehler, instabiler Lauf, Seitenwind, Tunnelfahrten) in ihrer Eigenfrequenz angeregt werden. Dies ist an sich nicht als Störung zu sehen, denn hier werden ja tatsächlich vorhandene Größen gemessen. Je nach Fahrzeugkomponente erstrecken sich die Eigenfrequenzen von einigen Hertz (Wagenkasten) bis hin zu 200-300 Hz (Radsatz). Die Erfassung dieser Vorgänge ist eigentlich nicht Zweck der Fahrversuche, sie zählen jedoch zu den Fahrzeugreaktionen auf Anregungen des Gleises und sollten daher berücksichtigt und dokumentiert werden.

In Abbildung 3.13, S. 49 ist der Zeitschrieb der Messstelle zur Erfassung der unkompenzierten Seitenbeschleunigung a_Q dargestellt. Dabei ist auf der Abszisse die Zeit in Sekunden aufgetragen und auf der Ordinate der Wert der Beschleunigung in m/s^2 . Das obere Diagramm zeigt die ungefilterten Werte in rot und die gefilterten Werte in blau. Im unteren Diagramm ist die gefilterte Größe nochmals in anderer Skalierung (zehnfache Vergrößerung) aufgetragen. Man erkennt, dass in den gefilterten Werten kaum mehr dynamische Anteile enthalten sind, während diese in den ungefilterten Werten klar erkennbar sind. Der quasistatische Anteil des Signals enthält aber in diesem Fall die relevante Information über die quasistatische unkompenzierte Seitenbeschleunigung a_Q

und gelangt zur Auswertung.

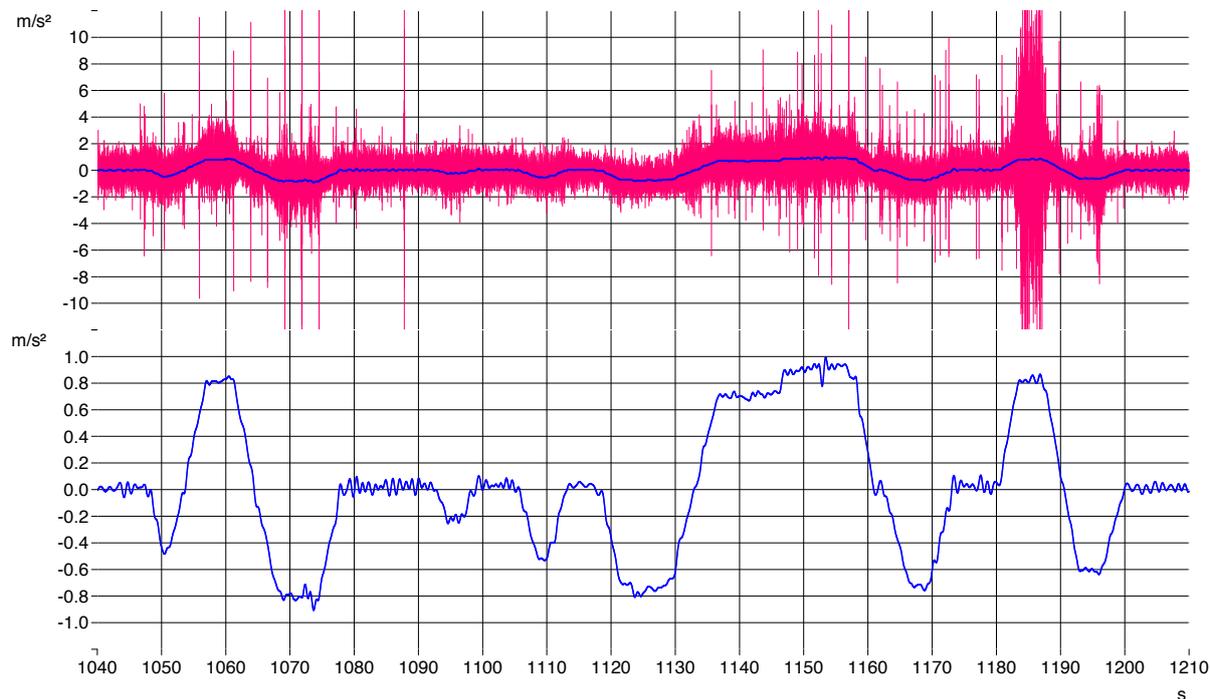


Abbildung 3.13: Vergleich ungefilterte Messgröße zu gefilterter Messgröße

Zur besseren Darstellung der Funktion eines Filters sind in Abbildung 3.14, S. 50 die Frequenzspektren zweier Signale dargestellt. Auf der Abszisse ist die Frequenz aufgetragen während auf der Ordinate die Amplitude der Messgröße abzulesen ist. Das rote Spektrum stellt den Frequenzinhalt des ungefilterten Signals eines Beschleunigungsaufnehmers dar. Für das blaue Spektrum wurde als Eingangsgröße das Messsignal eines Beschleunigungsaufnehmers verwendet, welches mit einem Tiefpassfilter auf 40 Hz gefiltert wurde. In dieser Abbildung ist gut erkenntlich wie das Filter funktioniert. Im Frequenzbereich unter 40 Hz sind die Spektren deckungsgleich, daher ist das rote Spektrum auch nicht zu erkennen. Im Bereich um die Grenzfrequenz von 40 Hz, lässt sich jedoch eine immer stärker werdende Abnahme der Signalamplitude beobachten, was auf die Wirkung des Tiefpassfilters zurückzuführen ist.

Streng genommen werden die Beurteilungsgrößen schon beim Erfassen der Daten mit analogen Filtern entsprechend der in der Norm festgelegten Filtercharakteristika gefiltert (siehe Abbildung 3.6, S. 31). Der Grund dafür ist, dass während der Versuchsfahrten die entsprechend gefilterten sicherheitsrelevanten Beurteilungsgrößen online auf einem Anzeigergerät dargestellt werden müssen. Dies ist vor allem bei Hochtastfahrten unbedingt notwendig um die Sicherheit des Messteams und des Messobjektes sicherzustellen. Somit werden sowohl die Rohsignale der Beurteilungsgrößen, als auch die gefilterten Größen

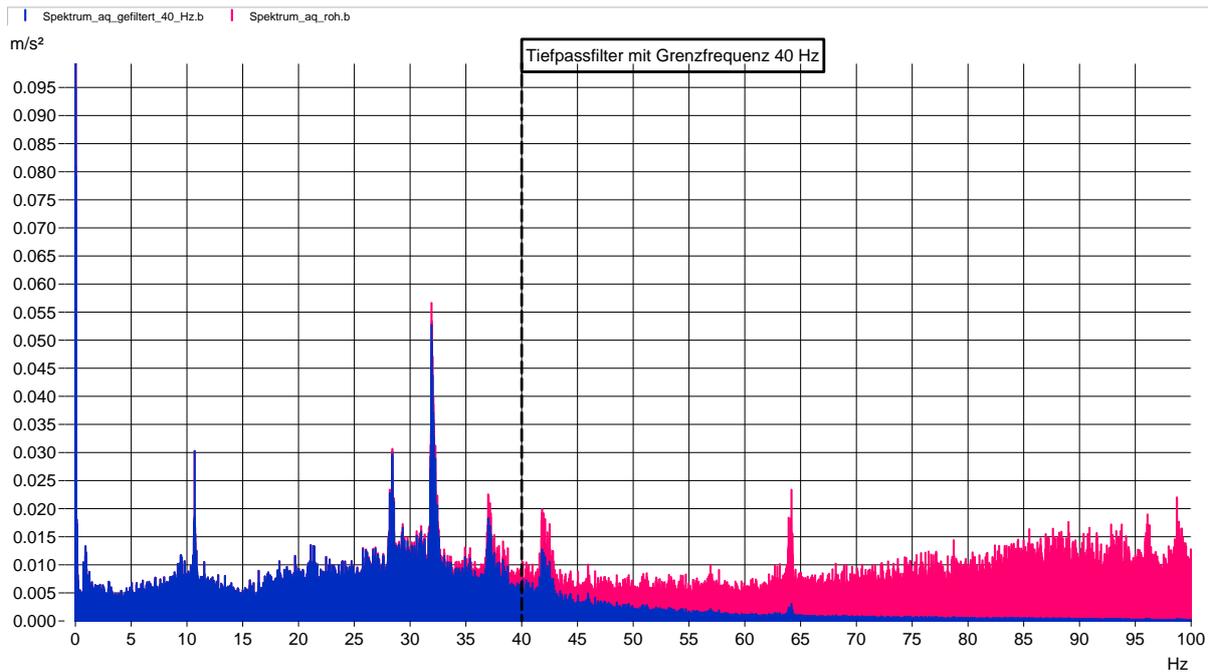


Abbildung 3.14: Vergleich der Frequenzspektren einer ungefilterten und einer gefilterten Messgröße

aufgezeichnet. Bei der Auswertung werden jedoch die Rohsignale verwendet und mit digitalen Filtern für die weitere Evaluierung aufbereitet.

Als Filter kommen Tiefpassfilter und Bandpassfilter zur Anwendung. Die Konfiguration der einzelnen Filter für die jeweiligen Beurteilungsgrößen ist unterschiedlich. Für alle verwendeten Filter gelten jedoch die folgenden Parameter der Filtercharakteristik. Für die 3dB-Eckfrequenz gilt ≥ 20 Hz, Abfall ≥ 24 dB/Oktave; Toleranz ± 0.5 dB bis zur Eckfrequenz, außerhalb der Eckfrequenz ± 1 dB. Eine Übersicht der einzelnen Filter für die jeweiligen Beurteilungsgrößen zeigen Tabelle 3.4, S. 51, Tabelle 3.5, S. 52, Tabelle 3.6, S. 53 und Tabelle 3.7, S. 53.

Bevor mit der statistischen Auswertung begonnen werden kann sind noch bestimmte Klassierverfahren anzuwenden und es müssen ausgewählte Zahlenwerte der Häufigkeitsverteilung ermittelt werden. Wie die Beurteilungsgrößen genau aufzubereiten sind ist in Tabelle 3.4, S. 51, Tabelle 3.5, S. 52, Tabelle 3.6, S. 53 und Tabelle 3.7, S. 53 beschrieben.

Klassierverfahren oder auch Zählverfahren werden zur Analyse regelloser Schwingungen angewendet. Dies trifft bei den hier vorliegenden Messwerten zu. Die hier zur Anwendung kommenden Klassierverfahren sind:

- das Stichprobenverfahren,
- die Klassierung mit vorheriger Bildung des gleitenden Mittelwerts,

Tabelle 3.4: Behandlung der Messsignale zur Beurteilung der Fahrwegbeanspruchung [EN14363, 2010]

Beurteilungsgröße	Formelzeichen	Einheit	Filterung	Klassierverfahren	Häufigkeitswerte	Prüfbereich 1	Prüfbereiche 2,3,4
Fahrwegbeanspruchung							
Führungskraft Radsatz 1, 2	Y_{qst}	kN	Tiefpassfilter 20 Hz	Stichprobenverfahren	$h_0 = 50\%$		Je Radsatz äußere Räder $y_{j1}(h_0)$ (Linksbögen) und $y_{j2} \cdot (-1)$ (Rechtsbögen)
Radkraft Radsatz 11, 12, 21, 22	Q_{qst}	kN	Tiefpassfilter 20 Hz	Stichprobenverfahren	$h_0 = 50\%$		Je Drehgestell äußere Räder $y_{j1}(h_0)$ (Linksbögen) und y_{j2} (Rechtsbögen)
Radkraft Radsatz 11, 12, 21, 22	Q_{max}	kN	Tiefpassfilter 20 Hz	Stichprobenverfahren	$h_2 = 99,85\%$	Je Drehgestell alle Räder $y_{jk}(h_2)$	Je Drehgestell äußere Räder $y_{j1}(h_0)$ (Linksbögen) und y_{j2} (Rechtsbögen)

Tabelle 3.5: Behandlung der Messsignale zur Beurteilung der Fahrsicherheit [EN14363, 2010]

Beurteilungsgröße	Formelzeichen	Einheit	Filterung	Klassierverfahren	Häufigkeitswerte	Prüfbereich 1	Prüfbereiche 2,3,4
Fahrsicherheit							
Summe der Führungskräfte Radsatz 1, 2	$\sum Y_{max}$	kN	Tiefpassfilter 20 Hz	gl. Mw. Verfahren mit $l_m = 2m$ und $l_f = 0,5m$	$h_1 = 0,15\%$ $h_2 = 99,85\%$	Je Radsatz $y_j(h_1) \cdot (-1)$ und $y_j(h_2)$	Je Radsatz $y_j(h_2)$ (Linksbögen) und $y_j(h_1) \cdot (-1)$ (Rechtsbögen)
Quotient führender Radsatz	$\left(\frac{Y}{Q}\right)_{max}$	-	Tiefpassfilter 20 Hz	gl. Mw. Verfahren mit $l_m = 2m$ und $l_f = 0,5m$	$h_1 = 0,15\%$ $h_2 = 99,85\%$		am führenden Radsatz äußeres Rad $y_{11}(h_2)$ (Linksbögen) und $y_{12}(h_1) \cdot (-1)$ (Rechtsbögen)
Summe der Radsatzlagerquerkräfte Radsatz 1, 2	H_{max}	kN	Tiefpassfilter 20 Hz	gl. Mw. Verfahren mit $l_m = 2m$ und $l_f = 0,5m$	$h_1 = 0,15\%$ $h_2 = 99,85\%$	Je Radsatz $y_j(h_1) \cdot (-1)$ und $y_j(h_2)$	Je Radsatz $y_j(h_2)$ (Linksbögen) und $y_j(h_1) \cdot (-1)$ (Rechtsbögen)
Beschleunigung am Fahrwerk Radsatz 1, 2	\ddot{y}_{max}^+	$\frac{m}{s^2}$	Tiefpassfilter 10 Hz	Stichprobenverfahren	$h_1 = 0,15\%$ $h_2 = 99,85\%$	Je Radsatz $y_j(h_1) \cdot (-1)$ und $y_j(h_2)$	Je Radsatz $y_j(h_2)$ (Linksbögen) und $y_j(h_1) \cdot (-1)$ (Rechtsbögen)
Beschleunigung im Fahrzeugkasten Ende I, II	\ddot{y}_{Smax}^+	$\frac{m}{s^2}$	Tiefpassfilter 6 Hz	Stichprobenverfahren	$h_1 = 0,15\%$ $h_2 = 99,85\%$	Je Ende $y_j(h_1) \cdot (-1)$ und $y_j(h_2)$	Je Radsatz $y_j(h_2)$ (Linksbögen) und $y_j(h_1) \cdot (-1)$ (Rechtsbögen)
Beschleunigung im Fahrzeugkasten Ende I, II	\ddot{z}_{Smax}^+	$\frac{m}{s^2}$	Bandpassfilter 0,4Hz bis 4Hz	Stichprobenverfahren	$h_1 = 0,15\%$ $h_2 = 99,85\%$	Je Ende $y_j(h_1) \cdot (-1)$ und $y_j(h_2)$	Je Ende $y_j(h_1) \cdot (-1)$ und $y_j(h_2)$

Tabelle 3.6: Behandlung der Messsignale zur Beurteilung der Fahrsicherheit [EN14363, 2010], fortgesetzt

Beurteilungsgröße	Formelzeichen	Einheit	Filterung	Klassierverfahren	Häufigkeitswerte	Prüfbereich 1	Prüfbereiche 2,3,4
Fahrsicherheit-Instabilitätskriterium							
Instabilitätskriterium	$\sum Y_{rms}$ H_{rms}	kN	Bandpassfilter $f_0 \pm 2Hz$	gl. quadratischer Mw. Verfahren $l_m = 100m$ $l_f = 10m$	Größtwerte	Je Radsatz	Je Radsatz
Instabilitätskriterium	\ddot{y}_{rms}^+ \ddot{y}_{rms}	$\frac{m}{s^2}$	Bandpassfilter $f_0 \pm 2Hz$	gl. quadratischer Mw. Verfahren $l_m = 100m$ $l_f = 10m$	Größtwerte	Je Radsatz	Je Radsatz

Tabelle 3.7: Behandlung der Messsignale zur Beurteilung des Schwingungsverhaltens [EN14363, 2010]

Beurteilungsgröße	Formelzeichen	Einheit	Filterung	Klassierverfahren	Häufigkeitswerte	Prüfbereich 1	Prüfbereiche 2,3,4
Schwingungsverhalten							
Beschleunigung im Fahrzeugkasten Ende I, II	\ddot{y}_{qst}^*	$\frac{m}{s^2}$	Tiefpassfilter 20 Hz	Stichprobenverfahren	$h_0 = 50\%$		Je Ende äußere Räder $y_{j1}(h_0)$ (Linksbögen) und $y_{j2}(h_0) \cdot (-1)$ (Rechtsbögen)
	\ddot{y}_{max}^* \ddot{z}_{max}^*	$\frac{m}{s^2}$	Bandpassfilter 0,4 Hz bis 10 Hz	Stichprobenverfahren	$h_1 = 50\%$ $h_2 = 99,85\%$	Je Ende $y_j(h_2)$ und $y_j(h_1) \cdot (-1)$	
	\ddot{y}_{rms}^* \ddot{z}_{rms}^*	$\frac{m}{s^2}$	Bandpassfilter 0,4 Hz bis 10 Hz	Stichprobenverfahren	<i>rms</i> -Werte		

- sowie die Klassierung mit vorheriger Bildung des gleitenden quadratischen Mittelwerts (RMS).

Beim Stichprobenverfahren werden die Messwerte eines zeitlich diskret abgetasteten Signals abhängig von ihrer Größe in Klassen mit bestimmter Klassenbreite eingeteilt. Das Ergebnis wird dann in Form eines Histogrammes dargestellt. Ein Histogramm ist im Wesentlichen ein Balkendiagramm in dem auf der Abszisse die Klassengrenzen aufgetragen sind und aus der Höhe der Balken die Anzahl der Ereignisse (Messwerte) in dieser Klasse ablesbar ist. Die Klassen kann man sich wie Schubladen vorstellen in welche die einzelnen Messwerte eingeordnet werden.

Zur Bestimmung des gleitenden Mittelwertes wird zuerst aus den, in einem Ausschnitt mit der Mittelungslänge l , enthaltenen Messwerten der Beurteilungsgrößen das arithmetische Mittel mit folgender Formel bestimmt.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.7)$$

\bar{x} ...arithmetisches Mittel

x_i ...Momentanwert des Messsignals an der Stelle i

n ...Anzahl der Messwerte im betrachteten Ausschnitt

Dies wird nach Fortschreiten im Signal mit der vorgegebenen Fortschrittslänge solange wiederholt bis das Ende des Messsignals erreicht ist. Zur besseren Veranschaulichung kann man sich ein bewegtes Fenster vorstellen durch welches das Messsignal betrachtet wird. Dabei ist die Fensterbreite gleich der Mittelungslänge und nach jeder Mittelung wird das Fenster um die Fortschrittslänge im Signalverlauf nach vorn bewegt und der neue Ausschnitt des Messsignals gemittelt. Die so erhaltenen Werte werden wie schon beim Stichprobenverfahren klassiert.

Auch bei der Bestimmung des gleitenden quadratischen Mittelwertes wird zuerst das quadratische Mittel des betrachteten Ausschnitts mit folgender Formel berechnet. Das quadratische Mittel wird auch Effektivwert (englisch: Root Mean Square) genannt.

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^n x_i^2} \quad (3.8)$$

x_{rms} ...quadratisches Mittel

x_i ...Momentanwert des Messsignals an der Stelle i

n ...Anzahl der Messwerte im betrachteten Ausschnitt

Nun wird wie bei der Bildung des gleitenden Mittelwertes vorgegangen. Die erhaltenen Werte werden ebenfalls klassiert. Der quadratische Mittelwert wird bei Schwingungen mit wechselndem Vorzeichen (z.B. sinusförmiges Signal) verwendet, da eine Bestimmung des arithmetischen Mittelwertes wegen $\bar{x}(\sin(x)) = 0$ sinnlos wäre.

In weiterer Folge werden aus den klassierten Daten normierte Summenkurven gebildet aus denen sich die Häufigkeitswerte ablesen lassen. Die Summenkurven werden durch Summieren der Ereignisse in den einzelnen Klassen gebildet. Dann werden diese durch die Gesamtanzahl der Ereignisse dividiert und man erhält normierte Summenkurven. Aus diesen Summenkurven werden die folgenden Häufigkeitswerte $y(h_i)$ ermittelt:

- $y(h_1)$ bei $h_1 = 0,15\%$
- $y(h_0)$ bei $h_0 = 50,00\%$
- $y(h_2)$ bei $h_2 = 99,85\%$

h_i ...Häufigkeitssumme

Die klassierten Daten einer Beschleunigungsmessstelle sind in Abbildung 3.15, S. 56 zu sehen.

Die Summenkurve ist in Abbildung 3.16, S. 56 dargestellt.

3.3.6 Statistische Bewertung der Beurteilungsgrößen

Die Auswertung der Beurteilungsgrößen mit Hilfe statistischer Methoden ist nötig um statistisch abgesicherte Ergebnisse zu erhalten. Denn Erstens gibt es zufällig verteilte Bauabweichungen des Fahrzeuges. Zweitens treten auf dem betrachteten Streckennetz ebenfalls zufällig verteilte Lageabweichung der Gleise auf. Nachdem die Beurteilungsgrößen, auch von diesen beiden Größen abhängen, ist eine statistische Betrachtung der erfassten Beurteilungsgrößen notwendig.

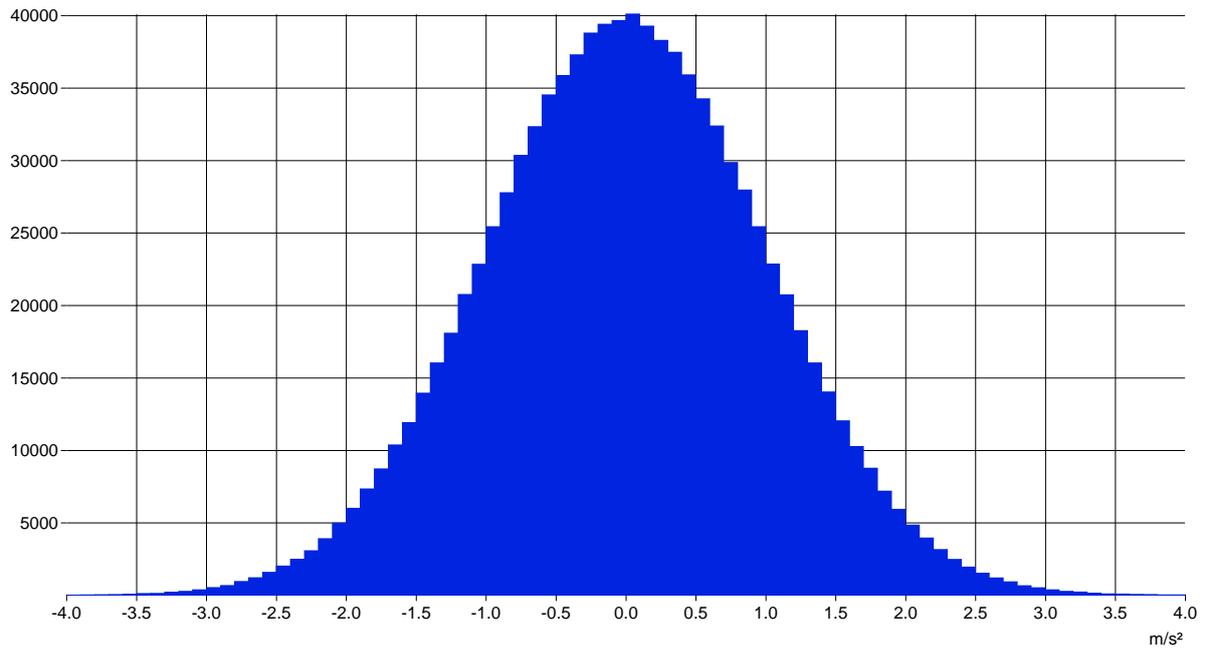


Abbildung 3.15: Klassierte Daten einer Beurteilungsgröße

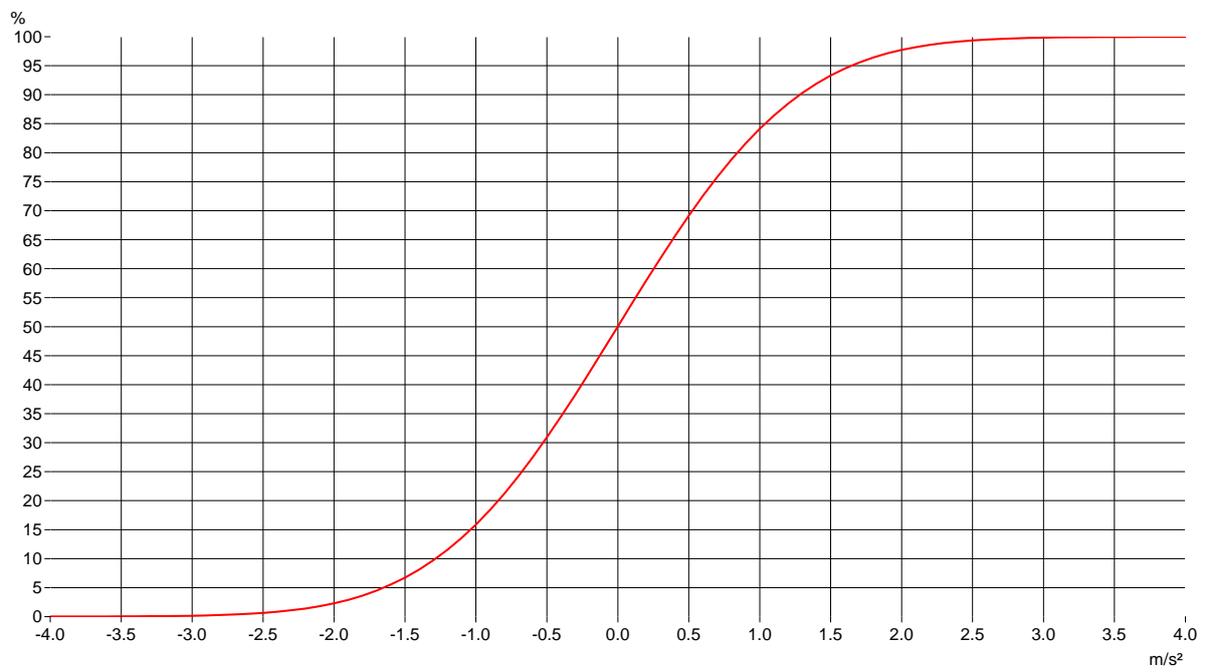


Abbildung 3.16: Summenkurve einer Beurteilungsgröße

Mathematischer Hintergrund

Wenn für eine normalverteilte Zielgröße mittels Entnahme von Stichproben⁷ Kenngrößen wie der Mittelwert bestimmt werden sollen, so kann nicht vorausgesetzt werden, dass der Mittelwert der Stichprobe dem Mittelwert der Grundgesamtheit entspricht. Dies ist in Abbildung 3.17, S. 57 dargestellt.

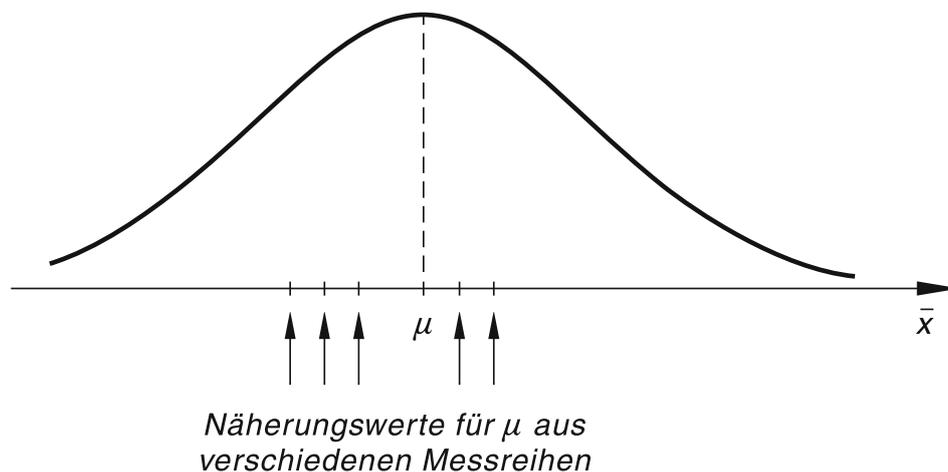


Abbildung 3.17: Unterschied zwischen Kenngrößen aus Stichprobe und wahren Wert, aus [Papula, 2011]

Mit der Angabe des Vertrauensbereiches, wie in Abbildung 3.18, S. 58 ist es möglich einen Bereich anzugeben der mit der ebenfalls angegebenen Aussagewahrscheinlichkeit (auch Vertrauensniveau genannt) den wahren Wert der gesuchten Größe enthält. Die Größe des Vertrauensbereiches wird von mehreren Parametern bestimmt. Zu diesen Parametern gehören die Anzahl der in der Stichprobe enthaltenen Messwerte (n), der Mittelwert der Stichprobe (\bar{x}) und die Streuung der Stichprobe (s). Weiters wird noch der Parameter t benötigt der wiederum vom gewählten Vertrauensniveau (PA) und der Anzahl der Messwerte (n) abhängt. Der Zahlenwert t genügt der Bedingung $P(-t \leq T \leq t) = PA$, hierbei ist T eine Zufallsvariable die der t -Verteilung mit $f = n - 1$ Freiheitsgraden folgt. Je höher das geforderte Vertrauensniveau ist, desto größer wird auch der Vertrauensbereich. Mit folgenden Formeln lassen sich die untere Grenze (μ_u) und die obere Grenze (μ_o) des Vertrauensbereiches berechnen:

$$\mu_u = \bar{x} - t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.9)$$

$$\mu_o = \bar{x} + t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.10)$$

⁷ Mit der Entnahme von Stichproben ist hier die diskrete Abtastung des Messsignals mit einer bestimmten Abtastrate f_s [Hz] gemeint.

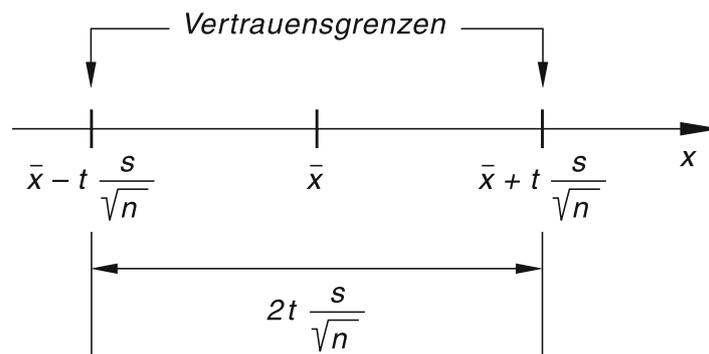


Abbildung 3.18: Erklärung des Vertrauensbereichs, aus [Papula, 2011]

Die *t-Verteilung* (auch Student-Verteilung genannt) wird verwendet um die Grenzen des Vertrauensbereichs bei unbekanntem Mittelwert und unbekannter Streuung einer Stichprobe zu bestimmen. Sie beschreibt die standardisierte Schätzfunktion der aus Stichproben einer normalverteilten Zufallsvariable berechneten Mittelwerte. Diese sind nämlich vor allem bei geringer Anzahl an Messwerten je Stichprobe und unbekannter Streuung nicht mehr normalverteilt sondern *t*-verteilt. In Abbildung 3.19, S. 59 ist der Unterschied zwischen Normalverteilung und *t*-Verteilung ersichtlich. Darin sind *t*-Verteilungen mit verschiedenen Stichprobengrößen (2, 4, 8, 60) gemeinsam mit einer Standardnormalverteilung geplottet. Dazu lässt sich sagen, dass die *t*-Verteilung vor allem bei geringer Stichprobengröße breiter ausgeprägt ist und an den Flanken auch noch höhere Wahrscheinlichkeitswerte ergibt. Das bedeutet ein stark vom Mittelwert abweichender Wert ist bei dieser Verteilung wahrscheinlicher als bei der Normalverteilung. Je mehr Messwerte pro Stichprobe enthalten sind, desto mehr nähert sich die Kurvenform der *t*-Verteilung der Kurvenform der Normalverteilung an. Für eine *t*-Verteilung mit $n \rightarrow \infty$ ergibt sich also eine Normalverteilung. Dies kann man schon bei der *t*-Verteilung für $n = 200$ erkennen.

Vorgehensweise bei der statistischen Auswertung

Die Zielgrößen y_i der statistischen Auswertung sind die Beurteilungsgrößen $Y, Q, \sum Y, Y/Q, H, \ddot{y}^+, \ddot{y}_s^*, \ddot{z}_s^*$. Als Vertrauensniveau des Vertrauensbereichs der statistischen Kennzahlen wird $PA = 95,0\%$ angegeben. Für die sicherheitsrelevanten Beurteilungsgrößen $\sum Y, Y/Q, H, \ddot{y}^+, \ddot{y}_s^*, \ddot{z}_s^*$ wird jedoch eine höhere Aussagewahrscheinlichkeit von $PA = 99,0\%$ des Vertrauensbereichs verlangt. Die Beurteilung dieser Zielgrößen y_i ist nur in den definierten Prüfbereichen durchzuführen. Bei der Auswertung werden die Größtwerte $y_{max,i}$, Mittelwerte $y_{med,i}$ und quadratische Mittelwerte $y_{rms,i}$ betrachtet.

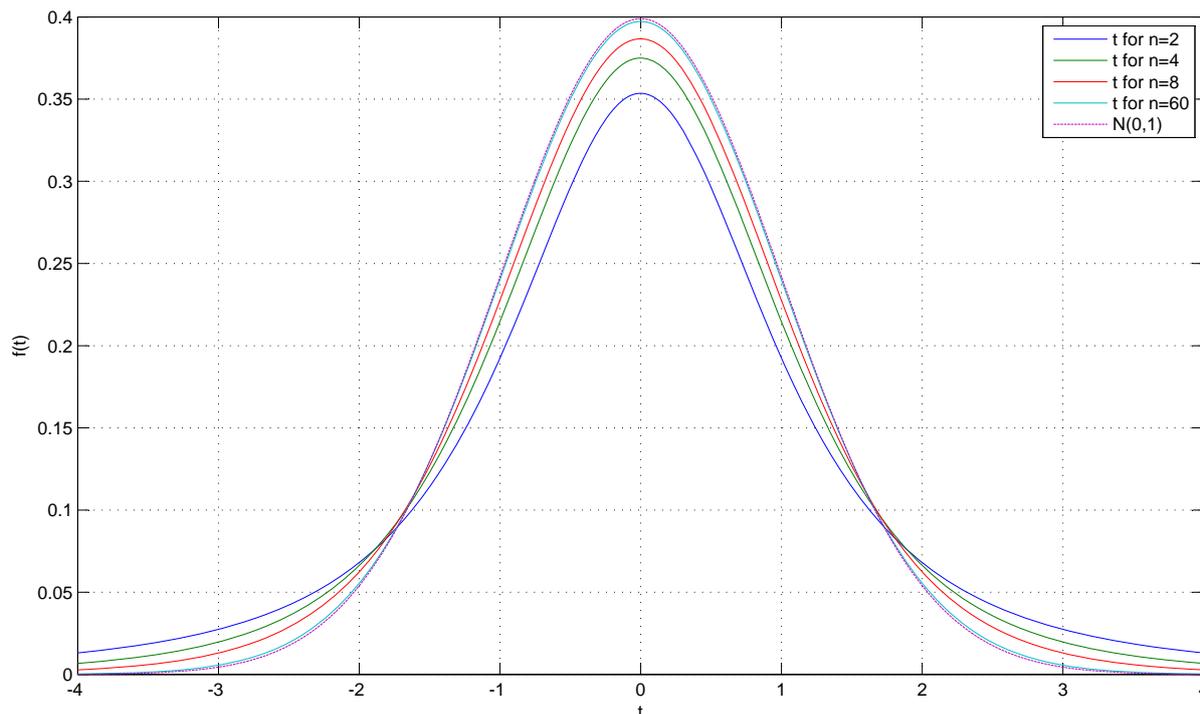


Abbildung 3.19: Normalverteilung und t-Verteilungen ($n=2, 4, 8, 60$)

In der Norm EN 14363:2010 wird die Gesamtverteilung der Zielgröße y_i zunächst als eindimensionale Verteilung betrachtet. Dies ist möglich wenn sich die maßgeblichen Einflussgrößen x_i in eng begrenzten Wertebereichen bewegen. Somit wird vereinfachend von normalverteilten Grundgesamtheiten und eindimensionalen Stichprobenverteilungen ausgegangen. [EN14363, 2010]

Nun ist für jede Zielgröße der Schätzwert des maximalen Erwartungswertes der jeweils betrachteten Stichprobe zu bestimmen. Die Vorgehensweise zur Bestimmung des Schätzwerts hängt davon ab ob das *eindimensionale Verfahren* oder das *zweidimensionale Verfahren* benutzt wird. Unabhängig davon welches Verfahren angewendet wird, sind vorher schon Hilfsgrößen, sogenannte Stichprobenmaßzahlen, zu berechnen. Dazu zählen:

- Hilfssummen:

$$S_x = \sum_{i=1}^n x_i, S_y = \sum_{i=1}^n y_i, S_{xx} = \sum_{i=1}^n x_i^2, S_{yy} = \sum_{i=1}^n y_i^2, S_{xy} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \quad (3.11)$$

- Mittelwerte:

$$\bar{x} = \frac{S_x}{n}, \bar{y} = \frac{S_y}{n} \quad (3.12)$$

- Summe der quadrierten Abweichungen und Produktabweichung:

$$Q_{xx} = S_{xx} - \frac{S_x^2}{n}, \quad Q_{yy} = S_{yy} - \frac{S_y^2}{n}, \quad Q_{xy} = S_{xy} - \frac{S_x \cdot S_y}{n} \quad (3.13)$$

- Varianzen:

$$s_x^2 = \frac{Q_{xx}}{n-1}, \quad s_y^2 = \frac{Q_{yy}}{n-1} \quad (3.14)$$

- Kovarianz:

$$s_{xy} = \frac{Q_{xy}}{n-1} \quad (3.15)$$

Eindimensionales Auswerteverfahren

Im Prüfbereich 1 (gerade Strecke) wird vorrangig das eindimensionale Auswerteverfahren angewendet. Für das *eindimensionale Verfahren* kommt die folgende Formel zur Anwendung:

$$Y(PA)_{max} = \bar{y} + k \cdot s_y \quad (3.16)$$

\bar{y} ...Mittelwert der Stichprobe

s_y ...Standardabweichung der Stichprobe

$k = 3,0$ für Fahrsicherheit und $k = 2,2$ für Fahrwegbeanspruchung

Vor allem in den Prüfbereich 2 bis 4 wird sich aber sehr wohl eine Abhängigkeit der Zielgrößen y von den Einflussgrößen ergeben. Dies macht sich durch eine größere Streuung der Zielgrößen bemerkbar. In diesem Fall wird eine Einbeziehung des Überhöhungseffektbetrages uf als Einflussgröße der statistischen Auswertung empfohlen. Zur Berechnung der Schätzwerte der quasistatistischen Werte (Y , Q , \hat{y}^*) muss lt. Norm das zweidimensionale Verfahren angewendet werden.

Zweidimensionales Auswerteverfahren

Beim *zweidimensionalen Verfahren* kommt die Regressionsanalyse zur Anwendung. Die Regressionsanalyse hat die Aufgabe anhand einer Stichprobe festzustellen, welcher Art der Zusammenhang zwischen der Variable X (Einflussgröße) und der Zufallsvariable Y (Beurteilungsgröße) ist. Die Einflussgröße ist hierbei der Überhöhungseffektbetrag uf . Für die Regressionsanalyse wird weiters noch ein Ansatz in Form einer Kurvengleichung $Y = f(X)$ benötigt. Der passende Ansatz für die Ausgleichskurve lässt sich im Allgemeinen durch Betrachtung der Form der *Punktewolke* (=Messwerte über der Einflussgröße) bestimmen. Im hier betrachteten Fall wird jedoch ein linearer Zusammenhang zwischen

den Zielgrößen y und der Einflussgröße x_i unterstellt. Ein linearer Zusammenhang zwischen uf und den Beurteilungsgrößen ist auch durch physikalische Gesetzmäßigkeiten zu begründen. So ist z.B. davon auszugehen, dass die Führungskräfte Y bei einem Anstieg von uf ebenfalls ansteigen. Daher wird als Lösungsansatz eine Ausgleichsgerade (auch Regressionsgerade) mit folgender Gleichung gewählt.

$$y = ax + b \quad (3.17)$$

a, b ...Regressionskoeffizienten

Nun wird, wie in Abbildung 3.20, S. 61 gezeigt, die vertikale Abweichung v_i zwischen dem Messpunkt $P_i(x_i, y_i)$ und der Ausgleichsgeraden $y = f(x) = ax + b$ bestimmt. Es gilt:

$$v_i = y_i - f(x_i) = y_i - a \cdot x_i - b \quad (3.18)$$

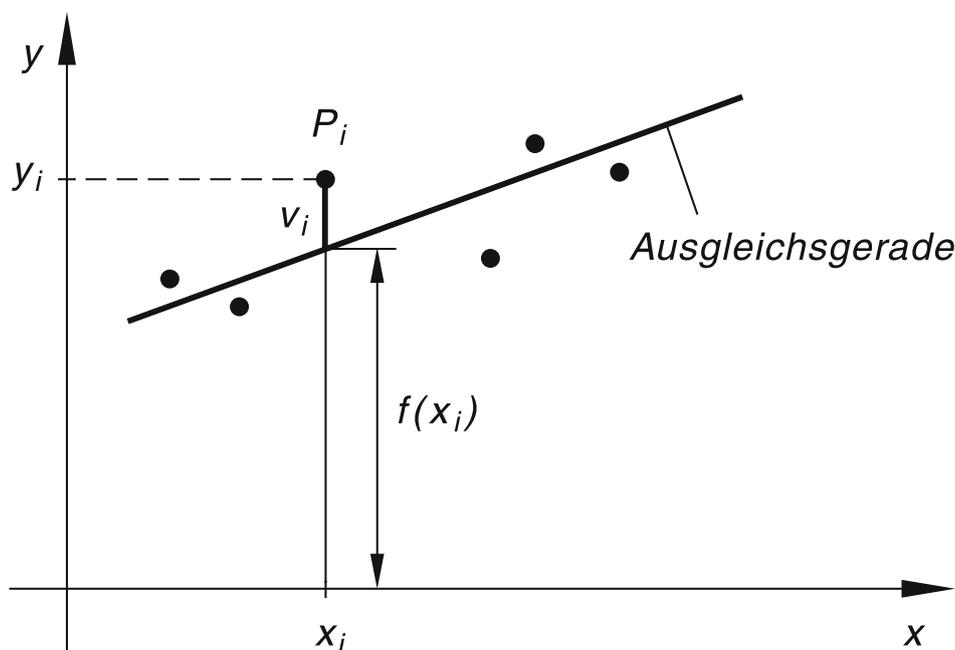


Abbildung 3.20: Abweichung zw. Messpunkt P_i und Ausgleichsgerade, aus [Papula, 2011]

Als nächstes wird die *Methode der kleinsten Fehlerquadrate nach Gauß* angewendet und die Parameter a und b werden so bestimmt, dass die Summe der Abstandsquadrate

$$S(a, b) = \sum_{i=1}^n v_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a \cdot x_i - b)^2 \quad (3.19)$$

minimal wird. Dies ist dann der Fall wenn die partiellen Ableitungen 1. Ordnung gleich Null werden. Daraus erhält man ein lineares Gleichungssystem mit zwei Unbekannten

aus dessen Lösung sich die Formeln zur Bestimmung der Regressionskoeffizienten a und b ergeben.

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - n \cdot \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \cdot \bar{x}^2} \quad \text{bzw. mit Hilfsgrößen der Norm } a = \frac{Q_{xy}}{Q_{xx}} \quad (3.20)$$

$$b = \bar{y} - a \cdot \bar{x} \quad (3.21)$$

Durch die Parameter a und b ist die Ausgleichsgerade vollständig bestimmt. Bringt man die Gleichung der Ausgleichsgeraden mit der Beziehung für b auf folgende Form,

$$y - \bar{y} = a \cdot (x - \bar{x}) \quad \text{mit } b = \bar{y} - a \cdot \bar{x} \quad (3.22)$$

so lässt sich zeigen, dass sie durch den Schwerpunkt $S(\bar{x}; \bar{y})$ der aus den Messpunkten gebildeten Punktwolke läuft.

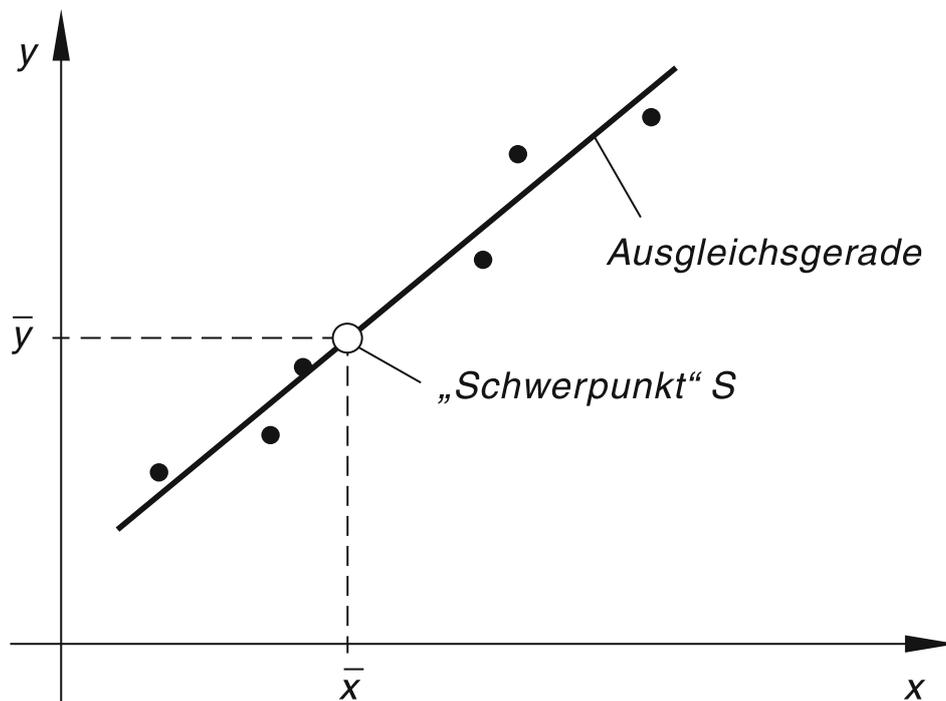


Abbildung 3.21: Zusammenhang Ausgleichsgerade und Schwerpunkt, aus [Papula, 2011]

Für das zweidimensionale Auswerteverfahren lässt sich die obere Grenze des Vertrauensbereiches $Y(PA, x')_{max}$ an einer vorgegebenen Stelle x' folgendermaßen berechnen (Berechnung lt. Norm).

$$Y(PA, x')_{max} = \hat{y}(x') + t(PA, f) \cdot s_r \cdot \sqrt{B} \quad (3.23)$$

Wobei $\hat{y}(x')$ die Regressionsgerade bezeichnet und die Hilfsgröße B wie folgt definiert ist.

$$B = B(x') = 1 + \frac{1}{n} + \frac{(x' - \bar{x})^2}{Q_{xx}} \quad (3.24)$$

Eine weitere Größe die in obiger Formel enthalten ist wird *Restvarianz* s_r^2 genannt.

$$s_r^2 = \frac{Q_y}{n-2} \left(1 - \frac{Q_{xy}^2}{Q_x Q_y} \right) \quad (3.25)$$

In der Literatur (z.B. in [Lerch, 2007]) finden sich andere Schreibweisen der oben genannten Formel zur Bestimmung der Grenzen des Vertrauensbereiches der Regressionsgeraden.

$$Y(PA, x')_{max} = \hat{y}(x') \pm t(PA, f) \cdot \sqrt{\frac{(x - \bar{x})^2 \cdot n \cdot (s_x^2 - a^2 \cdot s_x^2) + s_x^2}{n \cdot (n-2) \cdot s_x^2}} \quad (3.26)$$

Mit folgenden Vertrauensbereichen für die Parameter der Regressionsgeraden a und b .

$$a \pm t(PA, f) \cdot \sqrt{\frac{s_r^2}{n \cdot Q_x} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (3.27)$$

$$b \pm t(PA, f) \cdot \sqrt{\frac{s_r^2}{Q_x}} \quad (3.28)$$

Die Werte $t(PA, f)$ der zweiseitigen *t-Verteilung* sind in Abhängigkeit des Vertrauensniveaus PA und des Freiheitsgrades $f = n - 2$ aus Tabellen zu entnehmen. Das Vertrauensniveau für Beurteilungsgrößen der Fahrsicherheit beträgt 99% und für Beurteilungsgrößen der Fahrwegbeanspruchung und des Schwingungsverhaltens 95%. Für die Auswerterroutine sind die benötigten Werte für t in einer Datenbank hinterlegt. Ein Ergebnisbeispiel des zweidimensionalen Auswerteverfahrens ist in Abbildung 3.22, S. 64 dargestellt. Die Ergebnisse für Linksbögen und Rechtsbögen sind farblich unterschiedlich eingetragen, damit eine eventuelle Ungleichverteilung leicht zu erkennen ist. Weiters ist noch die Regressionsgerade und die Vertrauensbereiche eingezeichnet. In diesem Diagramm sind zu Demonstrationszwecken sowohl der Vertrauensbereich mit einer Auswahrscheinlichkeit von 95% als auch jener mit einer Auswahrscheinlichkeit von

99, 85% enthalten. Im Normalfall ist je nach Beurteilungsgröße nur einer der beiden Vertrauensbereiche relevant.

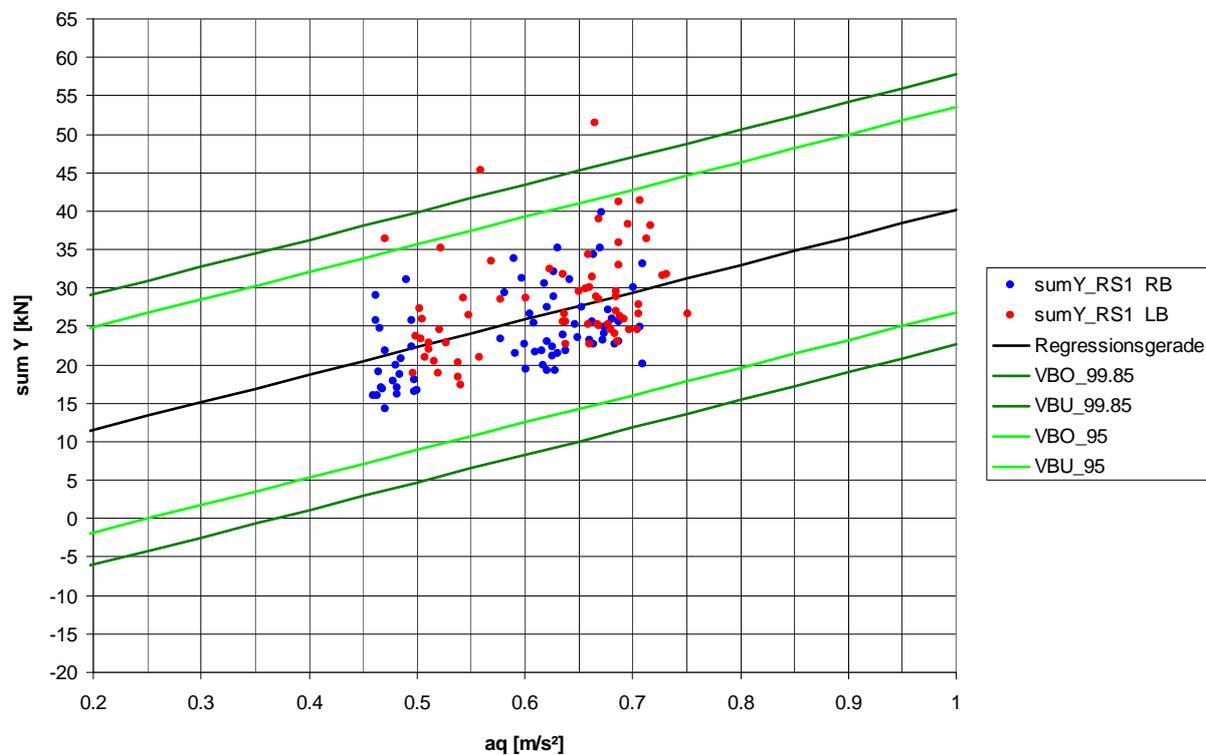


Abbildung 3.22: Regressionsgerade mit Vertrauensbereich

Stabilitätsbewertung

Als nächstes ist die Stabilität des Fahrzeuges zu bewerten. Instabiler Fahrzeuglauf ist ein unerwünschter Fahrzustand, welcher vorwiegend während der Fahrt auf geradem Gleis mit tendenziell höherer Geschwindigkeit auftritt. Grundsätzlich kommt es bei Schienenfahrzeugen durch die Profilierung der Radsätze zu einer Wellenbewegung, dem sogenannten Sinuslauf, beim Lauf des Radsatzes im geraden Gleis. Diese Bewegung entsteht wenn sich durch die Querauslenkung uy des Radsatzes eine Rollradiendifferenz Δr zwischen linkem und rechtem Rad ergibt. Wegen der drehstarrten Kopplung, d.h. linke und rechte Radscheibe drehen sich mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit ω , legt die Radscheibe welche auf dem größeren Rollradius läuft mehr Weg zurück als die gegenüberliegende Radscheibe. Dies führt zu einem Wenden des Radsatzes und der eben beschriebene Vorgang wiederholt sich in die entgegengesetzte Richtung. In Abbildung 3.23, S. 65 ist der Lauf des Radsatzes schematisch gezeigt. Hier wird vereinfachend angenommen, dass es

sich um kegelige Radprofile mit dem Neigungswinkel δ_0 handelt. Für diesen Fall lässt sich die Wellenlänge L des Sinuslaufs mit der Klingelschen Formel angeben.

$$L = 2\pi \sqrt{\frac{e_0 r_0}{\lambda_e}} \quad (3.29)$$

r_0 ...Rollradius (Laufkreisradius) in der unverschobenen Position

$2e_0$...Abstand der Radaufstandspunkte

λ_e ...äquivalente Konizität, für konische Profile $\lambda_e = \delta_0$, bei Kreisprofilen $\lambda_e = \delta_0 \frac{R_R}{R_R - R_S}$

R_R, R_S ...Krümmungsradien von Rad bzw. Schiene

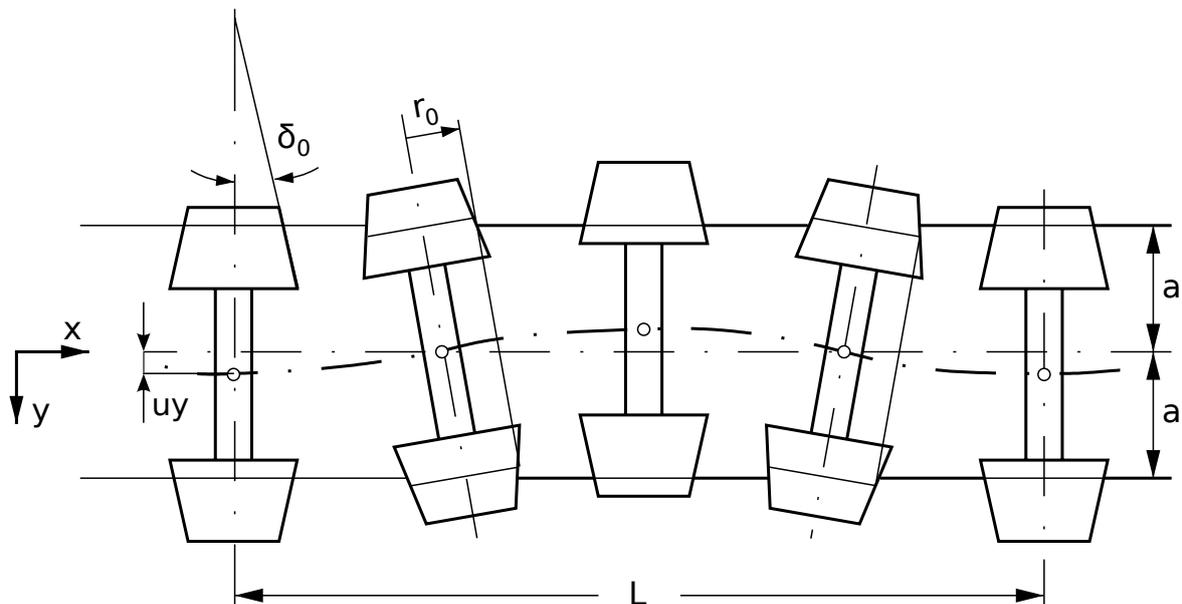


Abbildung 3.23: Sinuslauf des Radsatzes im Gleis, aus [Popp und Schiehlen, 2010]

In der Realität sind dieser Wellenbewegung andere stochastische Anregungen durch das Gleis überlagert. Je nachdem ob die Amplitude dieser Wellenbewegung, nach einer seitlichen Auslenkung des Radsatzes durch eine Störung im Gleis, mit der Zeit abklingt oder ansteigt spricht man von stabilem oder instabilem Lauf. Der Übergang zwischen instabilem und stabilem Verhalten erfolgt bei einer bestimmten Geschwindigkeit welche *kritische Geschwindigkeit* genannt wird. Abbildung 3.24, S. 66 zeigt die Querbewegungen nach Auslenkung des Radsatzes bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten.

Instabiler Lauf ist problematisch weil sich dabei die Amplitude der Wellenbewegung so lange erhöht, bis es zu einem Anlaufen des Spurkranzes kommt. Bei einem weiteren Anstieg der Amplitude kann es unter ungünstigen Umständen (Radentlastung durch Verwindung, hoher Reibwert zwischen Rad und Schiene) zu einem Aufklettern des Radsatzes auf die Schiene kommen was in weiterer Folge zu einer Entgleisung des Fahrzeugs führen kann. Außerdem kann es durch den instabilen Lauf zu einer Verschiebung des

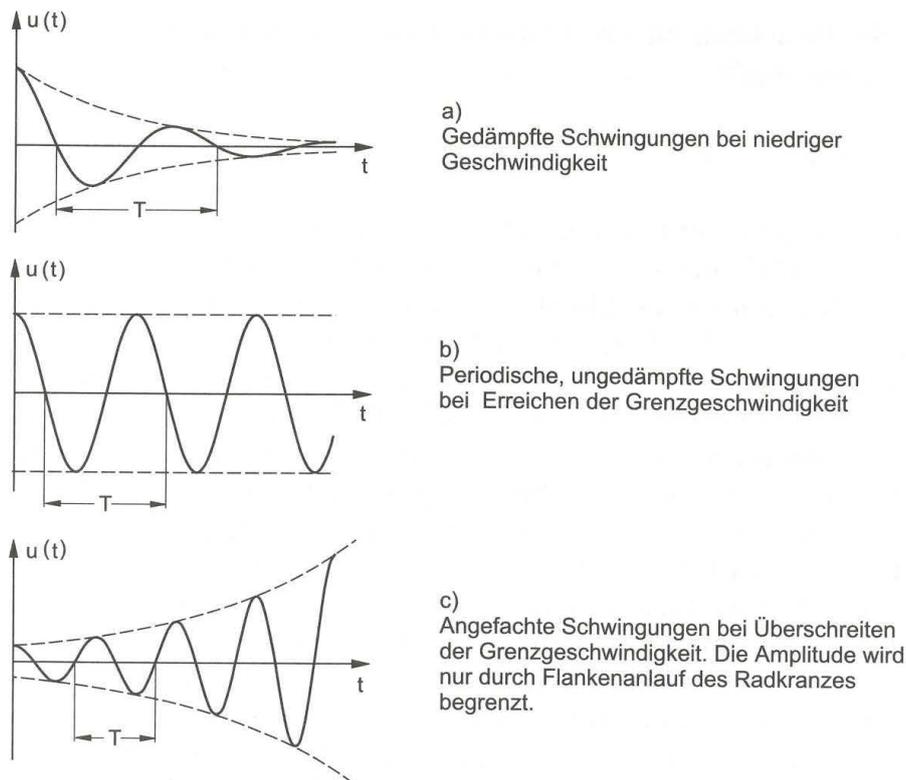


Abbildung 3.24: Querbewegungen des Radsatzes, aus [Knothe und Stichel, 2003]

Gleises kommen, wenn durch das Anlaufen des Spurkranzes der Querverschiebewiderstand des Gleises bzw. der Schwellen überwunden wird.

Da der instabile Lauf eine oszillierende Bewegung ist, wird die Methode der quadratischen Mittelwertbildung angewandt um die Stabilität zu bewerten. Die dafür benötigten Beurteilungsgrößen sind je nach angewendetem Messverfahren $\sum Y_{rms}$, H_{rms} , \dot{y}_{rms} und \ddot{y}_{rms} . In Tabelle 3.4, S. 51, Tabelle 3.5, S. 52, Tabelle 3.6, S. 53 und Tabelle 3.7, S. 53 sind die Parameter für Filterung und Aufbereitung angegeben. Eine weitere Größe die für die Bewertung des Stabilitätsverhaltens von Nöten ist, wird in der EN 14363:2010 Instabilitätsfrequenz f_0 genannt. Diese Frequenz muss entweder durch Simulation vor den Versuchen ermittelt werden, oder sie kann auch aus den Messdaten der Strecken, auf denen Instabilität aufgetreten ist, bestimmt werden. Dazu ist in Abbildung 3.25, S. 67 ein Messschrieb abgebildet.

Darin ist die Summe der Führungskräfte (hier des führenden Radsatzes RS1), die Krümmung der Strecke und die Fahrgeschwindigkeit gezeigt. Man sieht, dass sich die Instabilität auf gerader Strecke (Krümmung=0) und bei, zumindest für das betrachtete Fahrzeug, höherer Geschwindigkeit ($\approx 120\text{km/h}$) ausprägt.

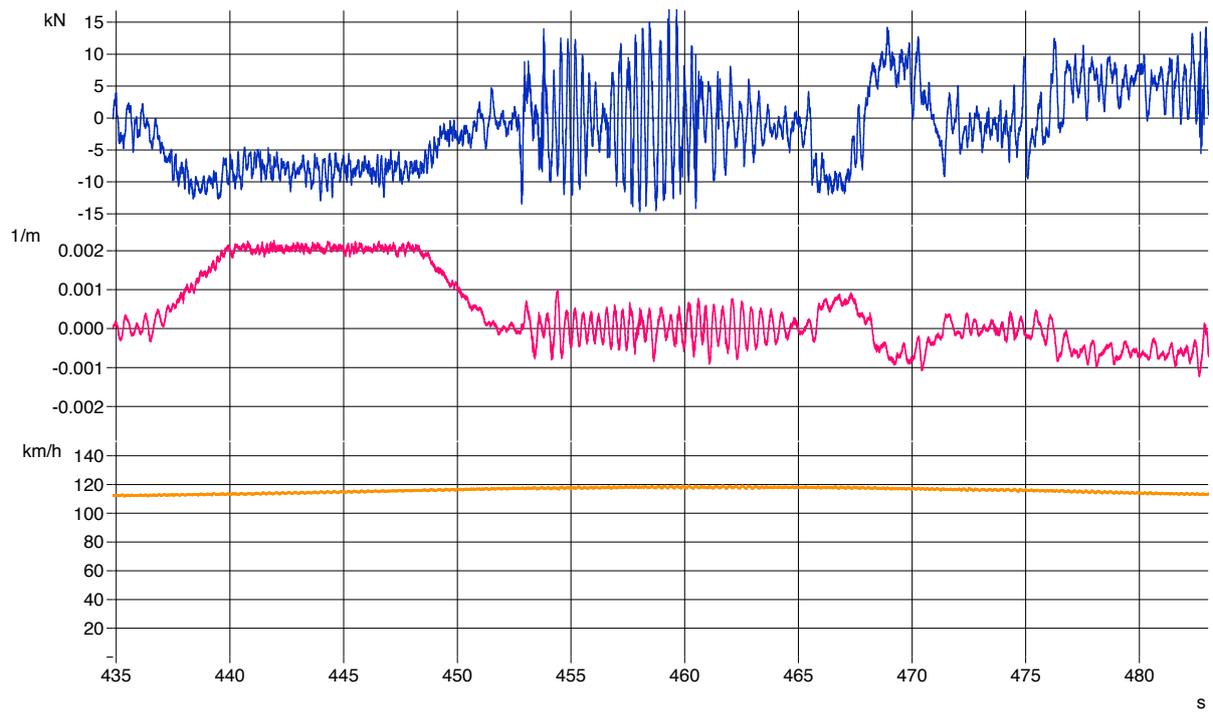


Abbildung 3.25: Messschrieb Instabilität

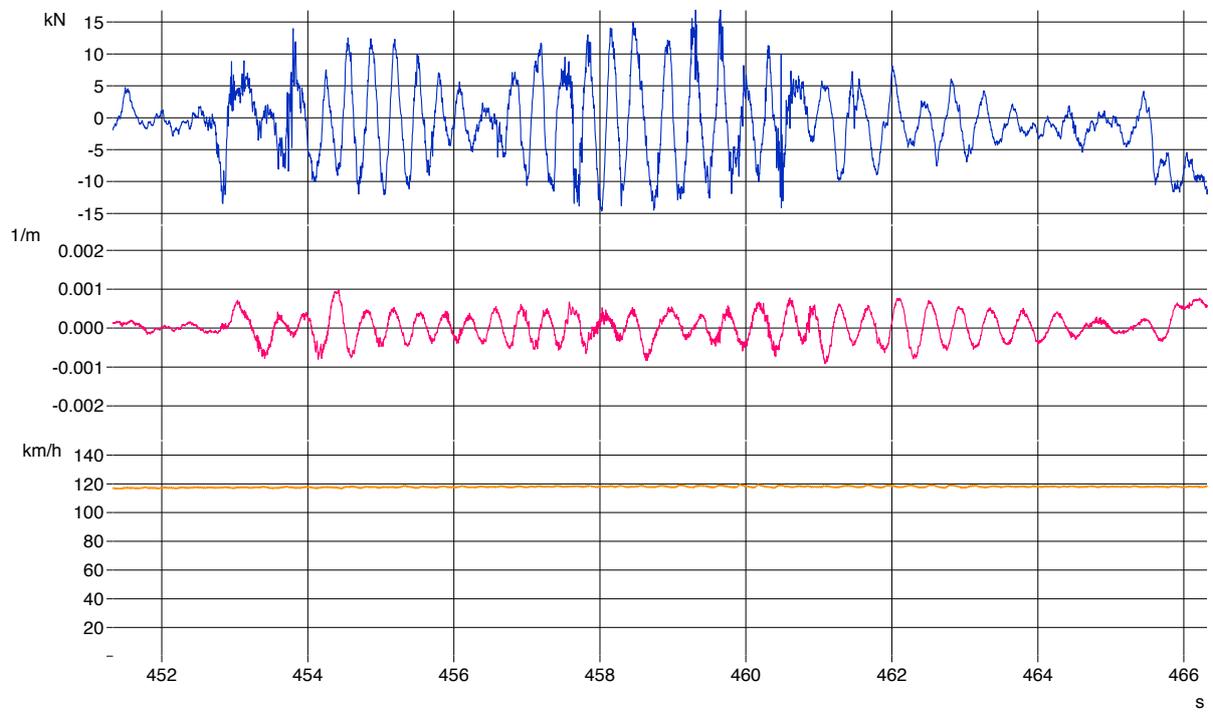


Abbildung 3.26: Detail Messschrieb Instabilität

Betrachtet man den Verlauf der Summe der Führungskräfte detaillierter (siehe Abbildung 3.26, S. 67) so lässt sich die Instabilitätsfrequenz ablesen ($f_0 \approx 3Hz$).

Bewertung der Gleislage der Versuchsgleise

Die Gleislage der Versuchsstrecke hat ebenfalls die in der EN 14363:2010 definierten Bedingungen zu erfüllen. Neben den Regelungen hinsichtlich der Bauart des Oberbaus, der Einbauneigung der Schienen und der Gleistrassierung werden die Gleislageabweichungen und die Gleislagequalität zur Beurteilung der Gleislage verwendet. Nachdem ein Gleis nie ideal verlegt ist, weist es Gleislagefehler auf die gleichzeitig zur Beschreibung der Gleislage dienen. Nach [Knothe und Stichel, 2003] gibt es vier Gleislagefehler:

- den Richtungsfehler $y_G = \frac{1}{2}(y_L + y_R)$
- den Längshöhenfehler $z_G = \frac{1}{2}(z_L + z_R)$
- den Querrhöhenfehler $\phi_{xG} = \frac{1}{2b}(z_L - z_R)$
- und den Spurweitenfehler. $\Delta y_G = \frac{1}{2}(y_L - y_R)$

Diese sind in Abbildung 3.27, S. 68 ersichtlich.

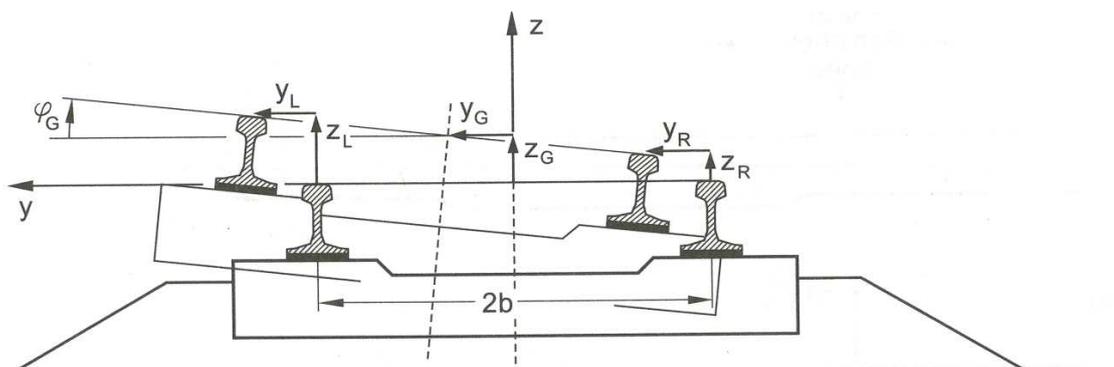


Abbildung 3.27: Parameter der Gleislage, aus [Knothe und Stichel, 2003]

Meist beschränkt man sich auf die ersten drei Fehlertypen welche in Abbildung 3.28, S. 69 dargestellt sind.

Für die Beurteilung der Gleislagequalität werden in der Norm *Qualitätsniveaus* verwendet. Die EN 14363:2010 definiert den Begriff Gleislagequalität folgendermaßen.

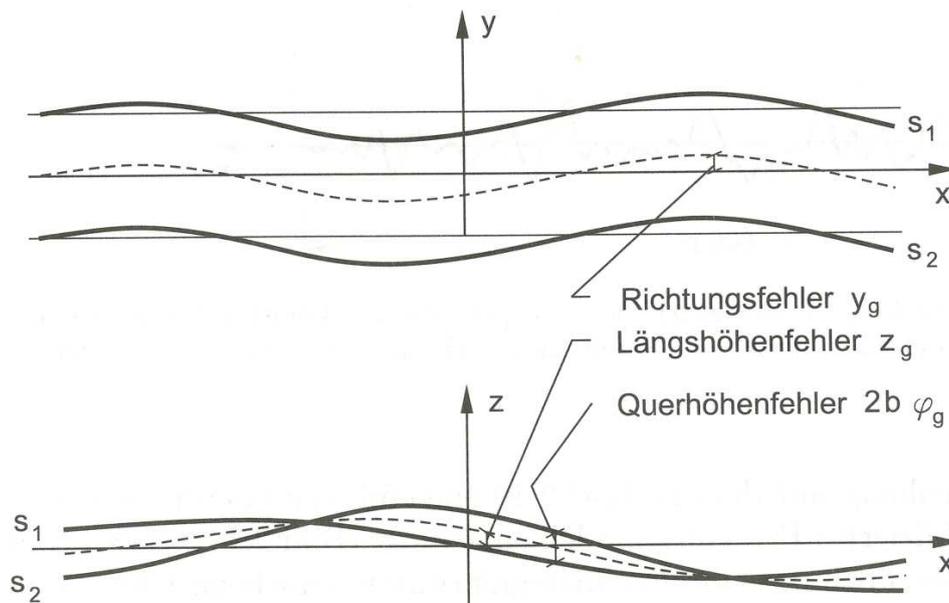


Abbildung 3.28: Richtungsfehler und Längshöhensfehler, aus [Knothe und Stichel, 2003]

“Der Begriff Gleislagequalität beschreibt den Istzustand eines Gleises unter Berücksichtigung der Gleislageabweichungen. Das Qualitätsniveau der Gleislage ist nach Gesichtspunkten der Gleisinstandhaltung definiert. Grundlage sind Gleise repräsentativer Strecken, die nach dem gegenwärtigen Stand der Technik und der üblichen Praxis instand gehalten werden.” [EN14363, 2010]

Die Qualitätsniveaus werden wie folgt beschrieben.

“Qualitätsniveau QN1 löst die Beobachtung eines Gleisabschnittes oder eine Instandhaltungsmaßnahme im Rahmen der normalen Arbeitsplanung aus. Qualitätsniveau QN2 erfordert kurzfristig eine Instandhaltungsmaßnahme und Qualitätsniveau QN3 kennzeichnet Gleisabschnitte, bei denen die übliche Gleislagequalität nicht vorhanden ist. Allerdings stellt das Qualitätsniveau QN3 nicht den ungünstigsten, noch zulässigen Instandhaltungszustand eines Gleises dar.” [EN14363, 2010]

Bei der Berechnung der Qualitätsniveaus für die Auswertungsabschnitte werden nur der Richtungsfehler y_G und der Längshöhensfehler z_G berücksichtigt. Die dabei gebildeten Beurteilungsgrößen sind der absolute Größtwert des Richtungsfehlers Δy_{max}^0 und dessen Standardabweichung Δy_{σ}^0 . Analog sind für den Höhenfehler der absolute Größtwert Δz_{max}^0 und die Standardabweichung Δz_{σ}^0 zu bestimmen. Anhand dieser Werte lassen sich die Qualitätsniveaus der Auswertungsabschnitte mittels Tabelle 3.8, S. 70 bestimmen.

Tabelle 3.8: Grenzwerte der Qualitätsniveaus [EN14363, 2010]

	Richtung				Längshöhe			
	QN1		QN2		QN1		QN2	
Örtlich zulässige Geschwindigkeit in km/h	Δy_{max}^0	Δy_{σ}^0	Δy_{max}^0	Δy_{σ}^0	Δz_{max}^0	Δz_{σ}^0	Δz_{max}^0	Δz_{σ}^0
$V \leq 80$	12	1,5	14	1,8	12	2,3	16	2,6
$80 < V \leq 120$	8	1,2	10	1,5	8	1,8	12	2,1
$120 < V \leq 160$	6	1	8	1,3	6	1,4	10	1,7
$160 < V \leq 200$	5	0,8	7	1,1	5	1,2	9	1,5
$200 < V \leq 300$	4	0,7	6	1	4	1	8	1,3

Für QN3 sind hier keine Grenzwerte berücksichtigt. Sie werden für die absoluten Größtwerte Δy_{max}^0 und Δz_{max}^0 als 30% Steigerung der Grenzwerte für QN2 angegeben. Das bedeutet $\Delta y_{max,QN2}^0 = 1,3 \cdot \Delta y_{max,QN3}^0$, analog wird $\Delta z_{max,QN3}^0$ berechnet.

Die Daten der Gleislageabweichungen werden mit speziellen Gleismesswagen erfasst und sind bei den Bahnverwaltungen verfügbar. Damit die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist müssen die Messsignale entsprechend gefiltert und je nach verwendetem Messsystem mit einem Korrekturfaktor korrigiert werden. Als Filter wird ein Butterworth-Filter vierter Ordnung mit der unteren Eck-Wellenlänge $L_u = 3m$ und der oberen Eck-Wellenlänge $L_o = 25m$ verwendet. Die Korrekturfaktoren für die Messsysteme der einzelnen Bahnen sind der Tabelle C.2 in der EN 14363:2010 zu entnehmen. In Abbildung C.5, S. 103 und Abbildung C.6, S. 103 sind Beispiele für Gleislagedaten welche den Qualitätsniveaus QN1-QN3 entsprechen gezeigt.

Die Auswertungsabschnitte jedes Prüfbereiches sollten folgende Verteilung der Qualitätsniveaus aufweisen.

- 50% der Abschnitte mit einer Gleislagequalität \leq QN1
- 40% der Abschnitte mit einer Gleislagequalität $>$ QN1 \leq QN2
- 10% der Abschnitte mit einer Gleislagequalität $>$ QN2

In der Darstellung der Ergebnisse ist die Verteilung der Qualitätsniveaus neben den anderen Ergebnissen zu dokumentieren. Dabei werden die Standardabweichungen Δy_{σ}^0 und Δz_{σ}^0 der Auswertungsabschnitte jedes Prüfbereiches klassiert und Summenkurven gebildet aus denen sich die Anteile der Qualitätsniveaus ablesen lassen. Ein Beispiel für

die Klassierung der Standardabweichungen der Gleislagefehler ist in Abbildung 3.29, S. 71 zu sehen.

RIM Report of Quality Levels acc. to 14363

Evaluation variable:	delta y sigma
Track:	Test
Test zone:	not applicable
Number of evaluation sections:	95
Permissible local speed [km/h]:	160.00
Class width [mm]:	0.10
Track quality value QN1 (standard deviation)[mm]:	1.00
Track quality value QN2 (standard deviation)[mm]:	1.30

Class N°	Class limits		Occupation figure		Cumulated Sum %
	Lower limit [mm]	Upper limit [mm]	Value	Cumulated Sum	
1	0.30	0.40	8	0	0.00
2	0.40	0.50	10	8	8.42
3	0.50	0.60	16	18	18.95
4	0.60	0.70	17	34	35.79
5	0.70	0.80	20	51	53.68
6	0.80	0.90	7	71	74.74
7	0.90	1.00	3	78	82.11
8	1.00	1.10	1	81	85.26
9	1.10	1.20	2	82	86.32
10	1.20	1.30	2	84	88.42
11	1.30	1.40	3	86	90.53
12	1.40	1.50	4	89	93.68
13	1.50	1.60	0	93	97.89
14	1.60	1.70	1	93	97.89
15	1.70	1.80	1	94	98.95
16	1.80	1.90	0	95	100.00

Abbildung 3.29: Ergebnis der Klassierung der Standardabweichung nach QN

Das Diagramm in Abbildung 3.30, S. 72 stellt die zur Summenkurve aufsummierten Werte der klassierten Standardabweichungen dar. Auf der Abszisse ist die Standardabweichung des betrachteten Gleislagefehlers (hier der Richtungsfehler) aufgetragen während die Ordinate die über die Klassen kumulierte und normierte Summe der Auswertungsabschnitte zeigt. Dabei ist der Grenzwert der Standardabweichung für QN1 als grüne vertikale Linie und für QN2 als gelbe vertikale Linie eingetragen. Weiters sind noch bei 50% und bei 90% der Abschnittssumme horizontale Geraden eingezeichnet. Dieser Abbildung kann entnommen werden ob die Gleisqualität der Abschnitte in den empfohlenen Anteilen ($50\% \leq \text{QN1}$, $40\% > \text{QN1} \leq \text{QN2}$ und $10\% > \text{QN2}$) in der Versuchsstrecke enthalten ist. Im hier gezeigten Beispiel ist die Strecke eher zu "gut", da der Anteil mit Gleislagequalität $\leq \text{QN1}$ ca. 85% beträgt, während der Anteil $> \text{QN1} \leq \text{QN2}$ ca. 5% ausmacht. Der Streckenanteil mit Gleislagequalität $> \text{QN2}$ ist fast genau 10% wie benötigt. Die in der Norm geforderten Anteile der Gleislagequalität lassen sich klarerweise nicht immer exakt erfüllen und sind eher als Anhalt bei der Auswahl der Versuchsstrecken gedacht.

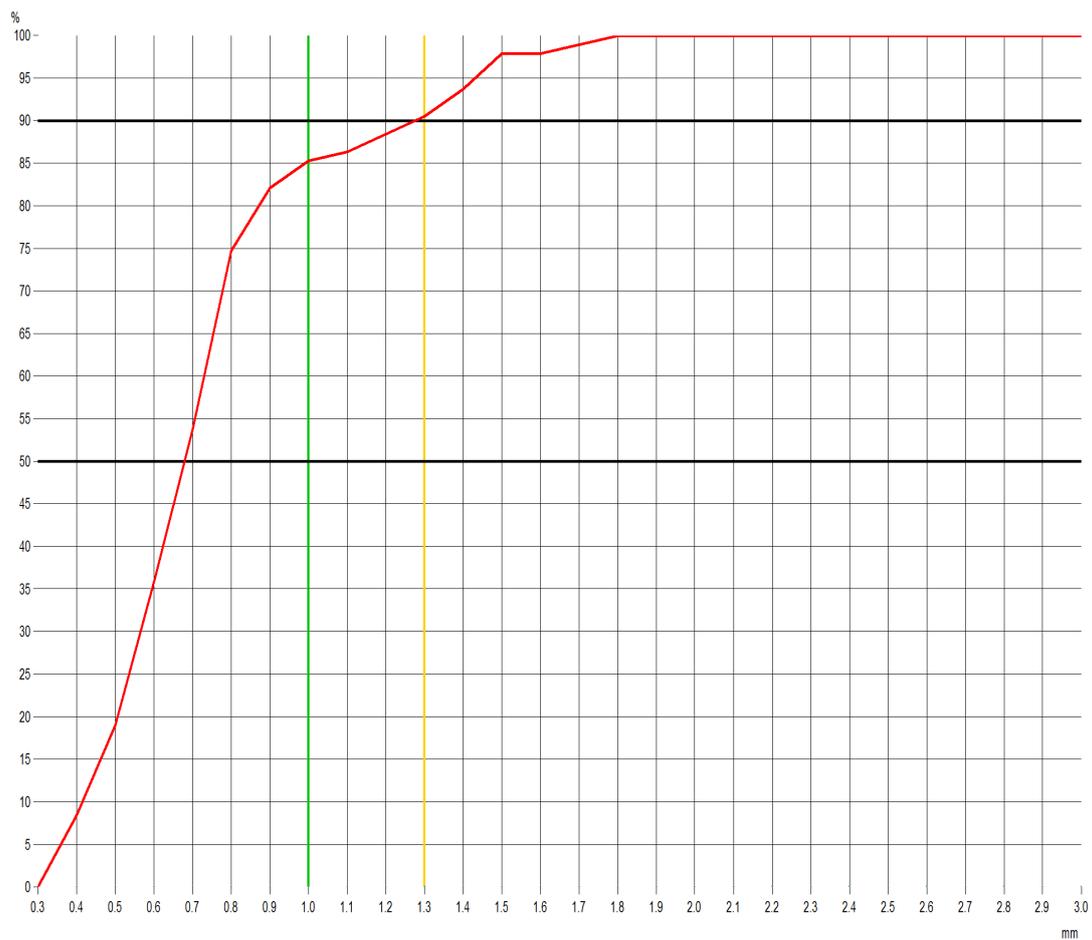


Abbildung 3.30: Anteile der QN in Abschnitten

Die Angaben zu Verwindung und Spurweite der befahrenen Versuchsstrecke in der EN 14363:2010 sind eher vage. Die Grenzverwindung ist mit $g_1^0 = \frac{20}{2a} + 3 \leq 7$ in % definiert, wobei $2a$ die Längenbasis in m bezeichnet. Für die Spurweite in Prüfbereich 1 (gerades Gleis) sind abhängig von der Fahrgeschwindigkeit V die maximalen Werte für die Spurweite gemittelt über 100 m in Tabelle C.3 EN 14363:2010 angegeben. In Gleisbögen (Prüfbereiche 2, 3, 4) muss die Spurweite mindestens 1455 mm betragen.

3.3.7 Ausgabe und grafische Darstellung

Nachdem im vorhergehenden Abschnitt die Aufbereitung und Evaluierung der Daten aus den Streckenversuchen beschrieben wurde, wird in diesem Abschnitt auf die Ausgabe und die grafische Darstellung der Ergebnisse eingegangen. Die Norm verlangt eine Dokumentation der Ergebnisse in Form eines Berichts. Dieser muss Informationen beinhalten welche die Bewertung der Prüfbedingungen, die Beurteilung der Ergebnisse und die Prüfung der Zulassungsbedingungen ermöglichen. Weiters sind ausreichend detaillierte Angaben zu Versuchsfahrzeug, Versuchsgleisen, Messverfahren, Umweltbedingungen und sonstigen besonderen Umständen zu machen. So lässt sich der Ablauf der Streckenversuche und eventuell aufgetretene Besonderheiten nachvollziehen. Einen weiteren Teil der Ergebnisdokumentation stellt der Ist-Zustand des Versuchsfahrzeuges dar. Dieser ist anhand von Zeichnungen oder Beschreibungen ausreichend festzuhalten und in den Bericht aufzunehmen.

Hinsichtlich der Präsentation der Ergebnisse der statistischen Auswertung gibt es in der Norm nur relativ grobe Vorgaben. Gemeinsam ist den Darstellungen aber, dass die Schätzwerte der maximalen Erwartungswerte $Y(PA)_{max}$ aller Beurteilungsgrößen in Tabellen oder Diagrammen dargestellt werden müssen. Dabei muss der Schätzwert der maximalen Erwartungswerte $Y(PA)_{max}$ der Beurteilungsgröße und der zugehörige Grenzwert gemeinsam dargestellt werden. Dieser Vergleich ist für jede Beurteilungsgröße, jede Versuchsbedingung und jeden untersuchten Prüfbereich durchzuführen. Es werden Abschnitte in Übergangsbögen getrennt von Abschnitten in Vollbögen oder gerader Strecke dargestellt. Für die Auswerteabschnitte der Übergangsbögen werden die Höchstwerte der Häufigkeitswerte $y(h_i)$ mit den Grenzwerten verglichen. Nicht alle Beurteilungsgrößen werden für alle Prüfbereiche bewertet. Das hat den Grund, dass es keinen Sinn macht beispielsweise die quasistatischen Führungskräfte Y_{qst} in Prüfbereich 1 (gerade Strecke und sehr große Radien) zu bewerten, da diese dort in der Regel nicht auftreten. Zur Beurteilung des Stabilitätsverhaltens des Testobjekts, sind der Größtwert der Beurteilungsgröße für Stabilität und wie schon vorher der Grenzwert y_{lim} für jede Versuchsvariante und die Prüfbereiche 1 und 2 gegenüberzustellen. Dem Fahrzeug kann stabiles Verhalten attestiert werden, wenn die Beurteilungsgrößen keine Überschreitungen des Grenzwertes

zeigen. Diese Auswertung ist für alle Auswertungsabschnitte der Prüfbereiche 1 (Gerades Gleis) und 2 (große Radien) durchzuführen.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Form von Diagrammen welche mittels Tabellenkalkulationssoftware erzeugt werden. Dies ist notwendig um Diagramm und zugehörige Daten gleichzeitig verfügbar zu haben, da so gleich Überschreitungen der Grenzwerte den Daten zugeordnet werden können. In den Tabellen sind auch die Informationen über den jeweiligen Streckenabschnitt hinterlegt. So kann anhand der Gleislagedaten überprüft werden ob die Überschreitungen dem dynamischen Verhalten des Fahrzeugs oder einem Einzelfehler in der Gleislage zuzuordnen sind. Dadurch ist anhand der Abschnittsnummer eine Rückverfolgung der Ergebnisse bis auf den Auswertungsabschnitt des Zeitschriebes möglich. So kann man im Nachhinein beispielsweise den Signalverlauf einer Messstelle für einen gewissen Streckenabschnitt nochmals genau analysieren und eventuelle Störeinflüsse die ungültige Ergebnisse liefern erkennen.

Der Aufbau der Ergebnistabellen beginnt mit einem Allgemeinen Teil in dem allgemeine Daten wie Projektname, Datum, Bearbeiter und ähnliches abgelegt werden. Das nächste Tabellenblatt stellt eine Statistik der gesamten Auswertung dar, d.h. alle Auswertungsabschnitte in allen Prüfbereichen werden betrachtet. Diese Aufstellung erlaubt es zu überprüfen ob die Anforderungen der Norm hinsichtlich Anzahl der Auswertungsabschnitte je Prüfbereich, kumulierte Länge der Abschnitte je Prüfbereich und mittlere Radien für die Prüfbereiche 3 und 4 erfüllt werden. Darauf folgen die Ergebnisse der Beurteilungsgrößen in Diagrammen, getrennt nach Prüfbereichen. Zuerst werden die Ergebnisse der Abschnitte für gerade Strecke und Vollbögen gezeigt und erst danach folgt die Darstellung der Ergebnisse für die Übergangsbögen.

3.4 Testen und Optimieren der Algorithmen

Nach dem Abschluss der Konzeptionierung und Erstellung der Funktionsmodule folgt noch die Optimierung und Erprobung der Auswerteroutine und deren einzelner Teile. Dies geht Hand in Hand mit den in Kapitel 4, S. 79 beschriebenen Auswertungen mit realen Daten aus Projekten. Ein wichtiger Punkt ist die Überprüfung der Plausibilität der Ergebnisse. Dazu werden Daten aus schon abgearbeiteten Projekten nochmals ausgewertet und die Ergebnisse verglichen. Weiters werden mit einem Mehrkörpersimulationsprogramm Strecken erstellt, deren Trassierung genau auf die vier Prüfbereiche zugeschnitten ist. So können Messdaten erzeugt werden, indem ein Fahrzeugmodell diese Strecken mit verschiedenen Geschwindigkeiten befährt und sich so die gewünschten Fahr-

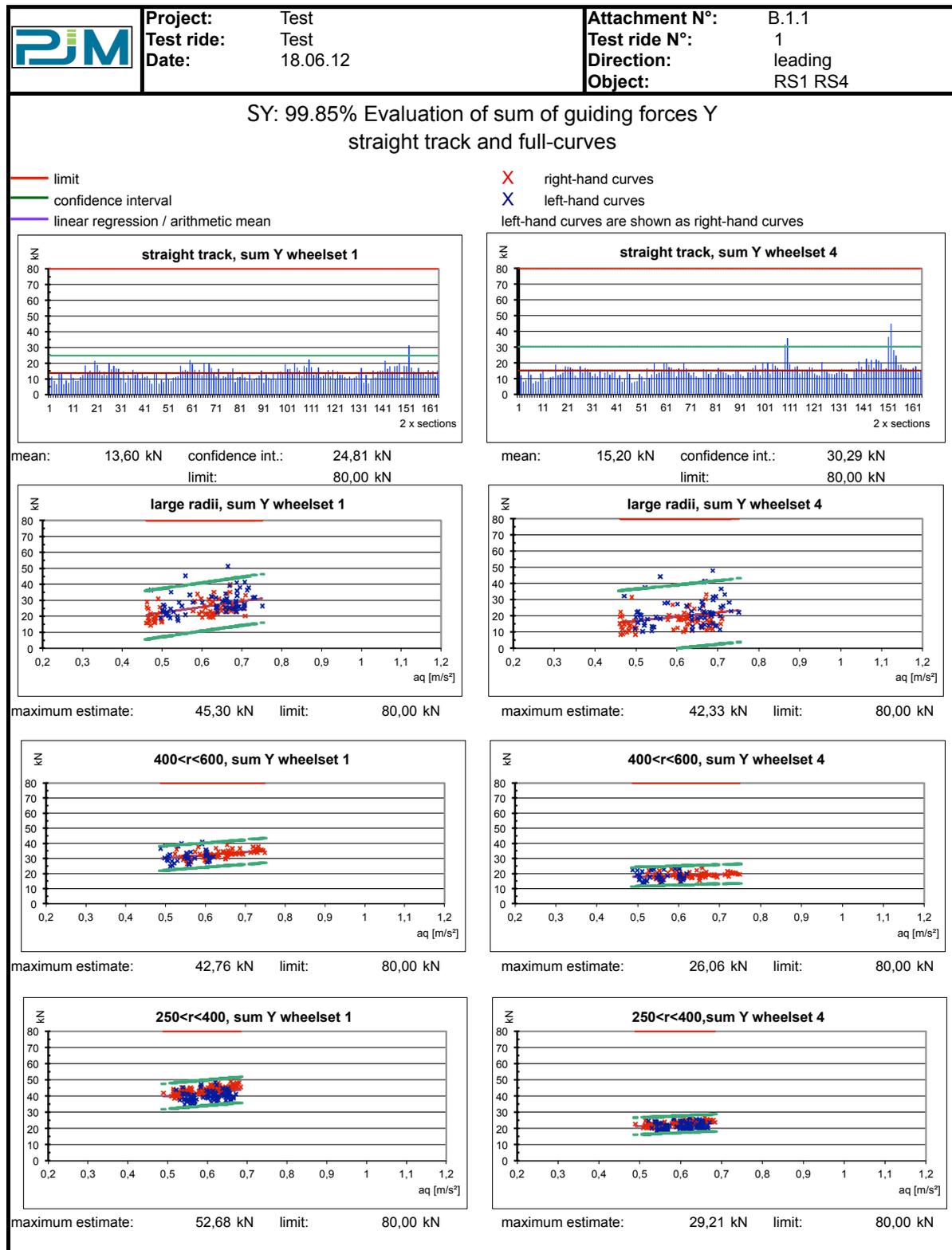


Abbildung 3.31: Ergebnisse Vollbögen

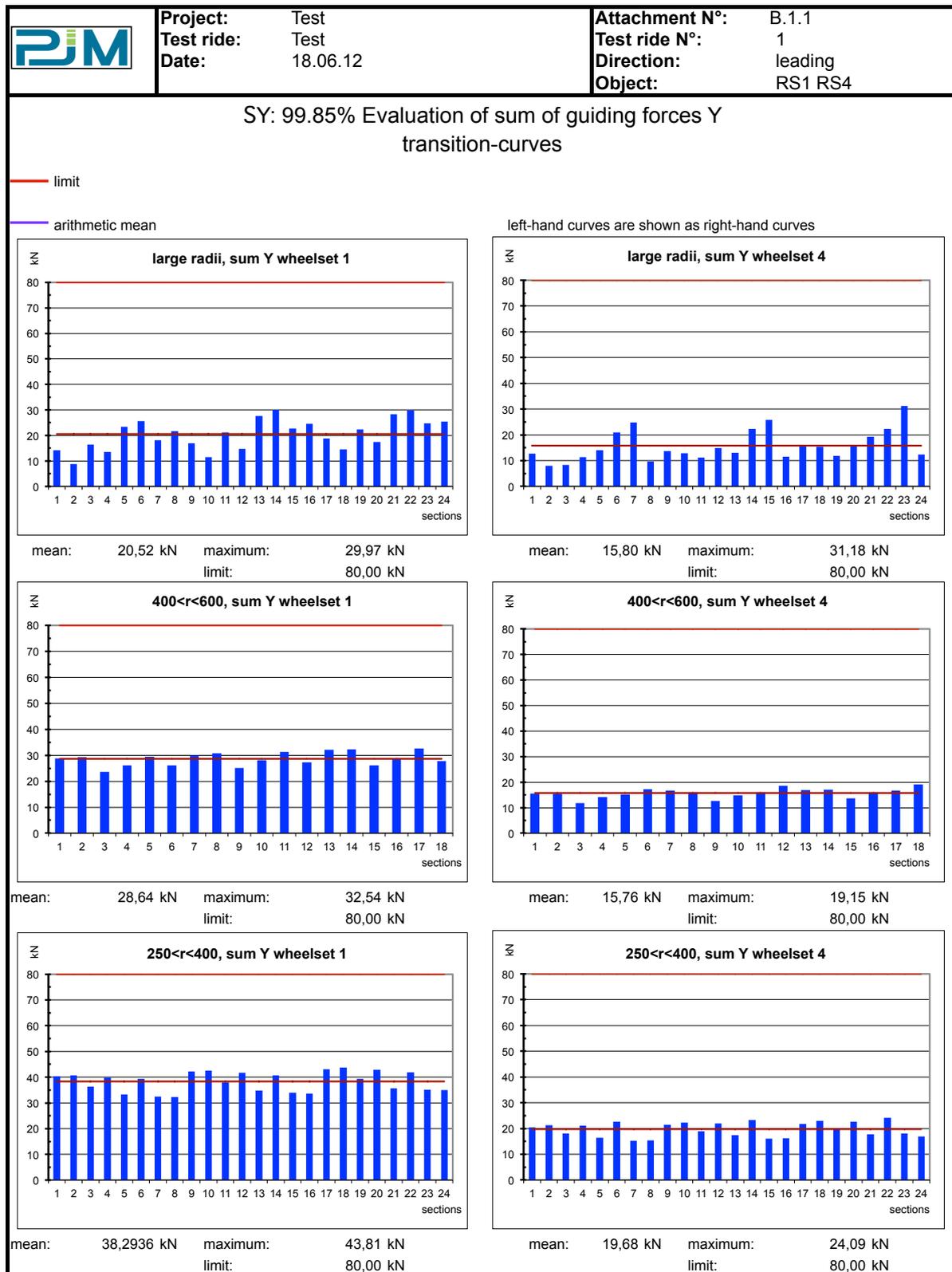


Abbildung 3.32: Ergebnisse Übergangsbögen

zustände ergeben. Diese Daten können wie Messdaten aus realen Projekten verarbeitet werden. Somit eignet sich diese Vorgehensweise ideal zur Erprobung der Auswerteroutine, denn sie bietet die Möglichkeit sowohl die vom Fahrzeug als auch die vom Fahrweg abhängigen Parameter zu variieren und so schnell Testdaten unter verschiedenen Prüfbedingungen bereitzustellen.

Ein weiterer Punkt beim Testen der Auswerteroutine ist die Minimierung der Laufzeit. Oft sind nämlich mehrere Durchläufe der Routine notwendig, da verschiedene Parameter angepasst werden und dann eine neuerliche Auswertung durchgeführt wird. Weiters ist es wichtig Programmteile wie Schleifen oder ähnliche Konstrukte sorgfältig anzulegen, da bei Iterationen sonst unnötig Rechenzeit verbraucht wird. Eine Optimierung solcher Codepassagen kann auch bei nur geringer Zeitersparnis je Rechenschritt sinnvoll sein, wenn diese Operation viele Male ausgeführt wird.

Ein Beispiel kommt im Teil “Abschnittsbildung” vor. Dort wird ausgehend vom Vollbogenanfang bzw. Vollbogenende der Übergangsbogen im Krümmungsschrieb durch schrittweises Überprüfen der Steigung der Krümmung erkannt. Die Erkennung des Anfangs- bzw. Endpunktes des Übergangsbogen sollte mit einer Genauigkeit von etwa 0.5 m erfolgen. Wird aber bei der Suche schon mit so geringer Schrittweite begonnen, dauert diese dementsprechend lange. Daher wurde dieser Suchvorgang mit variabler Schrittweite umgesetzt. Die Suche startet z.B. mit 10 m Schrittweite, durch diese grobe Suche wird der gesuchte Punkt jedoch meist übersprungen. Passiert dies wird das durch die Routine erkannt und die Suche wird vom letzten gültigen Punkt mit verminderter Schrittweite (5 m) fortgesetzt. Wie viele Verfeinerungsschritte sinnvoll sind ist in den einzelnen Fällen abzuwägen. Hier wurde als dritte Schrittweite 0.5 m verwendet, da diese Genauigkeit ausreicht. In Abbildung 3.33, S. 78 ist dieser Vorgang in Form eines Ablaufdiagramms dargestellt.

Auch bei der Ausgabe der Ergebnisse lässt sich je nach der verwendeten Ausgabemethode deutlich Zeit einsparen. Zur Zeit gibt es verschiedene Versionen des Ausgabemoduls. Eine zeitoptimierte Version, in der eine deutlich schneller Ausgabefunktion genutzt wird, die aber nur in der neuesten Version der zur Erstellung der Routine verwendeten Software zur Verfügung steht. Zusätzlich existiert noch eine abwärtskompatible Version mit etwas längerer Laufzeit.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden Ergebnisse einer Datenauswertung realer Messdaten zur Validierung der Auswerteroutine gezeigt. Da die Ergebnisse hauptsächlich aus Diagrammen, Grafiken und Tabellen bestehen, werden im Folgenden solche Beispiele besprochen und erklärt. Es soll möglichst zu jeder Teilfunktion der Auswerteroutine eine grafische Repräsentation des Teilergebnisses gezeigt werden. Dabei kann es teilweise zu Redundanzen mit Darstellungen aus früheren Kapiteln kommen, welche aber der Vollständigkeit halber in Kauf genommen werden.

4.1 Ergebnisse - Eingabe

Die Eingabe der benötigten Parameter wie allgemeine Daten, Grenzwerte der Beurteilungsgrößen, Kanalnamen zur Zuordnung der Messsignale und Verzeichnisse der benötigten Daten erfolgt über eine Tabelle. Ein Ausschnitt dieser sogenannten "Startmappe" ist in Abbildung 4.1, S. 79 zu sehen.

Angabe der Projektdaten	
Projektbezeichnung	Test
Fahrzeugbezeichnung	RS1 RS4
Fahrtrichtung	vorlaufend
Datum der Auswertung, Eingabeformat: '01.01.2011	18.06.2012
Kunde	Test
Durchgeführt von	Test
Spurweite [mm]	1435 mm
V_{\max} [km/h]	160 km/h
$\ddot{u}f_{zul}$ [mm]	100 mm
$\ddot{u}f_{zul}$ [m/s ²]	0.6540 m/s ²
Geraden eindimensional (1) oder zweidimensional (2) auswerten	1

Abbildung 4.1: Beispiel Eingabemappe

4.2 Ergebnisse - Krümmungsberechnung

Die Krümmungsberechnung ergibt einen wegbasierten Krümmungsschrieb der Messfahrt. Dazu ist in Abbildung 4.2, S. 80 ein Beispiel gezeigt. Die Krümmung der Strecken wird durch einen Drehratensensor vom Fahrzeug aus erfasst.

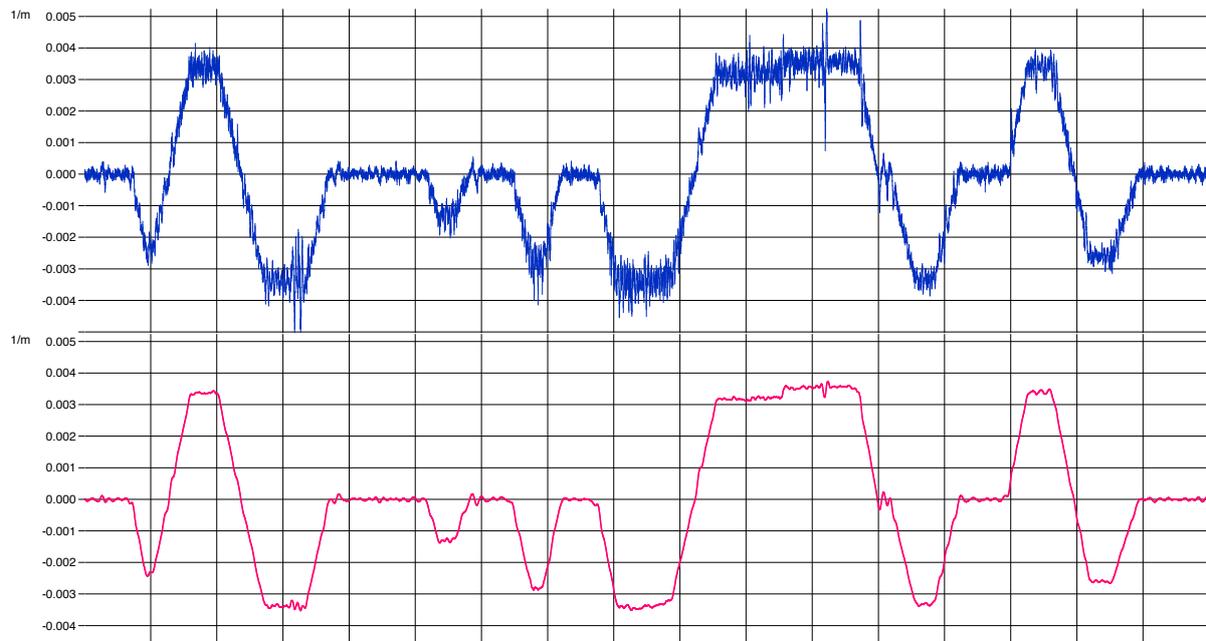


Abbildung 4.2: Beispiel Krümmungsberechnung

4.3 Ergebnisse - Unterteilung der Vollbögen, Übergangsbögen und Geraden

Die Unterteilung der Strecke in die Elemente Vollbogen, Übergangsbogen und Gerade anhand des Krümmungsschriebes ergibt beispielsweise folgendes Ergebnis in Abbildung 4.3, S. 81. Dies kann genutzt werden um zu überprüfen ob die einzelnen Elemente der Strecke korrekt erkannt wurden. Denn es kann durchaus vorkommen, dass durch das Einwirken von Störgrößen die eigentlichen Messgrößen so stark beeinflusst werden und die automatische Erkennung der Routine fehlschlägt. Abhilfe schafft eine manuelle Nachkontrolle und wenn nötig ein Nachjustieren der Parameter anhand derer die Trassierungselemente erkannt werden. In diesem Beispiel ist das aber, wie erkennbar ist, nicht nötig.

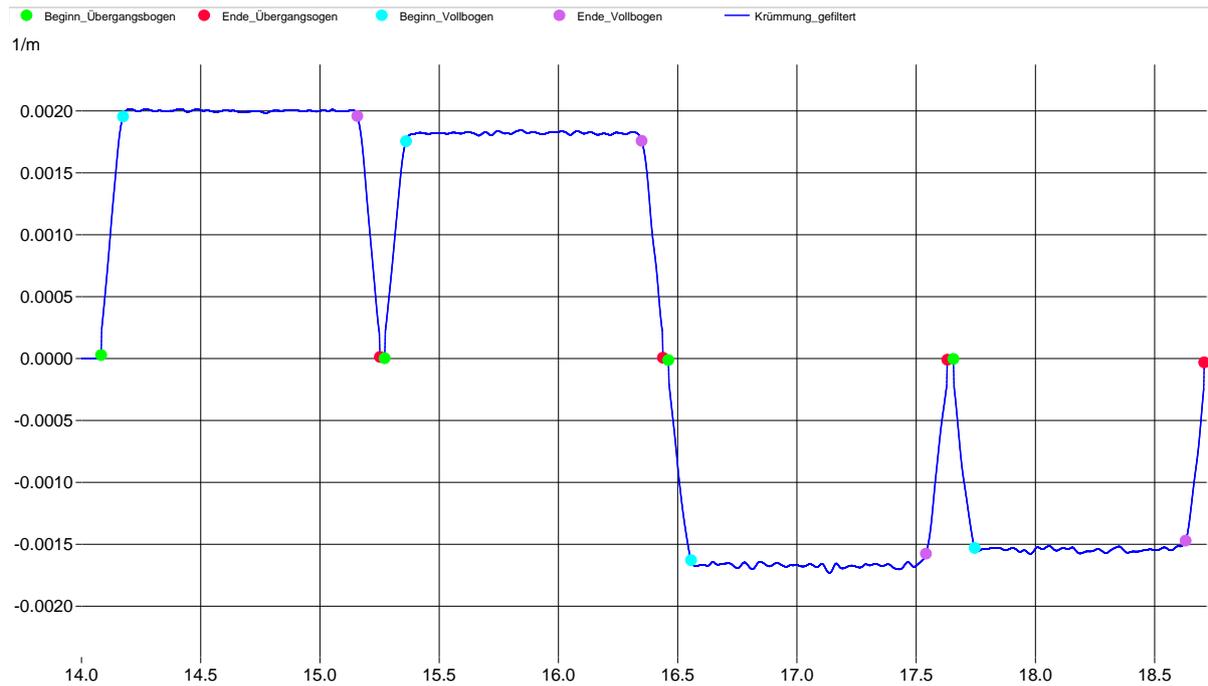


Abbildung 4.3: Beispiel Unterteilung in Vollbögen und Übergangsbögen

4.4 Ergebnisse - Abschnittsbildung

Nachdem die Trassierungselemente in Auswertungsabschnitte unterteilt wurden, werden die sogenannten “Bogenhauptpunkte” in zusammen mit anderen Größen in Tabellen ausgegeben. Dies kann sich im späteren Verlauf der Auswertung als nützlich erweisen, falls man ungewöhnliche Messwerte in einem Abschnitt nochmals überprüfen möchte. In Abbildung 4.4, S. 81 ist solch eine Tabelle dargestellt.

Messfahrt Nr.	Bogennummer	Abschnitts Nr.	Index Nr.	Fahrtrichtung	Anfangspunkt [m]	Endpunkt [m]	Abschnittslänge [m]	V-Mitte [km/h]	dV [km/h]	Radius [m]	Abschnitts-aq1 [m/s²]	Abschnitts-aq2 [m/s²]	Abschnitts-aq MRS [m/s²]	Fehler aq absolut (MRS gemessen) [m/s²]	Fehler aq (MR gemessen) [?]
1	1	1	41	1	24.40	115.90	91.50	71.97	-0.05	552.45	0.2921	0.4103	0.2989	0.006861562	2.35
1	1	2	4	1	116.64	172.64	56.00	71.94	0.00	279.60	0.5336	0.5520	0.5546	0.001010772	0.18
1	1	3	4	1	174.12	230.12	56.00	71.94	0.00	279.60	0.5600	0.5475	0.5353	-0.024695965	-4.41
1	1	4	4	1	231.61	287.61	56.00	71.94	0.00	279.60	0.5350	0.5379	0.5335	-0.001587929	-0.30
1	1	5	4	1	289.09	345.09	56.00	71.94	0.00	279.60	0.5461	0.5439	0.5446	-0.001518361	-0.28
1	1	6	4	1	346.57	402.57	56.00	71.94	0.00	279.60	0.5336	0.5444	0.5379	0.004378066	0.82
1	1	7	4	1	404.05	460.05	56.00	71.94	0.00	279.60	0.5404	0.5298	0.5533	0.012897764	2.39
1	1	8	4	1	461.54	517.54	56.00	71.93	0.00	279.60	0.5211	0.5195	0.5186	-0.002490154	-0.48
1	1	9	4	1	519.02	575.02	56.00	71.94	0.00	279.60	0.5395	0.5376	0.5225	-0.016988887	-3.15
1	1	10	4	1	576.50	632.50	56.00	71.93	0.00	279.60	0.5223	0.5285	0.5281	0.005748672	1.10
1	1	11	4	1	633.98	689.98	56.00	71.94	0.00	279.60	0.5484	0.5438	0.5606	0.012192462	2.22
1	1	12	4	1	691.46	747.46	56.00	71.94	0.00	279.60	0.5363	0.5462	0.5371	0.000840617	0.16
1	1	13	4	1	748.95	804.95	56.00	71.94	0.00	279.60	0.5359	0.5366	0.5333	-0.002555869	-0.48
1	1	14	4	1	806.43	862.43	56.00	71.94	0.00	279.60	0.5481	0.5508	0.5491	0.001075888	0.20
1	1	15	4	1	863.91	919.91	56.00	71.94	0.00	279.60	0.5550	0.5596	0.5412	-0.013740642	-2.48
1	1	16	4	1	921.39	977.39	56.00	71.94	0.00	279.60	0.5556	0.5484	0.5539	-0.001767597	-0.32
1	1	17	4	1	978.88	1034.88	56.00	71.94	0.00	279.60	0.5584	0.5441	0.5480	-0.010392926	-1.86
1	1	18	4	1	1036.36	1092.36	56.00	71.94	0.00	279.60	0.5473	0.5456	0.5608	0.013525142	2.47
1	1	19	42	1	1093.10	1184.60	91.50	71.97	0.06	551.61	0.3026	0.1663	0.2844	-0.018162398	-6.00

Abbildung 4.4: Beispiel Ausgabe der einzelnen Abschnitte, “Bogenhauptpunkte”

4.5 Ergebnisse - Kontrolle der Abschnitte auf a_Q und V

Mit dem Ergebnis der a_Q - und V Kontrolle ist eine Überprüfung der Anzahl der auswertbaren Abschnitte möglich. In Abbildung 4.5, S. 82 ist dies beispielhaft dargestellt.

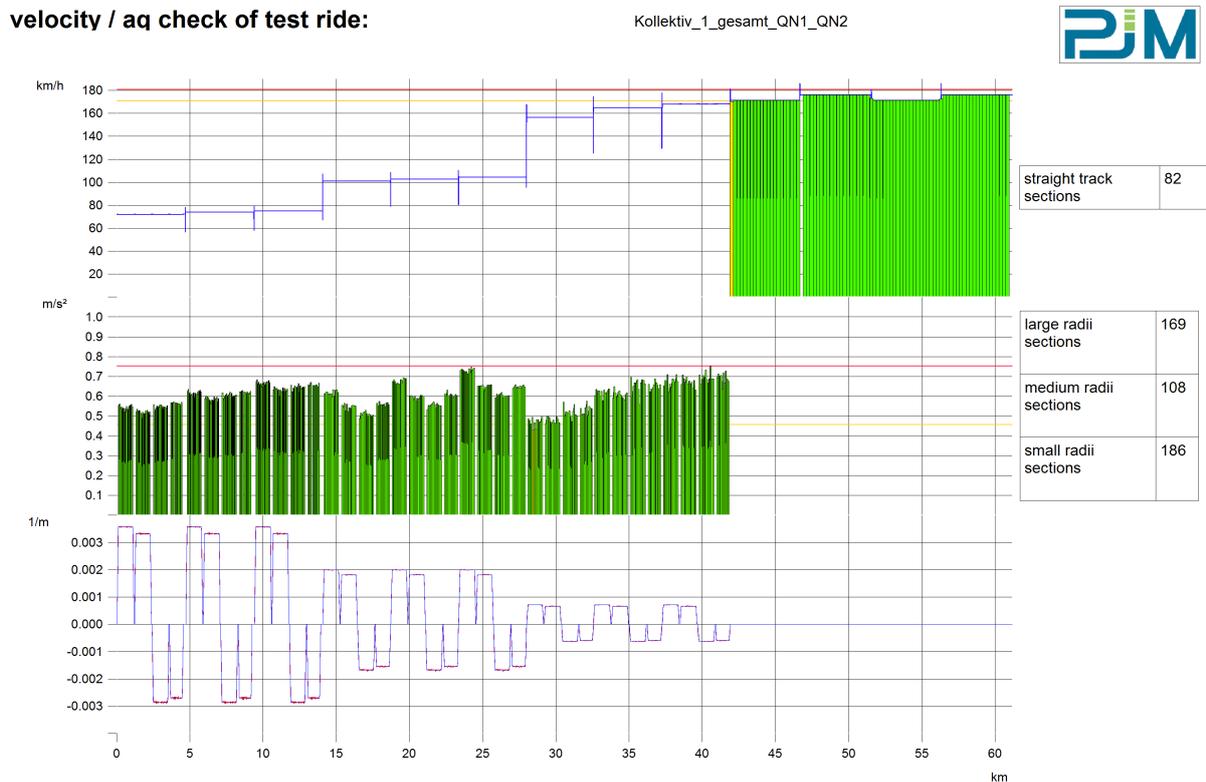


Abbildung 4.5: Beispiel a_Q und V Kontrolle

4.6 Ergebnisse der Bewertung der Beurteilungsgrößen

Die Bewertung der Beurteilungsgrößen stellt eigentlich die Hauptaufgabe der Auswerterroutine dar, denn auf Basis dieser Ergebnisse wird beurteilt, ob das Fahrzeug die Grenzwerte einhält oder überschreitet. Auf Grund der sehr umfangreichen Ergebnisse die sich bei einer vollständigen Auswertung ergeben sind diese in *Anhang D* vollständig dargestellt.

5 Erkenntnisse und Ausblick

Die Beschäftigung mit der Thematik fahrtechnischer Versuche bei Schienenfahrzeugen setzt ein Studium der Regelwerke welche auf diesem Gebiet Anwendung finden voraus. Dies ist deswegen wichtig, da diese Normen den Tätigkeiten und Prozessen, welche mit dem Prüfvorgang verbunden sind, eine gewisse Struktur geben. In der in dieser Arbeit vorgestellten Norm werden die Prüfvorgänge zwar meist gut definiert, doch in der Praxis treten immer wieder Fragestellungen auf, die in dieser Art nicht in der Norm berücksichtigt sind. Einige Themen welche die fahrtechnischen Versuche betreffen befinden sich noch in Diskussion in den zuständigen Arbeitsgruppen und Gremien.

Das erste Thema, welches auch in der Einleitung der EN 14363:2010 erwähnt wird, ist wie die Prüfung von Weichenfahrten in die Streckenversuche einbezogen werden sollen. Dort wird jedoch darauf verwiesen, dass noch weitere Untersuchungen notwendig sind um die Prüfbedingungen zu definieren. Das Thema Weichenfahrten ist nicht nur für die Fahrzeughersteller, im Hinblick auf Spurkranzabnutzung und Entgleisungssicherheit von Interesse, auch für die Institutionen welche für die Erhaltung der Infrastruktur zuständig sind stellen Weichen einen bedeutenden Kostentreiber dar. Denn die Instandhaltung von Weichen ist deutlich kostspieliger als jene der meisten anderen Streckenabschnitte. Veit schreibt dazu: *“1m Weiche im durchgehenden Hauptgleis verursacht dieselben durchschnittlichen jährlichen Lebenszykluskosten wie 11m Gleis. Dieser Wert basiert auf Standardweichen in der Geraden, wobei er mit dem Abzweigradius der Weiche leicht variiert, generell gilt, je größer die Weiche desto günstiger im Vergleich.”*[Veit, 2007]. Nun betrifft der Geltungsbereich der EN 14363:2010 zwar tendenziell eher die Fahrzeugseite, doch nachdem darin auch eigens Beurteilungsgrößen zur Beurteilung der Fahrwegbeanspruchung definiert werden, ist ersichtlich, dass diese beiden Bereiche nicht getrennt betrachtet werden dürfen. Auf Grund der Wichtigkeit der Thematik wird es sicherlich bald auch für diesen Bereich Regelungen zur Durchführung dieser Prüfungen geben.

Eine weitere offene Fragestellung bildet der Grenzwert für die quasistatische Führungskraft Y_{qst} . Diesbezüglich wird in der EN 14363:2010 Folgendes angemerkt: *“Dieser Grenzwert ist in Gleisbögen mit sehr kleinen Gleisbogenhalbmessern (Prüfbereich 4) für viele Fahrzeuge ein Problem. Der Wert wird derzeit durch die UIC überprüft. Abweichungen von diesem Grenzwert können unter bestimmten Bedingungen erlaubt werden.”*[EN14363,

2010] Diese Regelung ist etwas vage gehalten, z.B. werden die “bestimmten Bedingungen” unter denen Abweichungen vom Grenzwert erlaubt sind nicht genauer definiert. Solche Ausnahmen erlauben ein Überschreiten der Grenzwerte durch Ausnutzen der Grauzonen und sollten in Zukunft besser gehandhabt werden.

Bei der Beurteilung der Gleislagequalität gibt es nach Meinung des Verfassers auch gewisse Inkonsistenzen, welche zur Verständlichkeit der Norm nicht unbedingt beitragen. Die Begriffe “Richtung” und “Längshöhe” bezeichnen in der Literatur nämlich den Richtungsfehler und den Längshöhenfehler. Diese Größen sind eigentlich auf Gleisbasis definiert mit den Formeln $y_G = \frac{1}{2}(y_l + y_r)$ für den Richtungsfehler und $z_G = \frac{1}{2}(z_l + z_r)$ für den Längshöhenfehler. Die EN 14363:2010 jedoch fordert eine Betrachtung nach linker und rechter Schiene getrennt. Dafür sind die Bezeichnungen “Richtung” und “Längshöhe” jedoch eigentlich nicht gebräuchlich. Dieser Umstand könnte eventuell zu Fehlinterpretationen der Norm führen und sollte daher berücksichtigt werden.

Ein Thema das auf den ersten Blick nichts mit der fahrtechnischen Prüfung von Schienenfahrzeugen zu tun hat, ist der Trassenpreis. Nun gibt es zumindest in einigen Ländern schon Trassenpreissysteme, welche die Abnutzung der Schienen in die Kalkulation des Trassenpreises einfließen lassen. Beispiele sind Schweden und Großbritannien wo ein solches System schon eingesetzt wird. Auch in Österreich wird dieser Umstand seit 2005 im Infrastrukturbenützungsentgelt (IBE) berücksichtigt. Die Beurteilung erfolgt anhand der Rad/Schiene Kräfte, wird derzeit aber nur bei Triebfahrzeugen angewendet. Vielleicht werden in Zukunft auch Ergebnisse aus den fahrtechnischen Prüfungen zur Bewertung neuer Schienenfahrzeuge herangezogen.

Im Hinblick auf die jetzt schon teilweise angewendete Klassifizierung von Fahrzeugen anhand ihrer Fahrwegbeanspruchung, wird sich in Zukunft sicher noch Bedarf ergeben dieses Thema genauer zu betrachten. Zur Untersuchung ist sicherlich eine Kombination aus Versuchsfahrten und Simulationen am besten geeignet. Dabei ergeben sich durch die Messfahrten, welche ja bei der Zulassung neuer Fahrzeuge ohnehin notwendig sind, wertvolle Daten für spätere Evaluierungen und zur Ergänzung der Datenbasis. Außerdem lassen sich damit die Ergebnisse aus Simulationen validieren. Das Werkzeug der Simulation bietet wiederum die Möglichkeit die Phänomene des Rad/Schiene Kontakts im Detail zu untersuchen. So lassen sich Größen wie die Rad/Schiene Kräfte, die Schlüpfef, die Kontaktspannungen und andere betrachten, welche für eine Untersuchung der Fahrwegbeanspruchung benötigt werden. Denn eine Klassifizierung nur basierend auf den Rad/Schiene Kräften greift vor allem bei Triebfahrzeugen vermutlich zu kurz. Hierbei könnte es nämlich passieren, dass ein Fahrzeug mit gutem Bogenlaufverhalten und niedrigen Führungskräften und radialer Einstellung der Radsätze, das Gleis durch Roll-

kontaktermüdung trotzdem schädigt. Eine Betrachtung dieser Vorgänge wäre auf Grund des modularen Aufbaus der Auswerteroutine, bei Vorliegen der benötigten Simulationsdaten, ebenso möglich wie die Bearbeitung anderer Fragestellungen. Ob das Thema der Klassifizierung jedoch durch die ohnedies schon umfangreiche EN 14363:2010 abgedeckt werden sollte ist fraglich. Es wird sich zeigen ob dieses Thema zukünftig in die EN 14363:2010 eingebunden wird oder aber, was wahrscheinlich sinnvoller wäre, in separaten Regelwerken behandelt werden wird.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufgaben des Systems Rad/Schiene	1
2.1	Zusammenführung bisheriger Normen in der EN 14363	5
2.2	Gliederung der Prüfverfahren EN14363	6
2.3	Prüfumfang der stationären Versuche	7
2.4	Merkmale der Streckenversuche	12
2.5	Messverfahren und Beurteilungsgrößen	13
2.6	Definition der Überhöhung	20
2.7	Definition der freien Seitenbeschleunigung a_q	21
3.1	Ablauf der Versuchsvorbereitung und der Streckenversuche	25
3.2	Messgrößen für verschiedene Messverfahren	26
3.3	Beschleunigungssensoren im Wagenkasten	28
3.4	Beschleunigungssensor am Drehgestellrahmen	29
3.5	Beschleunigungssensor am Radsatzlager	29
3.6	Darstellung der Messkette	31
3.7	Prüfbedingungen	35
3.8	Übersicht der Funktionsmodule der Routine	37
3.9	Abschnittsbildung für Geraden, Übergangsbögen und Vollbögen	40
3.10	Prüfbereiche der fahrtechnischen Versuche	43
3.11	Kontrolle der Abschnitte für Prüfbereich 4	45
3.12	Kontrolle der Abschnitte für Prüfbereich 1	45
3.13	Vergleich ungefilterte Messgröße zu gefilterter Messgröße	49
3.14	Vergleich der Frequenzspektren einer ungefilterten und einer gefilterten Messgröße	50
3.15	Klassierte Daten einer Beurteilungsgröße	56
3.16	Summenkurve einer Beurteilungsgröße	56
3.17	Unterschied zwischen Kenngrößen aus Stichprobe und wahren Wert	57
3.18	Erklärung des Vertrauensbereichs	58
3.19	Normalverteilung und t-Verteilungen ($n=2, 4, 8, 60$)	59
3.20	Abweichung zw. Messpunkt P_i und Ausgleichsgerade	61
3.21	Zusammenhang Ausgleichsgerade und Schwerpunkt	62

3.22	Regressionsgerade mit Vertrauensbereich	64
3.23	Sinuslauf des Radsatzes im Gleis	65
3.24	Querbewegungen des Radsatzes	66
3.25	Messschrieb Instabilität	67
3.26	Detail Messschrieb Instabilität	67
3.27	Parameter der Gleislage	68
3.28	Richtungsfehler und Längshöhensfehler	69
3.29	Ergebnis der Klassierung der Standardabweichung nach QN	71
3.30	Anteile der QN in Abschnitten	72
3.31	Beispiel Ergebnisse Vollbögen	75
3.32	Beispiel Ergebnisse Übergangsbögen	76
3.33	Erkennung der Übergangsbögen mit variabler Schrittweite	78
4.1	Beispiel Eingabemappe	79
4.2	Beispiel Krümmungsberechnung	80
4.3	Beispiel Unterteilung in Vollbögen und Übergangsbögen	81
4.4	Beispiel Ausgabe der einzelnen Abschnitte, "Bogenhauptpunkte"	81
4.5	Beispiel a_Q und V Kontrolle	82
A.1	Auswahl des zu verwendenden Streckenversuchs	95
A.2	Auswahl des Messverfahrens	96
B.1	Anforderungen Beschleunigungssensoren	98
B.2	Anforderungen Geschwindigkeitssensoren	98
B.3	Anforderungen Drehratensensoren	99
C.1	Sicherheitsrelevante Größen; gerade Strecke	101
C.2	Sicherheitsrelevante Größen; kleine Bögen	101
C.3	Beispiel Vorabkontrolle 1	102
C.4	Beispiel Vorabkontrolle 2	102
C.5	Messschrieb mit Gleislagequalität QN1 und QN2	103
C.6	Messschrieb mit Gleislagequalität QN3	103
D.1	Ergebnisse Beurteilungsgröße quasistatische Radkraft, Vollbögen	105
D.2	Ergebnisse Beurteilungsgröße quasistatische Radkraft, Übergangsbögen	106
D.3	Ergebnisse Beurteilungsgröße maximale Radkraft, Vollbögen	107
D.4	Ergebnisse Beurteilungsgröße maximale Radkraft, Übergangsbögen	108
D.5	Ergebnisse Beurteilungsgröße Summe der Führungskräfte, Vollbögen	109
D.6	Ergebnisse Beurteilungsgröße Summe der Führungskräfte, Übergangsbögen	110
D.7	Ergebnisse Beurteilungsgröße quasistatische Führungskräfte, Vollbögen	111
D.8	Ergebnisse Beurteilungsgröße quasistatische Führungskräfte, Übergangsbögen	112

D.9 Ergebnisse Beurteilungsgröße Quotient Y/Q , Vollbögen	113
D.10 Ergebnisse Beurteilungsgröße Quotient Y/Q , Übergangsbögen	114
D.11 Ergebnisse Beurteilungsgröße Querschleunigungen Drehgestell 1, Vollbögen	115
D.12 Ergebnisse Beurteilungsgröße Querschleunigungen Drehgestell 1, Übergangsbögen	116
D.13 Ergebnisse Beurteilungsgröße Querschleunigungen Drehgestell 2, Vollbögen	117
D.14 Ergebnisse Beurteilungsgröße Querschleunigungen Drehgestell 2, Übergangsbögen	118
D.15 Ergebnisse Beurteilungsgröße maximale Querschleunigungen Wagenkasten, Vollbögen	119
D.16 Ergebnisse Beurteilungsgröße maximale Querschleunigungen Wagenkasten, Übergangsbögen	120
D.17 Ergebnisse Beurteilungsgröße quasistatische Querschleunigungen Wagenkasten, Vollbögen und Übergangsbögen	121
D.18 Ergebnisse Beurteilungsgröße quasistatische Querschleunigungen Wagenkasten, Vollbögen und Übergangsbögen	122
D.19 Ergebnisse Beurteilungsgröße maximale Vertikalbeschleunigungen Wagenkasten, Vollbögen	123
D.20 Ergebnisse Beurteilungsgröße maximale Vertikalbeschleunigungen Wagenkasten, Übergangsbögen	124
D.21 Ergebnisse Beurteilungsgröße RMS Vertikalbeschleunigungen Wagenkasten, Vollbögen	125
D.22 Ergebnisse Beurteilungsgröße RMS Vertikalbeschleunigungen Wagenkasten, Übergangsbögen	126
D.23 Ergebnisse Stabilitätsbewertung	127

Tabellenverzeichnis

2.1	Grenzwerte der maximalen Beschleunigungen im Wagenkasten [EN14363, 2010]	17
2.2	Grenzwerte des Schwingungsverhaltens [EN14363, 2010]	19
3.1	Prüfbedingungen für Fahrgeschwindigkeit und Überhöhungsfehlbetrag . .	42
3.2	Mindestlänge und Anzahl Abschnitte Prüfbereich 1, aus [EN14363, 2010]	46
3.3	Mindestlänge und Anzahl der Abschnitte in den Prüfbereichen 2, 3 und 4, aus [EN14363, 2010]	47
3.4	Behandlung der Messsignale zur Beurteilung der Fahrwegbeanspruchung [EN14363, 2010]	51
3.5	Behandlung der Messsignale zur Beurteilung der Fahrsicherheit [EN14363, 2010]	52
3.6	Behandlung der Messsignale zur Beurteilung der Fahrsicherheit [EN14363, 2010], fortgesetzt	53
3.7	Behandlung der Messsignale zur Beurteilung des Schwingungsverhaltens [EN14363, 2010]	53
3.8	Grenzwerte der Qualitätsniveaus [EN14363, 2010]	70
A.1	Bedingungen Streckenversuche	93
A.2	Bedingungen Streckenversuche (fortgesetzt)	94

Literaturverzeichnis

- [ISO17025 2007] : *Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien*. Januar 2007
- [UIC518 2009] : *Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour - Safety - Track fatigue - Running behaviour*. September 2009
- [EN14363 2010] : *Bahnanwendungen - Fahrtechnische Prüfung für die fahrtechnische Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen - Prüfung des Fahrverhaltens und stationäre Versuche*. März 2010
- [Berg u. a. 1996] BERG, H. ; GÖSSLING, G. ; ZÜCK, H.: Radsatzwelle und Radscheibe - die richtige Kombination zur Messung der Kräfte zwischen Rad und Schiene. In: *ZEV+DET Glasers Annalen* 120 (1996), Nr. 2, S. 40ff.
- [Corazza u. a. 2004] CORAZZA, G.R. ; BRUNER, M. ; COSCIOTTI, E. ; LICCIARDELLO, R. ; MALAVASI, G.: Y- und Q-Kraftmessung-Analyse und Felderfahrung eines neuen Verfahrens. In: *ZEVrail Glasers Annalen Tagungsband SFT Graz* 128 (2004), S. 272ff.
- [Czichos 2008] CZICHOS, H.: *Mechatronik - Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme*. Vieweg+Teubner Verlag, 2008
- [Hoffmann 1987] HOFFMANN, K.: *Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1987
- [Kanehara und Ohno 2003] KANEHARA, H. ; OHNO, K.: Development of a Continuous Measurement System for Contact Position between Wheel and Rail toward Clarification of Derailment Mechanism. In: *JR East Technical Review* (2003), Nr. 2, S. 54–60
- [Knothe und Stichel 2003] KNOTHE, K. ; STICHEL, S.: *Schienenfahrzeugdynamik*. Springer-Verlag, 2003
- [Kolbe u. a. 2007] KOLBE, T. ; HAIGERMOSER, A. ; STRADTMANN, H.: Die DIN EN 14363 - eine neue Norm für die Prüfung zur fahrtechnischen Zulassung von Schienenfahrzeugen. In: *ZEV Rail* (2007), Mai, Nr. 5, S. 192–201
- [Lerch 2007] LERCH, R.: *Elektrische Messtechnik*. Springer-Verlag, 2007

-
- [Papula 2011] PAPULA, L.: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Vieweg+Teubner Verlag, 2011
- [Popp und Schiehlen 2010] POPP, K. ; SCHIEHLEN, W.: *Ground Vehicle Dynamics*. Springer-Verlag, 2010
- [Reif 2010] REIF, K.: *Sensoren im Kraftfahrzeug*. Vieweg+Teubner Verlag, 2010
- [Veit 2007] VEIT, P. ; FENDRICH, L. (Hrsg.): *Handbuch Eisenbahninfrastruktur - Kap. 18 Instandhaltung und Anlagenmanagement*. Springer-Verlag, 2007
- [Weber 1961] WEBER, H.H.: Zur direkten Messung der Kräfte zwischen Rad und Schiene. In: *Elektrische Bahnen* 32 (1961), Nr. 5, S. 93–110

Anhang A - Tabellen und Diagramme der EN 14363

Tabelle A.1: Bedingungen Streckenversuche

Geänderte Parameter	Verzicht Streckenversuch	Verzicht Streckenversuch	eingeschränkter Streckenversuch	eingeschränkter Streckenversuch
	Lokomotiven Triebwagen Reisezugwagen	Güterwagen	Lokomotiven Triebwagen Reisezugwagen	Güterwagen
Betriebsparameter				
Erhöhung zulässige Fahrzeughöchstge- schwindigkeit	_b	_b	0 km/h bis +20 km/h	0 km/h bis +20km/h
Fahrzeugparameter				
Drehgestellmitten- abstand (Fahrzeug mit zwei Radsätzen)	-5% bis +20%	-15% bis +A ^a bei 2a* ≥ 9m ^e -5% bis +A ^a bei 2a* < 9m ^e	-10% bis +A ^a	-30% bis +A ^a bei 2a* ≥ 9m ^e -10% bis +A ^a bei 2a* < 9m ^e
Radsatzabstand (Fahrzeug mit zwei Radsätzen)	nicht betrachtet	-15% bis +A ^a bei 2a* ≥ 8m ^e -5% bis +A ^a bei 2a* < 8m ^e	nicht betrachtet	-30% bis +A ^a bei 2a* ≥ 8m ^e -10% bis +A ^a bei 2a* < 8m ^e
Schwerpunktshöhe leeres Fahrzeug	-20% bis +10%	-100% bis +20%	-40% bis +40%	-100% bis +A ^a
Schwerpunktshöhe beladenes Fahrzeug	-20% bis +10%	-100% bis +50%	-40% bis +40%	-100% bis +A ^a
Ungefederte Masse	-5% bis +5%	nicht betrachtet	-10% bis +10%	nicht betrachtet
Primärgefederte Mas- se	-5% bis +5%	nicht betrachtet	-10% bis +10%	nicht betrachtet
Sekundärgefederte Masse	-10% bis +10%	nicht betrachtet	-10% bis +10%	nicht betrachtet
Trägheitsmoment des Wagenkastens (um die z-Achse)	-10% bis +10%	-100% bis +10% ^d	-10% bis +10%	-100% bis +20% ^d
Verwindungshärte $c_t^x \leq 3 \cdot 10^{10} \text{ kNm}^2/\text{rad}^e$	nicht betrachtet	-66% bis +200%	nicht betrachtet	-66% bis +200%
Verwindungshärte $c_t^x > 3 \cdot 10^{10} \text{ kNm}^2/\text{rad}^e$	nicht betrachtet	-50% bis +A ^a	nicht betrachtet	-50% bis +A ^a
Leergewicht des Fahrzeugs (>12t bei Fahrzeugen mit Einzelradsätzen oder ≥16t bei Drehgestell- fahrzeugen)	nicht betrachtet	-15% bis +A ^a	nicht betrachtet	-30% bis +A ^a
Max. statische Rad- satzkraft für Fahr- zeuge mit $2Q_0 \leq 225 \text{ kN}^f$	nicht betrachtet	-100% bis +5%	nicht betrachtet	-100% bis +10%

Tabelle A.2: Bedingungen Streckenversuche (fortgesetzt)

Geänderte Parameter	Verzicht Streckenversuch	Verzicht Streckenversuch	eingeschränkter Streckenversuch	eingeschränkter Streckenversuch
	Lokomotiven Triebwagen Reisezugwagen	Güterwagen	Lokomotiven Triebwagen Reisezugwagen	Güterwagen
Fahrwerkparameter				
Radsatzabstand im Drehgestell	0% bis +5%	0% bis +10%	-5% bis +20%	-10% bis +20%
Radnenndurchmesser	-10% bis +15%	-10% bis +15%	-10% bis +15%	-10% bis +15%
Vertikalsteifigkeit primär (bei Fahrzeugen mit zweistufiger Fedierung)	-20% bis +20%	0% bis +25%	-40% bis +40%	0% bis +25%
Vertikalsteifigkeit sekundär (Gesamtsteifigkeit bei Fahrzeugen mit einstufiger Fedierung)	-10% bis +10%	0% bis +25%	-40% bis +40%	0% bis +25%
Verringerung der Übergangslast	nicht betrachtet	-5% bis 0%	nicht betrachtet	-5% bis 0%
Radsatzführung: Steifigkeit	0% bis +10%	_b	-10% bis +10%	_c
Radsatzführung: Dämpfung, Spiele usw.	-10% bis +10%	_b	-10% bis +10%	_c
Ausdrehmoment des Drehgestells	-10% bis +10%	-20% bis +20%	-20% bis +20%	-20% bis +20%
Massenträgheitsmoment Drehgestell (um z-Achse)	-100% bis +5%	-100% bis +10%	-100% bis +10%	-100% bis +20%
Querfeder sekundär (Steifigkeit, Dämpfung, Spiel, usw.)	-10% bis +10%	_b	-10% bis +10%	_c
<p>a... Keine Begrenzung aus dieser Norm, Einschränkungen aus anderen Regeln können vorliegen. b... Kein Verzicht auf Streckenversuche zulässig. c... Vollständige Streckenversuche erforderlich. d... Nur für Fahrzeuge ohne Drehgestelle. e... Wert bei der Erstzulassung. f... Geänderter Wert.</p>				

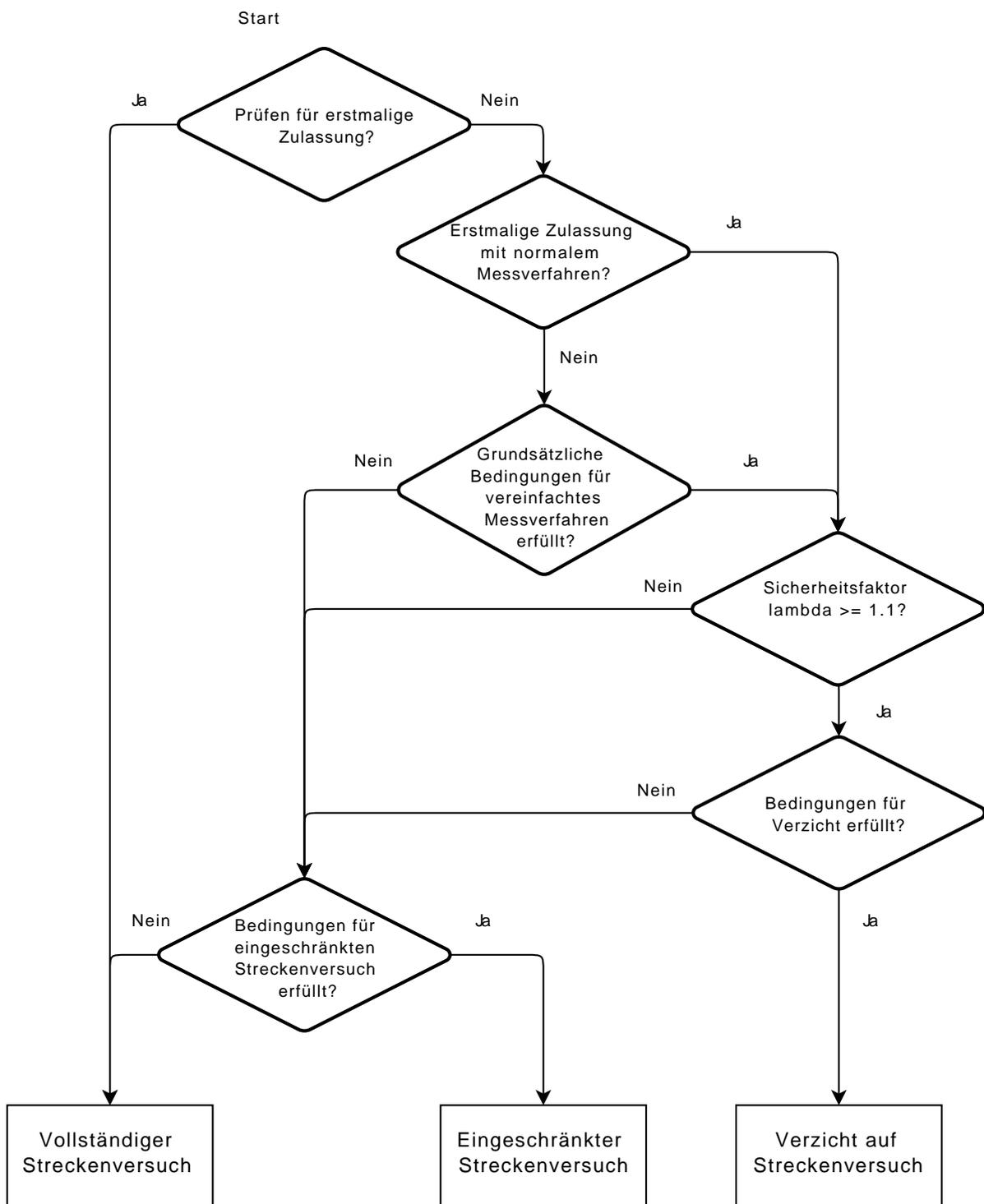


Abbildung A.1: Auswahl des zu verwendenden Streckenversuchs nach [EN14363, 2010]

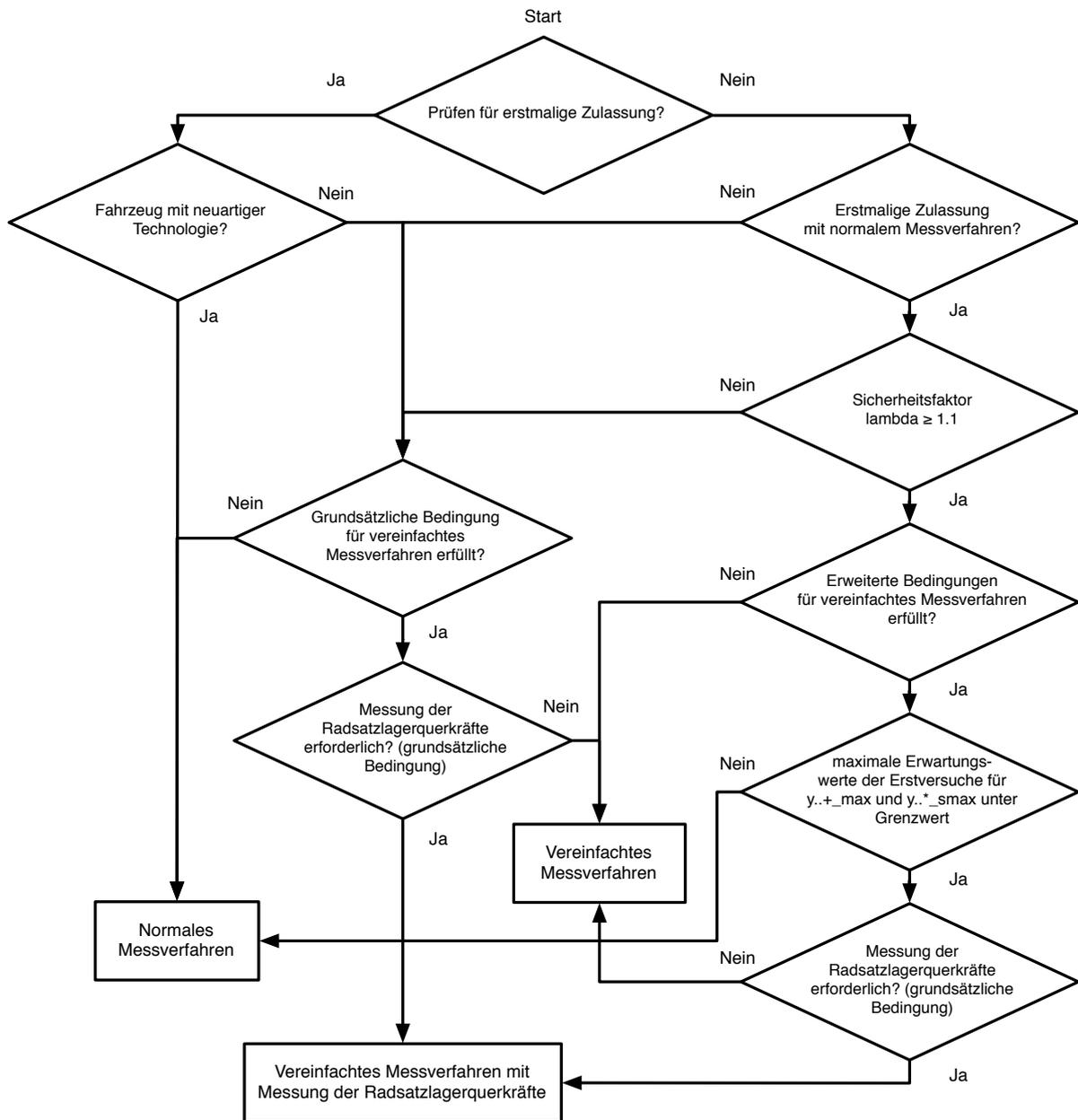


Abbildung A.2: Auswahl des Messverfahrens nach [EN14363, 2010]

Anhang B - Anforderungen an Sensoren

Messgröße Anforderung	\ddot{y}^+	\ddot{y}^*	\ddot{z}^*	a_q
Auflösung	< 2 mg	< 2 mg	< 2 mg	< 2 mg
Frequenzbereich	mindestens 0 bis 80 Hz	mindestens 0 bis 80 Hz	mindestens 0,4 bis 80 Hz	mindestens 0 bis 80 Hz
Messbereich	mindestens -10 bis +10 g	mindestens -5 bis +5 g	mindestens -10 bis +10 g	mindestens -10 bis +10 g
Übersprechverhalten	$\leq 1\%$	$\leq 2\%$	$\leq 2\%$	$\leq 0.1\%^1$
Temperatureinfluss auf Nullpunkt	$\leq 0,01\ \%/^{\circ}\text{C}$	$\leq 0,01\ \%/^{\circ}\text{C}$	$\leq 0,01\ \%/^{\circ}\text{C}$	$\leq 0,01\ \%/^{\circ}\text{C}$
Temperatureinfluss auf Skal.-faktor	$\leq 0,03\ \%/^{\circ}\text{C}$	$\leq 0,03\ \%/^{\circ}\text{C}$	$\leq 0,03\ \%/^{\circ}\text{C}$	$\leq 0,03\ \%/^{\circ}\text{C}$
Temperaturbereich	-20...70°C	-20...70°C	-20...70°C	-20...70°C
Schutzklasse (Minimum)	IP 65	IP 65	IP 65	IP 65

Abbildung B.1: Anforderungen Beschleunigungssensoren

Randbedingung 1 Randbedingung 2	Reflektorteilung 1 Reflektor / Umfang
Max. Geschwindigkeit 150 km/h	mindestens 100 Hz
Max. Geschwindigkeit 200 km/h	mindestens 150 Hz
Max. Geschwindigkeit 250 km/h	mindestens 150 Hz
Max. Geschwindigkeit 300 km/h	mindestens 200 Hz
Max. Geschwindigkeit 350 km/h	mindestens 200 Hz
Max. Geschwindigkeit 400 km/h	Mindestens 250 Hz

Abbildung B.2: Anforderungen Geschwindigkeitssensoren

Anforderung	Messgröße	O_z
Frequenzbereich		0 bis 50 Hz
Messbereich		Mindestens -50 bis + 50 °/s
Nichtlinearität des Kalibrierfaktors bei 50 °/s		$\leq 3 \%$
Nullpunktsstabilität		$\leq 5^\circ / \sqrt{h}$
Temperatureinfluss des Skalierungsfaktors		$\leq 0,1 \%/^\circ\text{C}$
Übersprechen von Beschleunigungen		$\leq 0,5 \%$
Temperaturbereich		-20...70°C
Schutzklasse		IP 65

Abbildung B.3: Anforderungen Drehratensensoren

Anhang C - Beispiele und Messschriebe

gerade_stab_lam_06_QN1_QN2_v176

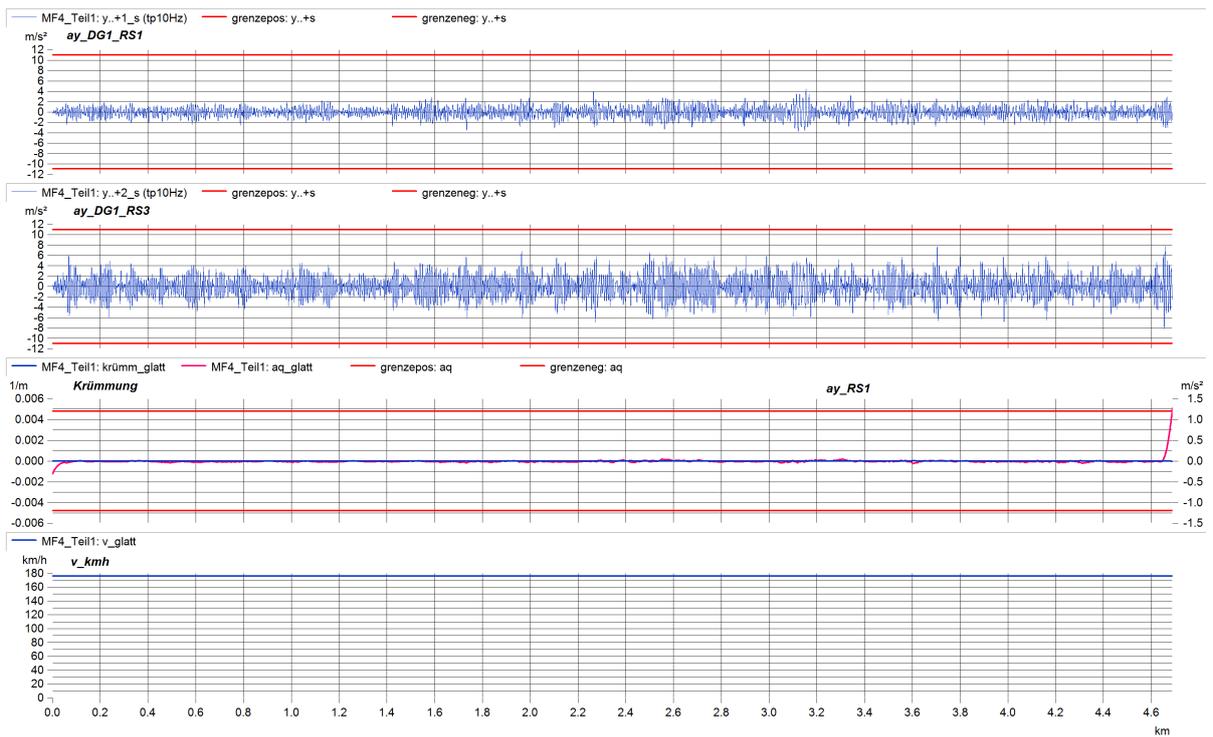
Beurteilungsgröße: $y_{..+s}$ 

Abbildung C.1: Sicherheitsrelevante Größen; gerade Strecke

R250_R400_QN1_QN2_v75

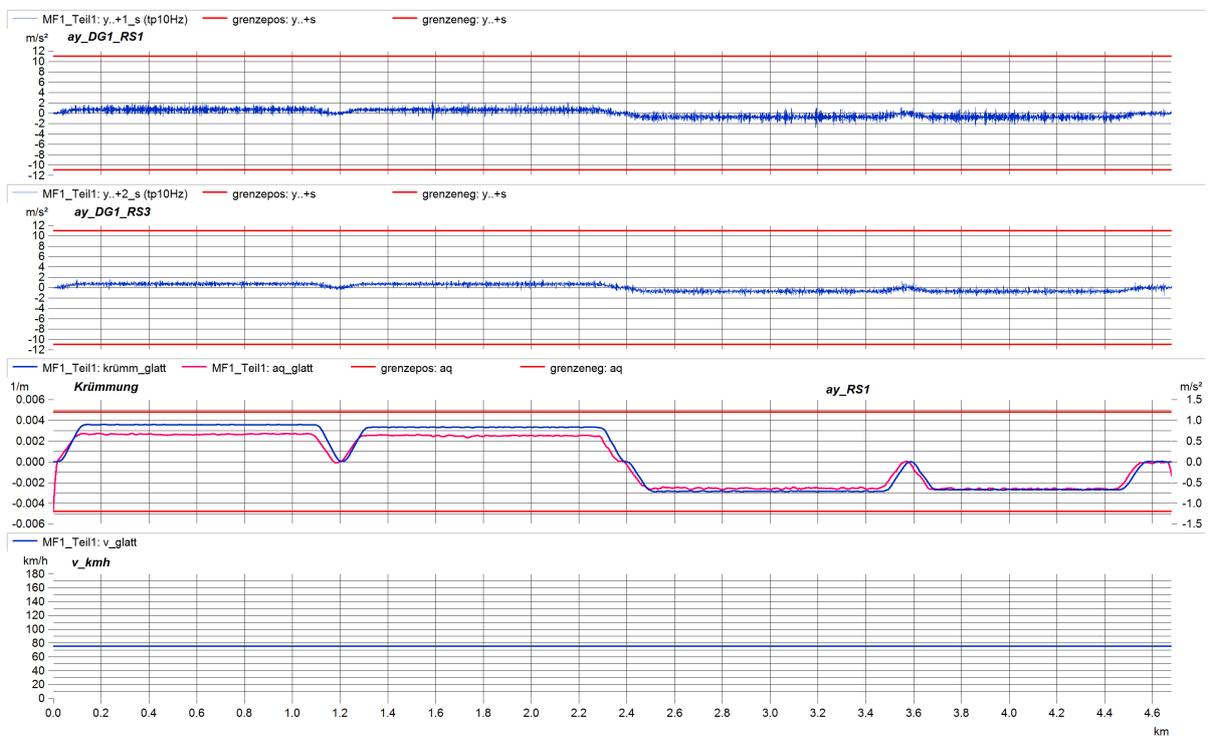
Beurteilungsgröße: $y_{..+s}$ 

Abbildung C.2: Sicherheitsrelevante Größen; kleine Bögen

Geschwindigkeits bzw. aq-Kontrolle der Messfahrt: M004_A_Kiruna_Gällivaer_Teil_3

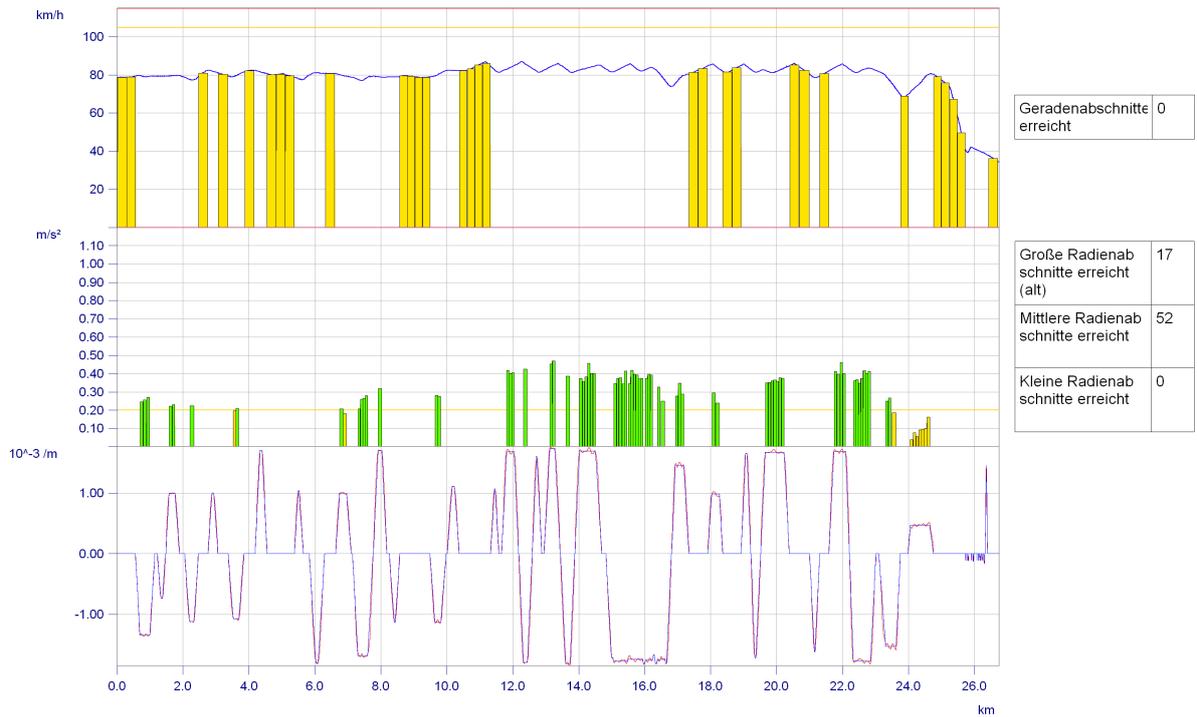


Abbildung C.3: Beispiel Vorabkontrolle 1

Geschwindigkeits bzw. aq-Kontrolle der Messfahrt: M150_A_Knüttelfeld_St_Michael



Abbildung C.4: Beispiel Vorabkontrolle 2

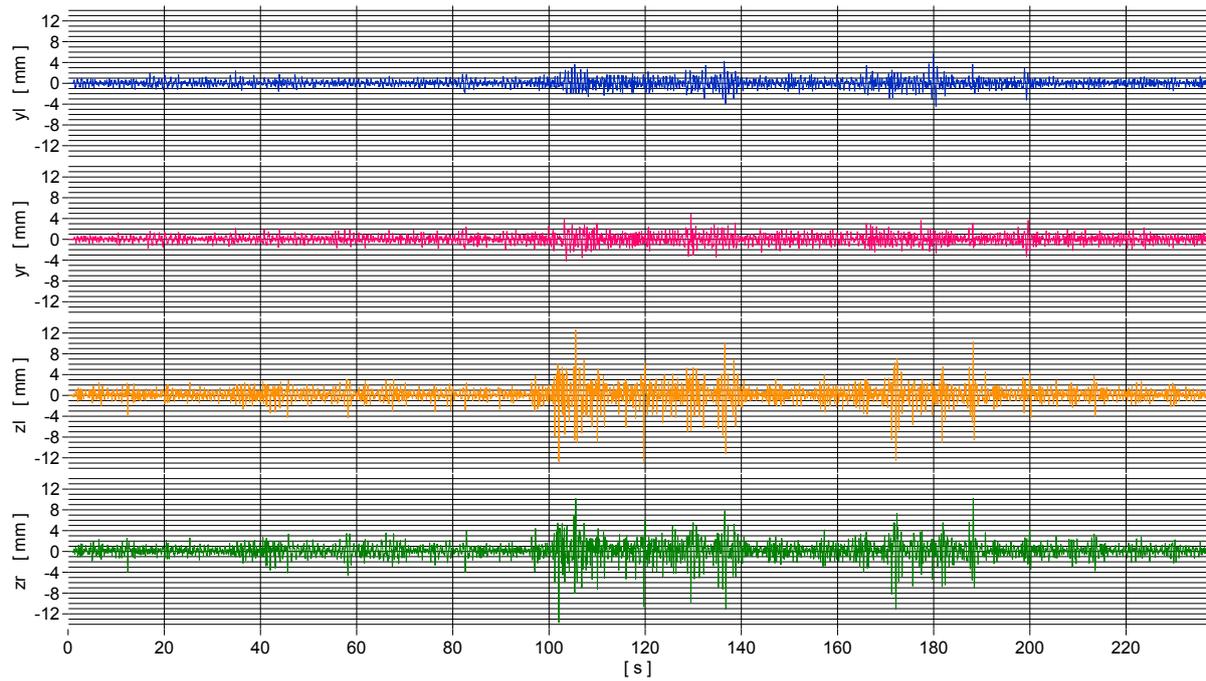


Abbildung C.5: Messchrieb mit Gleislagequalität QN1 und QN2

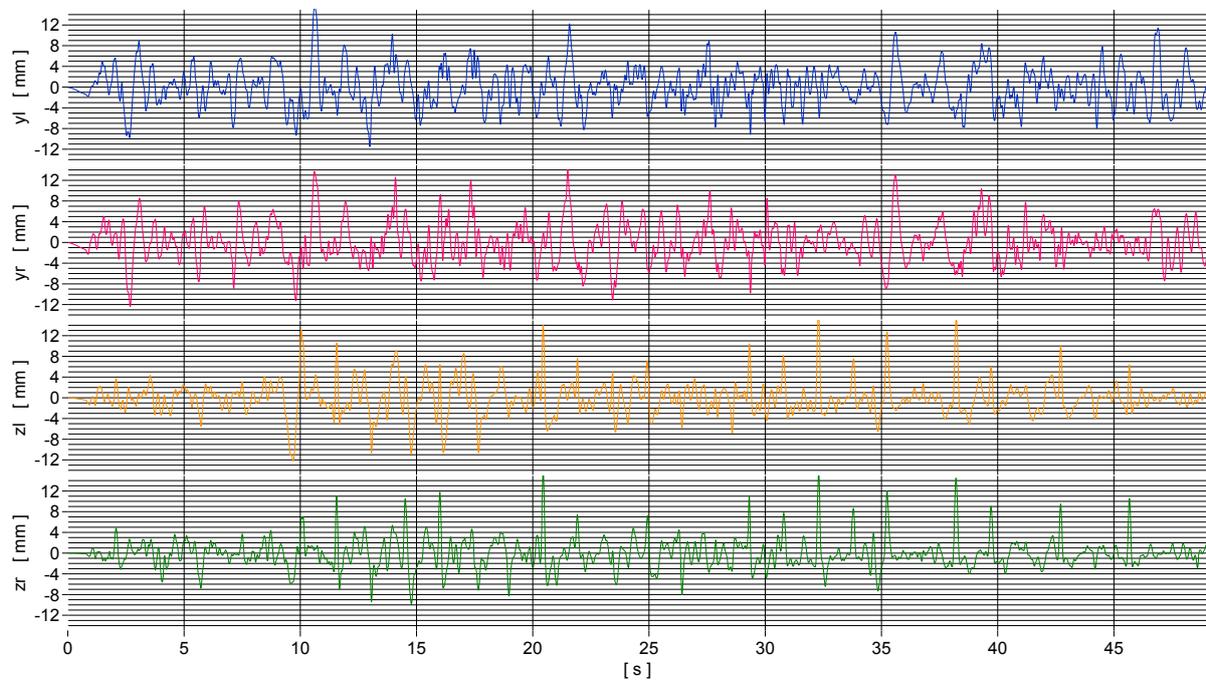


Abbildung C.6: Messchrieb mit Gleislagequalität QN3

Anhang D - Ergebnisse einer vollständigen Auswertung

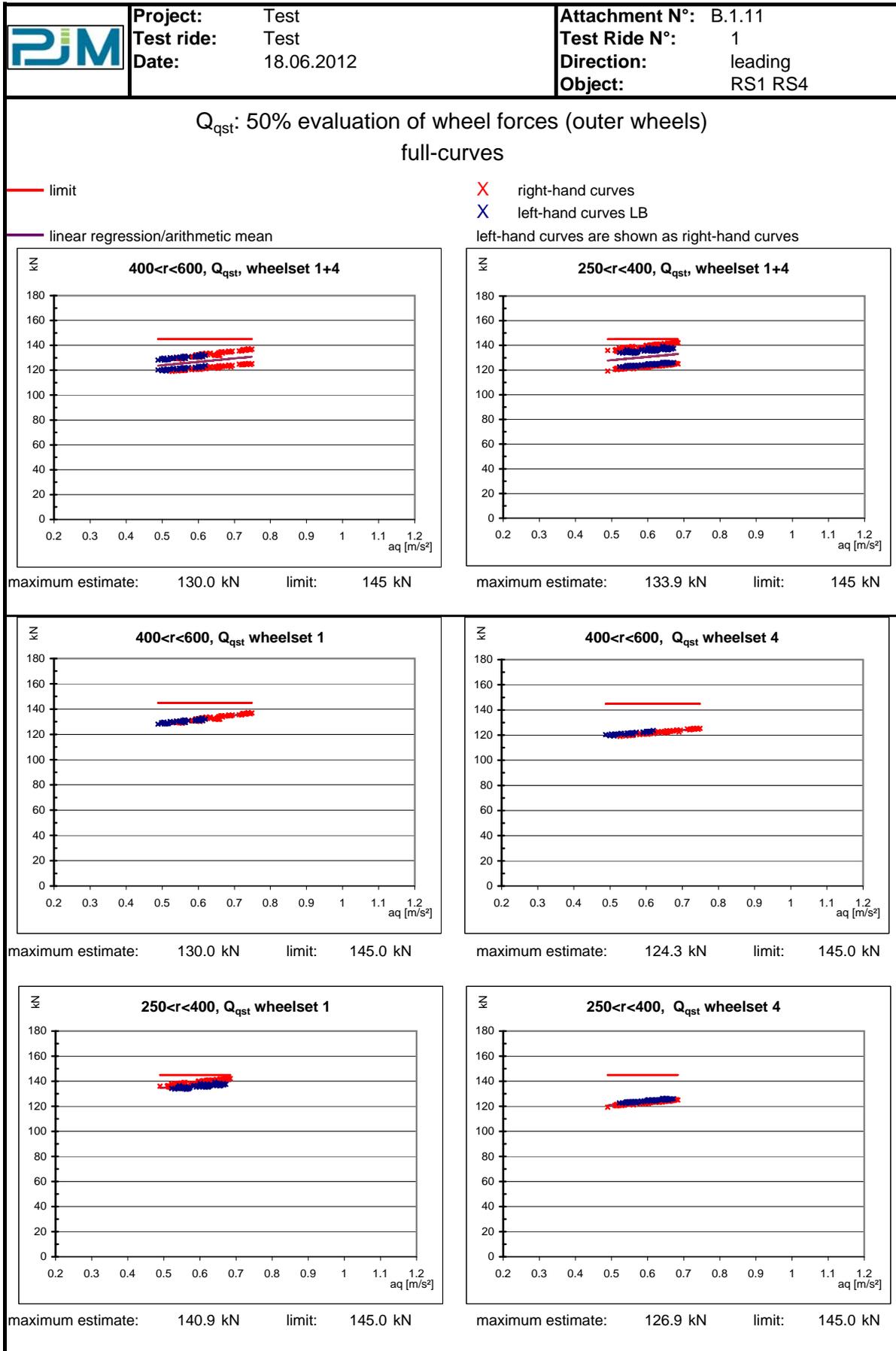


Abbildung D.1: Ergebnisse Beurteilungsgröße quasistatische Radkraft, Vollbögen

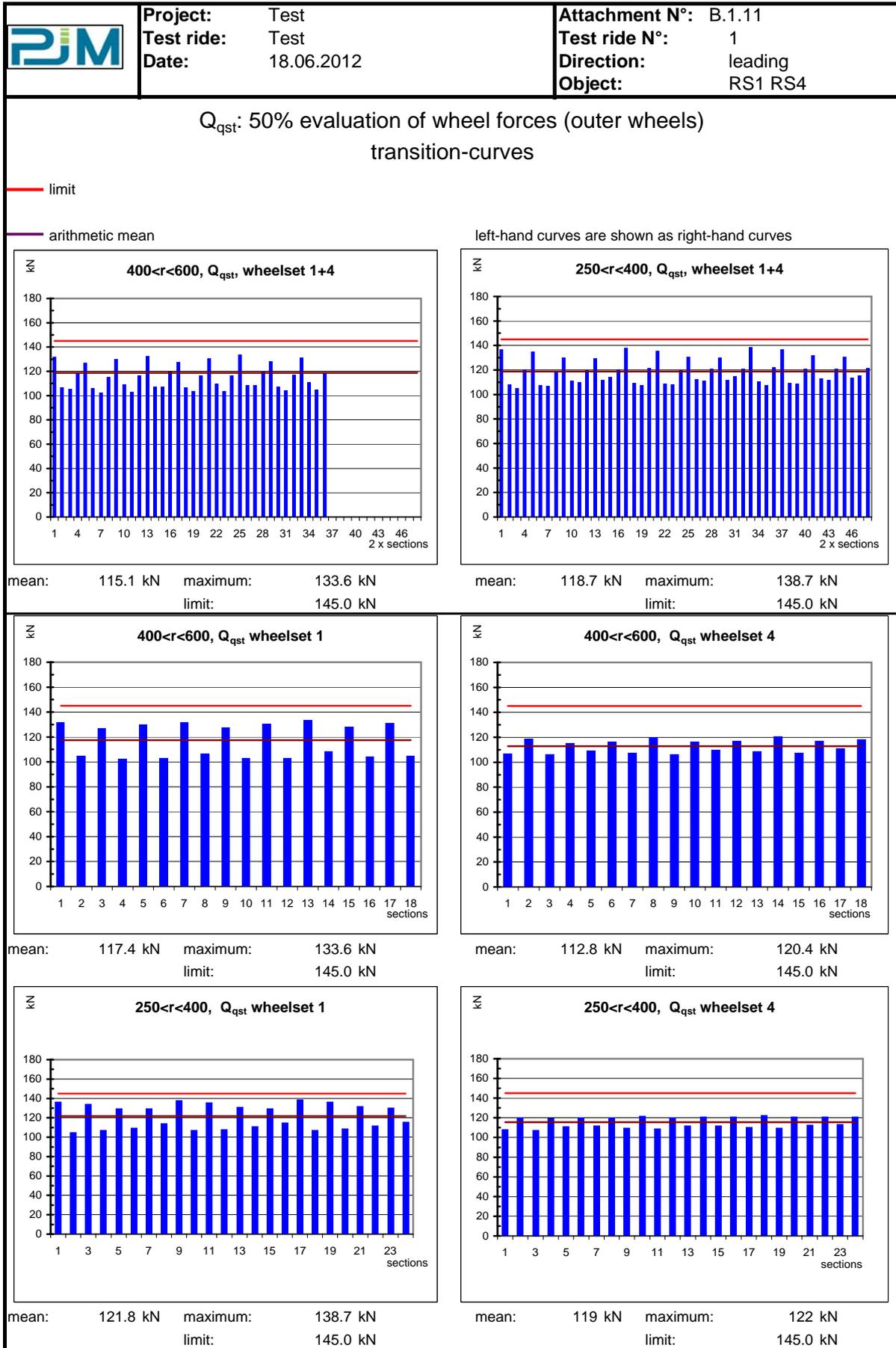


Abbildung D.2: Ergebnisse Beurteilungsgröße quasistatische Radkraft, Übergangsbögen

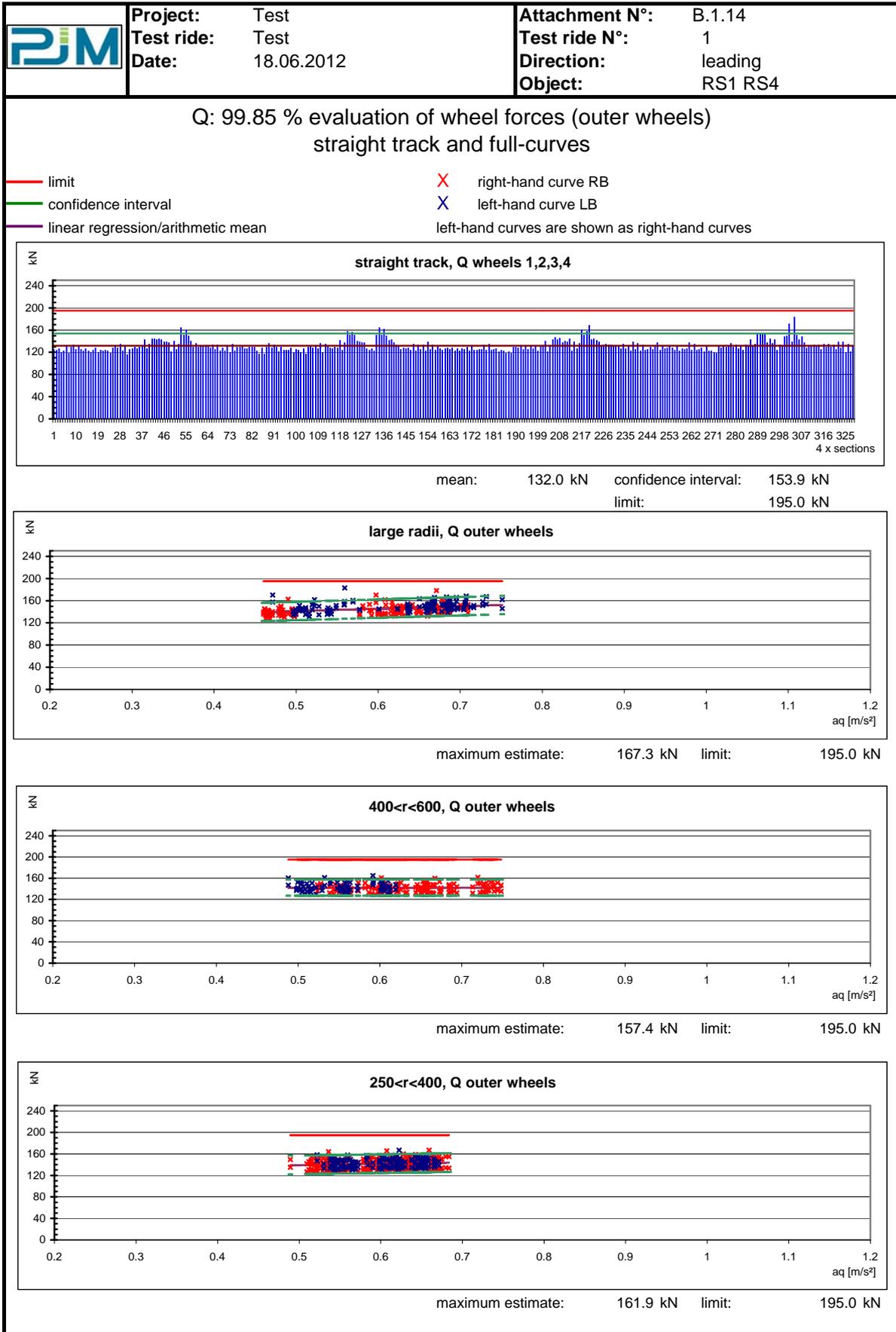


Abbildung D.3: Ergebnisse Beurteilungsgröße maximale Radkraft, Vollbögen

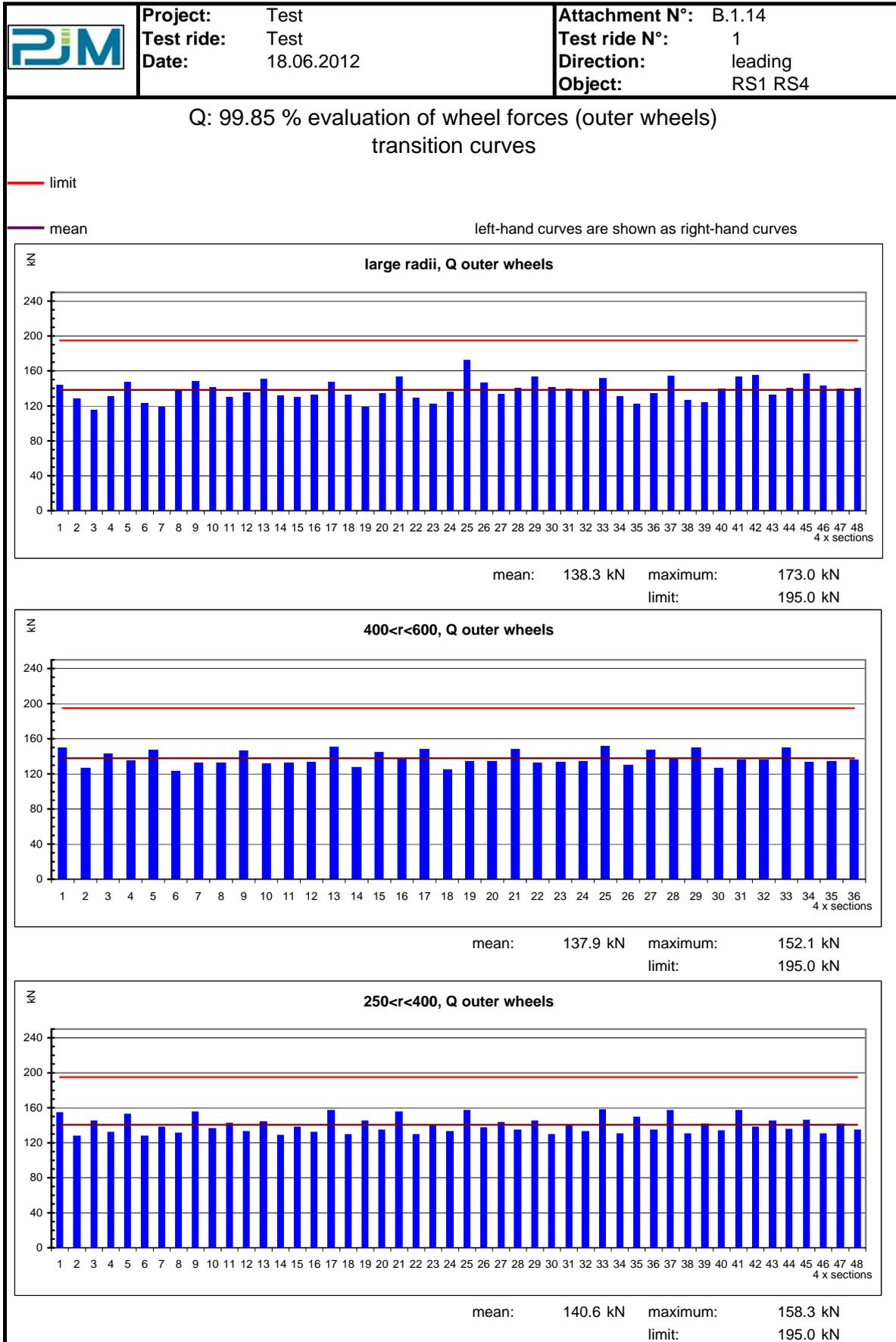


Abbildung D.4: Ergebnisse Beurteilungsgröße maximale Radkraft, Übergangsbögen

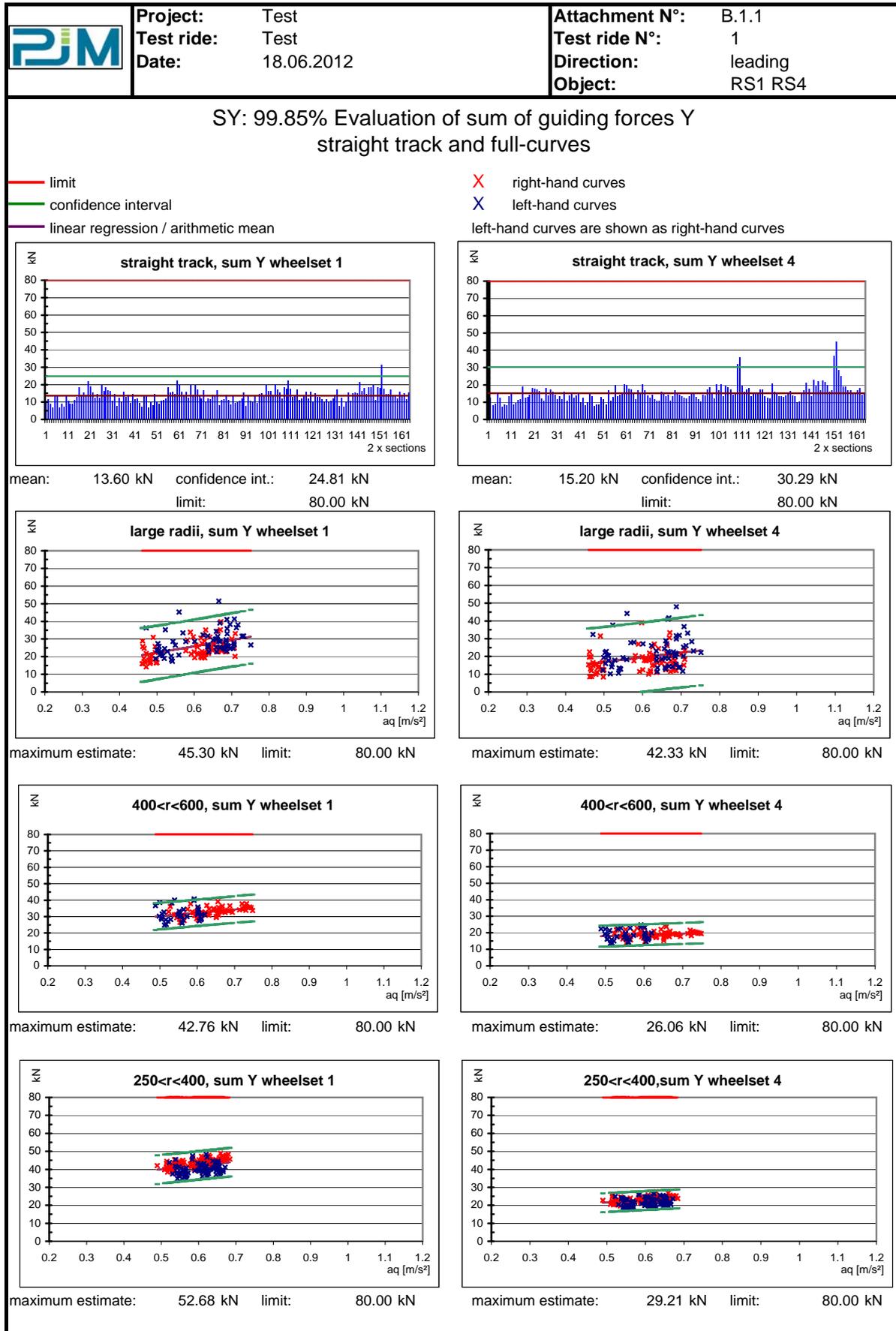


Abbildung D.5: Ergebnisse Beurteilungsgröße Summe der Führungskräfte, Vollbögen

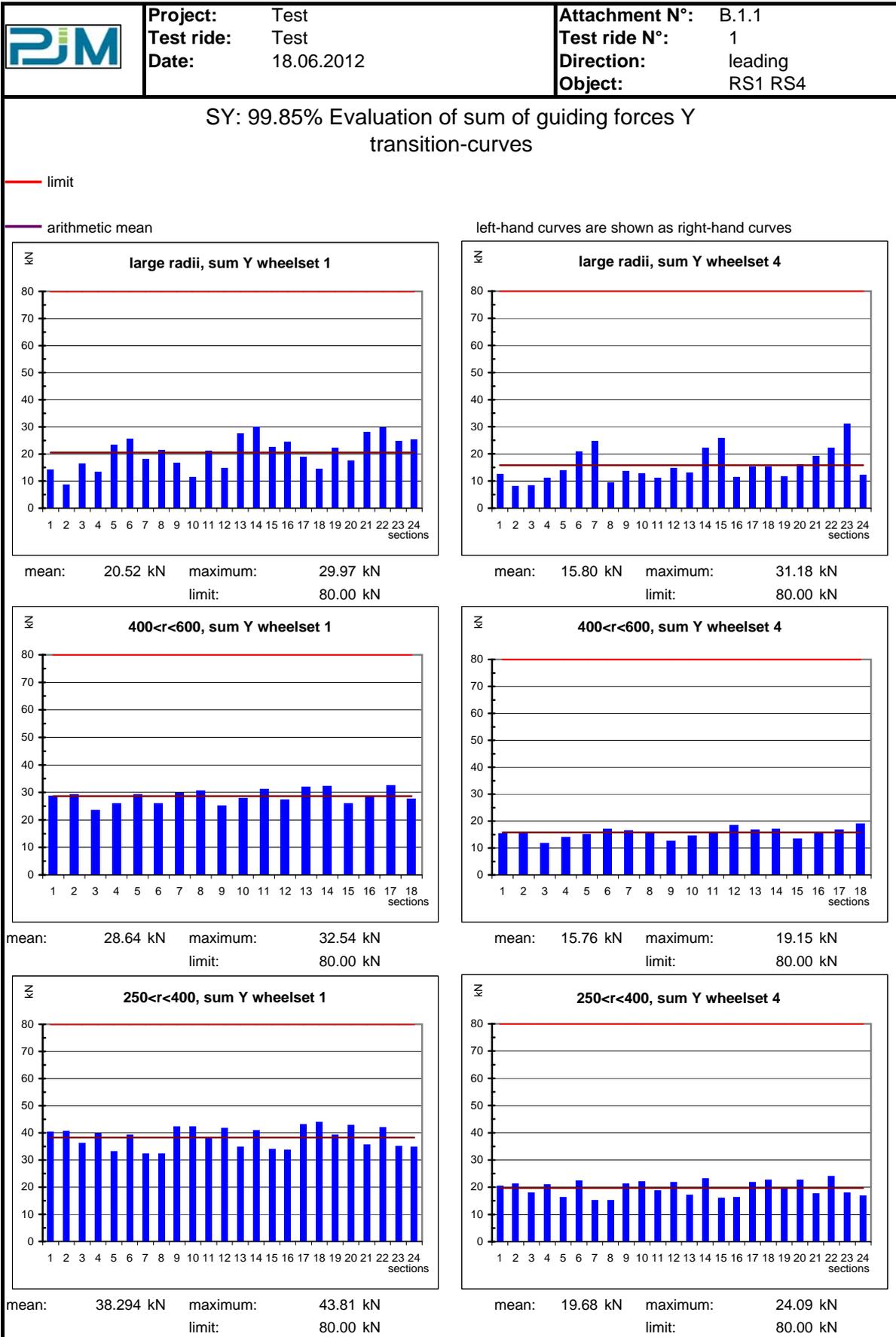


Abbildung D.6: Ergebnisse Beurteilungsgröße Summe der Führungskräfte, Übergangsbögen

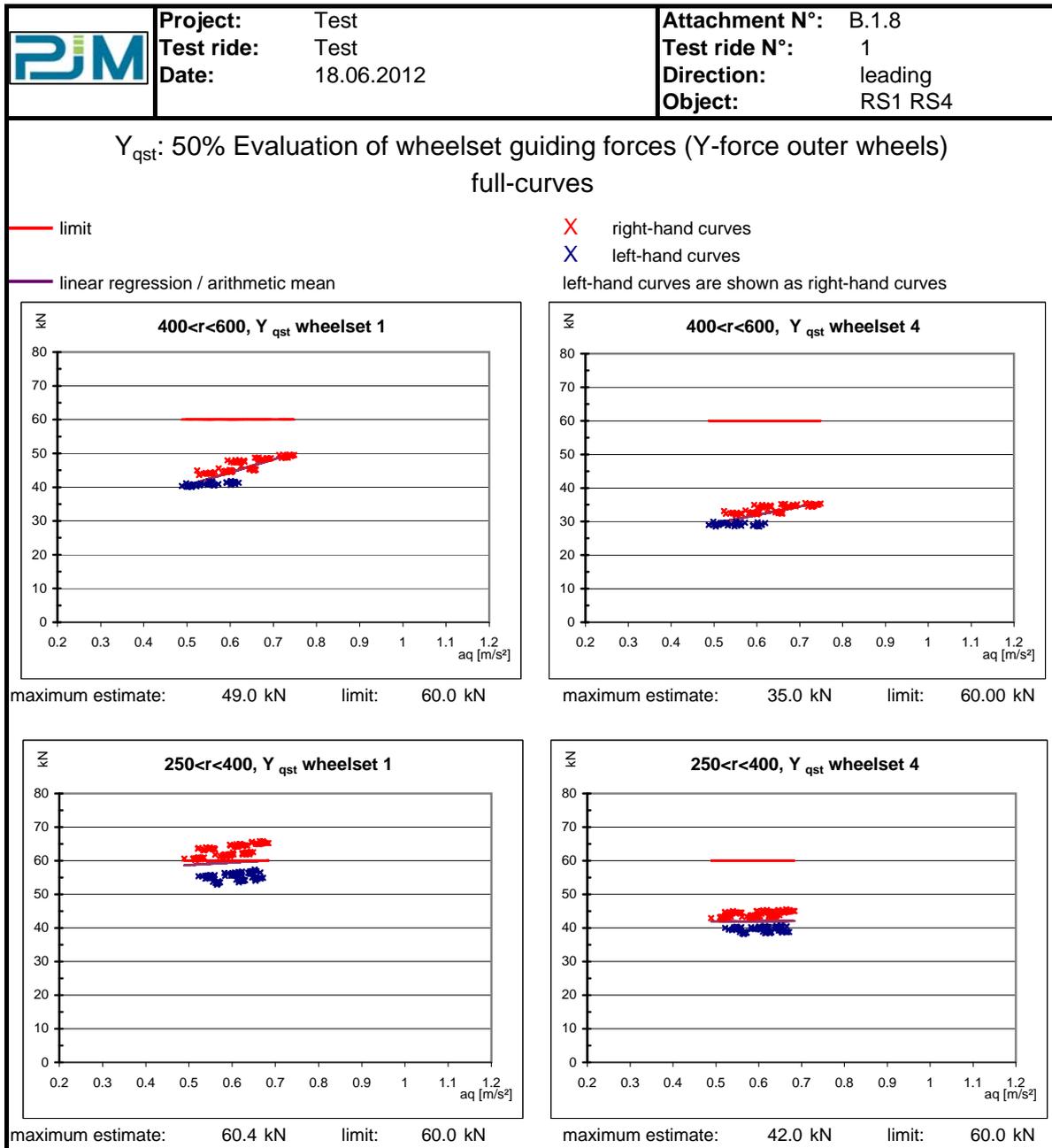


Abbildung D.7: Ergebnisse Beurteilungsgröße quasistatische Führungskräfte, Vollbögen

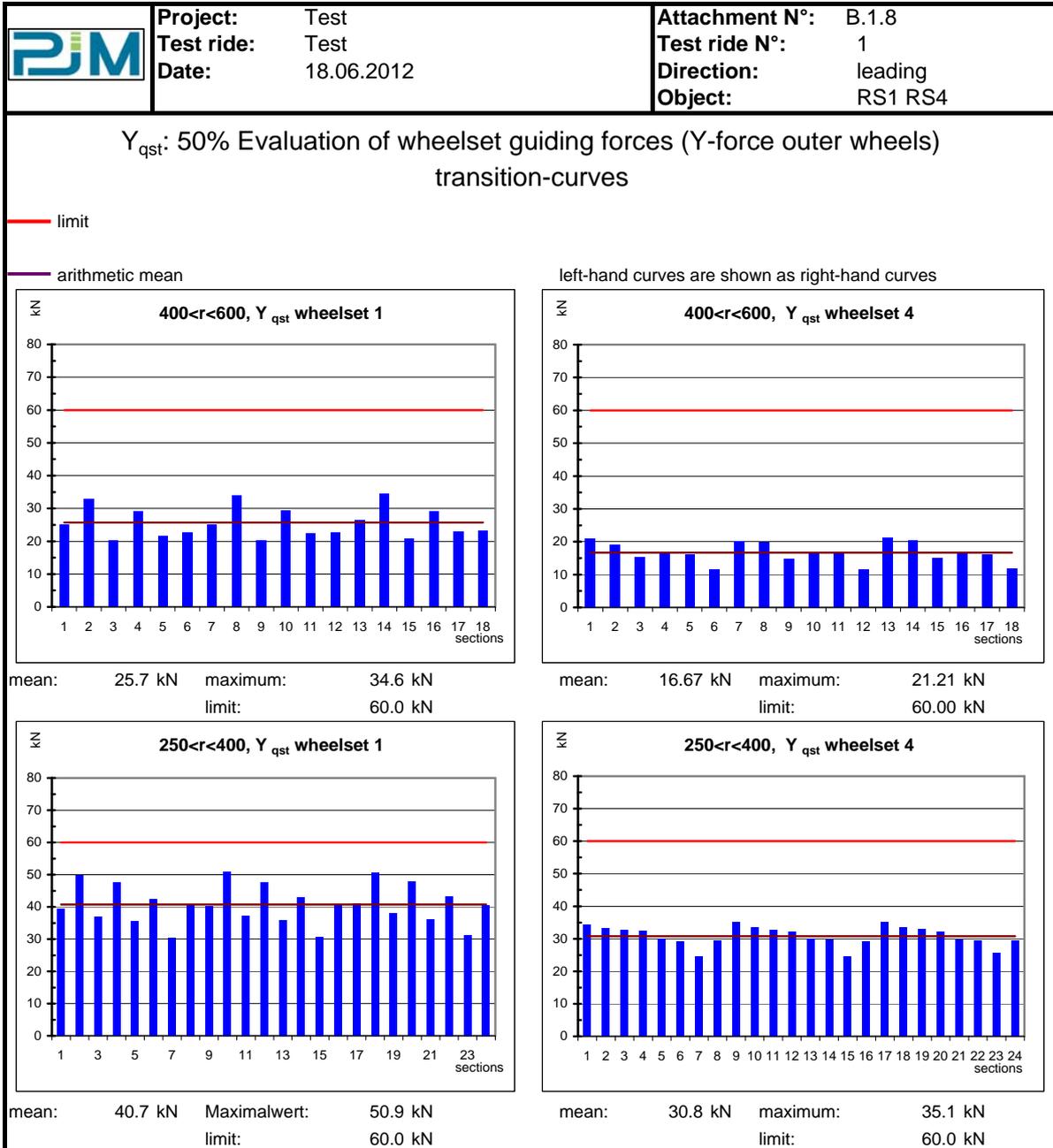


Abbildung D.8: Ergebnisse Beurteilungsgröße quasistatische Führungskräfte, Übergangsbögen

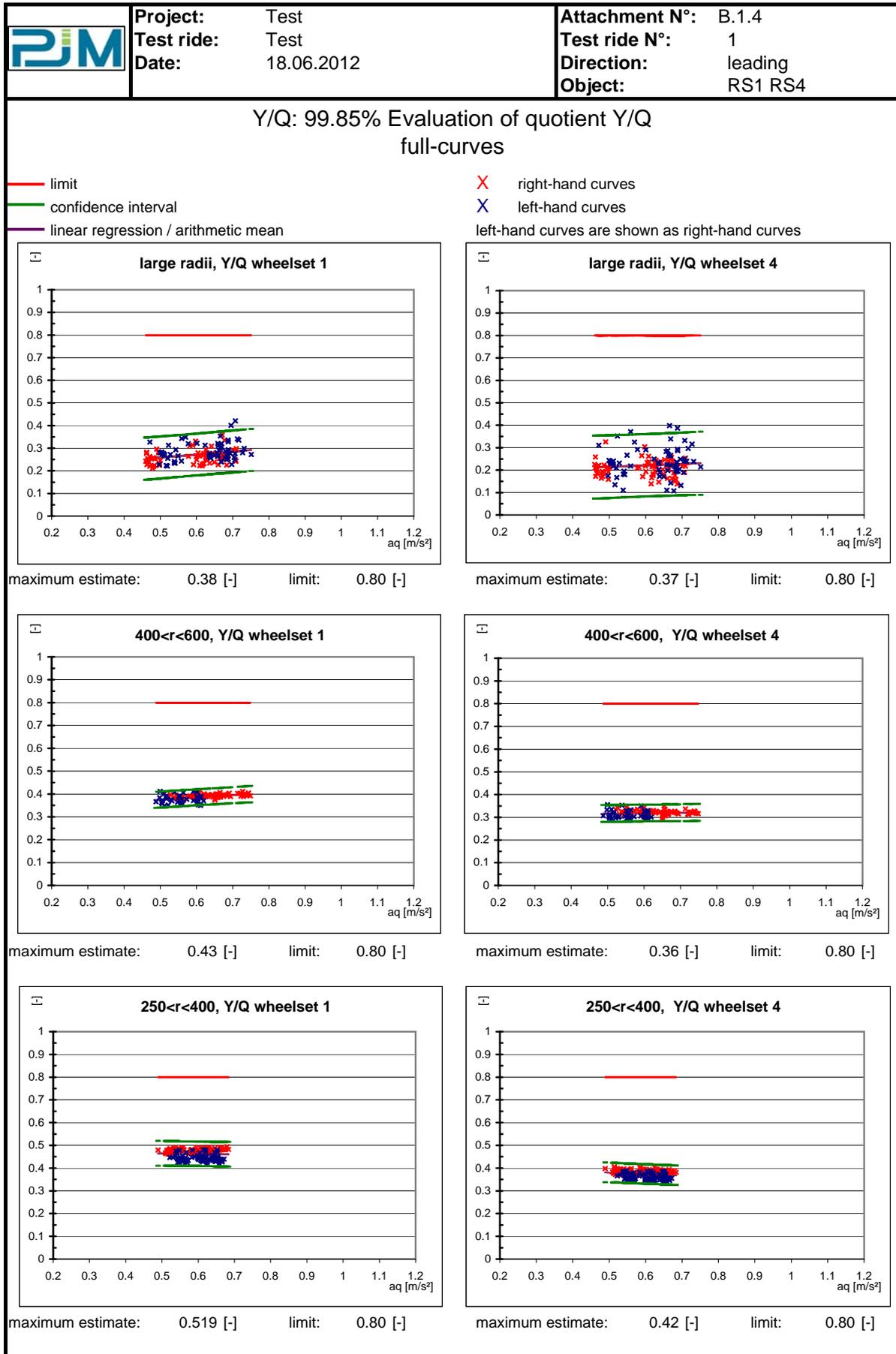


Abbildung D.9: Ergebnisse Beurteilungsgröße Quotient Y/Q, Vollbögen

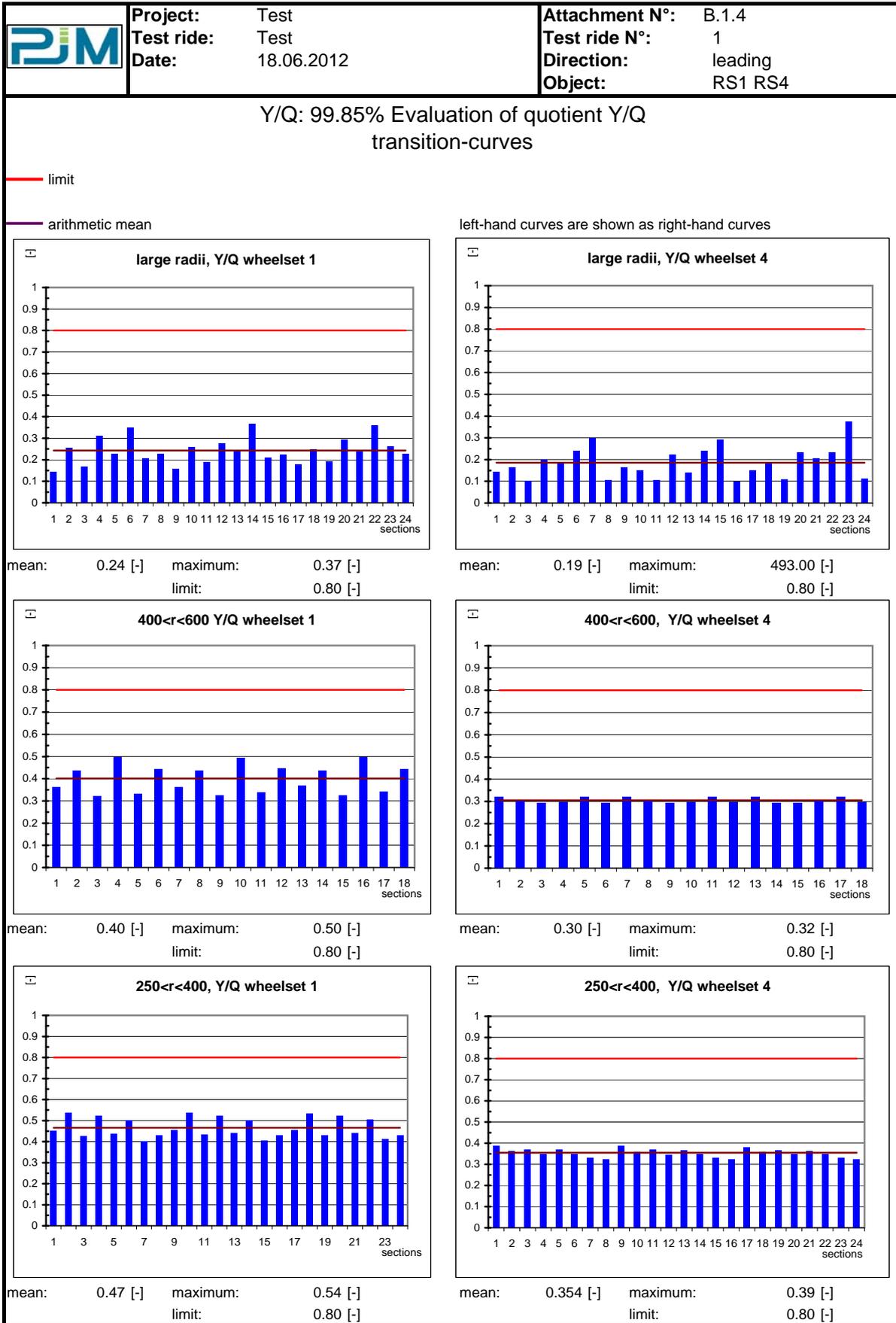


Abbildung D.10: Ergebnisse Beurteilungsgröße Quotient Y/Q, Übergangsbögen

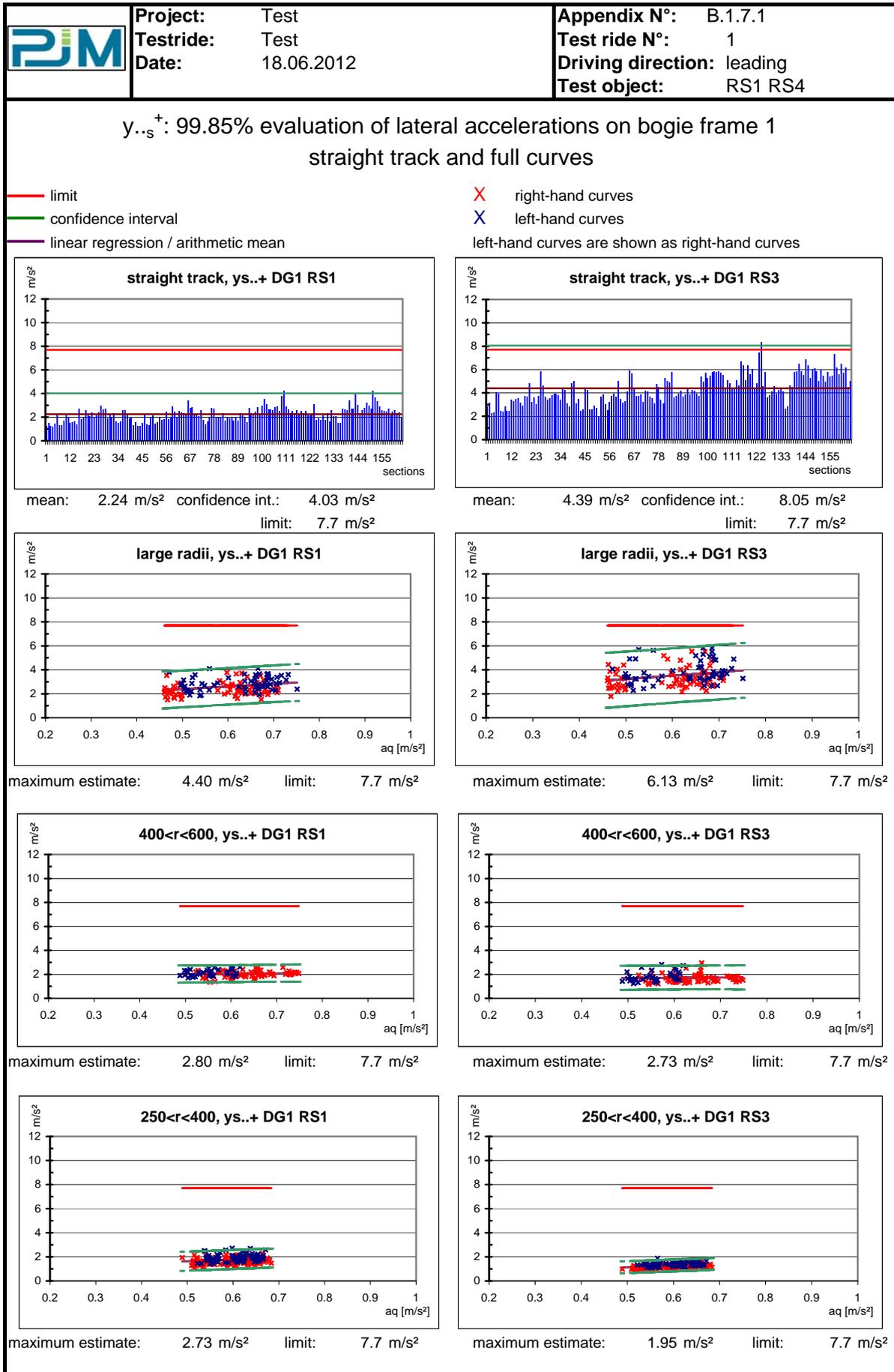


Abbildung D.11: Ergebnisse Beurteilungsgröße Querbeschleunigungen Drehgestell 1, Vollbögen

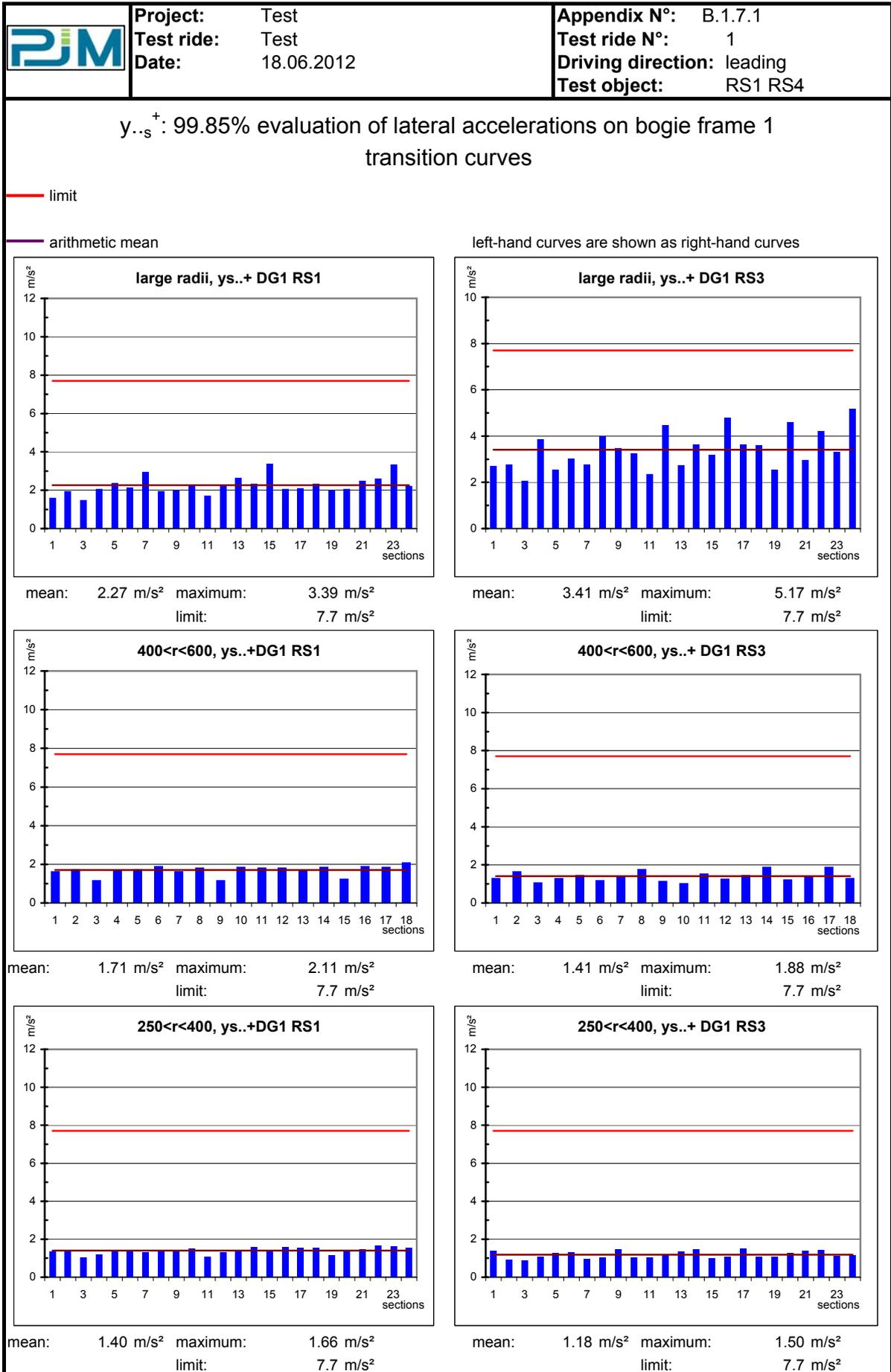


Abbildung D.12: Ergebnisse Beurteilungsgröße Querbeschleunigungen Drehgestell 1, Übergangsbögen

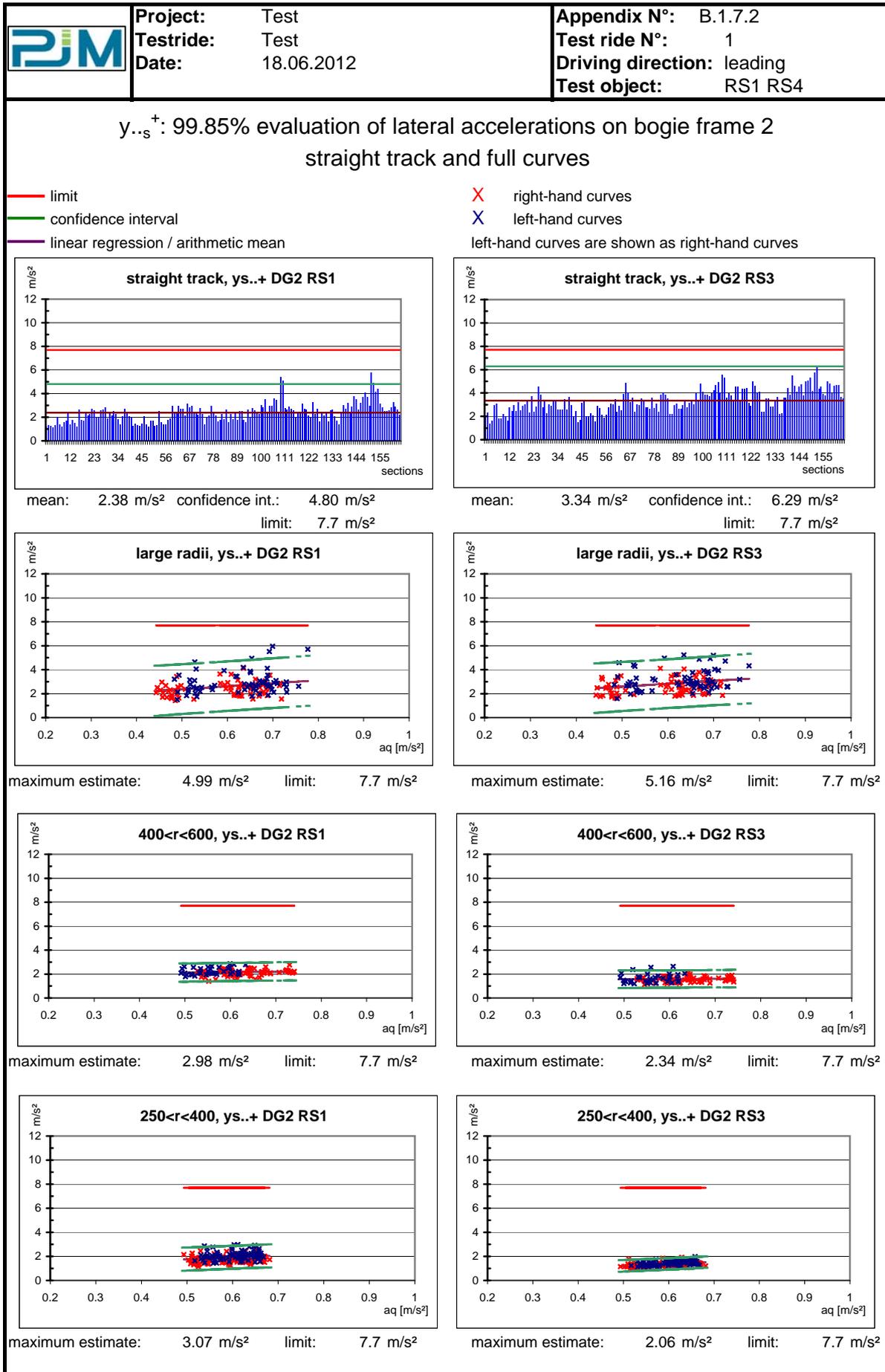


Abbildung D.13: Ergebnisse Beurteilungsgröße Querbeschleunigungen Drehgestell 2, Vollbögen

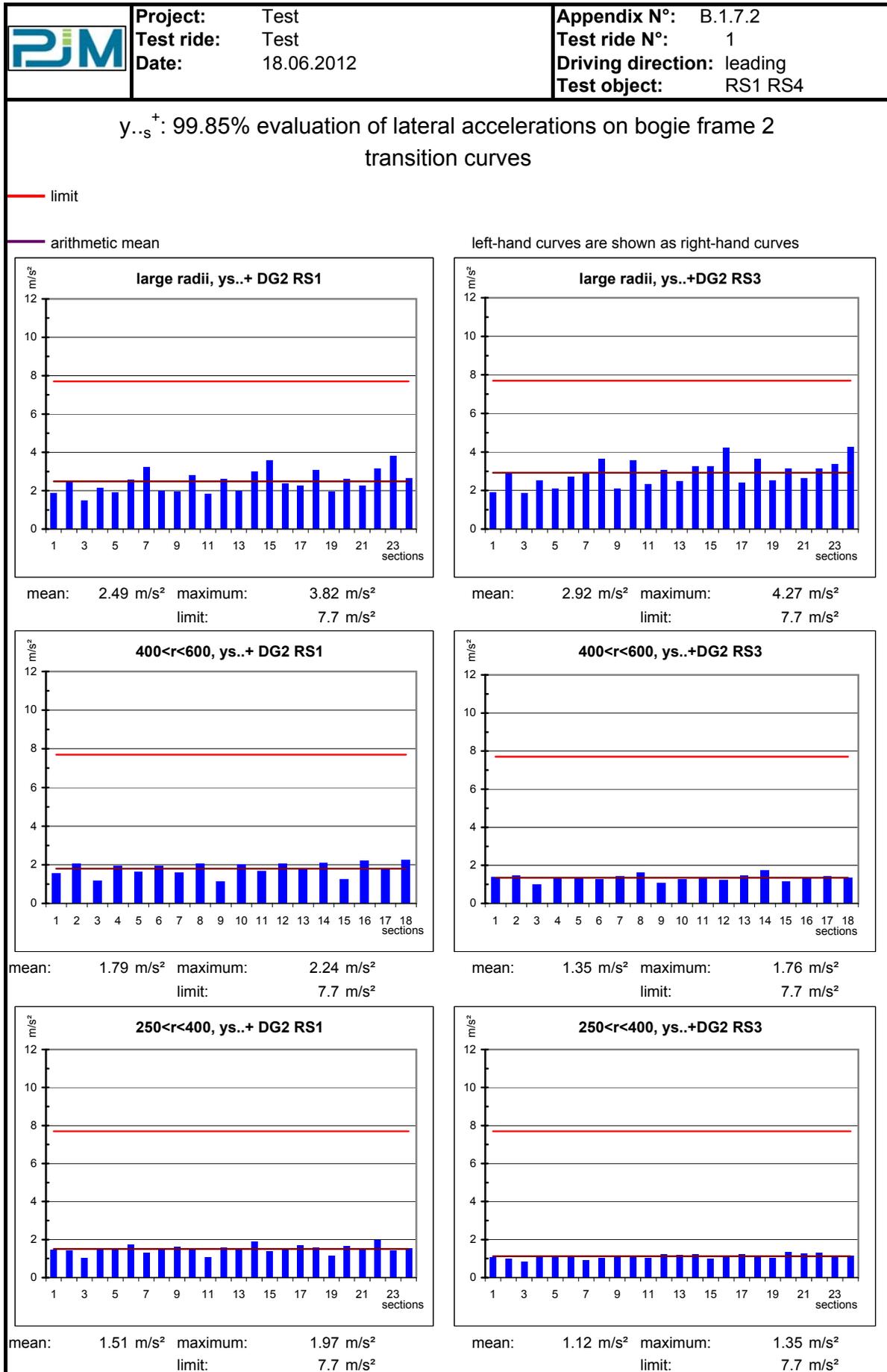


Abbildung D.14: Ergebnisse Beurteilungsgröße Querbeschleunigungen Drehgestell 2, Übergangsbögen

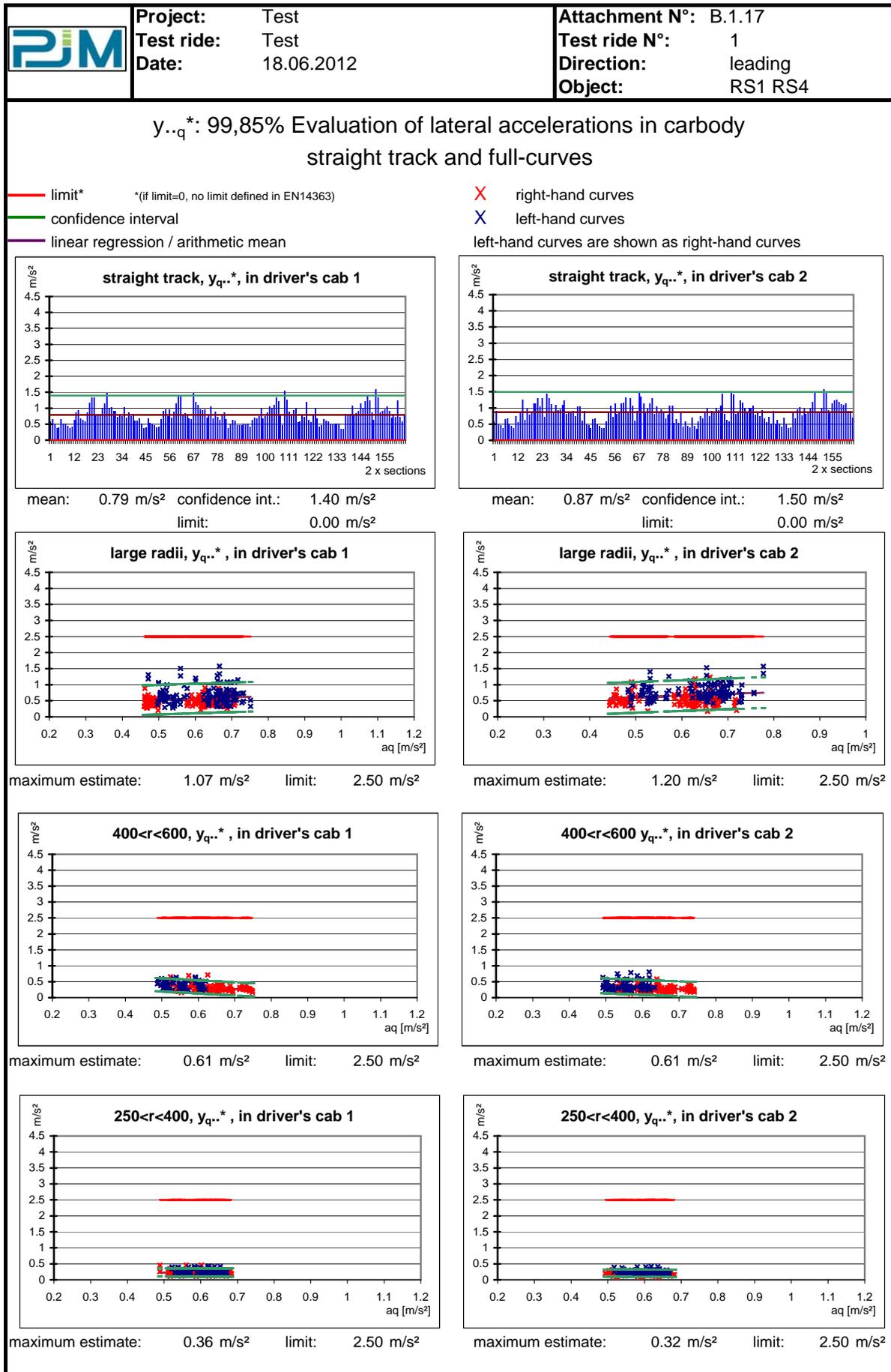


Abbildung D.15: Ergebnisse Beurteilungsgröße maximale Querbeschleunigungen Wagenkasten, Vollbögen

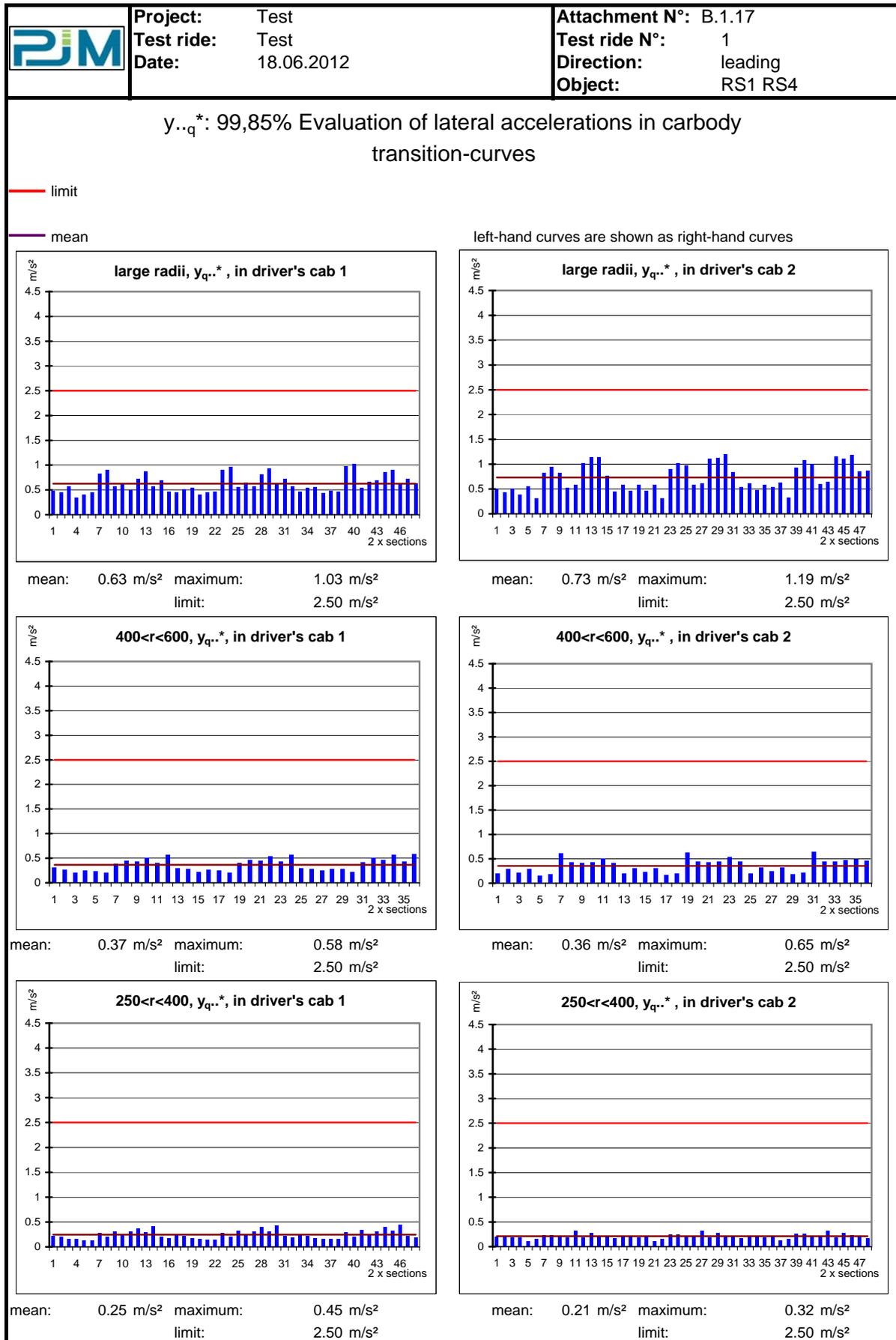


Abbildung D.16: Ergebnisse Beurteilungsgröße maximale Querbeschleunigungen Wagenkasten, Übergangsbögen

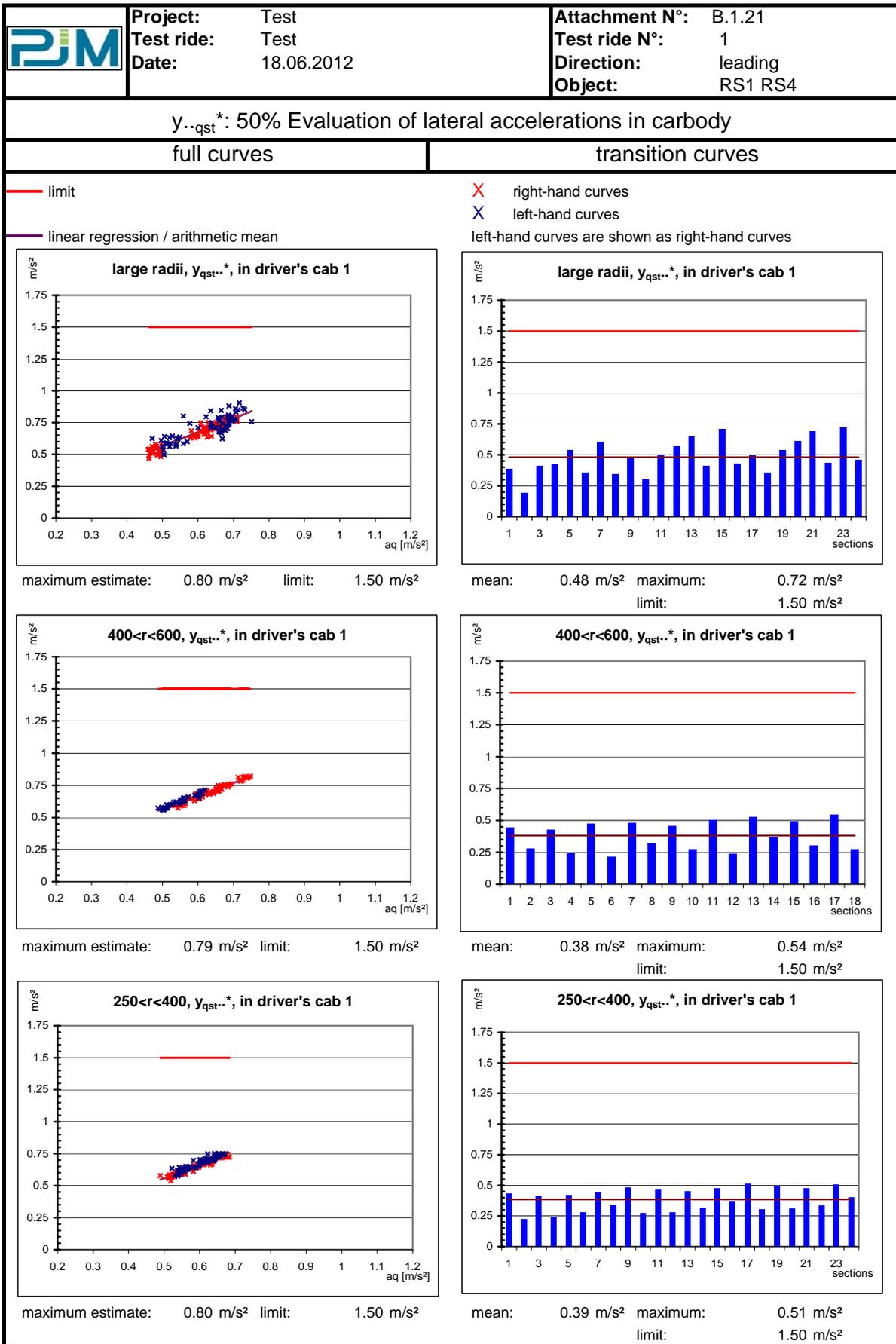


Abbildung D.17: Ergebnisse Beurteilungsgröße quasistatische Querbeschleunigungen Wagenkasten, Vollbögen und Übergangsbögen

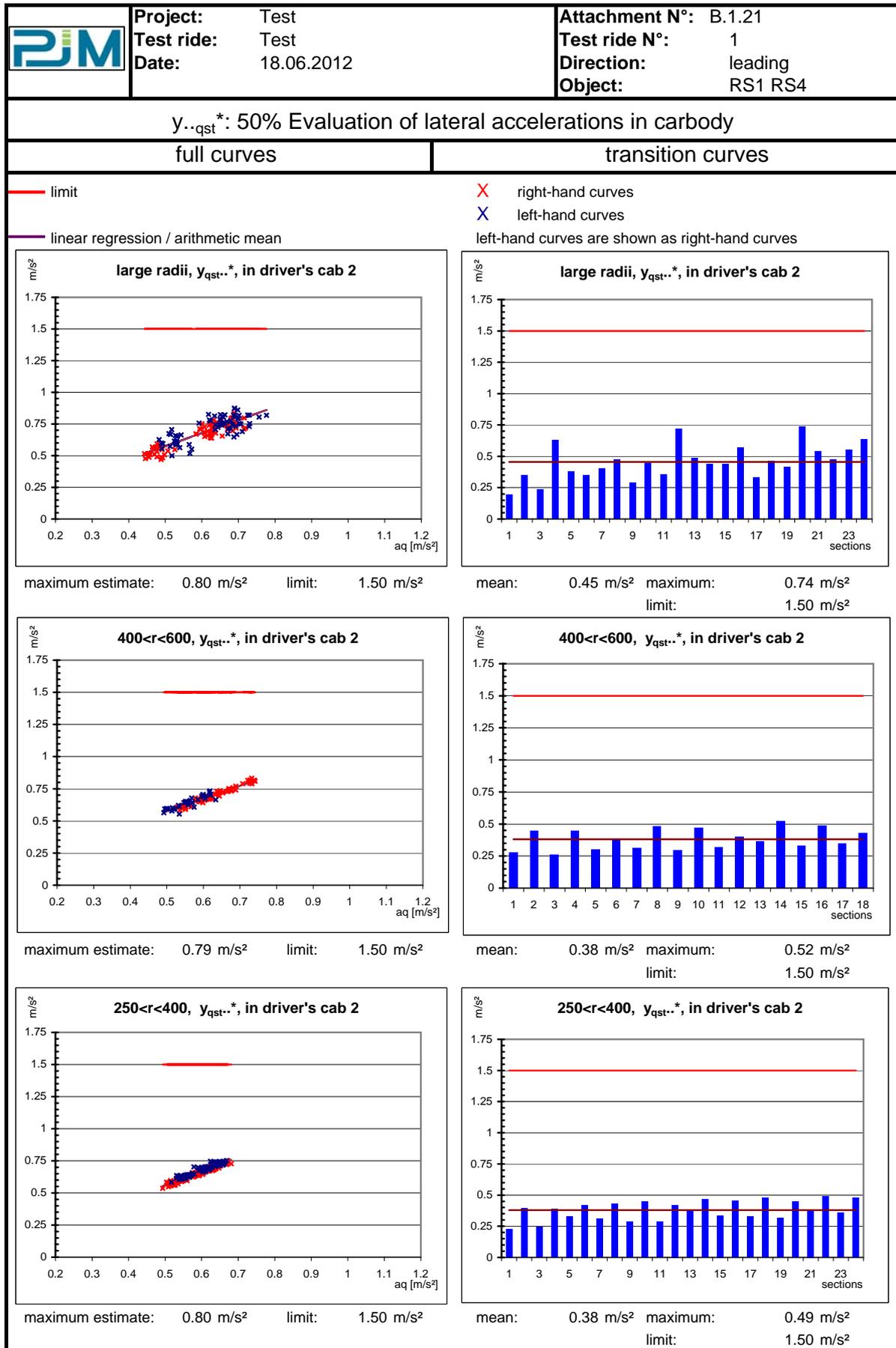


Abbildung D.18: Ergebnisse Beurteilungsgröße quasistatische Querbeschleunigungen Wagenkasten, Vollbögen und Übergangsbögen

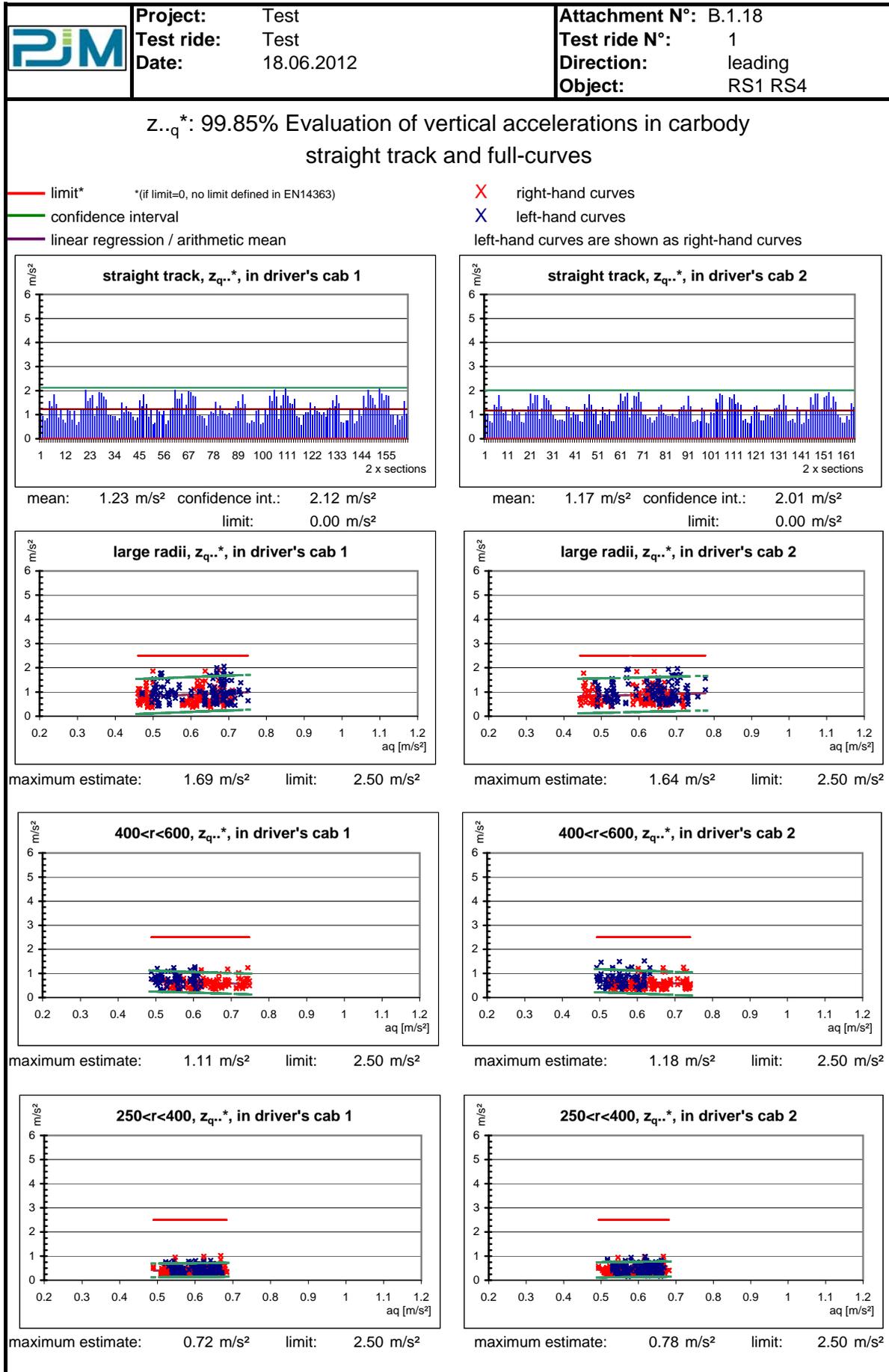


Abbildung D.19: Ergebnisse Beurteilungsgröße maximale Vertikalbeschleunigungen Wagenkasten, Vollbögen

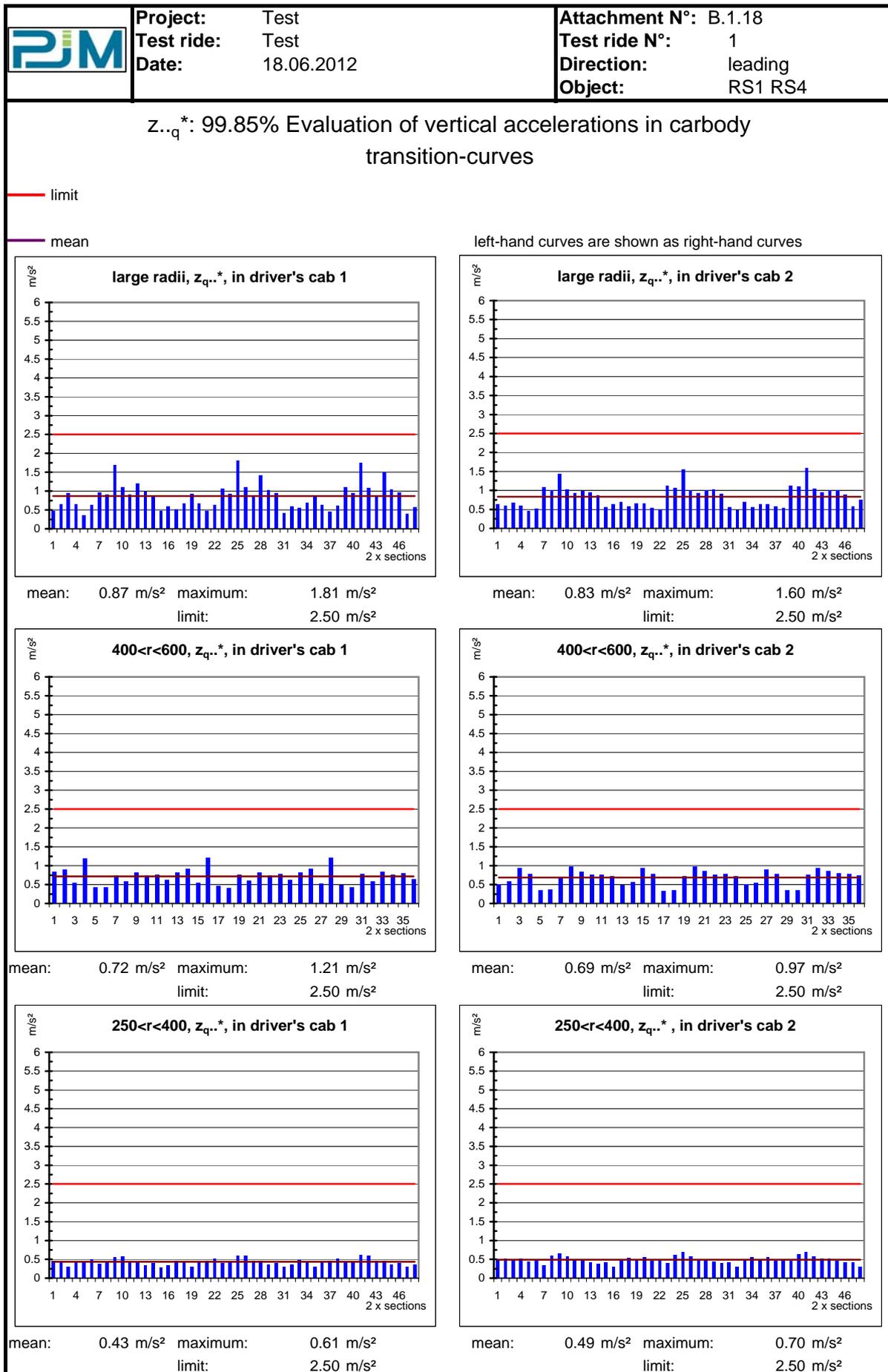


Abbildung D.20: Ergebnisse Beurteilungsgröße maximale Vertikalbeschleunigungen Wagenkasten, Übergangsbögen

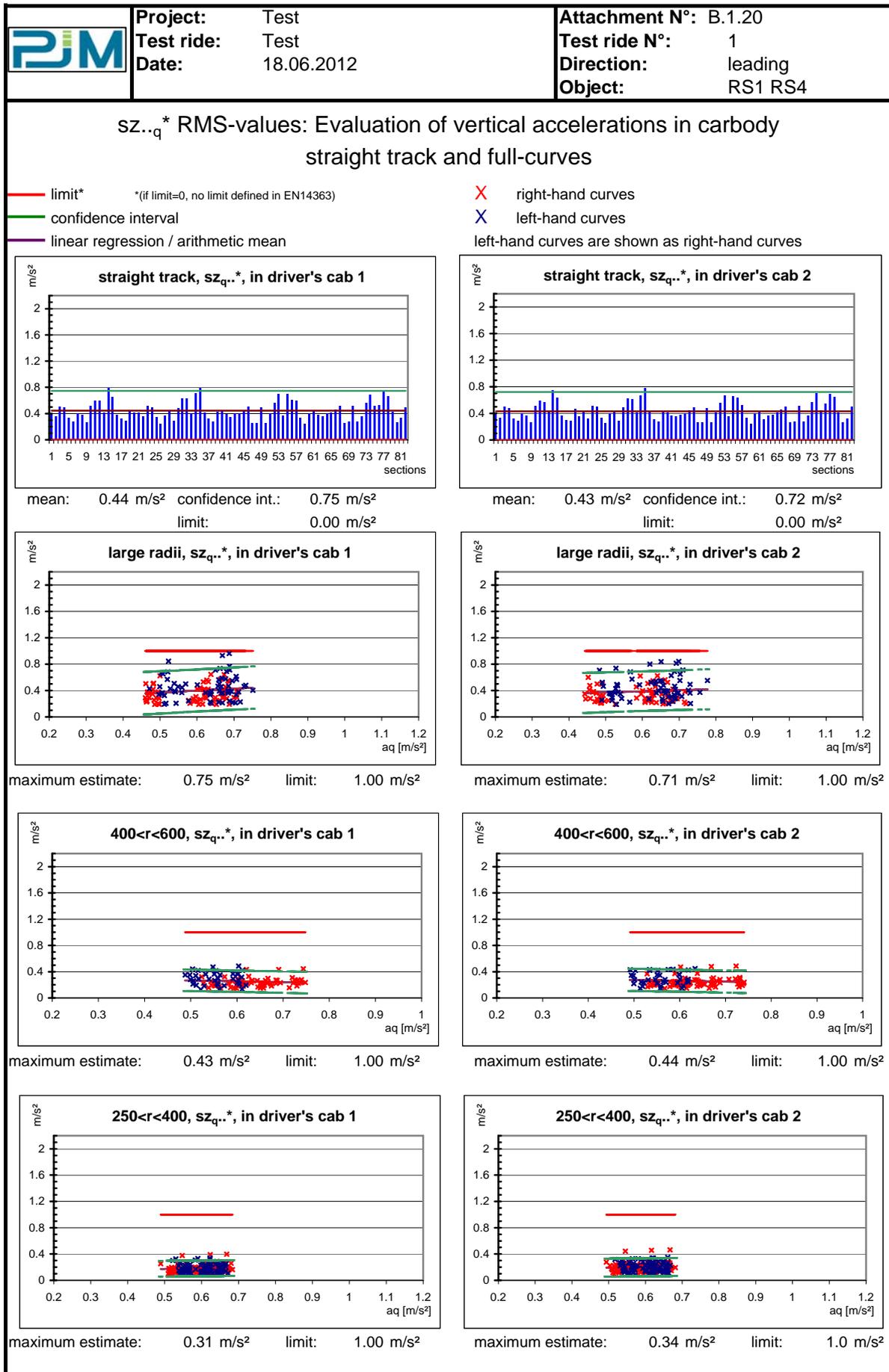


Abbildung D.21: Ergebnisse Beurteilungsgröße RMS Vertikalbeschleunigungen Wagenkasten, Vollbögen

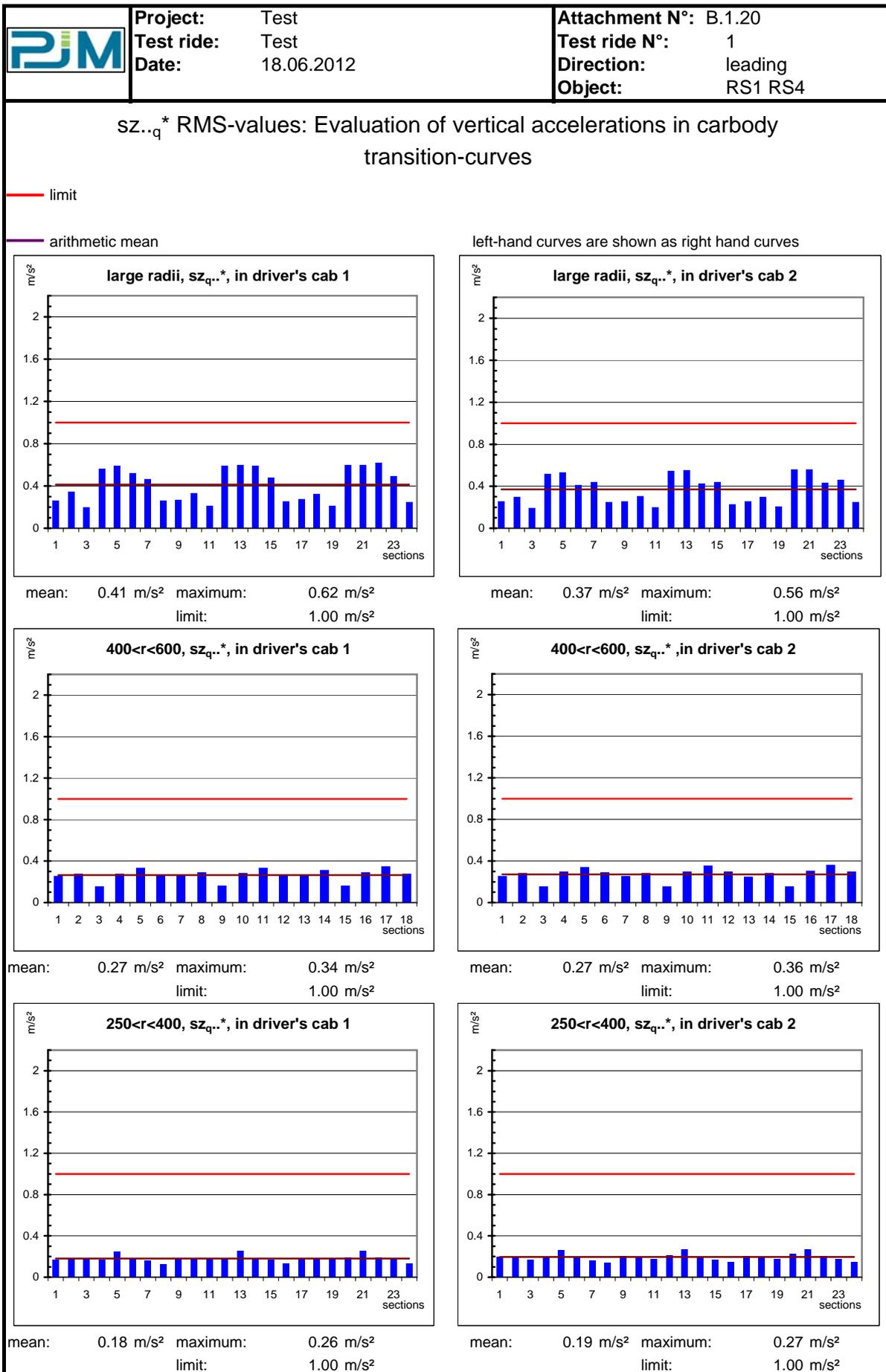


Abbildung D.22: Ergebnisse Beurteilungsgröße RMS Vertikalbeschleunigungen Wagenkasten, Übergangsbögen

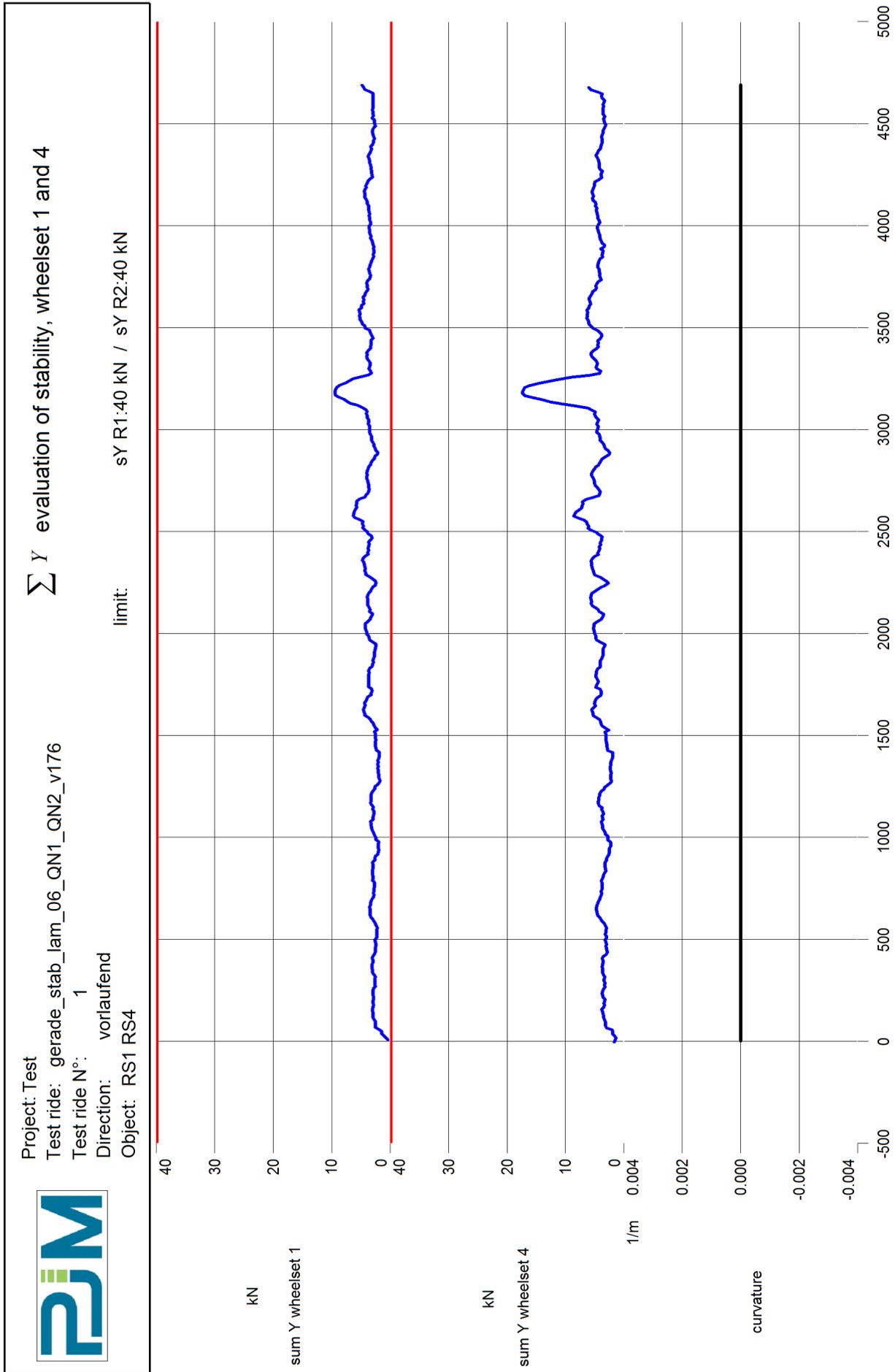


Abbildung D.23: Ergebnisse Stabilitätsbewertung