

SIEMENS



Müllneritsch Lisa, BSc.

# Erarbeiten einer standardisierten Beanspruchungs-Zeit-Funktion für Kleinprobenversuche

## MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ass.Pof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Moser

Dipl.-Ing. Martin Rieger

Arbeitsgruppe Betriebsfestigkeit und Schienenfahrzeugtechnik  
des Instituts für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik

Graz, am 4. Jänner 2018



# 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 entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 04.01.2018

.....

Müllneritsch Lisa

# Statutory Declaration

---

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

Graz, am 04.01.2018

.....

Müllneritsch Lisa



## Danksagung

---

Diese Masterarbeit entstand auf Wunsch der Siemens AG Austria in Graz Eggenberg und wurde in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Betriebsfestigkeit und Schienenfahrzeugtechnik des Instituts für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik der TU Graz durchgeführt.

### Siemens AG Austria

Für die Bereitstellung des Themas, die allgemeine Betreuung der Arbeit und insbesondere die Betreuung der Finite-Elemente-Simulation der Kleinprobe, möchte ich mich herzlich bei Herrn Dipl.-Ing. Werner Mößler bedanken.

Im Bereich Prüfsignalerstellung gilt mein ganz besonderer Dank Herrn Dipl.-Ing. Werner Kremmüller, der durch sein fundiertes Fachwissen und seine langjährige Erfahrung in der Datenauswertung diese Arbeit überhaupt ermöglicht und in ihrer Ausführung sehr bereichert hat.

Außerdem möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Martin Lechner bedanken, durch dessen spezielles Fachwissen im Bereich Datenauswertung sehr wichtige Denkansätze in dieser Masterarbeit berücksichtigt werden konnten.

### TU Graz

Auf Seiten der technischen Universität geht mein Dank an Herrn Ass. Prof. Dipl. –Ing. Dr. techn. Christian Moser für das Ermöglichen der Arbeit und an meinen Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Martin Rieger, der mir die Prüfstandstechnik näher gebracht hat und mich bei der Vollendung meiner Arbeit wesentlich unterstützt hat.

Abschließend gilt mein ganz persönlicher Dank meiner Familie, da sie mir mein Studium ermöglicht hat und mich in allen Lebenslagen immer unterstützt hat.

Lisa Müllneritsch



## Kurzfassung

---

Das Fachgebiet der vorliegenden Masterarbeit liegt im Bereich Betriebsfestigkeits- und Lebensdauerbewertung von Fahrwerken für Schienenfahrzeuge der Firma Siemens AG Austria.

Die Firma Siemens stellt die Forderung nach Leichtbau und Innovation in der Schienenfahrzeugtechnik und setzt dabei auf hochfesten Stahl. Kommt hochfester Stahl zum Einsatz, hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse der Betriebsfestigkeitsrechnung, welche nach anerkannten Bewertungsregeln für Baustahl durchgeführt wurde, verglichen mit den Ergebnissen der Schwingversuche von Fahrwerken weniger gut übereinstimmen als bei der Verwendung von Baustahl. Die Ursache für den Unterschied liegt darin, dass die Bewertung der Betriebskollektive in der Rechnung konservativer erfolgt als bei der Auswertung des Schwingversuches.

Um die festgelegten Richtwerte entsprechend anzupassen, soll das Potenzial, dass durch den Einsatz von hochfestem Stahl entsteht genauer untersucht werden. Ein Teil dieser Untersuchungen wird mittels Kleinprobenversuchen durchgeführt. Diese Kleinproben repräsentieren ein Kerbdetail der Schweißkonstruktion Fahrwerksrahmen. Es handelt sich dabei um Längssteifen aus hochfestem Stahl Alform 700 M, auch S700 genannt, mit verschliffenem Längsnahtende.

Ausgehend von Streckenversuchen, Schwingversuchen und Betriebsfestigkeitsrechnungen verschiedener Fahrwerke, können potenziell kritische Stellen des Fahrwerksrahmens ermittelt und nach ihrer Beanspruchungsart kategorisiert werden. Als Beispiel werden die Abbindenähte am Untergurt des Langträgers betrachtet, da diese durch eine Zug-Schwellbeanspruchung kritisch belastet sind. Als charakteristischer Streckenversuch wird die Messung eines Fahrwerksrahmens aus hochfestem Stahl gewählt. Während dieses Streckenversuchs wurde mittels linearer Dehnmessstreifen der Beanspruchungs-Zeit-Verlauf kontinuierlich aufgezeichnet. Die durch den Versuch generierten Messwerte stellen in weiterer Folge die Ausgangsbasis der betrachteten Daten dar. Unter Festlegung der Randbedingungen für den Ermüdungsversuch, werden daraus charakteristische Prüfsignale für Kleinproben abgeleitet.

Das Hauptaugenmerk der Masterarbeit liegt auf dem Vorgang der Prüfsignalerstellung aus der aufgezeichneten Betriebsbeanspruchung. Der vorgeschlagene Prozess soll der Firma Siemens als Anleitung zur Prüfsignalerstellung für Betriebslastennachfahrversuche dienen, um weitere Kleinprobenversuche, bezogen auf den Fahrwerksrahmen, durchführen zu können.



## Abstract

---

The main field of this master thesis is fatigue performance under variable amplitude loading and fatigue calculation of bogies made by Siemens AG Austria.

Siemens wants to realize innovative design solutions for bogies and other related components by using high-strength steel to fulfill the growing demand of lightweight design in the railway industry. It turned out, that the results of fatigue calculation, which consider the approved guideline values for mild steel, compared with the results of fatigue testing of high-strength steel components diverge. The reason for that is a different assessment of operational collectives regarding fatigue calculation and fatigue test.

To be able to adjust known guideline values, it is necessary to gain more experience about the performance of high-strength steel. By testing specimens, that represent notch details of the welded bogie frame, a part of the new experience will be generated. The chosen specimens are longitudinal stiffeners with grinded weld end made of high-strength steel.

The process of exploration starts with the comparison of the results of on-track tests, fatigue tests and fatigue calculations of different bogies. It follows that the critical design details of the bogie frame can be identified, categorized and evaluated by their mechanical strain. For example the end of a weld seam on the lower flange of the longitudinal beam is ranked among the critical design details, because it is under high pulsating tensile loading. With the data of a characteristic on-track test of a bogie made of high strength steel, a certain stress-time-behavior for the weld detail can be set. The stress-time-behavior will be adjusted, considering defined constraints, to get characteristic test signals which are suitable for the specimen test rig.

This master thesis focuses on the process of transforming the measured signal of the on-track test to a test signal with variable amplitude loading, in a way to reduce the testing time and represent the real mechanical stress of a bogie in use. This suggested process of setting a test signal can be used as a guideline by Siemens to create test signals for further service load tests with specimens of other critical notch details, referring to the bogie frame.



# Inhaltsverzeichnis

---

1	Einleitung .....	1
2	Aufgabenstellung und Ziel .....	2
3	Theorie - Betriebsfestigkeit.....	6
3.1	Wichtige Begriffe der Betriebsfestigkeit.....	7
3.2	Das Betriebsbeanspruchungskollektiv .....	12
3.2.1	Ermitteln der Betriebsbeanspruchung.....	12
3.2.2	Klassierung eines Beanspruchungs-Zeit-Verlaufes .....	12
3.2.3	Erstellung eines Beanspruchungskollektivs .....	15
3.2.4	Lineare Schadensakkumulationshypothese.....	16
3.3	Arten von Ermüdungsfestigkeitsversuchen .....	18
3.3.1	Wöhler-Versuch (Einstufenversuch).....	18
3.3.2	Blockprogrammversuche (Mehrstufenversuch).....	19
3.3.3	Zufallslastenversuche.....	20
3.3.4	Betriebslastennachfahrversuche .....	21
3.4	Maßnahmen zur Versuchszeitverkürzung .....	22
4	Theorie - Nachbehandlungsverfahren von Schweißnähten .....	25
4.1	Kugelstrahlen .....	25
4.2	Reinigungsstrahlen.....	25
4.3	Verschleifen .....	25
4.4	HFMI (high frequency mechanical impact).....	26
4.5	Auszug aus der Studie zum HFMI-Verfahren [11].....	26
4.5.1	Versuchsspezifikation [11] .....	27
4.5.2	Ermüdungsfestigkeits tests mit CAL und VAL [11].....	27
4.5.3	Spezifizieren der Schadenssumme D [11].....	28
5	Erkenntnisse aus vorhandenen Versuchen.....	30
5.1	Was ist eine Kleinprobe?.....	30
5.2	Warum kommt Alform 700 M zum Einsatz? .....	30
5.3	Kleinprobenversuchsserien mit Alform 700 M .....	31
5.4	Rahmenschwingversuch .....	34

5.4.1	ICx Schwingversuch.....	34
5.4.2	Schwingversuch des SF100 Erprobungsträgers .....	35
6	Streckenversuch.....	38
6.1	Datenvergleich verschiedener Streckenversuche.....	39
6.1.1	Nullpunkt des Streckenversuches .....	40
6.1.2	Schweißnahttypen der Abbindenähte .....	42
6.1.3	Lastniveau der Projekte .....	43
6.1.4	Mittelspannungsniveau der Projekte.....	43
6.1.5	Spannungskollektive .....	44
6.2	Streckenversuch SF100 Laufdrehgestell .....	46
6.2.1	Auswahl der Messstelle .....	48
7	Versuchsaufbau.....	49
7.1	Beschreibung des Versuches.....	49
7.2	Daten der Universalprüfmaschine HUS60 .....	50
7.3	Definition Ausfall eines Bauteils .....	56
8	NX Modell .....	57
8.1	Variantenstudie zur Festlegung der Geometrie.....	57
8.2	Aufbau des Simulationsmodells der Kleinprobe in NX 11 .....	59
8.2.1	Simulationsergebnisse .....	61
9	Umrechnungsparameter - Vom Drehgestellrahmen zur Kleinprobe.....	64
9.1	Umrechnungsfaktor der Dehnung [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ] in Kraft des Zylinders [kN] .....	65
9.2	Umrechnungsfaktor der Kraft [kN] in den absoluten Weg des Zylinders [mm] .....	65
9.3	Umrechnungsfaktor des absoluten Weges [mm] in den relativen Weg des Zylinders [mm] .....	65
9.4	Umrechnungsfaktor der Dehnung in $\mu\text{m}/\text{m}$ in die Spannung in MPa .....	66
9.4.1	Dehnungen aus der FE-Rahmenberechnung .....	66
9.4.2	Vorgangsweise zur Bestimmung des Querdehnungsfaktors .....	68
9.5	Die Umrechnungsfaktoren.....	69
9.5.1	Beispiel für die Umrechnung.....	69
10	Prüfsignalerstellung .....	71
10.1	Aufbau des Signalerstellungstools .....	71
10.2	Inputdaten aus dem Streckenversuch .....	72
10.2.1	Problem bei der Verwendung von Spannungen .....	73

10.3	Anforderungen an das Prüfsignal .....	75
10.4	Erstellen der Versuchssequenz .....	77
10.4.1	Wahl der Wöhlerlinie .....	77
10.4.2	Rainflow-Kollektivierung der Streckenversuchsdaten .....	78
10.4.3	Versuchszeitverkürzung durch Omission .....	79
10.4.4	Versuchszeitverkürzung durch Eliminieren von Haltezeiten .....	81
10.4.5	Optimieren der Sequenz .....	82
10.5	Bestimmung der Mittellage .....	84
10.6	Mischung – Sequenz mit Beladewechseln .....	85
10.6.1	Annahmen zur Anzahl der Beladewechsel .....	86
10.6.2	Mischung der Sequenzen .....	87
10.7	Extrapolationsfaktor bestimmen .....	88
10.8	Interpolieren der Sequenz .....	89
10.9	Interpretation der möglichen Versuchssignale .....	92
10.9.1	Skalierung der Prüfkraft .....	93
10.9.2	Effektive Schadenssumme .....	95
10.9.3	Ergebnisse der betrachteten Signale in Zahlenwerten .....	96
10.9.4	Kollektivvergleiche .....	97
11	Statistik .....	100
12	Ausblick .....	101
13	Literaturverzeichnis .....	102
14	Abbildungsverzeichnis .....	105
15	Tabellenverzeichnis .....	109
16	Anhang .....	110
16.1	Werkstoffdatenblatt Alform 700 M .....	110
16.2	Programme, zur Erarbeitung des Inhaltes der Masterarbeit .....	114
16.3	Zeichnungen der Längssteife (Kleinprobe) .....	114
16.4	Reale Kleinproben .....	116
16.5	Spannungskollektive im Projektvergleich .....	117
16.5.1	Abbinder Radsatzführungsbuchse oben außen .....	117
16.5.2	Abbinder Radsatzführungsbuchse oben innen .....	118
16.5.3	Abbinder Radsatzführungsbuchse unten außen .....	119

16.5.4	Abbinder Radsatzführungsbuchse unten innen.....	120
16.5.5	Abbinder Primärfedertopf außen .....	121
16.5.6	Abbinder Primärfedertopf innen .....	122
16.5.7	Abbinder primäre Abhebesicherung oben außen .....	123
16.5.8	Abbinder primäre Abhebesicherung unten außen .....	124
16.6	Erklärung der Projektbezeichnungen.....	124
16.7	Auszug aus dem Streckenversuch des SF100L.....	125
16.7.1	Erklärung der Messungsbezeichnung: .....	125
16.7.2	Messstrecken .....	125
16.7.3	Fahrzeugkonfiguration .....	126
16.7.4	Verwiegeprotokoll.....	126
16.7.5	Auswertung des Streckenversuches an den Abbindern .....	127
16.7.6	Rainflow-Kollektive und Frequenzbereich .....	129
16.8	Dehnungen aus der FE-Rahmenrechnung des SF100L .....	133
16.9	Prüfzylindereinstellungen .....	134
16.9.1	Loop 1 mit Beladewechsel .....	134
16.9.2	Loop 2 mit Beladewechsel .....	135
16.10	Darstellung der Mischung der Sequenzen von Loop 1 .....	137
16.11	Abbildung der Prüfsignale.....	137
16.11.1	Loop 1.....	137
16.11.2	Rainflow-Kollektive der Prüfsignale aus Loop 1.....	141
16.11.3	Loop 2.....	142
16.11.4	Rainflow-Kollektive der Prüfsignale aus Loop 2.....	145

# 1 Einleitung

---

Die Firma Siemens AG in Graz Eggenberg fertigt Fahrwerke von Schienenfahrzeugen. Die Schienenfahrzeuge kommen im Personenverkehr zum Einsatz und werden für eine Lebensdauer von bis zu 40 Jahren ausgelegt. Zur Produktpalette von Siemens zählen Nahverkehrszüge, Fernverkehrszüge, Hochgeschwindigkeitszüge, Straßenbahnen, U-Bahnen und Lokomotiven. Höchste Priorität bei der Konstruktion und Auslegung von Fahrzeugen hat die Sicherheit von Personen im Fahrgastbetrieb.

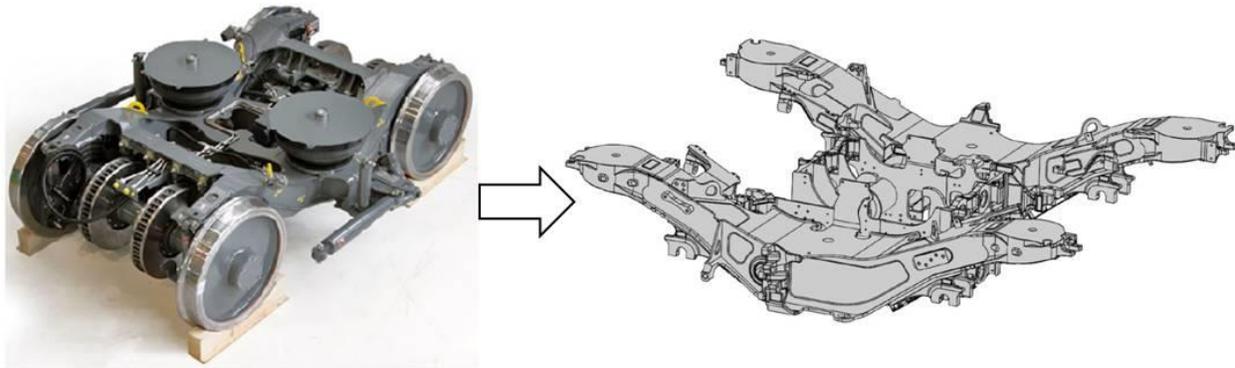


Abbildung 1.1 Beispiel für ein Drehgestell und einen Drehgestellrahmen der Firma Siemens AG Austria

Fahrwerke, zu denen auch Drehgestelle gehören, zählen zu den schwingbeanspruchten Bauteilen, die hoch dynamischen, komplexen Belastungen standhalten müssen. Ein Drehgestell besteht aus der Schweißkonstruktion des Rahmens, auf dem die Radsätze, der Motor, die Bremsen, die Federn, Dämpfer und alle weiteren Komponenten befestigt sind. Das Versagen einer Komponente kann auf unterschiedliche Ursachen, wie Ermüdungsbruch, Gewaltbruch, unzulässige Verformung, Instabilität, Verschleiß oder Korrosion zurückzuführen sein. Deshalb werden Drehgestelle zur Bestätigung der betriebsfesten Auslegung auf ihre Ermüdungsfestigkeit geprüft.

Bei geschweißten Strukturbauteilen, wie dem Fahrwerksrahmen, kommt es vor allem auf das verwendete Grundmaterial, die Ausführung der Schweißnähte sowie deren Nachbehandlungsverfahren an. Die durch den Schweißvorgang hervorgerufene Gefügeänderung im Grundmaterial, die Kerbwirkung der Schweißnaht und die eingebrachten, fertigungsbedingten Eigenspannungen können die Festigkeit des Bauteils erheblich beeinflussen. In der Auslegungs- und in der Prüfungsphase eines Fahrwerks können somit potenziell kritische Stellen festgestellt werden. Diese Stellen gilt es möglichst im Vorfeld zu erkennen und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen.

## 2 Aufgabenstellung und Ziel

---

Die Firma Siemens hat es sich zum Ziel gemacht ihre Produkte vermehrt in Leichtbauweise zu gestalten, um die Wirtschaftlichkeit ihrer Produkte zu steigern. Ein Punkt, der im Leichtbau sehr wichtig ist, ist die Auswahl des adäquaten Werkstoffes. Aus diesem Grund kommt zukünftig nicht nur der herkömmliche Baustahl S355 in Siemens Drehgestellrahmen zum Einsatz, sondern auch der hochfeste Stahl Alform 700 M, der auch unter der Bezeichnung S700 bekannt ist. Mit Hilfe der Finiten Elemente Simulation, der Ermüdungsfestigkeitsbewertung und der Betriebsfestigkeitsbewertung können die entwickelten Strukturbauteile entsprechend der geforderten Zuverlässigkeit laut den technischen Richtlinien und der Lebensdauer ausgelegt werden. Für eine geeignete Dimensionierung dieser zyklisch beanspruchten Bauteile ist es notwendig die Funktionen und die Betriebsbedingungen der einzelnen Komponenten zu kennen, sowie auch das Werkstoffverhalten. Weiteren Aufschluss über die Spannungs- und Dehnungszustände im realen Bauteil ergibt der Streckenversuch, bei dem auch Kräfte, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen gemessen werden.

Durch die oben genannten Möglichkeiten Informationen zum Verhalten eines Bauteils zu sammeln, haben sich die potenziell kritischen Stellen am Drehgestellrahmen herauskristallisiert. Bei einer dieser Stellen handelt es sich um Schweißnahtabbinder am Untergurt des Langträgers.

Zur Gewährleistung einer ordnungsgemäßen, klar definierten Schweißnahtverbindung kann der Abschluss der Längsnaht quer durch einen Abbinder verschweißt werden, wie in Abbildung 2.1 dargestellt ist.

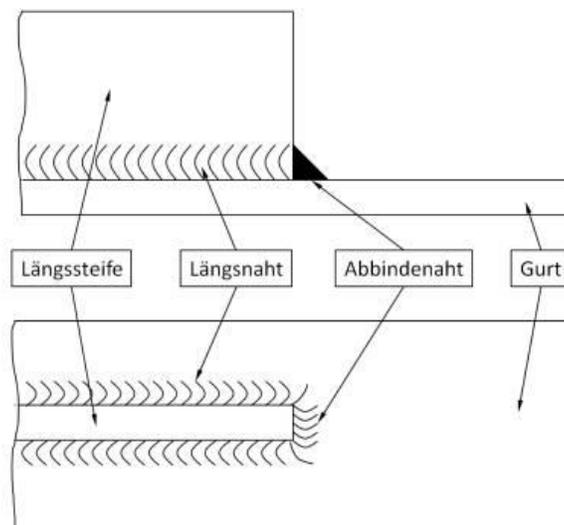


Abbildung 2.1 Darstellung einer Abbindenaht (auch Abbinder genannt) am Schweißnahtende, [1]

Abbindenähte und nachbearbeitete Enden von Längsnähten haben nicht nur den Vorteil, dass sie vor Korrosion und stirnseitiger Risseinleitung schützen, sondern sie erhöhen zudem auch die

Schwingfestigkeit durch Verminderung der Kerbwirkung am Blechende und der daraus resultierenden Spannungsreduktion.

### Problemstellung

Der Vergleich der Versuchsnachrechnung eines hochfesten Rahmens mit dem Rahmenschwingversuch zeigte große Differenzen in den Ergebnissen auf. Laut Rechnung erwiesen sich sehr viele Schweißnähte bei Überbeanspruchung bis zum Versagen als kritisch. Es konnte rechnerisch nicht festgestellt werden, an welcher Stelle genau das Versagen eintreten wird, wie der betrieblichen Auslastungsgrade des Rahmens in Abbildung 2.2 zeigen.

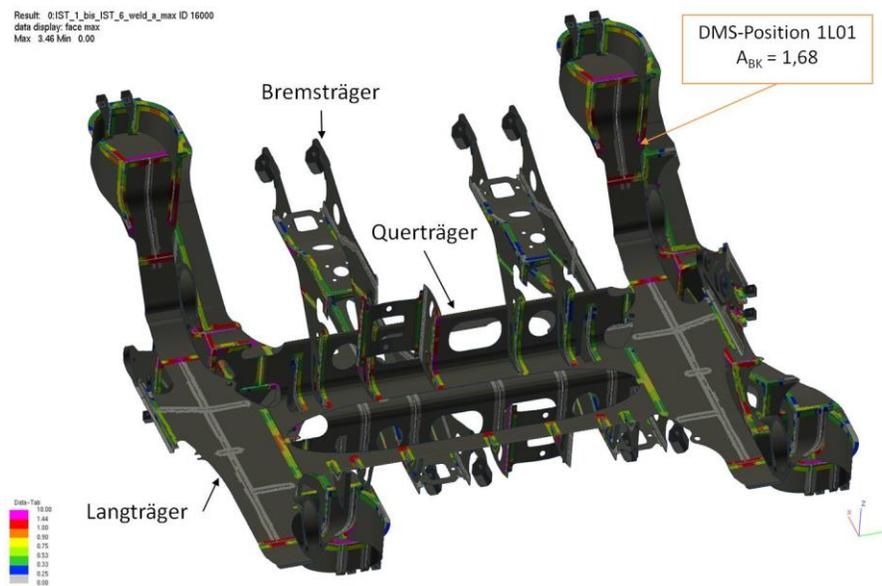


Abbildung 2.2 Betrieblicher Auslastungsgrad  $A_{BK}$ , SF100 Erprobungsträger, [2]

Der Rahmen hat im Schwingversuch den 4 Laststufen ohne Riss standgehalten, die für den Betriebsfestigkeitsnachweis erforderlich waren. Entgegen den Aussagen der Betriebsfestigkeitsrechnung gab es bis zum Ende des Betriebsfestigkeitsversuches nur einen Anriss im Bereich der Schweißnähte. Der Anriss kristallisierte sich erst spät in der 5. Laststufe heraus und führte in weiterer Folge zum Schwingbruch am Abbinde des Untergurtes des Langträgers. Die anderen kritischen Stellen hielten der Überbeanspruchung stand, obwohl laut Rechnung der Auslastungsgrad dieser bereits zu hoch war. Die Versuchsnachrechnung stellt im Allgemeinen immer den schlimmsten Fall der Beanspruchung dar. Daraus lässt sich schließen, dass die verwendeten Parameter, die aus Normen und Richtlinien stammen, in der Rechnung zur Bewertung zu konservativ sind und deutliches Verbesserungspotenzial beinhalten.

Um dieses Verbesserungspotenzial zu analysieren, sollen Schweißnahtenden von Kleinproben aus hochfestem Stahl Alform 700 M einer Versuchsreihe unterzogen werden. Diese Versuchsreihen dienen im Allgemeinen dazu die Lebensdauer von Bauteilen aus bestimmten Werkstoffen zu ermitteln. Mit den daraus gewonnenen Werten kann die Firma Siemens

schließlich ihre Bewertungsvorschriften für hochfesten Stahl Schritt für Schritt näher an die Realität heranbringen und das Potenzial dieses Stahls ausnützen.

Die **Aufgabe** ist es nun für das ausgewählte Kerbdetail, Abbindenähte am Untergurt des Langträgers, Daten aus den vorhandenen Streckenversuchen auszuwählen und zu vergleichen. Aus diesem Vergleich soll der Grad der Ähnlichkeit und der Vergleichbarkeit der Messergebnisse über eine normierte Kollektivform festgestellt werden. Durch das Ähnlichkeitsverhalten werden schließlich aus allen verwendbaren Messungen ein repräsentativer Streckenversuch und daraus eine repräsentative Beanspruchungs-Zeit-Funktion ausgewählt. Diese Daten werden für den Ermüdungsversuch der Kleinprobe benötigt.

Die **Vorgehensweise** ist in Abbildung 2.3 in ihren Grundzügen dargestellt. Sie beinhaltet, dass zuerst alle Versuchsvorgaben und Randbedingungen spezifiziert werden. Es fließen die Ergebnisse der FE-Rechnung der Kleinprobe mittels Siemens NX 11, die Parameter des Prüfstandes und des Prüfzylinders mit in das Prüfsignal ein. Anschließend folgen der Vergleich der Streckenversuchsdaten mit einem eigens programmierten Matlab (R2017b) Tool und die Signalaufbereitung bis zum endgültigen Prüfsignal. Während dieses ganzen Prozesses wird nach den Vorgaben der Betriebsfestigkeitsermittlung gehandelt.

Das **Ziel** ist es eine Vorgehensweise zur Prüfsignalerstellung aus Betriebslasten für Betriebslastennachfahrversuche zu definieren, siehe Abbildung 2.3. Sie beschreibt, wie aus einem ausgewählten Streckenversuch eine standardisierte Beanspruchungs-Zeit-Funktion für Kleinprobenversuche, in Form eines Kraft- und eines Wegsignals, entsteht. Im vorliegenden Fall werden damit Nahtenden einer Längssteife in einem einachsigen Zugversuch im Zugschwellbereich mit hoher Mittelspannung geprüft. Die Beanspruchungs-Zeit-Funktion soll sowohl den Beladezustand der Testfahrten berücksichtigen als auch die Reihenfolge der auftretenden Lastwechsel.

Der Prüfstands Aufbau ist vom Institut für Betriebsfestigkeit und Schienenfahrzeugtechnik der TU Graz vorgegeben.

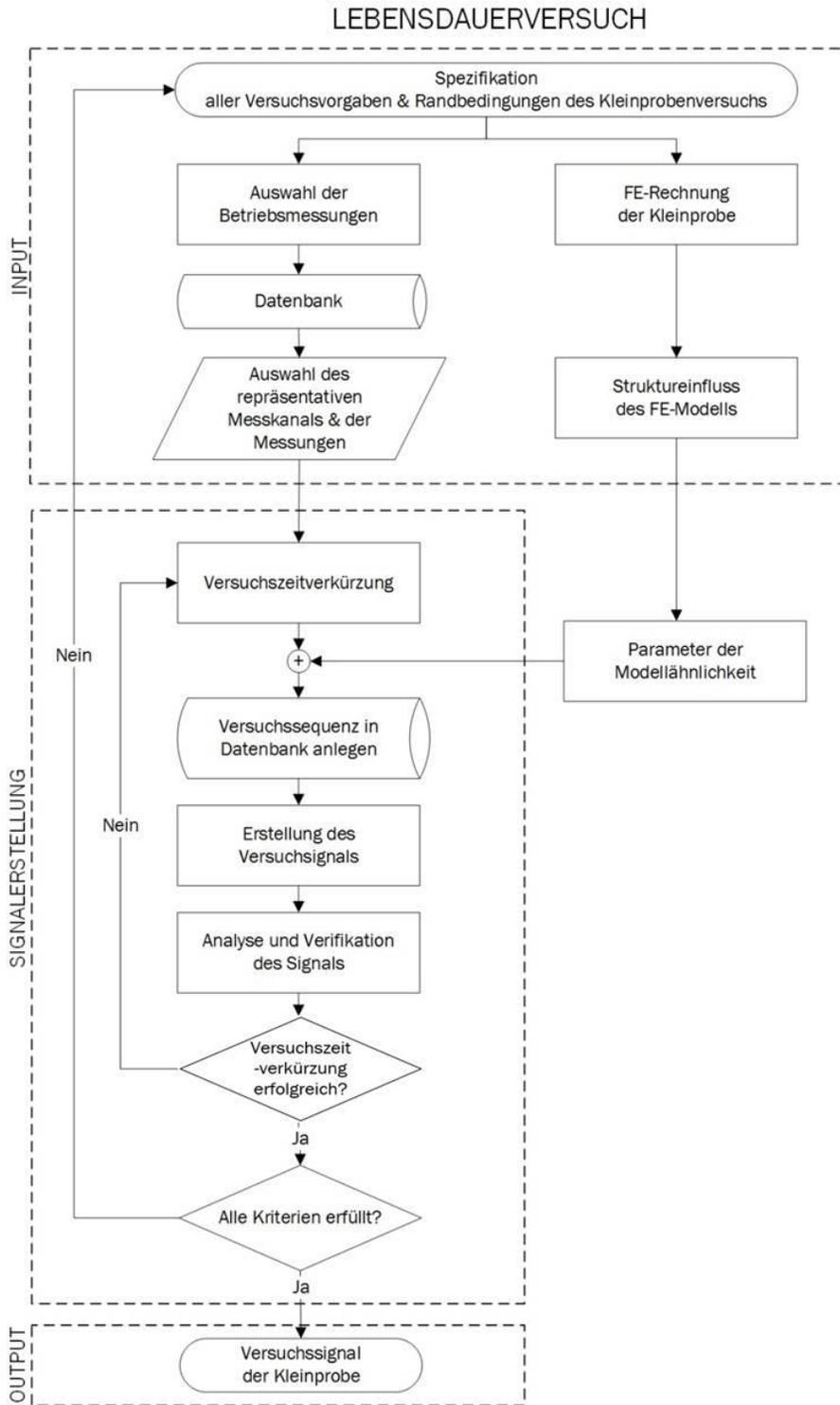


Abbildung 2.3 Vorgangsweise der Versuchssignalerstellung

### **3 Theorie - Betriebsfestigkeit**

---

Die Betriebsfestigkeit umfasst die Problemstellungen und Methoden in der Auslegung schwingbeanspruchter Bauteile, welche durch Schwingbruch oder durch Schwinganriss versagen können. Meistens sind die Ursachen und Einflüsse, die zum Bauteilversagen führen, aufgrund der Komplexität des gesamten Beanspruchungszustandes im Betrieb nicht genau ermittelbar. So kann es vorkommen, dass Ausfälle auch an unerwarteten Stellen auftreten. Es muss daher bereits bei der Auslegung und Entwicklung dieser Bauteile die Sicherheit durch Betriebsfestigkeit an erster Stelle stehen. [3]

Ein Betriebsfestigkeitsnachweis stellt den gesetzmäßig fassbaren Zusammenhang zwischen Lebensdauer und Größe der Schwingbeanspruchung dar und wird heutzutage mit einer entsprechenden Computer-Software durchgeführt. Der Betriebsfestigkeitsnachweis kann rechnerisch während des Entwicklungsprozesses und experimentell nach dem Entwicklungsprozess weiteren Aufschluss über die Güte der Konstruktion geben und potenzielle Schwachstellen aufweisen. [3]

Um die Größe der Schwingbeanspruchungen für die Auslegung so gut wie möglich einzuschätzen, müssen die Betriebsbeanspruchungen (Spannungen und Dehnungen), so realitätsnah wie möglich abgebildet werden. Des Weiteren müssen dafür die vorgesehene Lebensdauer, die Ausfallwahrscheinlichkeit und sämtliche dominanten werkstofflichen, konstruktiven, fertigungstechnischen und betrieblichen Einflüsse mit einbezogen werden. [3]

### 3.1 Wichtige Begriffe der Betriebsfestigkeit

Anhand von Abbildung 3.1 werden nun die wichtigsten Begriffe aus der Betriebsfestigkeit erklärt.

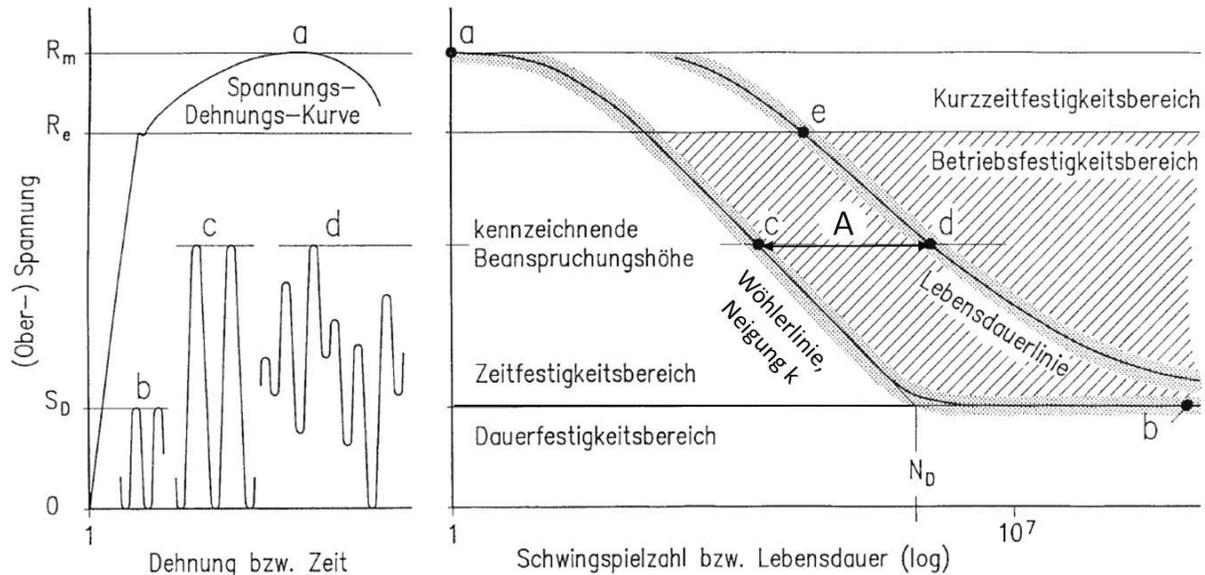


Abbildung 3.1 Parameter der Betriebsfestigkeit bei Schwellbeanspruchung, [3]

#### Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Mittels der Spannungs-Dehnungs-Kurve eines Werkstoffes lassen sich die Zugfestigkeit  $R_m$  und die Streckgrenze  $R_p$  eines Werkstoffes anschaulich darstellen. Sie stellen die oberen Grenzwerte der Beanspruchbarkeit eines Bauteils dar. [3]

#### Beanspruchbarkeit

Die Beanspruchbarkeit eines Bauteils ist die maximal ertragbare Beanspruchung durch gewollte oder ungewollte Belastungen im Betrieb. [4]

#### Schwingfestigkeit

Die Schwingfestigkeit ist die Festigkeit eines Werkstoffes gegenüber zyklischen und zeitlich veränderlichen Schwingbeanspruchungen. Sie wird je nach ertragbarer Lastspielzahl  $N$  in die Bereiche Kurzeitfestigkeit, Zeitfestigkeit und Dauerfestigkeit unterteilt. [4]

#### Kurzeitfestigkeit

$$N < 10^3 - 10^4 \text{ Lastspiele}$$

Bei Beanspruchungen in Höhe der Zugfestigkeit und der Streckgrenze wird es nach einer kleinen Anzahl von Schwingspielen zu einem Ausfall kommen. Sie beinhaltet die statische Festigkeitsgrenze mit der maximal zulässigen Beanspruchung. [3]

### **Zeitfestigkeit**

$$10^3 - 10^4 < N < 2 \cdot 10^6 \text{ Lastspiele}$$

Im Zeitfestigkeitsbereich führt eine endliche Anzahl von Schwingspielen zum Bruch. Je höher die Beanspruchung ist, desto weniger Schwingspiele erfolgen bis zum Bruch. Die Beanspruchung übersteigt die statische Festigkeit nicht. [3]

### **Dauerfestigkeit $S_D$**

$$N > 2 \cdot 10^6 \text{ Lastspiele}$$

Im Dauerfestigkeitsbereich kann eine schwingende Beanspruchung bis zu einer Größe von  $S_D$  (siehe Abbildung 3.1) unendlich oft ohne Bruch ertragen werden [3]. Da der Dauerfestigkeitswert für metallische Bauteile sehr niedrig ist, müssen für Betriebsbeanspruchungen höhere Werte zugelassen werden und das beschränkt die Lebensdauer [5].

### **Wöhlerlinie**

Ist die Größe der Beanspruchungsamplitude  $S_A$ , wie in Abbildung 3.1 (c), konstant entspricht die Zeitfestigkeitslinie der sogenannten Wöhlerlinie. Die Wöhlerlinie entsteht durch das Auswerten mehrerer Wöhler-Versuche und Auftragen der Werte in einem doppellogarithmischen Diagramm, siehe Abschnitt 3.3.1. [3]

#### ***Kennwerte der Wöhlerlinie***

k	Steigung
$S_D$	Dauerfestigkeitswert, Spannungsamplitude
$N_D$	Schwingspielzahl am Abknickpunkt zur Dauerfestigkeit
$S_A$	Beanspruchungsamplitude
$N_A$	Schwingspielzahl der Beanspruchungsamplitude

### **Lebensdauerlinie bzw. Gaßner-Linie**

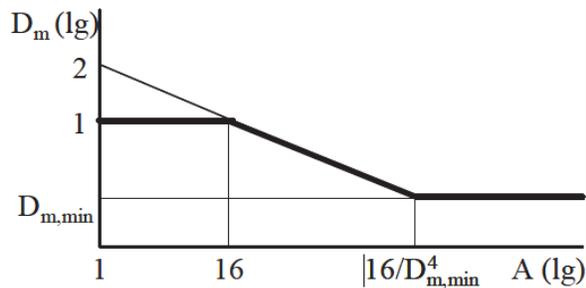
Variieren die Größe und die Abfolge der Beanspruchungsamplituden wie in Abbildung 3.1 (d) bei gleichem Maximum wie in (c) so entsteht die sogenannte Gaßner'sche Lebensdauerlinie im Zeitfestigkeitsbereich, wie sie für Bauteile im realen Betrieb kennzeichnend ist. Sie hat einen S-förmigen Verlauf und ist abhängig von Spannung, Schwingspielzahl und den Eigenschaften der dazugehörigen Beanspruchungs-Zeit-Funktion. Bewertet wird hier nach den Parametern der Betriebsfestigkeit. [3]

### **Lebensdauervielfaches A**

Das Lebensdauervielfache A (siehe Abbildung 3.1) gibt den Abstand zwischen der Wöhlerlinie und der Gaßner-Linie an und hängt von den Eigenschaften der Beanspruchungs-Zeit-Funktion sowie der Form des Beanspruchungskollektivs ab [3]. Die Berechnung ist in der FKM 6 [6] genau ausgeführt.

### Effektive Schadenssumme $D_m$

Die effektive Schadenssumme ergibt sich aus der Summe der Teilschädigungen eines Kollektivs und kann über das Lebensdauervielfache  $A$  im Diagramm laut Abbildung 3.2 aufgetragen werden. Übersteigt die Summe der Teilschädigungen den Wert 1, so wird das Bauteil plastisch verformt und es kann ein Riss entstehen. Die Formel (3.7) ist in Abschnitt 3.2.4 unter lineare Schadensakkumulationshypothese zu finden. [3][6]

Abbildung 3.2 Effektive Miner-Summe  $D_m$ , FKM 6 [6]

	$D_{m,min}$
Stahl, GS, Alu. <i>nicht geschweißt</i>	0,3
<i>geschweißte Bauteile</i>	0,5
GJS, GJM, GJL <i>nicht geschweißt</i>	1,0

Tabelle 3.1 Untergrenze effektive Miner-Summe, FKM 6 [6]

### Schwingbeanspruchung

Die Schwingbeanspruchung ist eine durch Ober- und Untergrenzen definierte, formabhängige und zeitlich veränderliche Spannungs-Zeit-Funktion. Sie besteht aus einem Schwingenspiel, das mit einer gewissen Häufigkeit auftritt. [3]

#### Kennwerte eines Schwingspiels

- $S_o$     Oberspannung
- $S_u$     Unterspannung
- $S_m$     Mittelspannung
- $S_a$     Spannungsamplitude (immer positiv)
- $\Delta S$     Schwingspielbreite (Range)

$$\Delta S = (S_o - S_u) = 2 * S_a \quad (3.1)$$

$$S_a = \frac{(S_o - S_u)}{2} \quad (3.2)$$

$$S_m = \frac{(S_o + S_u)}{2} \quad (3.3)$$

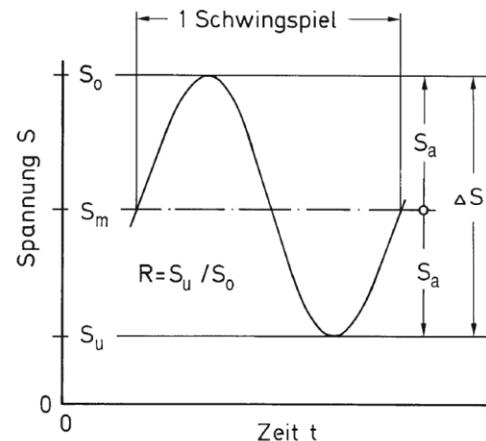


Abbildung 3.3 sinusförmiges Schwingspiel, [3]

### Form der Schwingbeanspruchung

Die Signalform einer Beanspruchungs-Zeit-Funktion kann bei gleicher Ober- und Unterspannung unterschiedlich sein. Sie hängt von der Regelbarkeit und dem Aufbau der Prüfmaschine ab. Der Einfluss der Signalform und der Prüffrequenz auf das Schwingfestigkeitsverhalten von Bauteilen sind aber eher gering. Voraussetzung dafür ist, dass Störungen, die die Prüffrequenz und die Prüfkraftmessung beeinflussen, vermieden werden. [7]

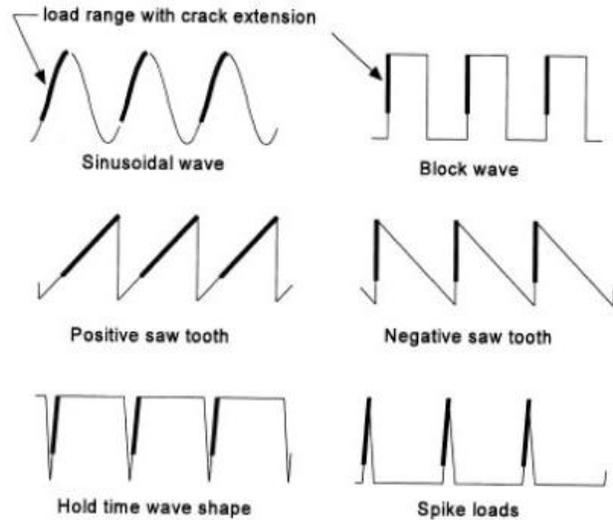


Abbildung 3.4 verschiedene Schwingformen inklusive Phasen des Risswachstums, [7]

### Spannungsverhältnis

Das Spannungsverhältnis  $R$ , laut Formel (3.4) und Abbildung 3.5, ist das Verhältnis von Unter- zu Oberspannung und gibt den Beanspruchungsfall an. [3]

$$R = \frac{S_u}{S_o} \quad (3.4)$$

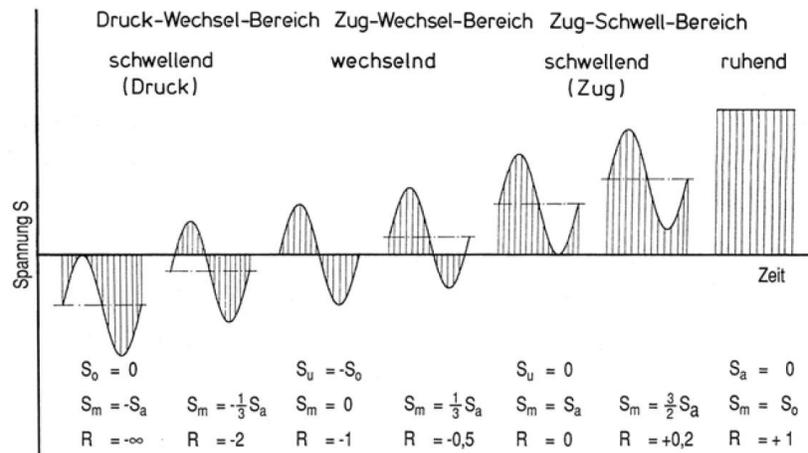
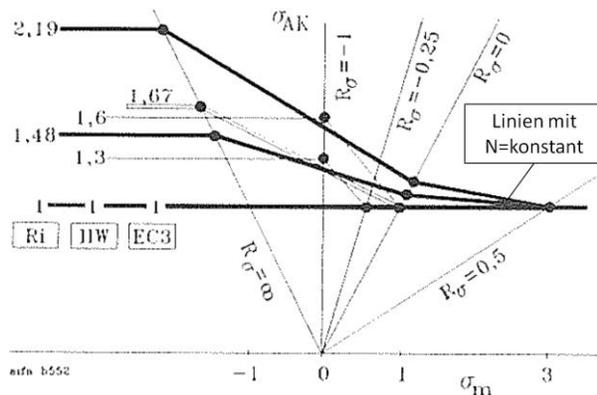


Abbildung 3.5 mögliche Beanspruchungsfälle und Spannungsverhältnis  $R$ , [3]

### Haigh-Diagramm

Das Haigh-Diagramm ist ein Dauerfestigkeits-Schaubild, in dem sich alle Informationen aus Wöhler-Versuchen (siehe Abschnitt 3.3.1) bezüglich der Mittelspannung und verschiedenen Spannungsverhältnissen darstellen lassen. Es kann zu einem Dauer- und Zeitfestigkeitsschaubild erweitert werden. [3]



Residual stress	$K_{E,\sigma}$	$M_\sigma$	$K_{E,\tau}$	$M_\tau \cdot^{-1}$
high	1,00	0	1,00	0
moderate	1,26	0,15	1,15	0,09
low	1,54	0,30	1,30	0,17

Tabelle 3.2 Eigenspannungsfaktoren  $K_E$  und Mittelspannungsempfindlichkeit  $M$  für geschweißte Bauteile, [8]

Abbildung 3.6 Haigh-Diagramm mit Mittelspannungsempfindlichkeit für hohen (I), mittleren (1,48) und niedrigen (2,19) Eigenspannungseinfluss laut FKM 5 ( $\rightarrow Ri$ ); weitere Vergleichswerte von IIW und Eurocode 3, [8]

### Mittelspannungsempfindlichkeit

Die Mittelspannungsempfindlichkeit  $M$  stellt den Einfluss des Spannungsverhältnisses  $R$  oder der Mittelspannung  $S_m$  auf die Höhe der ertragbaren Spannungsamplitude  $S_a$  dar. Sie gibt damit die Steigung der Linie der ertragbaren Schwingspielzahl  $N = \text{konstant}$  zwischen  $R = \infty$  und  $R = 0$  im Haigh-Diagramm an, siehe Abbildung 3.6. [3]

$$M = \frac{S_a(R = \infty) - S_a(R = 0)}{S_m(R = 0)} \quad (3.5)$$

## 3.2 Das Betriebsbeanspruchungskollektiv

Der Vorgang der Erstellung eines Betriebsbeanspruchungskollektivs sieht wie folgt aus [9]:

1. Ermitteln der Betriebsbeanspruchung durch Messung oder Lastannahmen
2. Klassierung von Beanspruchungs-Zeit-Verläufen
3. Erstellung eines Beanspruchungskollektivs
4. Lebensdauerberechnung nach der linearen Schadensakkumulationshypothese

### 3.2.1 Ermitteln der Betriebsbeanspruchung

Zur Festlegung der Betriebsbeanspruchung müssen die Gesamtnutzungsdauer, die Beanspruchungsart bzw. die Betriebszustände und die Sonderlastfälle eines Bauteils aus Streckenversuchen bekannt sein oder für die Lastannahmen definiert werden. [9]

### 3.2.2 Klassierung eines Beanspruchungs-Zeit-Verlaufes

Die Klassierung eines Beanspruchungs-Zeit-Verlaufes erfolgt durch **Zählverfahren**. Es gibt mehrere Möglichkeiten Ereignisse zu zählen. [9]

Die Messgröße ...

... erreicht einen Umkehrpunkt (Minimum, Maximum).

... überschreitet einen Bereich oder Horizont.

... schließt eine Hysterese.

... wird zu einem Zeitpunkt gezählt, der durch eine andere Messgröße definiert ist. [9]

Voraussetzung für alle Zählverfahren ist das Festlegen einer **Klassenbreite**. So kann der Messbereich in Klassen gleicher Größe unterteilt werden. Klassen werden in Richtung positiver Messgröße nummeriert. Überschreitet die Messgröße eine Klassenbreite, so wird dies gezählt. Messgrößen, die in einer Klasse bleiben, werden nicht gezählt und somit unterdrückt. Um zu verhindern, dass sehr kleine Amplituden bei der Klassengrenzenüberschreitung gezählt werden, gibt es die **Rückstellbreite**. Sie stellt eine Hysterese im Klassierungsbereich dar und eliminiert kleine Amplituden, die meist aus einem Rauschen oder Brummen der Messkette stammen. [9]

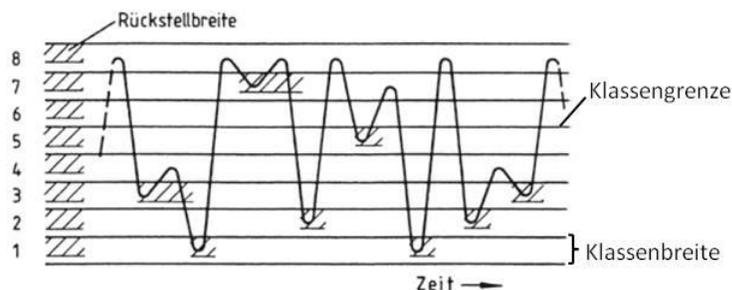


Abbildung 3.7 Klassenbreite, Klassengrenzen und Rückstellbreite, [9]

### 3.2.2.1 Arten von Zählverfahren

#### ➤ einparametrische Zählverfahren [9]

Bei der einparametrischen Zählung wird nur ein Merkmal gezählt.

- Spitzenzählung
- Klassendurchgangszählung
- Bereichszählung
- Bereichs-Paar-Zählung (auch Range-Pair-Counting)

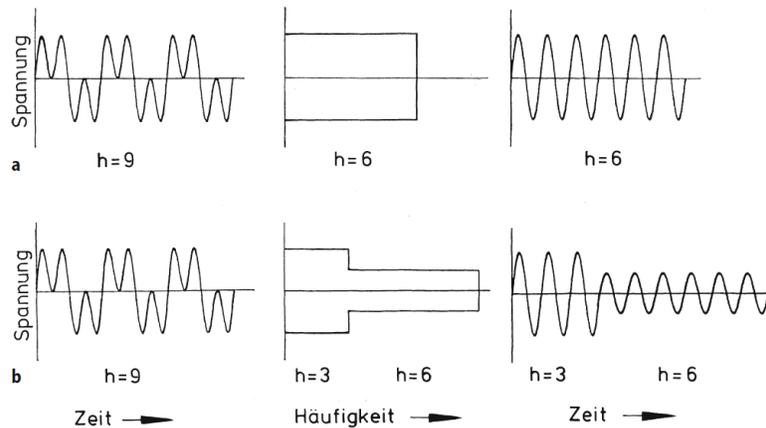


Abbildung 3.8 Unterschied zwischen Klassendurchgangsverfahren und Bereichs-Paar-Zählung, [3]

#### ➤ zweiparametrische Zählverfahren [9]

- Bereichs-Mittelwert-Zählung
- Von-Bis-Zählung
- Bereichs-Paar-Mittelwert-Zählung
- Rainflow-Zählung

Das am weitesten verbreitete zweiparametrische Zählverfahren ist die Rainflow-Zählung.

### 3.2.2.2 Rainflow-Zählung

Bei der Rainflow-Zählung werden geschlossene Hysteresen gezählt und nicht geschlossene als Residuum (Rest) gespeichert. [9]

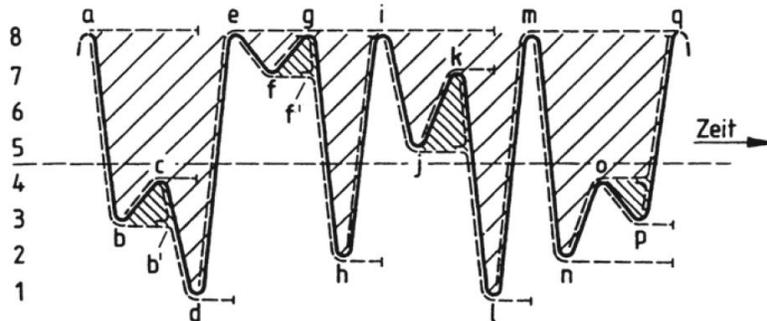


Abbildung 3.9 Rainflow-Zählung, [9]

Rainflow bedeutet „Fließen von Regentropfen“. Dreht man die Zeitachse aus Abbildung 3.9 um 90° Grad im Uhrzeigersinn, so stellen die Beanspruchungs-Zeit-Funktion „Dächer“ dar, über die der Regen nach unten fließt. Der Bereich, den ein Regentropfen zwischen den Dächern von Dachkante zu Dachkante zurücklegt, stellt eine geschlossene Hysterese dar (z.B. a-d-e oder f-g-f'). [9]

Um eine geschlossene Hysterese zu finden, werden 3- oder 4-Punkt-Algorithmen verwendet, die 3 oder 4 aufeinanderfolgende Umkehrpunkte auf eine Hysterese untersuchen. Die Hysteresen können im Spannungs-Dehnungs-Diagramm aufgetragen werden und stellen die Energie dar, die vom Bauteil während eines Schwingspiels aufgenommen und zur Verformung benötigt wird. [9]

Die Ergebnisse der Rainflow-Zählung können folgendermaßen gespeichert werden: [9]

- Vollmatrix (inklusive Minima, Maxima, Auftretensrichtung)
- Halbmatrix (mit Minima und Maxima, keine Information über die Auftretensrichtung)
- Vollmatrix (Zyklen mit Schwingbreiten und Mittelspannungen)

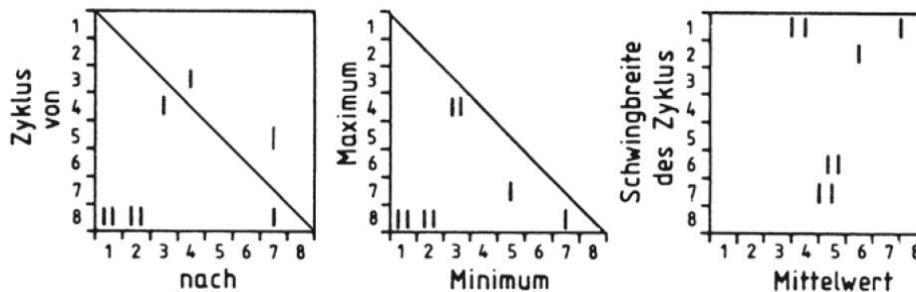


Abbildung 3.10 Vollmatrix und Halbmatrix mit Rainflow-Ergebnissen, [9]

Die Rainflow-Zählung ist dazu geeignet Signalmanipulationen, wie Omission und Truncation (siehe Abschnitt 3.4), durchzuführen. Durch die Ablage der Zyklen nach Schwingbreite und Mittelwert kann der Einfluss der Mittelspannung auf die Schädigung in der Lebensdauerrechnung berücksichtigt werden. Bei der Amplitudentransformation werden alle Zyklen der Rainflow-Matrix in schädigungsäquivalente Zyklen gleicher Mittelspannung oder mit gleichem Spannungsverhältnis abgelegt. Somit können Mittelwerte und Amplituden eindeutig rücktransformiert werden. [9]

### 3.2.3 Erstellung eines Beanspruchungskollektivs

Ein Beanspruchungskollektiv wird aus der Beanspruchungs-Zeit-Funktion mittels eines Zählverfahrens erstellt. Es stellt die bezogene Spannungsamplitude bezüglich ihrer Auftretenshäufigkeit bzw. Klassenüberschreitungshäufigkeit laut Abbildung 3.11 dar. Das Beanspruchungskollektiv weist folgende wesentliche Kennwerte auf: [3]

- Gesamtzahl der Schwingspiele
- Kollektivform
- Kollektivhöchstwerte mit dazugehöriger Spannungsamplitude und dazugehöriger Mittelspannung

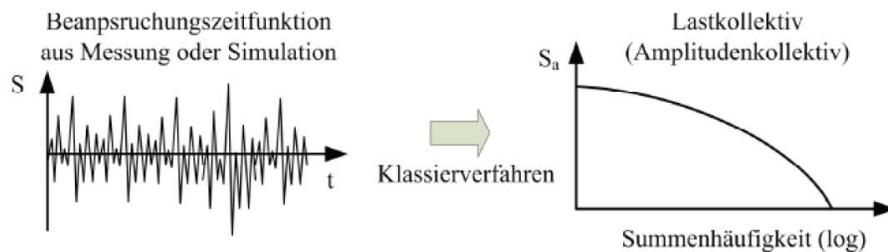


Abbildung 3.11 Zusammenhang Beanspruchungs-Zeit-Funktion und Kollektiv, [4]

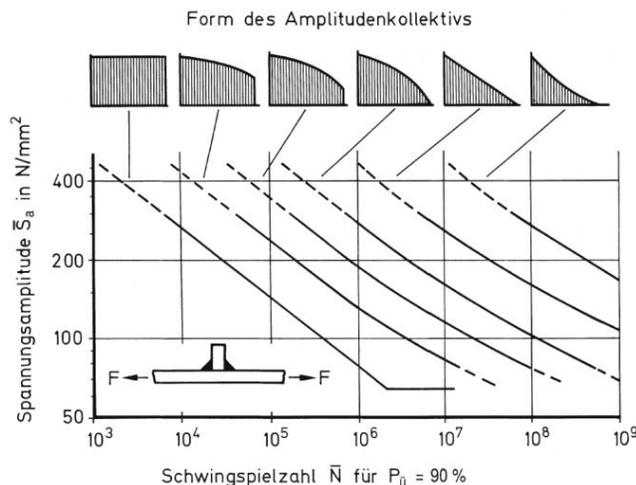


Abbildung 3.12 Lebensdauerlinien in Abhängigkeit der Völligkeit des Kollektivs, [3]

Die **Kollektivform** bzw. die Völligkeit eines Kollektivs hat großen Einfluss auf die Bauteillebensdauer. Je weniger große Beanspruchungsamplituden auftreten, desto größer wird die ertragbare Schwingspielzahl, laut Abbildung 3.12. [3]

Für den Vergleich von Daten aus mehreren Streckenversuchen ist es notwendig ein Einheitskollektiv zu erstellen. Das **Einheitskollektiv** kann entweder auf die Maximalamplitude oder auf die schädigungsäquivalente Amplitude eines Beanspruchungskollektivs normiert werden. [3]

### 3.2.4 Lineare Schadensakkumulationshypothese

Die lineare Schadensakkumulationshypothese beschäftigt sich mit den Zusammenhängen der Lastkollektive und deren Einfluss auf die Bauteillebensdauer. Zur Ermittlung der Schadenssumme wird ein Lastkollektiv in einzelne Rechteckkollektive mit konstanter Amplitude zerlegt, wie beim Wöhler-Versuch in Abschnitt 3.3.1 beschrieben ist und in Abbildung 3.13 dargestellt ist. [5]

Die Teilschädigung eines Rechteckkollektivs lautet:

$$D_i = \frac{N_i}{N_D} \quad (3.6)$$

Die gesamte Schädigungssumme eines Bauteils setzt sich aus der Summe der Teilschädigungen zusammen. Das bedeutet, dass die Schädigung linear mit der Schwingspielzahl zunimmt. [10]

$$D_m = \sum D_i = \sum \frac{N_i}{N_D} \quad (3.7)$$

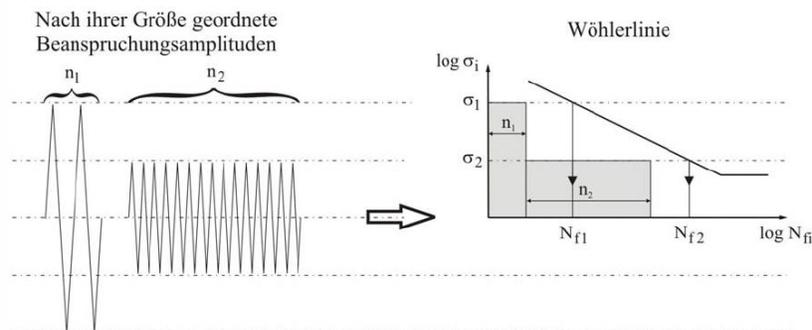


Abbildung 3.13 Teilschädigung, [5]

Für den Verlauf der Wöhlerlinie unterhalb der Dauerfestigkeit, wie in Abbildung 3.14, gibt es verschiedene Näherungsformeln, um eine Unterdimensionierung der Bauteile zu vermeiden. Das bedeutet es können sich auch Amplituden unterhalb der Dauerfestigkeitsgrenze schädigend auswirken. [10]

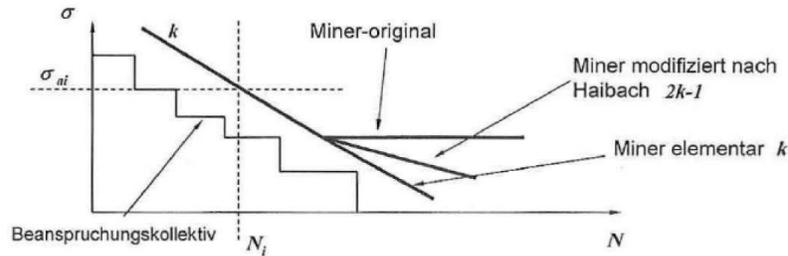


Abbildung 3.14 Verschiedene Verläufe der Wöhlerlinie nach der linearen Schadensakkumulationshypothese, [10]

### **Original-Miner-Regel** [3]

Hier verläuft die Wöhlerlinie nach dem Abknickpunkt bei der Lastwechselzahl  $N_D$  waagrecht. Teilschädigungen  $< S_D$  haben keinen Einfluss.

$$N = N_D * \left(\frac{S_A}{S_D}\right)^{-k} \quad \text{für } S_A > S_D \quad (3.8)$$

Folgende Modifikationen für  $S_A < S_D$  sind am verbreitetsten, siehe auch Abbildung 3.14:

### **Miner elementar** [3]

Die Schwingenspielzahl  $N$  ist folgendermaßen definiert:

$$N = N_D * \left(\frac{S_A}{S_D}\right)^{-k} \quad \text{für } S_A \leq n \geq S_D \quad (3.9)$$

Die Wöhlerlinie verläuft durchgehend mit der Neigung  $k$ . Das bedeutet alle Teilschädigungen haben einen Einfluss auf die Bauteillebensdauer.

### **Miner modifiziert nach Haibach** [3]

Diese Form der Miner Regel stellt einen Mittelweg zwischen der Unterschätzung der Lebensdauer nach Miner elementar und der Überschätzung der Lebensdauer nach Miner original dar. Der Dauerfestigkeitsabfall bei fortschreitender Schädigung wird hier berücksichtigt.

$$N = N_D * \left(\frac{S_A}{S_D}\right)^{-k} \quad \text{für } S_A > S_D \quad (3.10)$$

$$N = N_D * \left(\frac{S_A}{S_D}\right)^{-(2k-1)} \quad \text{für } S_A \leq S_D \quad (3.11)$$

### 3.3 Arten von Ermüdungsfestigkeitsversuchen

Es gibt folgende Möglichkeiten die Ermüdungsfestigkeitsprüfung eines Bauteils durchzuführen:

- Wöhler-Versuch
- Blockprogrammversuch
- Zufallslastenversuch
- Betriebslastennachfahrversuch

#### 3.3.1 Wöhler-Versuch (Einstufenversuch)

Ein Wöhler-Versuch ist die Grundform eines Betriebsfestigkeitsversuches und beschreibt das Verhalten eines Bauteils, das einer Schwingbeanspruchung unterliegt. Diese Schwingbeanspruchung ist durch eine konstante Amplitude und einen konstanten Mittelwert charakterisiert. Daher wird der Wöhler-Versuch auch als Einstufen-Versuch bezeichnet. [3]

Das Ergebnis des Versuches ist die Schwingspielzahl  $N$ , die bis zum Schwinganriss oder bis zum Schwingbruch führt. [3]

Um eine Wöhlerlinie zu erhalten müssen mehrere Wöhler-Versuche bei unterschiedlicher Beanspruchungshöhe aber mit konstanter Beanspruchungsamplitude durchgeführt werden. Dafür müssen etwa 10 bis 15 identische Bauteile geprüft werden. Durch das Auftragen der Versagensschwingspielzahl über der Spannungsamplitude kann man auf den Verlauf der Wöhlerkurve schließen. Je nach Auswertemethodik kommt es zu unterschiedlichen Kurvenverläufen, wie später im Kapitel 5.3 in Abbildung 5.6 gezeigt wird. [3]

***Einsatzbereiche von Wöhler-Versuchen*** [3]:

- Bestimmung der Dauerfestigkeit und Zeitfestigkeit von Werkstoffen
- Betrachtung der Schädigungsmechanismen bei Schwingbeanspruchung
- Variantenstudien von Bauteilen bezüglich Werkstoff und Konstruktionsweise
- Bezugsbasis für Betriebsfestigkeitsversuche
- Basis für Schädigungsakkumulationsrechnungen

### 3.3.2 Blockprogrammversuche (Mehrstufenversuch)

Die Betriebsbeanspruchung bei Blockprogrammversuchen setzt sich aus einer Grundbeanspruchung und einer Zusatzbeanspruchung zusammen, wie in Abbildung 3.15 gezeigt ist.

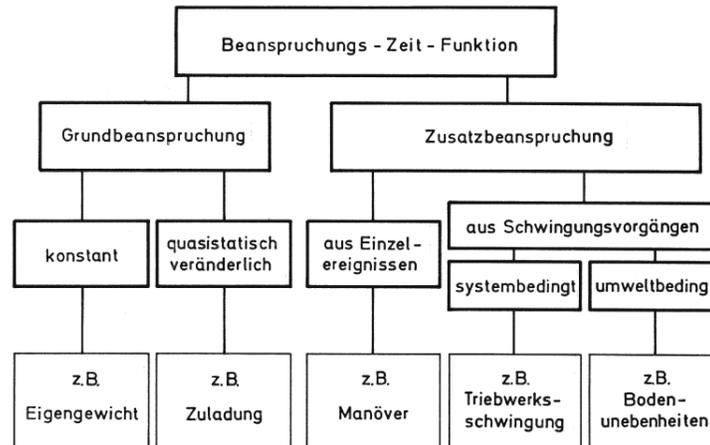


Abbildung 3.15 Bestandteile der Beanspruchungs-Zeit-Funktion bei Blockprogrammversuchen, [3]

Das Beanspruchungskollektiv des Blockprogrammversuches wird in Amplituden und ihre Häufigkeit unterteilt. Aus diesen Blöcken wird ein Beanspruchungs-Zeit-Verlauf als Prüfprogramm erstellt, wie in Abbildung 3.16 ersichtlich. [3]

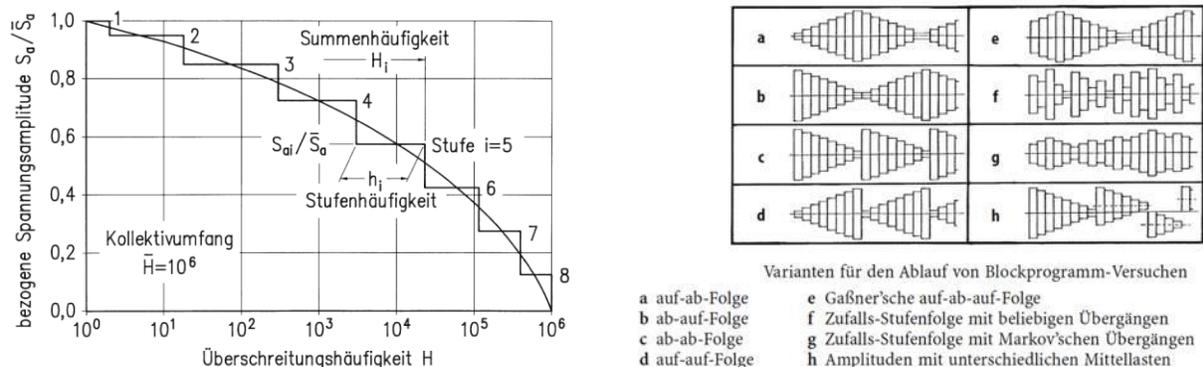


Abbildung 3.16 Darstellung eines Amplitudenkollektivs mit Treppenstufen und daraus erstellbare Ablaufpläne für Blockprogramm-Versuche laut Haibach [3]

#### Wesentliche Vorteile des Blockprogrammversuches [3]

- Versuchsablauf ist durch wenige Parameter definiert
- Versuch ist technisch einfach reproduzierbar
- Einheitskollektiv ermöglicht Vergleich von Versuchsergebnissen
- Erkenntnisse über das Betriebsfestigkeitsverhalten von Werkstoffen und Bauteilen

### 3.3.3 Zufallslastenversuche

Ein Betriebsfestigkeitsversuch mit stochastischem Beanspruchungsverlauf wird auch Zufallslasten-Versuch oder Random-Versuch genannt. Hier wird ein zufälliger Beanspruchungsverlauf ermittelt. Die Schwierigkeit im Vergleich zum Blockversuch liegt in der Umsetzung am Prüfstand. Die Kontrolle der stochastischen Beanspruchung mit sich ändernder Prüfkraft ist schwerer umzusetzen als bei Blockprogramm-Versuchen mit stufenweise konstanter Beanspruchung. [3]

Die Sollwert-Vorgabe bei Zufallslastenversuchen erfolgt durch [3]:

- Nachfahren der gemessenen Betriebsbeanspruchung oder Synthese der Beanspruchungs-Zeit-Funktion analog oder digital
- Angabe der Schwingenspielzahl
  - Zahl der Lastumkehrpunkte oder Zahl der Mittelwertdurchgänge
- Kennzeichnung der Beanspruchungshöhe
  - Spannungsamplitude oder Effektivwert

Die Beanspruchungs-Zeit-Funktion bei Zufallslastenversuchen besteht aus deterministischen und stochastischen Beanspruchungen, wie in Abbildung 3.17 und Abbildung 3.18 beispielhaft dargestellt ist.

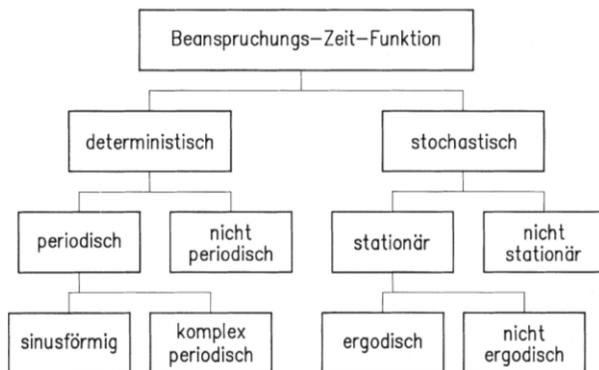


Abbildung 3.17 Beanspruchungs-Zeit-Funktion bei Zufallslasten-Versuchen, [3]

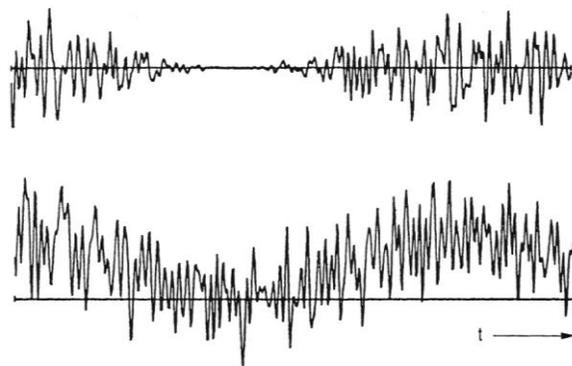


Abbildung 3.18 Nichtstationäre, stochastische Beanspruchungsverläufe, [3]

### 3.3.4 Betriebslastennachfahrversuche

Betriebslastennachfahrversuche ermöglichen eine realitätsnahe Ermittlung der Lebensdauer unter Betriebsbedingungen. Es sind dazu keine hypothetischen Annahmen nötig. Der Beanspruchungsverlauf wird gemessen und analog oder digital gespeichert. Die Voraussetzungen für die realitätsnahe Darstellung der Betriebsbeanspruchungen im Versuch sind [3]:

- Der Beanspruchungsverlauf für die Nutzungsdauer eines Bauteils muss bekannt sein.
- Die Versuchszeit muss der Nutzungsdauer des Bauteils entsprechen.

Um den Beanspruchungsverlauf messen zu können muss also entweder ein Prototyp, ein Vorgängermodell oder ein produziertes Bauteil existieren, für welches die Lebensdauer ermittelt werden soll. [3]

Da der Beanspruchungsverlauf meist nicht für die gesamte Nutzungsdauer des Bauteils vorliegt, muss ein repräsentativer Ausschnitt für diese Beanspruchung vorliegen [3]. Die Betriebsbeanspruchungen eines Schienenfahrzeuges lassen sich durch Streckenversuche ermitteln. Dazu fährt das Schienenfahrzeug auf einer vorgegebenen Strecke, die es während seiner Einsatzzeit immer wieder passieren wird. Das entspricht dem Äquivalent einer Langzeitmessung.

Der Schwingversuch am Prüfstand dauert aber selbst mit diesem repräsentativen Signal noch zu lange, da sehr viele kleine Lastwechsel vorliegen. Die Prüfapparatur ist jedoch in ihrer Prüfgeschwindigkeit und Prüffrequenz beschränkt ist. Auf Maßnahmen zur Versuchszeitverkürzung wird in Abschnitt 3.4 näher eingegangen. Die verkürzte Sequenz wird für den Lebensdauerersuch öfter wiederholt.

### 3.4 Maßnahmen zur Versuchszeitverkürzung

Die aus dem Streckenversuch erhaltenen Beanspruchungs-Zeit-Verläufe sind in der Regel nicht direkt in einem Ermüdungsversuch einsetzbar. Durch die sehr vielen enthaltenen kleinen Schwingspiele dauert der Prüfstandsversuch sehr lange und das macht ihn kostenintensiv. Daher ist die Versuchszeitverkürzung ein wichtiger Punkt in der Betriebsfestigkeitsprüfung und es gibt verschiedene Maßnahmen, um dies umzusetzen: [7]

- digitale Aufbereitung im Zeitbereich (untersuchen und editieren von außergewöhnlichen Merkmalen, Verknüpfung mehrerer Messkanäle möglich) [3]
- digitale Aufbereitung im Frequenzbereich (Fourier-Transformation, digitale Filterung) [3]
- digitale Aufbereitung im Rainflow-Bereich (Rainflow-Matrizen und Residuen ermitteln und überlagern) [3]

#### **Reduktion der Anzahl der Prüflinge**

Durch die Reduktion der Anzahl der zu prüfenden Teile erreicht man zwar auch eine Versuchszeitverkürzung, es muss dann jedoch die Qualität der Ergebnisse in Frage gestellt werden. [7]

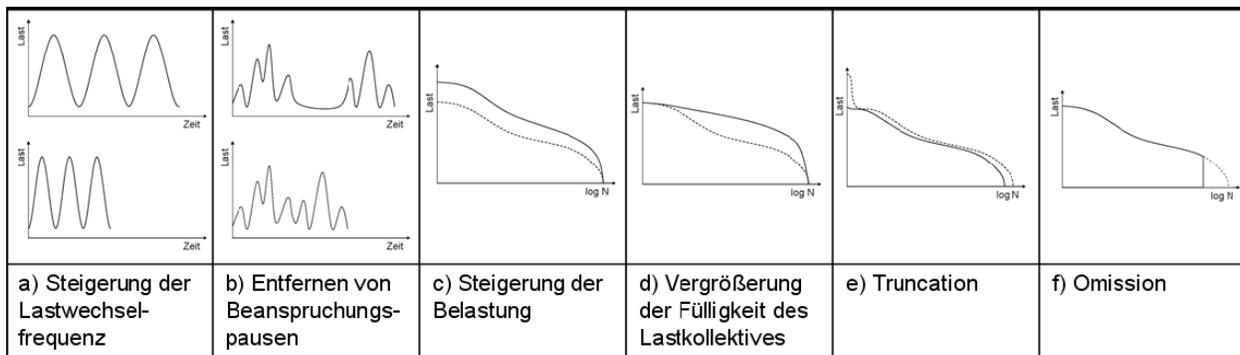


Abbildung 3.19 Maßnahmen zur Versuchszeitverkürzung von [7]

#### **a.) Erhöhung der Lastwechselfrequenz**

Wird eine Beanspruchungs-Zeit-Funktion kollektiviert, also eine Häufigkeitsverteilung der Amplituden erstellt, so gehen Informationen über die Belastungsform und die Reihenfolge der auftretenden Lastwechselamplituden verloren. Das Prüfsignal des Belastungskollektivs kann mit beliebiger Frequenz geprüft werden. Welche Frequenz sinnvoll ist, muss vor dem Versuch spezifiziert werden. [7]

#### **b.) Entfernen von Haltezeiten**

Haltezeiten der Beanspruchungs-Zeit-Funktion können entfernt werden, wenn das Prüfsignal ohne Klassierung nachgefahren wird. [7]

### **c.) Einführen von Laststeigerungsstufen**

Belastungsamplituden können proportional vergrößert werden um eine Versuchszeitverkürzung zu erreichen. Das bedeutet es werden weniger Lastzyklen bis zum Bauteilversagen im Versuch benötigt. Dieses Verfahren ist jedoch beschränkt durch die Möglichkeiten der Prüftechnik und den sich einstellenden Schädigungsmechanismus. Es besteht bei zu hohen Belastungsamplituden die Gefahr der plastischen Verformung des Prüflings und der Verlagerung der Bruchstelle durch veränderte Spannungsverteilung. Außerdem kann der positive Effekt fertigungsbedingter Eigenspannungen durch diese Spannungsverlagerung verloren gehen und zur falschen Beurteilung der Schwingfestigkeit führen. [7]

### **d.) Erhöhung der Fülligkeit des Lastkollektivs**

Die Form des Kollektivs hat großen Einfluss auf die Versagensschwingspielzahl. Bei einer Erhöhung der Fülligkeit der Kollektivform steigt die Anzahl der großen Belastungsamplituden, während die Gesamtzahl der Schwingspiele gleich bleibt. Dieses Vorgehen hat Einfluss auf die Gesamtschädigung des Bauteils, die Vergleichbarkeit mit dem realen Belastungszustand sinkt und die Gefahr der Spannungsverlagerung bleibt bestehen. [7]

### **e.) Truncation**

Truncation bedeutet das Weglassen von einzelnen, seltenen Lastspitzen der Beanspruchungs-Zeit-Funktion. Es muss sich dabei um Lastspitzen handeln, die nicht betriebliche Sonderereignisse sind und die das charakteristische Belastungsniveau der Beanspruchungs-Zeit-Funktion nicht verändern. Das Weglassen dieser Spitzen ist sinnvoll, da sie sonst zur Plastifizierung des Bauteils führen können. Das Einbringen von Druckeigenspannungen durch Lastspitzen kann sich je nach Beanspruchungssituation positiv oder negativ auf die Bauteillebensdauer auswirken. [7]

### **f.) Omission**

Unter Omission versteht man das Weglassen von Lastwechseln des Kollektivs mit sehr kleiner Amplitude und verkürzt die Versuchszeit beziehungsweise die Gesamtzyklenzahl wesentlich. Reale Beanspruchungs-Zeit-Funktionen weisen immer eine Vielzahl sehr kleiner Lastwechsel auf, die weit unter dem Niveau der Dauerfestigkeit liegen und somit keinen relevanten Einfluss auf die Schädigung haben. Der Omissionsparameter, auch relativer Threshold genannt, ist ein Grenzwert der Lastwechselamplitude, bis zu welcher die Reduktion stattfindet. [7]

Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass sich eine äquivalente Lebensdauer zwischen dem realen und dem gekürzten Kollektiv einstellt. Der Omissionsparameter ist abhängig vom Material, der Formzahl, der Kollektivform und dem Einfluss der Mittellast. [7]

Die Festlegung dieses Wertes ist nicht genormt, allgemein wird aber bei Stahlbauteilen angenommen, dass mittelspannungskorrigierte Lastwechsel unterhalb der halben

Dauerfestigkeit entfernt werden können. Es muss allerdings gewährleistet sein, dass keine Korrosion auftritt. Es ist auch möglich den Omissionsparameter experimentell zu bestimmen, allerdings ist dies mit großem Aufwand verbunden. [7]

Nachteile der Omission sind der Teilverlust von Reihenfolgeeffekten, Frequenz und Kollektivform. Kleine Schwingspiele können außerdem bei hoher Mittelspannung zu erheblicher Schädigung führen und es muss bei der Omission explizit darauf geachtet werden, dass diese nicht eliminiert werden. [7]

Verschiedene Verfahren zur Anwendung der Omission sind in [7] erwähnt und in der dort genannten Literatur genauer beschrieben.

## **4 Theorie - Nachbehandlungsverfahren von Schweißnähten**

---

Bei geschweißten Bauteilen sind die Dauerfestigkeit und der Versagensmodus stark von der Schweißnahtgeometrie und dem Eigenspannungszustand abhängig. Mittels Nahtnachbehandlungsverfahren kann das Potenzial von hochfesten Stahlverbindungen noch besser ausgenutzt und die Lebensdauer verlängert werden [11]. Zu den bei Siemens untersuchten und angewandten Nachbehandlungsverfahren des Schweißnahtüberganges bei Strukturbauteilen zählen Kugelstrahlen, Reinigungsstrahlen, Verschleifen und HFMI.

### **4.1 Kugelstrahlen**

Beim Kugelstrahlen werden Strahlmittelkörner mit sehr hoher Geschwindigkeit auf die zu bearbeitende Oberfläche geschleudert. Dadurch werden Fehlstellen ins Atomgitter eingebracht und das Bauteilvolumen vergrößert. Die dabei entstehenden Druckeigenspannungen wirken den Zugspannungen eines Bauteils entgegen, verlängern so die Lebensdauer und erhöhen die Korrosionsbeständigkeit. [12]

### **4.2 Reinigungsstrahlen**

Reinigungsstrahlen ist eine Art des Kugelstrahlens, die zum Entfernen von störenden Schichten und Partikeln genutzt wird. Als Strahlmittelkörner werden Glas oder Korund eingesetzt. Das Verfahren verbessert die Oberfläche und erhöht die Korrosionsbeständigkeit eines Bauteils. [13]

### **4.3 Verschleifen**

Beim Schleifen handelt es sich um ein spanendes Fertigungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide. Beim Verschleifen von Nahtübergängen werden die Rauhtiefe reduziert, Anlauffarben entfernt und die Oberfläche verbessert bis das gewünschte Schliffbild erreicht ist. [14]

#### 4.4 HFMI (high frequency mechanical impact)

Durch Nachbehandlung mittels HFMI, auch Hochfrequenzhämmern genannt, wird der Nahtübergangsradius vergrößert und es werden Druckeigenspannungen im Nahtübergang eingebracht, die die Ermüdungsfestigkeit von geschweißten Strukturen erhöhen sollen. [15]

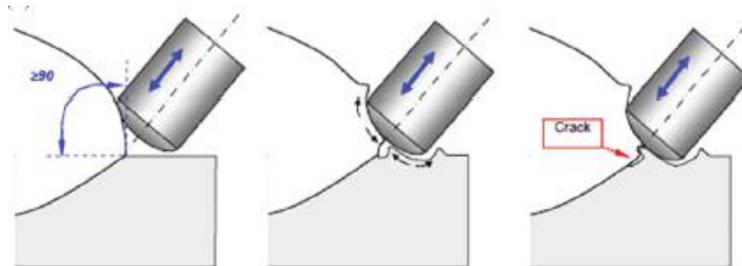


Abbildung 4.1 Einbringen von Druckeigenspannungen durch HFMI, Entstehen von rissähnlichen Strukturen, [15]

Der Nachteil dieses Verfahrens ist das Einbringen von rissähnlichen Strukturen. Diese erschweren das Identifizieren eines tatsächlichen Anrisses in der Schwingfestigkeitsprüfung und im realen Betrieb. Laut den Ergebnissen der Studie [11] in Abschnitt 4.5 ist die Anwendung des HFMI-Verfahrens zur Nachbehandlung von Schweißnähten nicht empfehlenswert. Schon nach wenigen Lastwechseln besteht die Möglichkeit einer Änderung des Eigenspannungszustandes, welcher sich negativ auf die erhöhte Festigkeit auswirken kann. Da Drehgestelle im Betrieb Belastungen mit variabler Amplitude über einen langen Zeitraum unterliegen, wird dieses Verfahren bei Siemens nicht mehr zum Einsatz kommen.

#### 4.5 Auszug aus der Studie zum HFMI-Verfahren [11]

An der Montan Universität Leoben wurde zum Nahtnachbehandlungsverfahren HFMI eine Studie [11] durchgeführt. In dieser Studie geht es um das Verhalten von Kleinproben in Form von Längssteifen mit unbehandelten Abbindenähten verglichen mit HFMI nachbehandelten Abbindenähten.

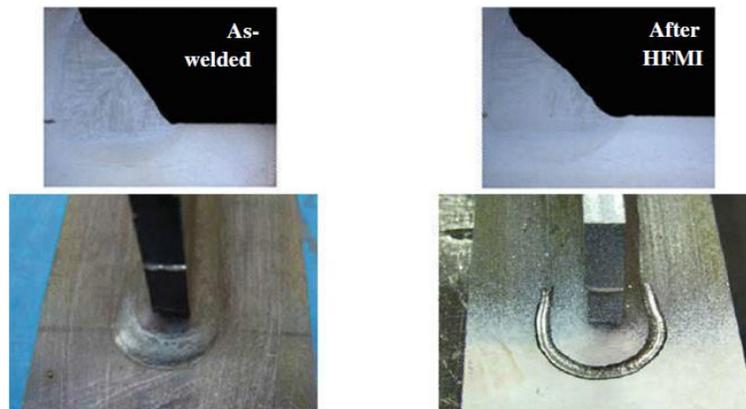


Abbildung 4.2 links: Nahtübergang wie geschweißt, rechts: Nahtübergang HFMI nachbehandelt, [15]

### 4.5.1 Versuchsspezifikation [11]

Die Tests wurden mit konstanter Amplitudenbelastung (CAL, constant amplitude loading) oder variabler (VAL, variable amplitude loading) Amplitudenbelastung bei einem Spannungsverhältnis von  $R=0,1$  und  $R=-1,0$  durchgeführt. Die Proben waren aus S355 Stahl und aus hochfestem S700 Stahl. Das Prüfsignal wurde per Zufallsprinzip mit der Resonanzprüfmaschine am Prüfstand generiert. Das so erzeugte Blocksignal besteht aus kurzen Lastblöcken mit jeweils 1000 Lastzyklen mit einer Gesamtzyklenzahl von  $2 \cdot 10^5$ .

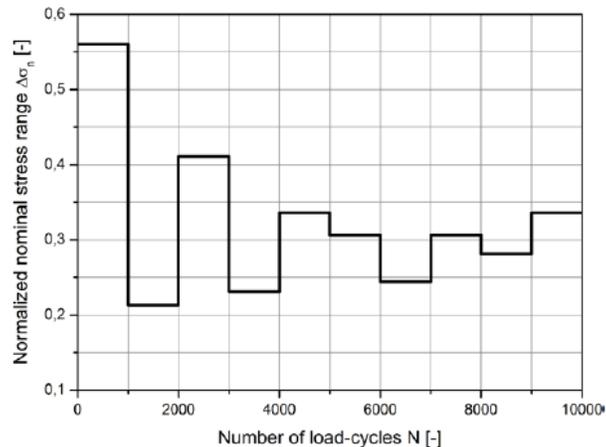


Abbildung 4.3 Auszug aus dem Blocksignal für S355 VAL Tests, [11]

### 4.5.2 Ermüdungsfestigkeitstests mit CAL und VAL [11]

Bei Versuchen mit konstanter Amplitudenbelastung ergab sich ein signifikanter Nutzen (Faktor 3,5) aus der HFMI-Behandlung. Bei Versuchen mit variabler Amplitudenbelastung hingegen reduzierte sich der Nutzen (Faktor 1,5) der erhöhten Ermüdungsfestigkeit erheblich, wie in Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5 ersichtlich. Aus dieser Studie folgt daher, dass die Faktoren für die erhöhte Ermüdungsfestigkeit von HFMI nachbehandelten, geschweißten Strukturbauteilen unter konstanter Amplitudenbelastung für die Ermüdungsfestigkeitsbewertung zulässig sind. Hingegen ist der Nutzen bei variabler Amplitudenbelastung zu gering und es besteht die Gefahr einer nicht-konservativen Bewertung und somit eines nicht-konservativen Komponentendesigns.

#### 4 Theorie - Nachbehandlungsverfahren von Schweißnähten

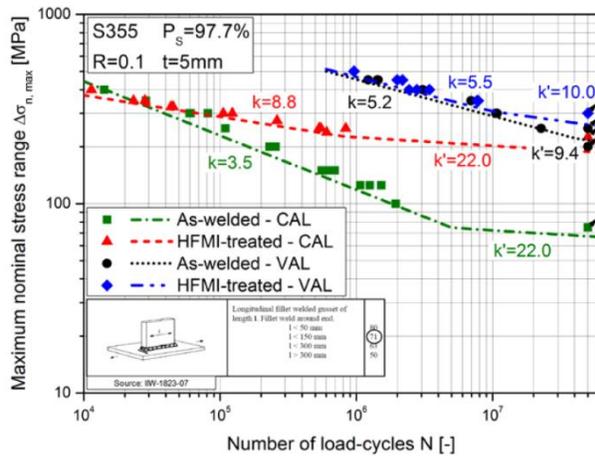


Abbildung 4.4 Nominale Wöhlerlinie, S355 Stahl, Ermüdungsfestigkeitstests, [11]

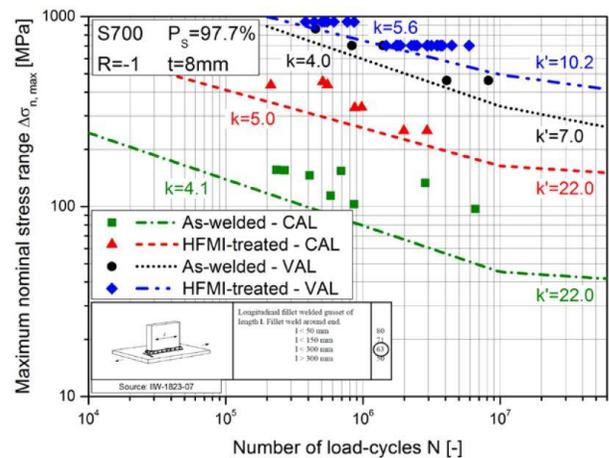


Abbildung 4.5 Nominale Wöhlerlinie, S700 Stahl, Ermüdungsfestigkeitstests, [11]

#### 4.5.3 Spezifizieren der Schadenssumme D [11]

Für eine ordnungsgemäße Ermüdungsfestigkeitsbewertung wurde die Bewertung der anwendbaren Schadenssummen betrachtet. Bei S700 Proben ohne Nachbehandlung und einer spezifizierten Schadenssumme von  $D=1.0$  liegen die berechneten Spannungswerte mit VAL über den experimentell ermittelten Werten mit CAL und über der genormten Lebensdauerlinie der IIW. Das führt zu einer konservativen Bewertung und ist laut Studie [11] gut anwendbar, siehe Abbildung 4.6.

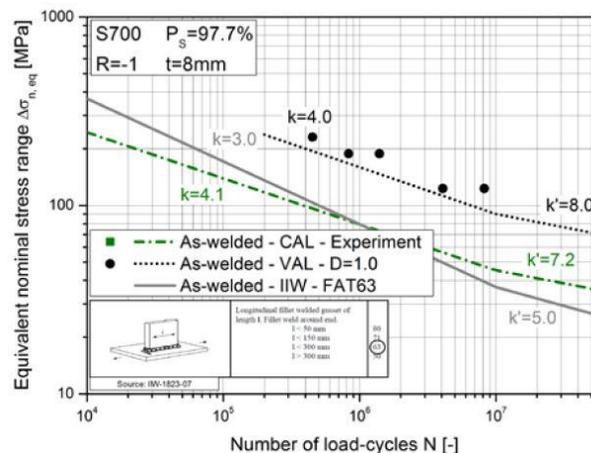


Abbildung 4.6 Äquivalentes nominales Spannungsniveau für S700 Proben ohne Nachbehandlung,  $D=1.0$ , [11]

Sind die S700 Proben jedoch HFMI behandelt worden, so liegen die mit VAL errechneten Spannungswerte mit der spezifizierten Schadenssumme  $D=1.0$  zwar über jenen der IIW aber unter den mit CAL experimentell ermittelten Werten, siehe Abbildung 4.7. Erst bei einer Schadenssumme von  $D=0.2$  liegen die mit VAL ermittelten Werte wieder über den experimentell ermittelten Werten und sind damit konservativ bewertet, siehe Abbildung 4.8.

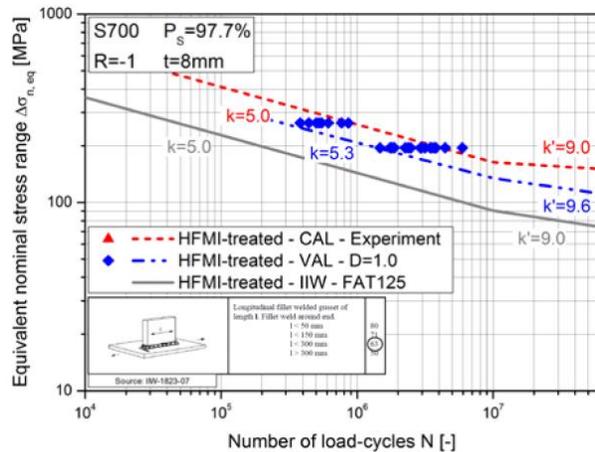


Abbildung 4.7 Äquivalentes nominales Spannungsniveau für S700 Proben HFMI behandelt,  $D=1.0$ , [11]

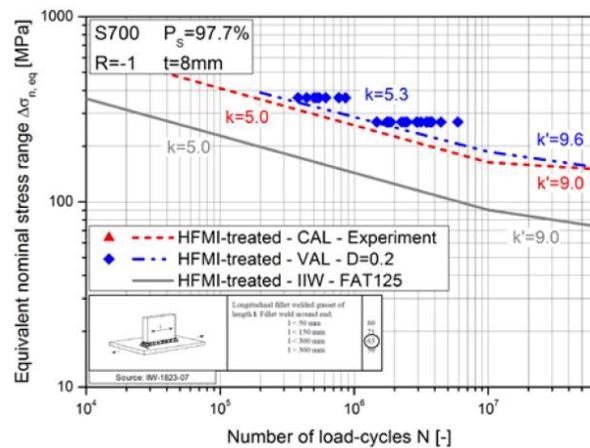


Abbildung 4.8 Äquivalentes nominales Spannungsniveau für S700 Proben HFMI behandelt,  $D=0.2$ , [11]

Laut aktuellem technischen Standard wird zumeist auf experimentelle Werte mit Schadenssummen von  $D=1.0$  und  $D=0.5$  zurückgegriffen. Damit sind die HFMI behandelten S700 Proben nicht konservativ bewertet und können zu einer nicht konservativen Dimensionierung führen. Die Studie schlägt daher vor, für Leichtbaukonstruktionen aus S700 Stahl mit HFMI-Nachbehandlung, eine spezifizierte Schadenssumme von  $D=0.3$  zu wählen und bei schwankendem Mittelspannungsniveau sogar  $D=0.2$ .

Zusammenfassend besagt die Studie, dass der Vorteil der HFMI-Behandlung unter VAL signifikant gegenüber CAL sowohl bei Baustahl als auch bei hochfesten Stahlproben vermindert ist, aufgrund der Relaxation des Druckrestspannungszustandes an der Schweißnaht während der zyklischen Belastung. [11]

## 5 Erkenntnisse aus vorhandenen Versuchen

---

Zur Ermittlung eines Beanspruchungs-Zeit-Verlaufes werden Versuchsdaten aus bereits durchgeführten Versuchen benötigt. Zum einen stellt die Firma Siemens dazu Daten aus diversen Kleinprobenversuchen mit Alform 700 M zur Verfügung und zum anderen Daten aus Rahmenschwingversuchen.

### 5.1 Was ist eine Kleinprobe?

Eine Kleinprobe dient zur Prüfung eines Strukturdetails einer komplexen Konstruktion. Da es oft aus Kostengründen und aus Komplexitätsgründen nicht möglich ist, durch die Schwingprüfung alle Einflüsse auf eine Konstruktion darzustellen und zu ermitteln, werden dafür Kleinproben angefertigt. Eine Kleinprobe stellt das gewünschte Strukturdetail einer Konstruktion vereinfacht dar. Es kann sich dabei um Grundmaterialproben oder um geschweißte Proben handeln. Die allgemeine Beanspruchungssituation für dieses Detail muss bekannt sein.

Wesentliche Unterschiede zwischen	
Kleinprobenversuch	Bauteil-Schwingversuch
Einachsigkeit	Mehrachsigkeit
in der Regel Einstufenkollektiv	in der Regel Betriebskollektiv
einfacher Beanspruchungszustand (reine(r) Zug, Druck oder Biegung)	überlagerte Beanspruchung aus Zug/Druck und Biegung
wenige Einflussparameter zwischen Rechnung und Versuch (Form der Wöhlerlinie, FAT-Klasse)	viele Einflussparameter zwischen Rechnung und Versuch aufgrund der Komplexität

Tabelle 5.1 Unterschiede Kleinprobenversuch – Schwingversuch

### 5.2 Warum kommt Alform 700 M zum Einsatz?

Alform 700 M [16] wird von der Firma voestalpine Grobblech GmbH hergestellt. Es handelt sich dabei um einen hochfesten Feinkornbaustahl, der thermomechanisch gewalzt und beschleunigt gekühlt wurde. Er ist sehr gut schweißbar aufgrund des niedrigen Kohlenstoffgehalts und des niedrigen Kohlenstoffäquivalents und muss nicht oder nur geringfügig vorgewärmt werden. Außerdem ist er sehr gut kaltumformbar und es sind geringe Kantradien möglich. Die hohe Festigkeit des Stahls spielt bei Konstruktionen in Leichtbauweise, wie zum Beispiel in der Fahrzeugindustrie, eine große Rolle. Die mechanischen Eigenschaften, die für eine Blechdicke von 10 mm mindestens gegeben sein müssen, sind Tabelle 5.2 zu entnehmen. [16]

Stahlsorten	Blechedicke mm	Dehngrenze Rp0,2 mind. MPa	Zugfestigkeit <sup>1)</sup> Rm MPa	Bruchdehnung <sup>1)</sup> L <sub>0</sub> = 5,65 √ S <sub>0</sub> mind., %	Kerbschlagarbeit <sup>2)</sup> mind. J
alform plate 620 M	8 ≤ 50	620	700 - 890	15	40
alform plate 700 M	8 ≤ 15	700	770 - 1.050	10	40
	> 15 ≤ 50	680	770 - 1.050	12	40
	> 50 ≤ 60	650	770 - 1.050	12	30

Tabelle 5.2 Mechanische Eigenschaften im Lieferzustand laut Datenblatt voestalpine, [16]

Das aktuelle Werkstoffdatenblatt der Kleinproben aus Alform 700 M befindet sich im Anhang unter 16.1.

### 5.3 Kleinprobenversuchsserien mit Alform 700 M

Bereits 2013 ließ Siemens Kleinprobenversuche aus Alform 700 M vom Institut für Betriebsfestigkeit und Schienenfahrzeugtechnik der TU Graz durchführen. Es wurden sowohl Grundmaterialproben als auch Proben, die als Stumpfstoße oder Kreuzstoße mit verschiedenen Schweißnahttypen ausgeführt waren, zur näheren Untersuchung herangezogen.

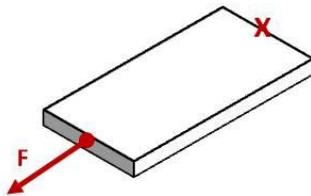


Abbildung 5.1 Grundmaterialprobe, einfaches Blech (symbolisch)

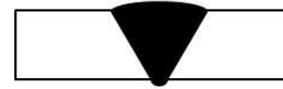


Abbildung 5.2 Stumpfstoß mit V-Naht (symbolisch)

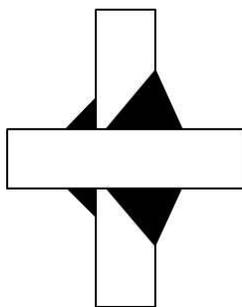


Abbildung 5.3 doppelseitiger HY-Kreuzstoß mit Gegenlage (mit Reststeg) (symbolisch)

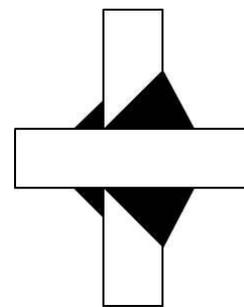


Abbildung 5.4 doppelseitiger HV-Kreuzstoß mit Gegenlage (durchgeschweißter Steg) (symbolisch)

Die Grundmaterialproben unterscheiden sich durch deren Bearbeitungsverfahren, wie Laserzuschneid, autogener Brennschnitt oder mechanische Bearbeitung. Die geschweißten Kleinproben unterscheiden sich nach dem Schweißnahttyp und dadurch, ob ein Nahtnachbehandlungsverfahren angewandt wurde oder nicht. Bei den

Nachbehandlungsverfahren, siehe auch Kapitel 4, handelte es sich um Kugelstrahlen, Reinigungsstrahlen, Burr Grinding (Verschleifen der Nahtübergänge) oder HFMI. [17]

Das Ergebnis dieser Versuchsreihen ist in Abbildung 5.5 und in Tabelle 5.3 ersichtlich.

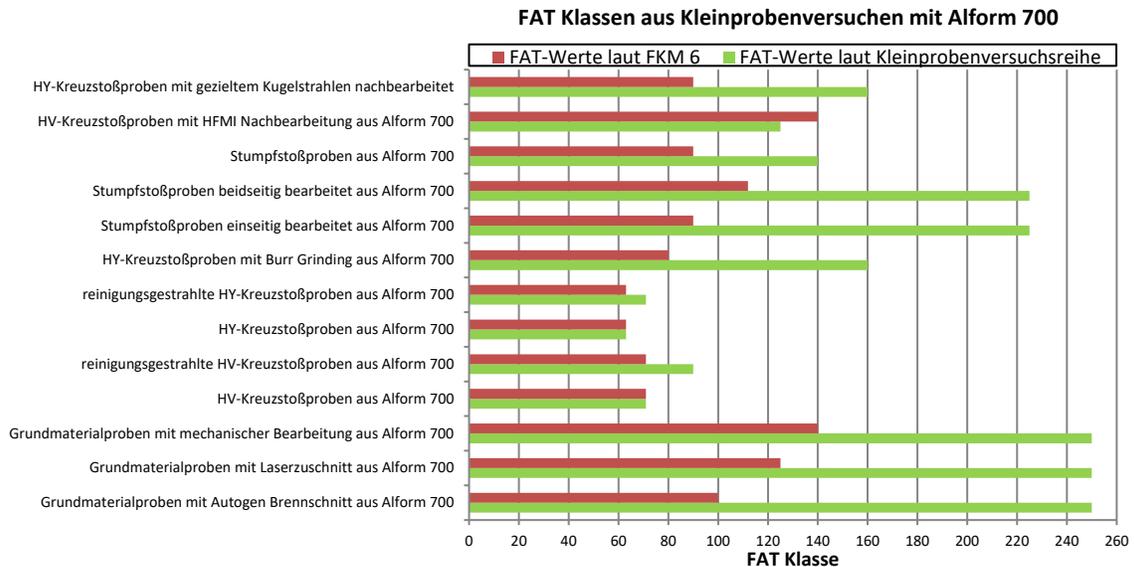


Abbildung 5.5 FAT Klassen aus Kleinprobenversuchen mit Alform 700 M im Vergleich mit Normwerten, [17]

Bei der Auswertung der Versuchsdaten kann man erkennen, dass die FAT-Werte aus der FKM 6 [6], welche für S355 Stahl gelten, entweder gleich hoch oder aber niedriger sind, als die aus den Versuchen erhaltenen FAT-Werte. Das zeigt, dass Strukturbauteile aus hochfestem Stahl höheren Beanspruchungen ausgesetzt werden können und das wird hier durch die gewonnen Zahlenwerte belegt.

Material	Probenform	Schweißnaht	Bearbeitungsverfahren/ Nahtnachbehandlungsverfahren	Kleinprobenversuche		FKM 6	
				k	FAT	k	FAT
Alform 700 M	Grundmaterial	keine	Autogen Brennschnitt	7	250	3	100
	Grundmaterial	keine	Laserzuschnitt	6	250	3	125
	Grundmaterial	keine	Mechanische Bearbeitung	6	250	3	140
	Kreuzstoß	HV-Naht (4x)	keine Nachbearbeitung	5	71	3	71
	Kreuzstoß	HV-Naht (4x)	reinigungsgestrahlt	6	90	3	71
	Kreuzstoß	HY-Naht (4x)	keine Nachbearbeitung	3	63	3	63
	Kreuzstoß	HY-Naht(4x)	reinigungsgestrahlt	4	71	3	63
	Kreuzstoß	HY-Naht (4x)	Burr Grinding (Verschleifen)	6	160	3	80
	Stumpfstoß	V-Naht (1x)	Einseitig bearbeitet	8	225	3	90
	Stumpfstoß	V-Naht (1x)	Beidseitig bearbeitet	7	225	3	112
	<b>Stumpfstoß</b>	<b>V-Naht (1x)</b>	<b>keine Nachbearbeitung</b>	<b>6</b>	<b>140</b>	<b>3</b>	<b>90</b>
	Kreuzstoß	HV-Naht (4x)	HFMI	5	125	5	140
	Kreuzstoß	HY-Naht (4x)	kugelgestrahlt	6	160	3	90

Tabelle 5.3 Ergebnisse: Wöhlerliniensteigung k, FAT-Klassen der Kleinprobenversuche mit Alform 700 M, [17]

In der FKM 6 [6] werden Schweißnähte standardmäßig mit einer Wöhlerliniensteigung von  $k=3$  definiert. Die Steigung, die sich aus den Versuchen abschätzen lässt, ist jedoch deutlich größer.

In Abbildung 5.6 ist beispielhaft ein Wöhlerversuch für einen Stumpfstoß ohne Nahtnachbehandlung [18] abgebildet. Die drei parallelen, schwarzen Linien stellen die Überlebenswahrscheinlichkeit der Proben für 50%, 90% und 97,7% laut Zugversuch dar. Der Auslegungswert von  $k=6$  (rote Linie in Abbildung 5.6 und markiert in Tabelle 5.3) führt zu einer Wöhlerlinie, die parallel zu den Werten aus dem Versuch verläuft. Im Gegensatz dazu weicht die genormte Wöhlerlinie mit Steigung  $k=3$  für geschweißte Bauteile, laut FKM 6 [6], (blaue Linie in Abbildung 5.6) stark vom realen Versuchsverlauf ab. Diese Ergebnisse weisen ein ähnliches Verhalten auf wie die zuvor angeführte Studie (Abschnitt 4.5) und besagen, dass die Normwerte von Baustahl zu konservativ sind, wenn hochfester Stahl zum Einsatz kommt. Besonders ersichtlich ist dieses Verhalten bei einer Lastzyklenzahl größer  $1 \cdot 10^6$ . Alle Proben, die einer Zyklenzahl von  $1 \cdot 10^7$  standhielten, sind als Durchläufer klassiert.

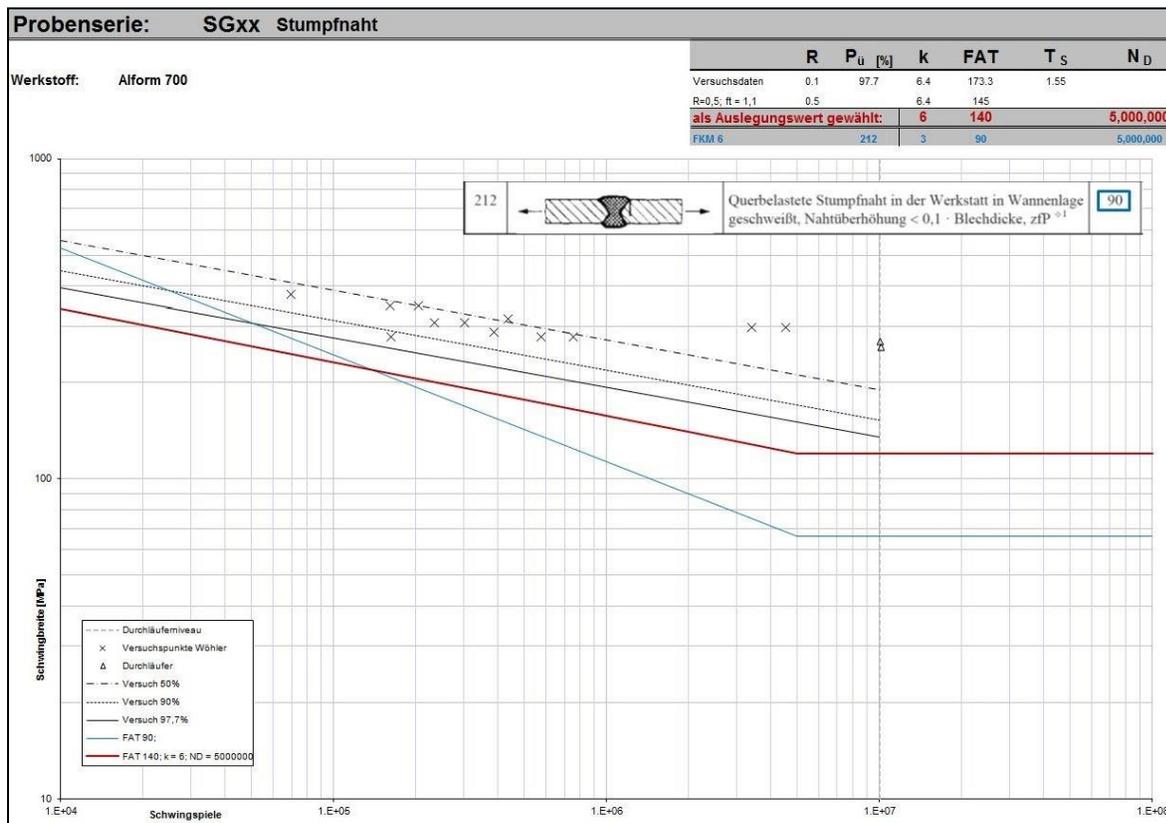


Abbildung 5.6 Kleinprobenversuche mit Alform 700M, Probe als Stumpfstoß ohne Nachbehandlung ausgeführt, [18]

In den vorhandenen Kleinprobenversuchsreihen mit hochfestem Stahl sind bisher noch keine Versuche an Nahtenden erfolgt.

## 5.4 Rahmenschwingversuch

Die nun betrachteten Rahmenschwingversuche wurden, laut den Spezifikationen [19] und [20], bis zum Anriss beziehungsweise bis zum vollständigen Versagen der Struktur durchgeführt. Risse entstanden im Grundmaterial und am Schweißnahtabbinder am Untergurt des Langträgers.

### 5.4.1 ICx Schwingversuch

Anhand des Schwingversuchs des ICx Triebdrehgestellrahmens, der aus S355 Stahl gefertigt wurde, lässt sich die Problematik anschaulich darstellen. Hier befindet sich der betroffene Abbinder an der Radsatzführungskonsole, welche in Abbildung 5.7 rot markiert ist, am Untergurt des Langträgers. Der Rahmen hat in der Betriebsfestigkeitsprüfung die laut Norm vorgeschriebene Lebensdauer erreicht und versagte erst beim Aufbringen von Überlasten. In Abbildung 5.8 erkennt man den ersten Anriss am Nahtübergang des Abbinders. Dieser Ermüdungsriss führte letztendlich zum vollständigen Versagen des Bauteils.

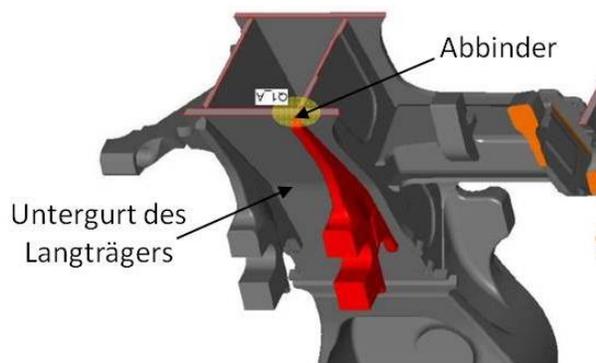


Abbildung 5.7 Kritische Stelle - Schweißnahtabbinder an der Radsatzführungskonsole am Untergurt des ICx, [19]



Abbildung 5.8 Anriss beim Schwingversuch am ICx Rahmen, [19]

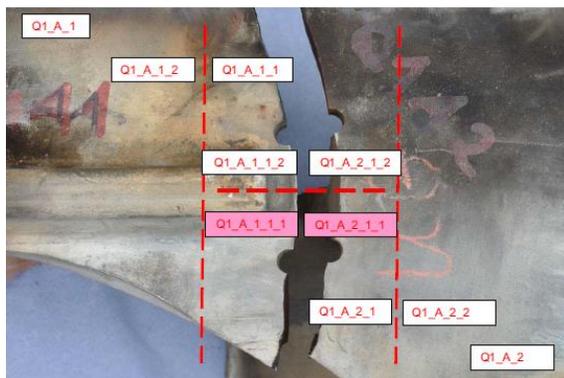


Abbildung 5.9 Durchführung des Schwingversuches bis zum Durchbruch, [19]

### 5.4.2 Schwingversuch des SF100 Erprobungsträgers

Ein weiteres Beispiel bietet der Ermüdungsversuch des SF100 Erprobungsträgers [20], der aus dem hochfesten Stahl Alform 700 M gefertigt wurde. Der Erprobungsträger bestand die erforderlichen Laststufen 1 bis 3 zur Absicherung der Ermüdungssicherheit und den darauffolgenden Zusatzversuch. Der Anriss am Untergurt des Langträgers nahe dem Abbinder des Primärfedertopfes (siehe Abbildung 5.10 und Abbildung 5.11) entstand erst bei einer Laststeigerung von 210 % in Bezug auf Laststufe 1 → Laststufe 5. Die Laststufe 5 diente der Risseinleitung. Nach erfolgreicher Risseinleitung wurde die Höhe der Last auf dieselbe wie in Laststufe 1 reduziert → Laststufe 6 und der Rissfortschritt beobachtet. Ab einer definierten Risslänge wurde mittels Ausbohren der Risspitze versucht den Riss zu stoppen. Trotz der Gegenmaßnahme wurde der weitere Rissfortschritt beobachtet (siehe Abbildung 5.12) und der Versuch wurde beendet. [20]

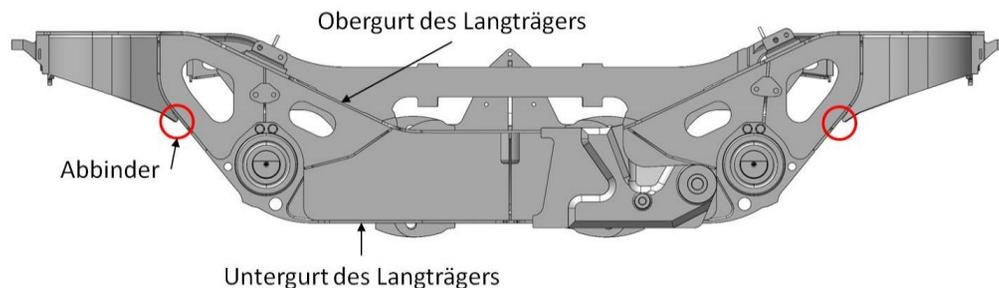


Abbildung 5.10 Seitenansicht des SF100 Laufdrehgestellrahmens mit kritischen Orten: Abbinder Primärfedertopf Langträgeruntergurt, [20]

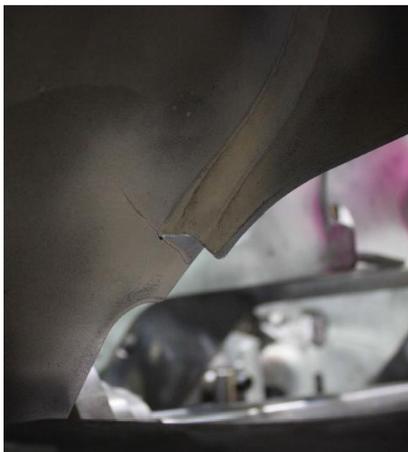


Abbildung 5.11 Anriss nahe dem Abbinder des Primärfedertopfes, [20]



Abbildung 5.12 Finaler Riss als Folge der Schwingprüfung, [20]

Im Gegensatz zum Streckenversuch können beim Schwingversuch am Prüfstand nicht alle tatsächlich wirkenden Kräfte aufgebracht werden. Im Schwingversuch reduziert man die Lastfälle auf definierte Koppelstellen. Es kann aus Platzgründen und aus Kostengründen nur

eine bestimmte Anzahl an Zylindern am Prüfstand montiert werden. Eine von der Realität abweichende Lastsituation wird somit in Kauf genommen und die spezifizierte Prüflast auf ihre Vergleichbarkeit geprüft.

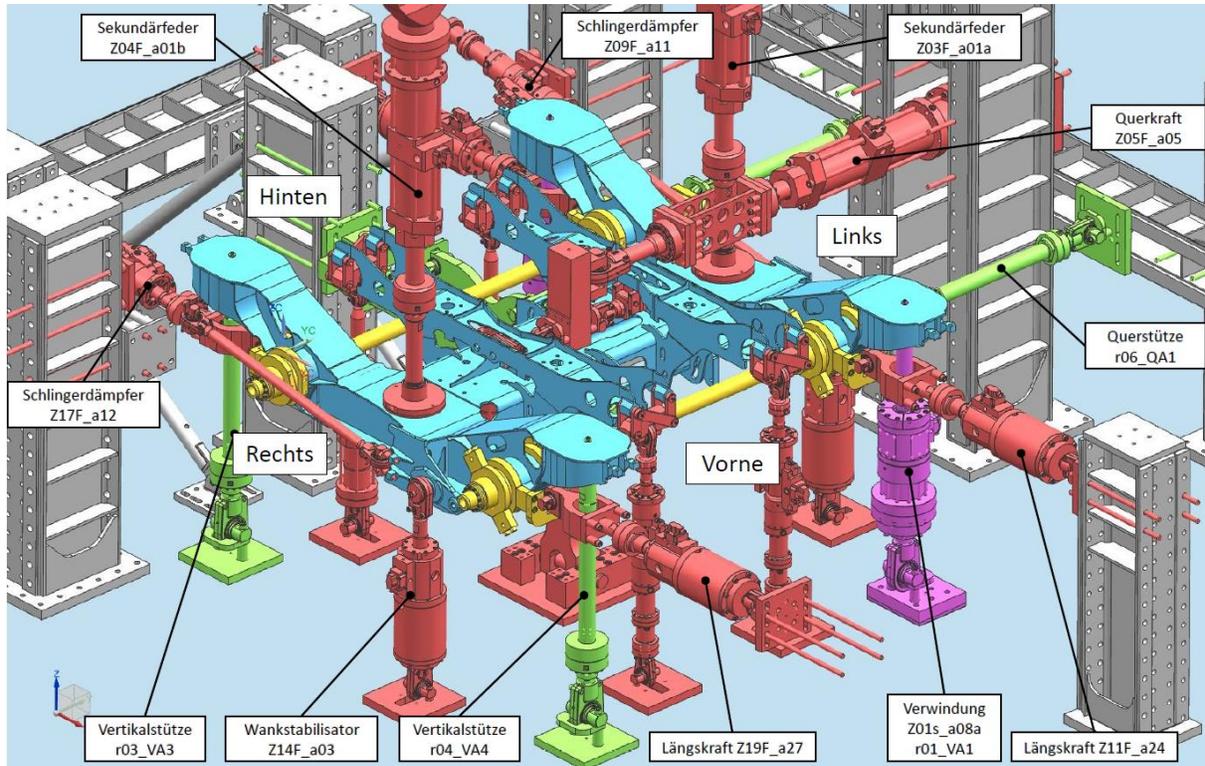


Abbildung 5.13 Prüfstands Aufbau des SF100 Erprobungsträgers; Zylinder: Aktionskräfte (rot), Verwindung (magenta), Reaktionskräfte (grün), [21]

Die Abbinde am Untergurt des Langträgers erfahren durch die Montage des Drehgestells und die Kräfte, die über die Anbauteile wirken, eine Zugvorspannung, wie in Abbildung 5.14 dargestellt. Außerdem haben festigkeitsmindernde Faktoren, wie der Kerbeinfluss der Schweißnaht und des Nahtüberganges, das veränderte Gefüge in der Wärmeinflusszone der Schweißnaht oder auch die Steifigkeit der Struktur, Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit.

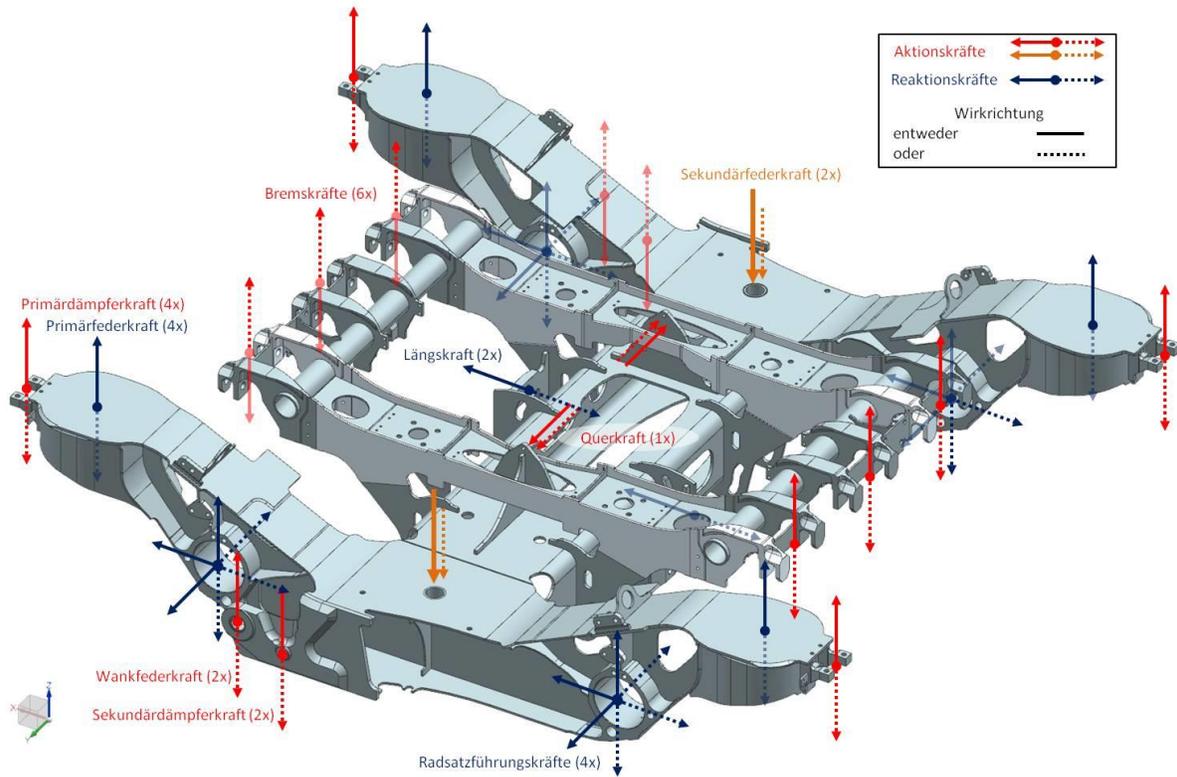


Abbildung 5.14 Kräftesituation am SF100L (endgültige Konstruktion), Sekundärfederkraft dominiert im Betrieb (orange), [2]

Aus diesen Gründen unterzieht die Firma Siemens die kritische Stelle „Nahtende am Untergurt des Langträgers“ einer Ermüdungsversuchsreihe. Dafür wird im Rahmen dieser Masterarbeit ein standardisierter Beanspruchungs-Zeit-Verlauf auf Basis der Daten aus dem Streckenversuch des SF100 Laufdrehgestells erstellt.

## 6 Streckenversuch

Der Streckenversuch ist notwendig, um in der Auslegung getroffene Annahmen zu verifizieren, um kritische Stellen zu erkennen und Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Schienenfahrzeuge müssen im Fahrgastbetrieb den Anforderungen der Kunden entsprechen und die Sicherheit von Personen und Umwelt muss gewährleistet sein.

Der Streckenversuch von Drehgestellen findet entweder auf realen Referenzstrecken oder einem speziell dafür vorgesehenem Testgelände statt. Die Messstrecken müssen dabei den Anforderungen der Anwendungsempfehlungen nach EN 13749 [22] entsprechen. In Tabelle 6.1 ist aufgelistet, wie ein Streckenversuch bei Siemens aufgebaut ist und was bei der Durchführung und Auswertung beachtet werden muss.

<b>STRECKENVERSUCH nach DIN EN 13749</b>	
<b>MESSAUFBAU</b>	<b>MESSUNG</b>
Kalibrierung	Nullpunkt festlegen
Messstellen	Wegmessung
Koordinatensystem	Dehnungsmessung
Vorrichtungen	Beschleunigungsmessung
Datenerfassung	Referenzmessung
Messtechnik und -ausrüstung	Lagebestimmung der Wegmessstellen
Verkabelung	Datenerfassung und Plausibilitätsprüfung
Messkette	Messung der Radaufstandskräfte
	Radunrundheit
<b>MESSAUFNEHMER</b>	<b>DOKUMENTATION</b>
Signale aus der Fahrzeugsteuerung	Fahrzeugtyp
Fahrzeuggeschwindigkeit	Messstellenplan
Motormoment	Messfahrtenplan mit gemessener Strecke
Fahrzeugposition	Bezeichnung der Messungen
Systemdruck	gemessene Daten
Beschleunigung	Zubehörbauteile
Drehrate	Belastungsbedingungen und Grenzwerte
Wegmessung	Abtastrate und Filterfrequenzen
Kraft- und Momentenmessung	Messzeitraum
Dehnung	Witterung
Temperatur	Bewertungsmethodik
Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur	Ermüdungsfestigkeitsnachweis

Tabelle 6.1 eines Streckenversuches laut DIN EN 13749 [22] und [23]

Streckenversuche werden für alle Arten von Schienenfahrzeugen durchgeführt. Am Siemens Standort Eggenberg sind Messdaten für folgende Fahrwerkstypen vorhanden, wobei diese nach Haltestellenabstand und Fahrgeschwindigkeit unterschieden werden:

- I Fernverkehrszüge inklusive Hochgeschwindigkeitszüge
- II Lokomotiven
- III Straßenbahnen
- IV Nahverkehrszüge wie z.B. U-Bahnen, S-Bahnen

Die genaue Auflistung und die Erklärung der Projektbezeichnungen befinden sich im Anhang 16.6 in Tabelle 16.1.

Im Folgenden werden die Messdaten verschiedener Fahrwerkstypen, an denen Abbinder am Untergurt des Langträgers bei der Testfahrt mittels Dehnmessstreifen (DMS) erfasst wurden, untereinander verglichen und ausgewertet, wie in Abbildung 6.1 dargestellt wird.

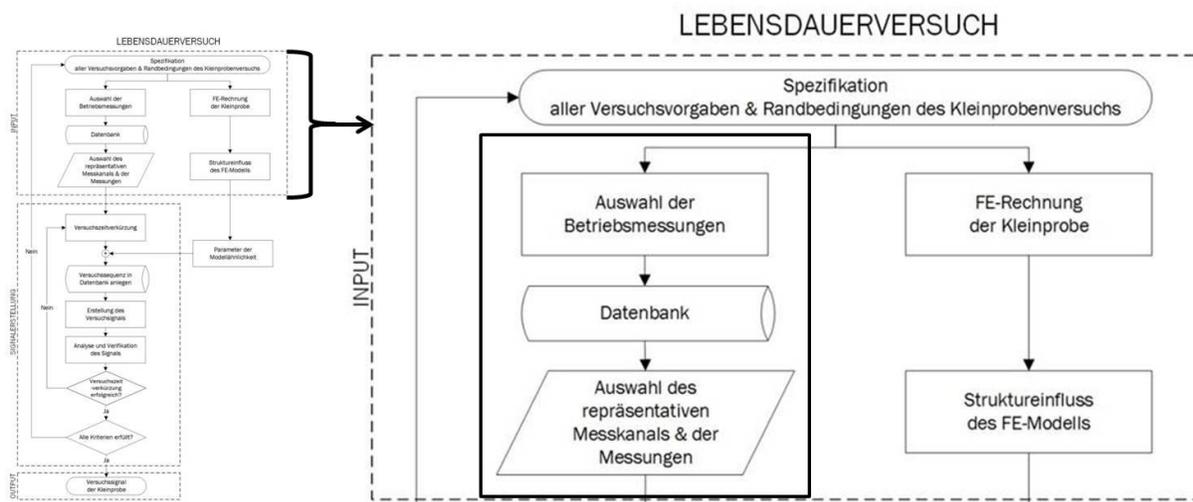


Abbildung 6.1 Wahl des Streckenversuches, bezogen auf Abbildung 2.3

## 6.1 Datenvergleich verschiedener Streckenversuche

Die in dem Streckenversuch gemessenen Dehnungen der linearen DMS und der DMS-Rosetten wurden mit dem Hooke'schen Gesetz beziehungsweise über den ebenen Spannungszustand in Spannungen umgerechnet, laut [22]. Die dazu verwendeten Werkstoffparameter, wie Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl, sind im Bericht der jeweiligen Streckenversuche [24] zu finden und sind hier gemäß Tabelle 8.2 festgelegt.

### 6.1.1 Nullpunkt des Streckenversuches

Um die Daten der Streckenversuche überhaupt vergleichen zu können, ist es notwendig zu wissen, in Bezug auf welchen Ausgangszustand die Messdaten vorliegen, wie in Tabelle 6.2 ablesbar ist.

Nullpunkt des Streckenversuches	I							II				III		IV		
	Bm1_1L_DostoOE_Prot_SF100L	Bm1_3L_VelUKEur_SF500	Bm2S_1T_DesRus_SF500	Bm2S_4L_DesRus_SF500	Bm1_14L_VelID_SF500	Bm1_20T_VelRus_SF520	Bm1S_22T_ICxDB_SF500	Bm1_1T_AmtrakUS_SF4	Bm1_2T_X4_SF4	Bm1_1T_X4B_Fin_SF4B	Bm1_1T_ER20Lit_SF6	Bm1_1T_AveNMue_SF30	Bm1_2L_AveNMue_SF30	Bm1_8T_DesMLOEBB_SF6500	Bm1_4L_DesTha_SF7000	Bm1_1T_DesTha_SF7000
ohne Wagenkasten	X		X	X	X	X	X		X		X	X	X	X	X	X
Absolutwert		X														
Komponenten-Eigengewicht							X		X							

Tabelle 6.2 Nullpunkt des jeweiligen Streckenversuches zur Berechnung der DMS Mittelspannung, [24]

#### **Nullpunkt ohne Wagenkasten**

Im Zustand Nullpunkt ohne Wagenkasten sind sowohl die Sekundärfederkraft als auch die Dehnung gleich Null. Unter der Annahme, dass die gemessenen Dehnungen proportional zur Sekundärfederkraft sind, kann die Berechnung der Mittelspannung durchgeführt werden. Vor Beginn der Messung wird der Zustand Drehgestell mit aufgesetztem, leerem Wagenkasten genullt. Dies ist idealerweise der Punkt „Ausgangspunkt der Messung“ in Abbildung 6.2. Da aber Messfehler entstehen können, muss man davon ausgehen, dass im Nullabgleich eine Messabweichung enthalten ist. Aus den Rollvorgängen der letzten Beladefahrten und der ersten Leerfahrten der Messungen sowie der jeweiligen Sekundärfederkraft wurde die Dehnung durch lineare Extrapolation mittels der Steigung  $k$  bei einer Sekundärfederkraft von 0 kN errechnet. Dieser erhaltene Dehnungsoffset  $d$  wurde zu allen gemessenen Dehnungen aller Testfahrten addiert, wie in Abbildung 6.2 ersichtlich, und der Nullpunkt ohne Wagenkasten ist bekannt. [25]

Damit können sämtliche Messungen mit durchgeführtem Nullabgleich „ohne Wagenkasten“ untereinander verglichen werden.

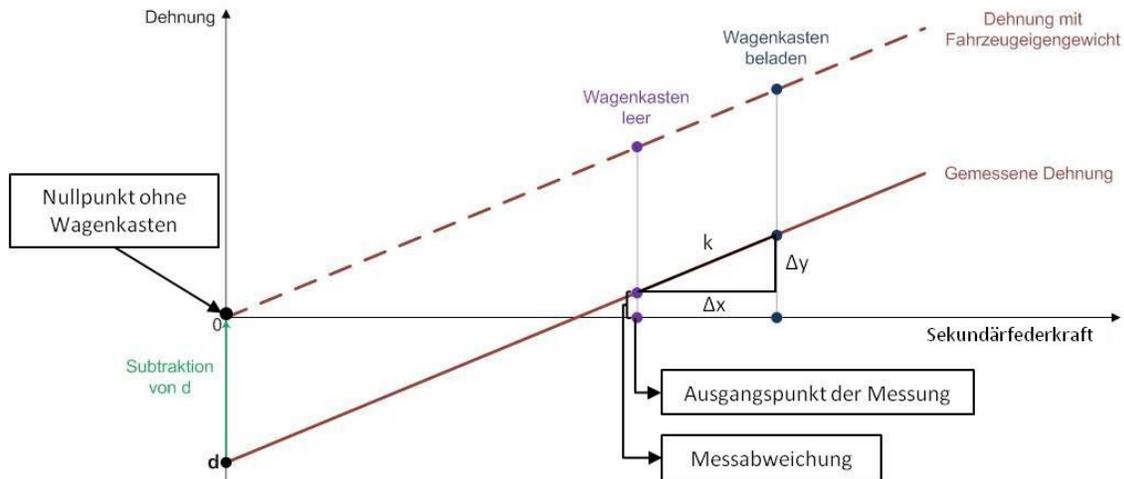


Abbildung 6.2 Ermittlung des Dehnungsoffsets  $d$  zur Berechnung der DMS Mittelspannung, [25]

### ***Nullpunkt als Absolutwert***

Beim Nullpunkt als Absolutwert ist der Mittelspannungseinfluss nur für den beladenen Wagenkasten bekannt, nicht aber für den leeren, was auf Fehler in der Messkette zurückzuführen ist. Die Messung des Velaro UK Eurostar ist somit nicht weiter für den direkten Vergleich verwendbar. [26]

### ***Nullpunkt als Komponenten-Eigengewicht***

Der Nullpunkt als Komponenten-Eigengewicht ist der Zustand, wenn die Dehnmessstreifen am Rahmen appliziert werden und das Drehgestell noch nicht zusammengebaut wurde. Die Komponente ist somit der geschweißte Rahmen. Es wirkt nur die Schwerkraft bzw. das Eigengewicht auf den Rahmen, der entsprechend gelagert wurde. Man kann nicht auf den Zustand Nullpunkt ohne Wagenkasten umrechnen, da der Gewichtseinfluss aller Anbauteile des Drehgestells, wie Motorträger, Bremsträger, usw., nicht bekannt ist. Es entfallen somit auch die Messdaten der Amtrak Lokomotive und der X4B Finnland Lokomotive für den direkten Vergleich. [26]

### 6.1.2 Schweißnahttypen der Abbindenähte

Weiteren Einfluss auf die gemessenen Ergebnisse hat die Geometrie der Konstruktion, sowie die Ausführung und Art der Schweißnähte, welche in Tabelle 6.3 aufgelistet sind.

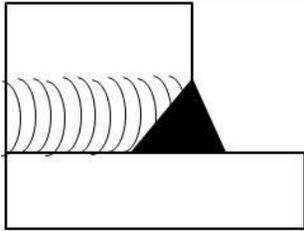
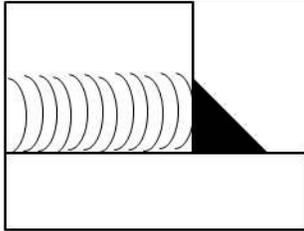
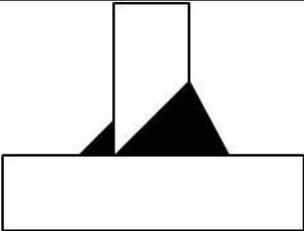
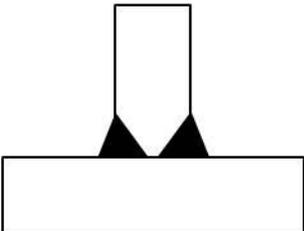
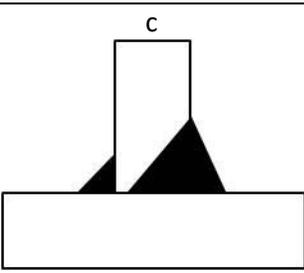
Schweißnähte am Abbinde- verschiedener Projekte		Abbindenaht	
			
		HY-Nahtende	KehlNahtende
Schweißnahttyp		Projekte	
 HV-Naht mit KehlNaht	I		Bm1_1L_DostoOE_Prot_SF100L
	II		
	III		
	IV		
 DHY-Naht	I	Bm1_3L_VelUKEur_SF500, Bm2S_1T_DesRus_SF500, Bm2S_4L_DesRus_SF500, Bm1_14L_VelD_SF500, Bm1_20T_VelRus_SF520, Bm1S_22T_ICxDB_SF500	
	II	Bm1_1T_AmtrakUS_SF4	
	III	Bm1_1T_AveNMue_SF30, Bm1_2L_AveNMue_SF30	Bm1_1T_AveNMue_SF30, Bm1_2L_AveNMue_SF30
	IV	Bm1_8T_DesMLOEBB_SF6500	
 HY-Naht mit KehlNaht	I		
	II	Bm1_1T_ER20Lit_SF6	
	III		
	IV	Bm1_4L_DesTha_SF7000, Bm1_1T_DesTha_SF7000	

Tabelle 6.3 Schweißnahttypen und Nahtenden am Abbinde verschiedener Drehgestelle, [27]  
 gewählter Streckenversuch: Bm1\_1L\_DostoOE\_Prot\_SF100L, [25]

### 6.1.3 Lastniveau der Projekte

In Abbildung 6.3 ist erkennbar, auf welchem Lastniveau die verschiedenen Fahrwerke beansprucht werden. Die Auflast auf die Sekundärfeder entsteht durch das Gewicht des Wagenkastens. Bei der Zuladung erhält der Wagenkasten zusätzliches Gewicht pro Quadratmeter, welches in der Spezifikation festgelegt ist. In den Streckenversuchen erfolgt die Zuladung zu Versuchszwecken normalerweise mit Sandsäcken und nicht durch Personen. Bei den unter Punkt II dargestellten Lokomotiven gibt es keine Zuladung, da eine Lokomotive für gewöhnlich nicht mit Fahrgästen besetzt oder Gütern beladen wird.

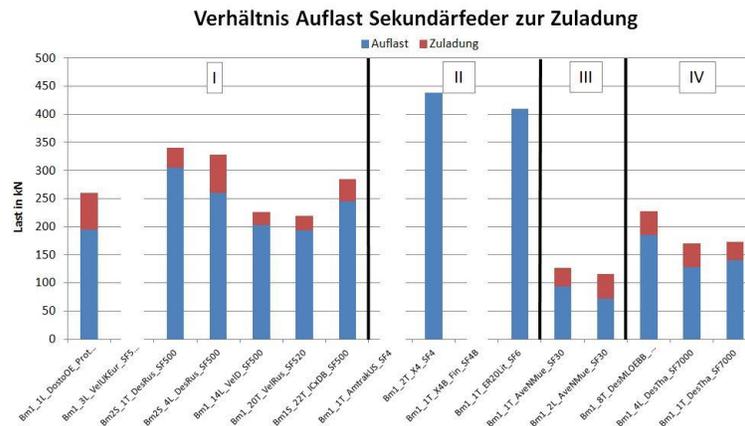


Abbildung 6.3 Verhältnis von Auflast auf die Sekundärfeder zur Zuladung bei verschiedenen Schienenfahrzeugtypen, [24]

### 6.1.4 Mittelspannungsniveau der Projekte

Die Mittelspannung kann bei der Messung selbst, aufgrund des Wagenkastengewichts, nicht erfasst werden und wurde daher wie in Abschnitt 6.1.1 beschrieben ermittelt und berücksichtigt.

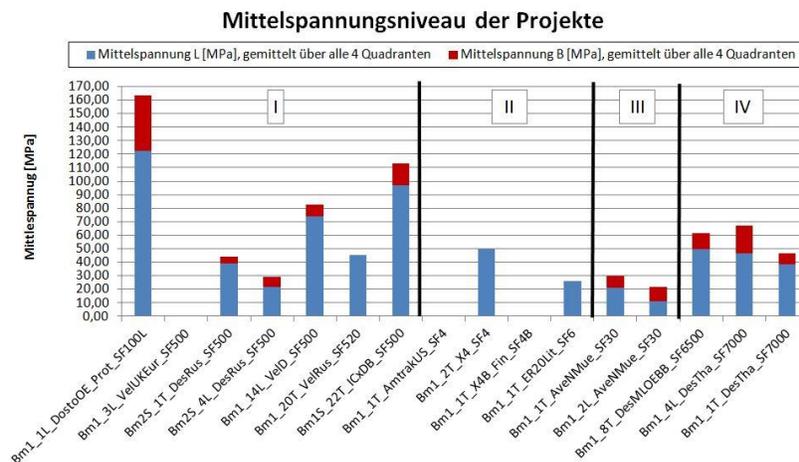


Abbildung 6.4 Mittelspannung der verschiedenen Drehgestelle, gemittelt über alle 4 Quadranten

### 6.1.5 Spannungskollektive

Um die Daten mehrerer Streckenversuche vergleichen zu können, muss zuerst das für den Vergleich gewünschte Strukturdetail feststehen – in diesem Fall die Abbindenähte am Untergurt eines Langträgers. Dann werden durch Recherche alle Projekte ermittelt, in denen Messdaten des gewünschten Details vorliegen und die dazugehörigen Messkanäle in einer Excel-Tabelle dokumentiert. Diese Tabelle dient als Input für das Matlab Tool mit dem schließlich automatisch der Kollektivvergleich unterschiedlicher Fahrwerke in verschiedenen Kombinationen erstellt werden kann.

Im Matlab Tool wurden folgende Parameter für die Erstellung der Wöhlerlinien verwendet:

- Wöhlerlinien Typ: Haibach für Schweißnähte
- Steigung der Wöhlerlinie:  $k = 3$
- Sicherheitsfaktor  $j_s$ : 1,05

Die Daten der Streckenversuche wurden auf die jeweilige Designlaufleistung linear extrapoliert, weshalb die Darstellung in Abbildung 6.5 Daten bis  $10^{10}$  Lastzyklen enthält. Alle kleinen Amplituden, die  $10^{10}$  Lastwechsel übersteigen, werden durch den relativen Kollektiv-CutOff (siehe Kapitel 10.2.1) beim Bewertungsvorgang der Firma Siemens grundsätzlich eliminiert, da ihr Anteil an der Schädigungssumme vernachlässigbar gering ist. Der Anteil der eliminierten Amplituden beträgt ca. 10%.

Die so ermittelten Rainflow-Kollektive stellen die Spannungsamplitude über die Lastzyklen dar. Da aber laut Abbildung 6.3 und Abbildung 6.4 bei allen Projekten ein anderes Verhältnis von Auflast auf die Sekundärfeder zur Zuladung und ein anderer Mittelspannungszustand herrscht, müssen die Werte der Spannungsamplitude  $A$  auf die jeweilige Äquivalentamplitude  $A_{eq}$  normiert werden.

$$A_{norm} = \frac{A}{A_{eq}} \quad (6.1)$$

Aus diesen normierten Rainflow-Spannungskollektiven für Abbinde am Untergurt aller in Abbildung 6.3 genannten Fahrwerke lässt sich eine Ähnlichkeit der Kollektivform zwischen  $10^4$  und  $10^{10}$  Lastwechseln erkennen. Aufgrund dieser Ähnlichkeit in dem für die Betriebsbeanspruchung relevanten Lastwechselbereich kann man davon ausgehen, dass bei Abbindenähten am Untergurt eines Langträgers ein ähnlicher zyklischer Beanspruchungszustand herrscht. Der dominierende Kraftanteil stammt dabei von der Sekundärfederkraft aufgrund von Beladewechseln, siehe Abbildung 5.14.

Der Bereich 0 bis  $10^4$  Lastwechsel weist quasistatische Einzelereignisse auf und kann bei der Betriebsfestigkeitsbetrachtung vernachlässigt werden.

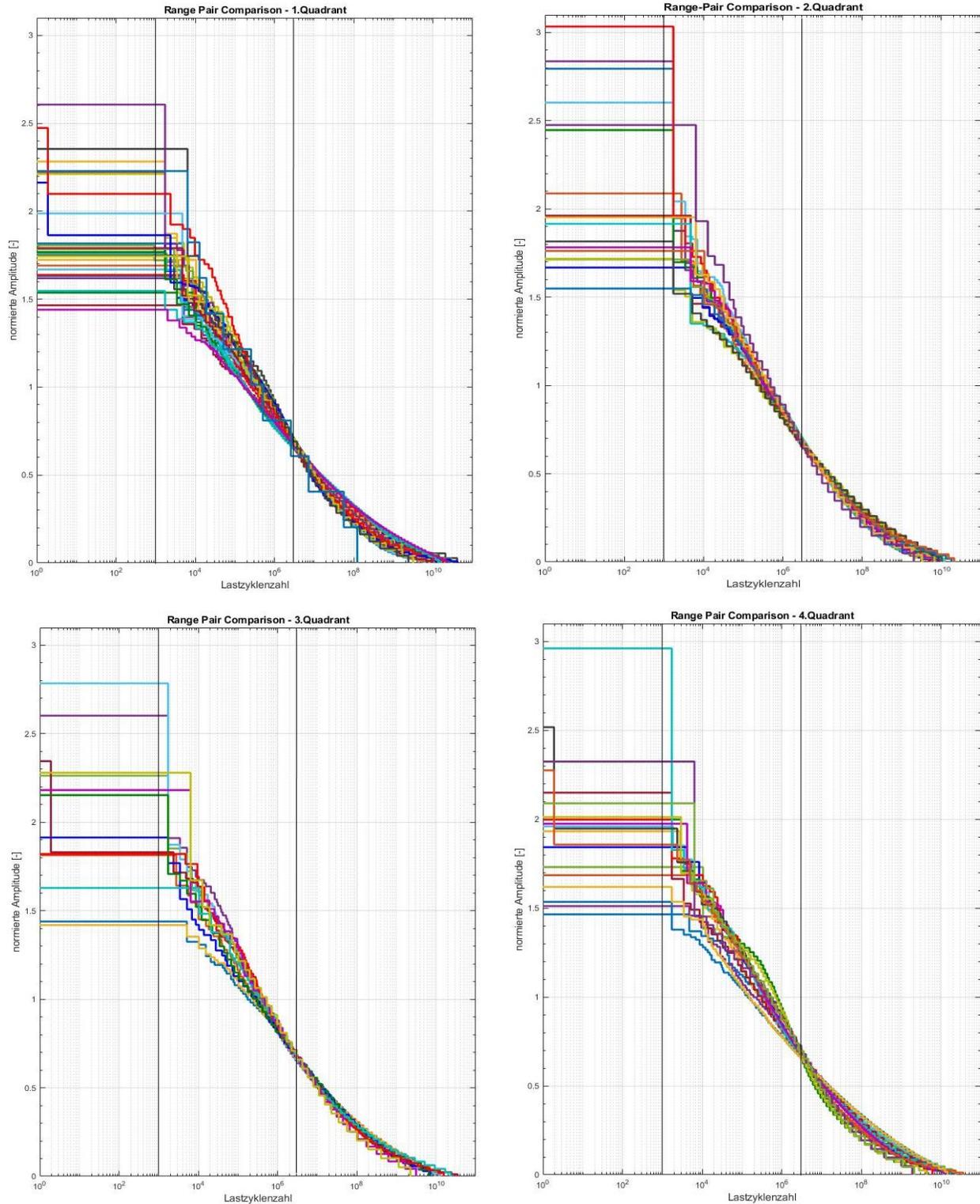


Abbildung 6.5 Spannungskollektive der Abbinder aller verglichenen Projekte, aufgeteilt auf die 4 Quadranten, auf Basis einer wechselnden Beladung, [24]

Durch die Ähnlichkeit der Kollektivform kann für Abbindenähte am Untergurt eines Langträgers eine repräsentative Messung sowie ein repräsentativer Messkanal ausgewählt werden. Auf Basis dieser Daten wird das Signal für den Kleinprobenversuch erstellt.

Da aufgrund der Vielzahl der Kollektive in jedem Diagramm in Abbildung 6.5 eine übersichtliche Legende nicht mehr möglich war, werden die Kollektive im Anhang in Kapitel 16.5 noch einmal detaillierter dargestellt. Dort ist eine Zuordnung der Projekte zum entsprechenden Kollektiv möglich.

## 6.2 Streckenversuch SF100 Laufdrehgestell

Der Streckenversuch des SF100 Laufdrehgestells (SF100L) wird als repräsentative Messung ausgewählt. Der Grund dafür ist, dass dies als einziges vergleichbares Projekt aus hochfestem Stahl Alform 700 M gefertigt wurde, wie es auch für die Kleinproben vorgesehen ist. Alle anderen Drehgestelle bestehen an der betrachteten Messstelle aus S355 Baustahl.

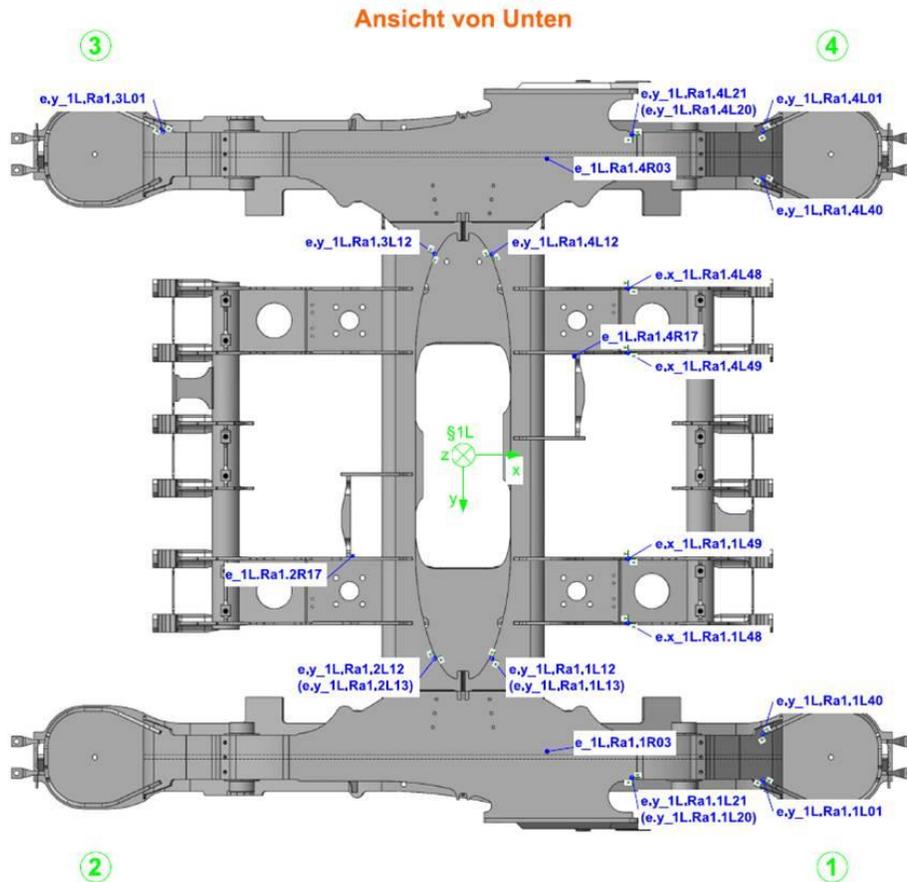
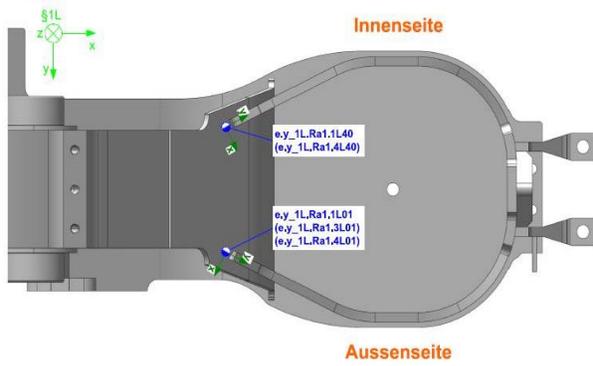


Abbildung 6.6 Messstellenplan der Quadranten 1 bis 4, Unterseite des SF100L,[25]

## Außenseite



## Innenseite

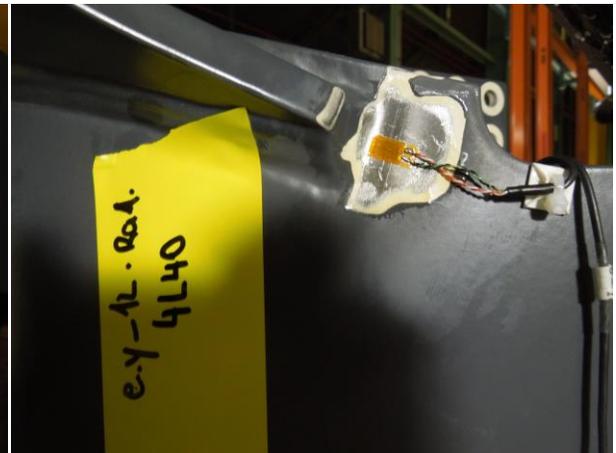


Abbildung 6.7 DMS-Positionen, Abbinder am Untergurt Langträger, SF100L, [25]

### 6.2.1 Auswahl der Messstelle

Es wird die **Messstelle 1L01** (siehe Abbildung 6.7) am **Federtopf auf der Außenseite von Quadrant 1** ausgewählt, da sie von den vorhandenen Abbinder-Messstellen die höchste Äquivalentamplitude aufweist, wie im Anhang 16.7.5 in Tabelle 16.2 hervorgehoben wird. Die Äquivalentamplitude muss im Idealfall bei exakt symmetrischer Beanspruchung eines exakt symmetrischen Rahmens in allen 4 Quadranten den gleichen Wert aufweisen. Im vorliegenden, realen Fall ist sie an den Stellen 3L01, 4L01, 1L40 und 4L40 sehr ähnlich, während sie in 1L01 abweicht. Das kann im Wesentlichen auf nicht symmetrische Lasten aber auch auf unterschiedliche Blechdicken der Konstruktion, abweichende Schweißnahtausführung oder eine abweichende Position des in 1L01 applizierten DMS und dadurch abweichenden Kerbeinfluss des Abbinders zurückzuführen sein. Die Auswahl auf die Position 1L01 fällt somit konservativ aus und deckt die höchst beanspruchte Messstelle ab.

Die anhand des Streckenversuches für die Signaldarstellung verwendeten Messfahrtgruppen sind in Tabelle 6.4 aufgelistet.

Einsatz	Designlaufleistung	Messfahrtgruppe	Name Messfahrtgruppe
Beladungszustand B Auslegungsmasse normale Zuladung	4.500.000 km 30 Jahre à 150.000 km	700	G046_S_B_Betriebsfestigkeit_extrap- 4.5Gm <sup>1</sup>
Beladungszustand L Auslegungsmasse des betriebsbereiten Fahrzeuges	4.500.000 km 30 Jahre à 150.000 km	701	G047_S_L_Betriebsfestigkeit_extrap- 4.5Gm <sup>1</sup>
Beladungszustand B-L 15000 Beladewechsel	4.500.000 km 30 Jahre à 150.000 km	708	G054_S_B- L_Betriebsfestigkeit_Einsatz_extrap- 4.5Gm <sup>1</sup>
Beladungszustand B-L 1 Beladewechsel	4.500.000 km 30 Jahre à 150.000 km	702	G048_S_B-L_Betriebsfestigkeit_extrap- 4.5Gm <sup>1</sup>

Tabelle 6.4 Beschreibung der Messfahrtgruppen des SF100L, [25]

Die Beladezustände „Auslegungsmasse des betriebsbereiten Fahrzeuges“, welcher dem Beladezustand „Leer“ entspricht, und „Auslegungsmasse normale Zuladung“, welcher dem Beladezustand „Beladen“ entspricht, sind in EN 15663 festgelegt.

Das normierte Spannungskollektiv an der DMS-Stelle 1L01 des SF100L ist im Anhang 16.5.5 abgebildet.

Weitere Informationen zur Messstrecke und Fahrzeugkonfiguration des SF100L befinden sich im Anhang 16.7 und stammen aus dem Bericht der Streckenversuche des SF100L [25].

<sup>1</sup> zur Erklärung der Bezeichnung siehe Anhang 16.7.1

## 7 Versuchsaufbau

Um die Kerbwirkung von Schweißnahtenden an Strukturbauteilen aus Alform 700 M besser beschreiben zu können, werden in der Schwingprüfhalle der TU Graz drei Versuchsreihen mit Kleinproben gleicher Geometrie durchgeführt. Pro Versuchsreihe werden etwa 15-20 Proben mit der Universalprüfmaschine geprüft.

Die Versuchsreihen unterscheiden sich folgendermaßen:

- |                  |   |                 |
|------------------|---|-----------------|
| 1. Versuchsreihe | Längssteife mit verschliffenem Nahtende | Nachfahrtsignal |
| 2. Versuchsreihe | Längssteife mit verschliffenem Nahtende | Blocksignal     |
| 3. Versuchsreihe | Längssteife mit Abbindenaht             | Blocksignal     |

Einige Fotos der realen Kleinproben befinden sich im Anhang 16.4. In dieser Masterarbeit geht es um die Erstellung des Betriebslastennachfahrtsignals für die erste Versuchsreihe.

### 7.1 Beschreibung des Versuches

Die Probe besteht aus einem Grundblech mit elliptischen Ausschnitten und zwei Stegen mit jeweils 10 mm Blechdicke. Im mittleren Bereich sind die Stege mit zwei doppelten HY-Nähten und am Stegblechrand mit zwei doppelten HV-Nähten verschweißt, siehe Abbildung 7.2. Die Nahtenden der Stege werden im Bereich der HV-Nähte blecheben verschliffen. In Abbildung 7.1 ist auch die Position von linearen Dehnmessstreifen (DMS) am Übergang der Schleifradien dargestellt. Diese werden jedoch bei Kleinprobenversuchen nur an einer ausgewählten Probe zur Verifikation der aufgebrachten Last appliziert.

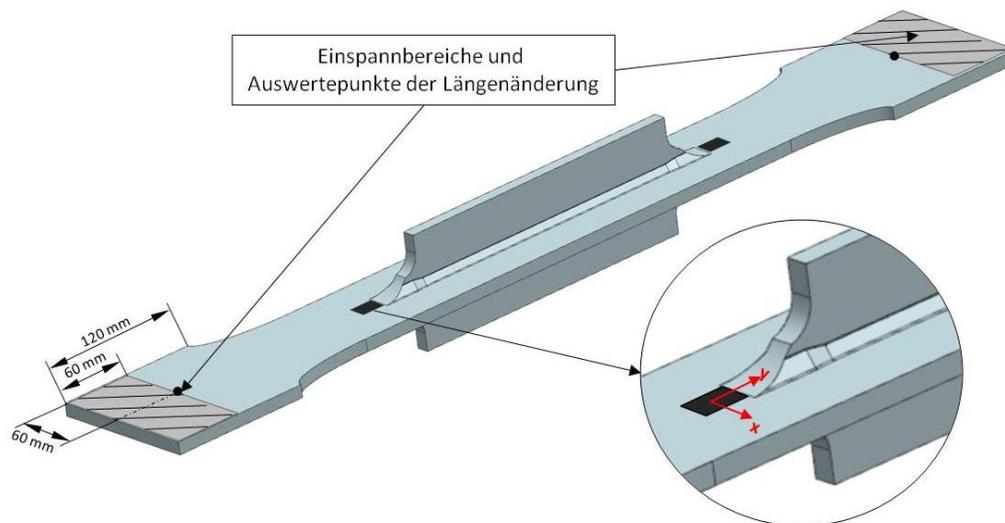


Abbildung 7.1 Kleinprobe mit DMS Position, DMS Koordinatensystem, Einspannbereiche (schraffiert) und Auswertepunkte der Längenänderung im NX

Der Versuch selbst ist ein einachsiger Zugversuch, der im Zugschwellbereich durchgeführt wird. Im Zuge dieser Masterarbeit wird für die erste Versuchsreihe ein möglichst realitätsnahes Nachfahrtsignal generiert. Realitätsnah bedeutet in diesem Fall, dass die reale Beanspruchung eines Drehgestells im Betrieb so gut wie möglich berücksichtigt werden soll. Die Informationen über Reihenfolge und Größe der auftretenden Beanspruchungen werden, wie zuvor in Kapitel 6 beschrieben, aus dem Streckenversuch gewonnen und sollen durch die folgende Versuchszeitverkürzung in Kapitel 10.4 mit Matlab R2017b weitestgehend erhalten bleiben.

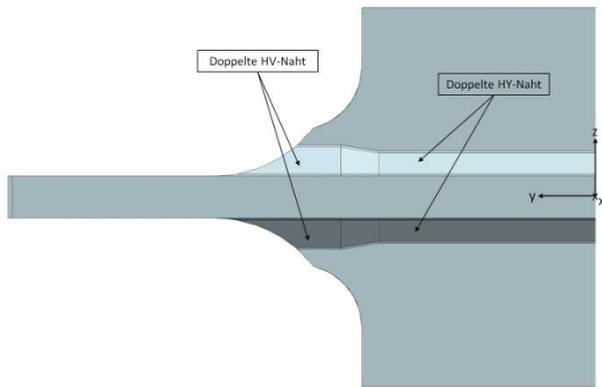


Abbildung 7.2 Ausschnitt der Seitenansicht der Kleinprobe

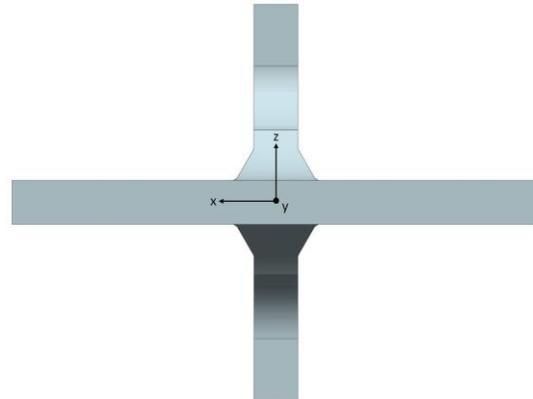


Abbildung 7.3 Vorderansicht der Kleinprobe

## 7.2 Daten der Universalprüfmaschine HUS60

Bei der Universalprüfmaschine der TU Graz handelt es sich um eine servohydraulische Zug/Druck-Prüfmaschine (siehe Abbildung 7.5) mit digitalem PID-Regler.

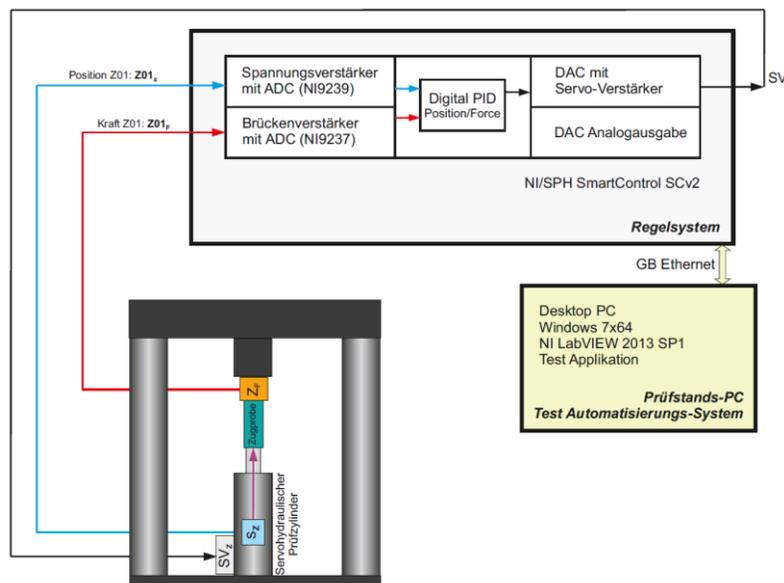


Abbildung 7.4 Schaltbild des Universalprüfstandes der TU Graz

In Abbildung 7.4 ist das Schaltbild des Prüfstandes zu sehen. Daraus lassen sich die Zusammenhänge des digitalen PID-Reglers für den kraftgeregelten Zylinder und den zeitsynchron gemessenen Weg des Zylinders ablesen. Sämtliche Messdaten werden vom Regelsystem mit einer Abtastrate  $f_s$  von 5 kHz abgetastet. Die Grenzfrequenz  $f_{g,s}$  des analogen Anti-Aliasing-Filters beträgt 2 kHz. Die Messdaten werden anschließend in der Messapplikation auf eine Grenzfrequenz  $f_g$  von 80 Hz verzerrungsfrei Tiefpass-gefiltert (FIR-Filter) und auf eine Datenrate  $f_A$  von 200 Hz dezimiert.

Zur Erklärung der Filtermethoden wird auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen, da diese hier nicht näher ausgeführt werden.



Abbildung 7.5 Universalprüfstand der TU Graz

Parameter der Universalprüfmaschine	Grenzwerte	Einheit
maximale Prüfkraft	+/- 60	Mp
maximaler Zylinderhub	+/- 20	mm
maximale Frequenz	100	Hz
Längenänderung der Probe bei 100 Hz	ca. 0,05	mm
maximale Abtastrate des PID-Reglers	5000	Hz
maximaler Systemdruck	300	bar

Tabelle 7.1 Grenzwerte der Universalprüfmaschine

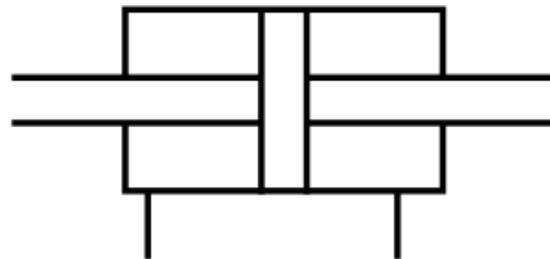


Abbildung 7.6 Gleichgangzylinder, schematisch, [28]

In der Prüfmaschine befindet sich ein hydraulisch gelagerter Gleichgangzylinder, wie Abbildung 7.6 angeführt ist. Der Zylinderdurchmesser beträgt 222 mm und der Kolbenstangendurchmesser 160 mm. Die für die ein- und ausfahrende Kraft notwendige **Kolbenfläche** ergibt sich damit zu:

$$A_K = \frac{\pi}{4} * (d_{Zyl}^2 - d_{Stange}^2) \quad (7.1)$$

$$A_K = \frac{\pi}{4} * (222^2 - 160^2) * 10^{-2} = 186 \text{ cm}^2$$

Die **maximal mögliche Prüfkraft** des Zylinders muss von Mp (Megapond) auf kN umgerechnet werden.

$$F_{Zyl,max} = \pm 60 \text{ Mp} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \pm 588,6 \text{ kN}$$

Test Rides of Group G047\_S\_L\_Betriebsfestigkeit\_extrap-4.5Gm: 1:192

Minimum	-0.213 mm	Mean	-0.00579 mm	SD	0.0317 mm
Maximum	0.194 mm	Median	-0.00237 mm	Skewness	-0.258
Range	0.407 mm	RMS	0.0322 mm	Kurtosis	0.829

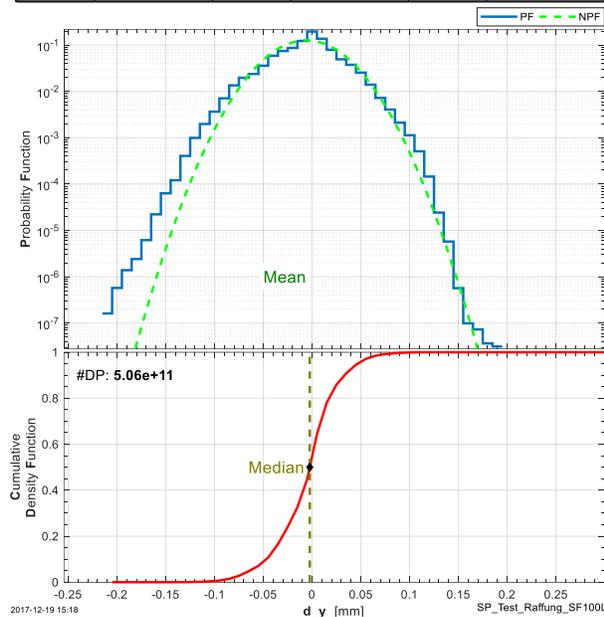


Abbildung 7.7 statistische Auswertung der Messfahrtgruppe „Leer“ des Streckenversuchs des SF100L

Test Rides of Group G046\_S\_B\_Betriebsfestigkeit\_extrap-4.5Gm: 211:452

Minimum	-0.204 mm	Mean	-0.000824 mm	SD	0.0345 mm
Maximum	0.207 mm	Median	-0.000486 mm	Skewness	-0.0261
Range	0.411 mm	RMS	0.0345 mm	Kurtosis	0.935

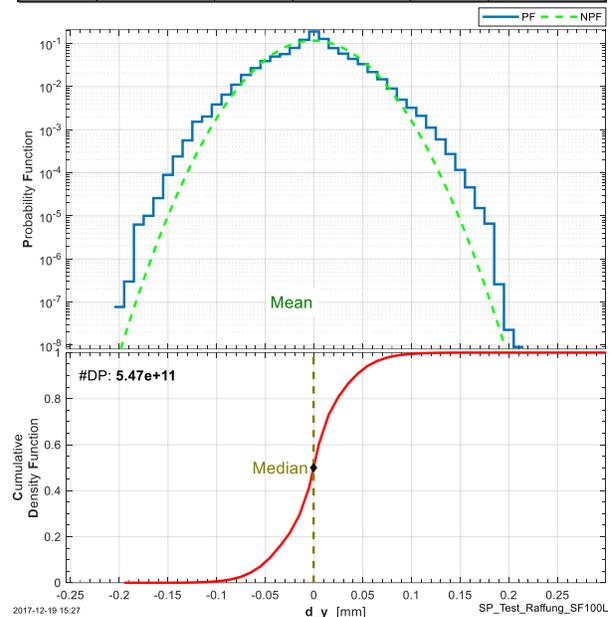


Abbildung 7.8 statistische Auswertung der Messfahrtgruppe „Beladen“ des Streckenversuchs des SF100L

Der errechnete maximale Zylinderhub der Signale aus den Streckenmessungen liegt bei 0,19 mm (Leer, Maximum laut Abbildung 7.7) und 0,20 mm (Beladen, Maximum laut Abbildung 7.8). Die Berechnung des Zylinderhubes erfolgt wie in Abschnitt 9.3.

In Abbildung 7.9 ist die Hub-Frequenz-Kennlinie des Prüfzylinders bei einem Volumenstrom von  $125 \frac{\text{Liter}}{\text{min}}$  abgebildet. Der Arbeitspunkt AP wird mit Reserve bei  $\pm 0,3$  mm Hub und einer Prüffrequenz von 30 Hz gewählt. Außerdem ist der Arbeitspunkt MAX des Zylinders bei  $\pm 0,05$  mm Hub und 100 Hz Prüffrequenz als Referenzpunkt markiert.

In Tabelle 7.2 sind die verwendeten Zylinderparameter, welche für das Matlab Script benötigt wurden, noch einmal zusammengefasst und werden im Folgenden einzeln erklärt.

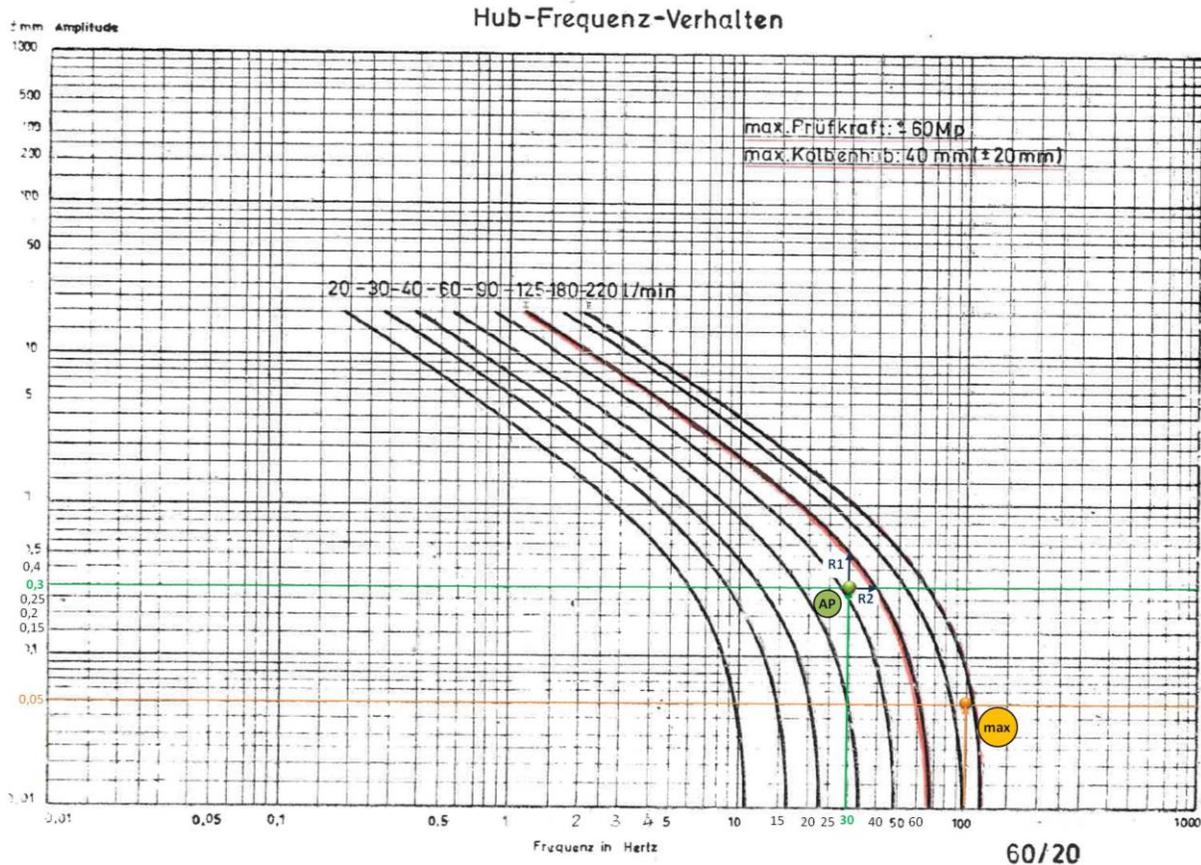


Abbildung 7.9 Frequenzgangkurve des Zylinders mit gewählten Arbeitspunkt AP

Die **maximal mögliche Verfahrensgeschwindigkeit**  $v$  des Zylinders wird mit Formel (7.2) beim Arbeitspunkt AP, laut Abbildung 7.9, bestimmt.

$$v_{Zyl} = 2 * \pi * f * Hub \quad (7.2)$$

$$v_{Zyl,max} = 2 * \pi * 30 \text{ Hz} * 0,3 \text{ mm} = 56,55 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Diese Geschwindigkeit wird niedriger gewählt, um Reserve für das Skalieren des Signals zu schaffen.

$$\rightarrow \text{gewählt: } v_{Zyl,max} = 30 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Die **maximal mögliche Verfahrenbeschleunigung**  $a$  des Zylinders wird mit Formel (7.3) beim Arbeitspunkt AP, laut Abbildung 7.9, bestimmt.

$$a_{Zyl} = (2 * \pi * f)^2 * Hub \quad (7.3)$$

$$a_{Zyl,AP} = (2 * \pi * 30 \text{ Hz})^2 * 0,3 \text{ mm} = 10659,2 \frac{\text{mm}}{\text{s}^2}$$

$$\rightarrow \text{gewählt: } a_{Zyl,AP} = 10000 \frac{\text{mm}}{\text{s}^2}$$

Die **maximale Zylinderfrequenz f** wird mit 50 Hz in den Zylinderdaten gespeichert. Sie kann in weiterer Folge für die Signalerstellung auf 30 Hz geregelt werden. Das ist eine Vorsichtsmaßnahme, da bei einer Zylinderfrequenz von 50 Hz die Gefahr einer Überlagerung mit der Netzfrequenz besteht.

Der **theoretisch maximale Volumenstrom Q** wird aus Abbildung 7.9 entnommen und liegt bei  $125 \frac{\text{Liter}}{\text{min}}$ .

Der **maximal mögliche Volumenstrom  $Q_{\max}$**  bei den gewählten Parametern wird über die Kolbenfläche und die maximale Zylindergeschwindigkeit nach Formel (7.4) bestimmt.

$$Q_{\max} = A_K * v_{Zyl, \max} \quad (7.4)$$

$$Q_{\max} = 186 \text{ cm}^2 * 10^2 * 30 \frac{\text{mm}}{\text{s}} * 10^{-6} = 0,558 \frac{\text{Liter}}{\text{s}}$$

$$Q_{\max} = 0,558 \frac{\text{Liter}}{\text{s}} * 60 = 33,48 \frac{\text{Liter}}{\text{min}} < 125 \frac{\text{Liter}}{\text{min}}$$

In Abbildung 7.9 weisen R1 und R2 auf die **Reserven** hin, die durch den gewählten Arbeitspunkt AP noch für die Skalierung des Signals enthalten sind und sie werden über die Formeln (7.2) und (7.4) bestimmt. Auf den Skalierungsfaktor wird nach der Signalerstellung in Abschnitt 10.9.1 näher eingegangen.

#### Reserve 1: (R1 - laut Abbildung 7.9)

---

$$v_{R1, Zyl} = 2 * \pi * f_{R1} * Hub_{R1}$$

$$Q_{R1} = A_K * v_{R1, Zyl}$$

$$v_{R1, Zyl} = 2 * \pi * 30 \text{ Hz} * 0,5 \text{ mm}$$

$$Q_{R1} = 186 \text{ cm}^2 * 10^2 * 94,25 \frac{\text{mm}}{\text{s}} * 10^{-6}$$

$$v_{R1, Zyl} = 94,25 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

$$Q_{R1} = 1,753 \frac{\text{Liter}}{\text{s}} * 60 = 105,18 \frac{\text{Liter}}{\text{min}}$$

Laut Reserve 1 kann die Zylindergeschwindigkeit  $94,25 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  betragen und der Volumenstrom  $105,18 \frac{\text{Liter}}{\text{min}} < 125 \frac{\text{Liter}}{\text{min}}$ .

#### Reserve 2: (R2 - laut Abbildung 7.9)

---

$$v_{R2, Zyl} = 2 * \pi * f_{R2} * Hub_{R2}$$

$$Q_{R2} = A_K * v_{R2, Zyl}$$

$$v_{R2, Zyl} = 2 * \pi * 40 \text{ Hz} * 0,3 \text{ mm}$$

$$Q_{R2} = 186 \text{ cm}^2 * 10^2 * 75,4 \frac{\text{mm}}{\text{s}} * 10^{-6}$$

$$v_{R2, Zyl} = 75,4 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

$$Q_{R2} = 1,402 \frac{\text{Liter}}{\text{s}} * 60 = 84,15 \frac{\text{Liter}}{\text{min}}$$

Laut Reserve 2 kann die Zylindergeschwindigkeit  $75,4 \frac{mm}{s}$  betragen und der Volumenstrom  $84,15 \frac{Liter}{min} < 125 \frac{Liter}{min}$ .

Der **absolute Öldruck**  $p_{80}$  im Zylinder bei 80 % der Nennkraft auf die Kolbenfläche beträgt:

$$p_{80} = \frac{F_{80}}{A_K} \quad (7.5)$$

$$p_{80} = \frac{(470,4 * 10^3) N * 10^{-5}}{186 \text{ cm}^2 * 10^{-4}} = 252,9 \text{ bar}$$

Die **maximale Zylinderleistung** ergibt sich aus 80% der Nennkraft und der gewählten maximalen Zylindergeschwindigkeit.

$$P_{max} = F_{80} * v_{Zyl,max} \quad (7.6)$$

$$P_{max} = 470,4 \text{ kN} * 30 \frac{mm}{s} * 10^{-3} = 14,112 \text{ kW}$$

Bezeichnung	Größe	Einheit	Beschreibung
$F_{Nenn}$	588	kN	Nennkraft Zylinder (60 Mp) (gegeben, Tabelle 7.1)
Hub	$\pm 20$	mm	Maximaler Hub (gegeben, Tabelle 7.1)
$P_{sys}$	300	bar	Systemdruck (gegeben, Tabelle 7.1)
$A_K$	186	$\text{cm}^2$	Kolbenfläche (gegeben, Formel (7.1))
numSV	1	#	Anzahl der Steuerventile (gegeben)
v	30	mm/s	Maximale Verfahrgeschwindigkeit (Annahme)
a	10000	$\text{mm/s}^2$	Maximale Verfahrbeschleunigung (Annahme, siehe Formel (7.3))
f	50	Hz	Maximale Verfahrfrequenz (gegeben, laut Abbildung 7.9)
x	8	mm	Fahrbare Wegamplitude (hier 80% vom halben Hub) (berechnet)
$F_{80}$	470.4	kN	80% der Nennkraft (berechnet)
$Q_{max}$	0,558	Liter/s	Volumenstrom (berechnet, Formel (7.4))
$p_{80}$	252.9	bar	Absoluter (Differential-) Öldruck für 80% der Nennkraft (rein hydrostatisch gelagerter Zylinder) (berechnet, Formel (7.5))
$P_{max}$	14.112	kW	Absolute maximale Leistung des Zylinders für 80% der Nennkraft mal der maximalen Verfahrgeschwindigkeit (berechnet, Formel (7.6))

Tabelle 7.2 verwendete Zylinderparameter für Matlab R2017b

### **7.3 Definition Ausfall eines Bauteils**

Der Ausfall eines Bauteils ist dann gegeben, sobald ein detektierbarer Anriss vorhanden ist. Bei einer Resonanzprüfmaschine erkennt man einen Ausfall, wenn die Frequenz bei gleichbleibenden Betriebsbedingungen um 1 Hz abfällt. Bei einer servohydraulischen Prüfmaschine erkennt man den Ausfall, wenn bei unveränderter Krafteinbringung durch den Prüfzylinder mehr Zylinderweg gemessen wird. Das bedeutet, dass die Probe durch einen Anriss eine Querschnittsverkleinerung erfährt und die Steifigkeit der Probe sinkt.

## 8 NX Modell

Um die Daten aus dem Streckenversuch des SF100L an der Messstelle 1L01 auf die Kleinprobe übertragen zu können, müssen Ähnlichkeitsparameter zur Umrechnung des Kerbdetails des Drehgestells auf die Kleinprobe festgelegt werden. Hierfür ist eine Finite-Elemente-Simulation eines Modells der Kleinprobe mit Siemens NX 11 als Input für den Lebensdauerversuch notwendig, siehe Abbildung 8.1.

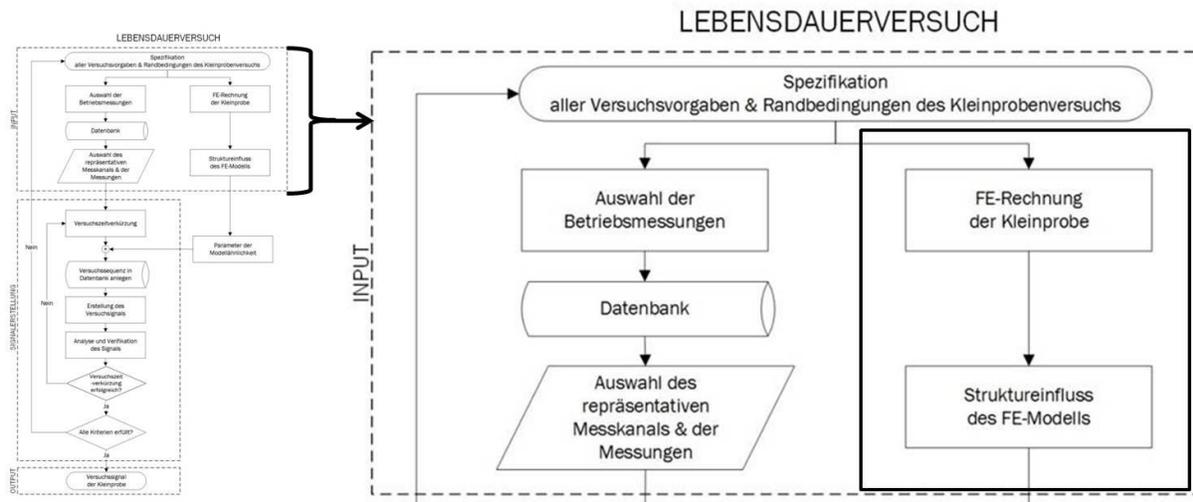


Abbildung 8.1 FE-Rechnung der Kleinprobe, siehe auch Abbildung 2.3

### 8.1 Variantenstudie zur Festlegung der Geometrie

Die endgültige, ideale Geometrie der Kleinprobe wurde durch eine Variantenstudie verschiedener Geometrien mit NX 11 verifiziert. Somit ist gesichert, dass sich die maximale Kerbwirkung der Kleinprobe im Schleifradius der Längssteife befindet.

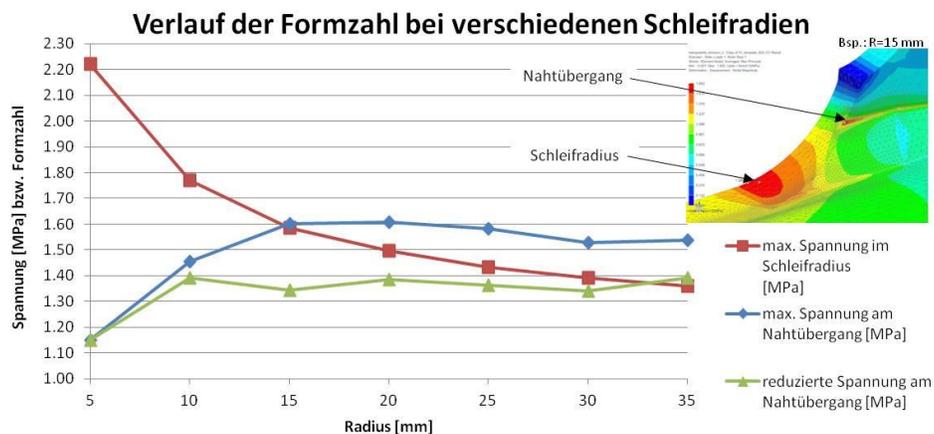
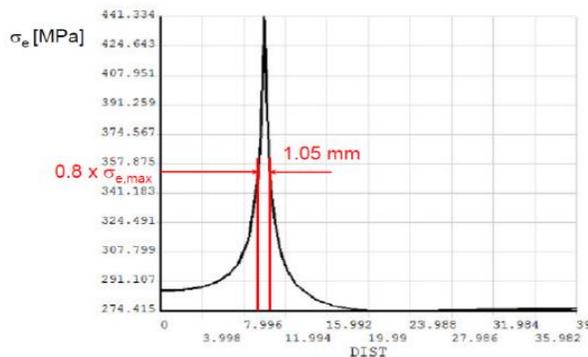


Abbildung 8.2 Verlauf der Formzahl bei unterschiedlichen Schleifradien

Die Reduktion der Spannung am Nahtübergang ist mit dem Verfahren zur Spitzenwertreduktion [29] berechnet worden, welches auch in Masterarbeit [1] genauer beschrieben wird.



$$\sigma_{e,a}^* = \sigma_{e,a} * \left(\frac{p}{p_{ref}}\right)^{0,12} \quad (8.1)$$

p ... Länge, innerhalb der die Spannung 80% des Spitzenwertes beträgt

p<sub>ref</sub> ... Referenzlänge bei 1 MPa

σ<sub>e,a</sub> ... Maximale Spannung

σ<sub>e,a</sub><sup>\*</sup> ... reduzierte Spannung

Abbildung 8.3 Spitzenwertreduktion, [29]

Abbildung 8.3 zeigt, dass der Spitzenwert auf 80% der maximalen Spannung reduziert wird. Ist der reduzierte Spannungswert am Nahtübergang kleiner als der Spannungswert im Schleifradius, so ist der Schleifradius die kritische Kerbe. Wenn dies nicht der Fall ist, dann bleibt der Nahtübergang zum Stegblech der kritische Ort.

Die Referenz-FAT-Klasse zur Berechnung der FAT-Klasse im Schleifradius stammt aus Abbildung 8.4, wie in [1] festgelegt wurde.

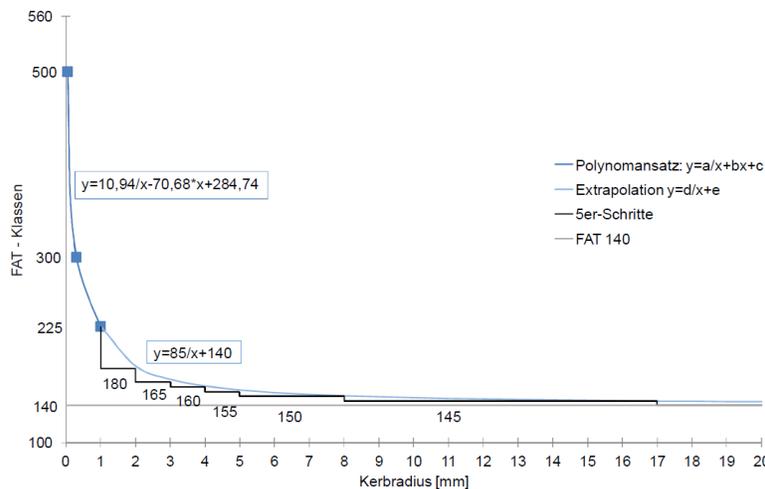


Abbildung 8.4 Vorschlag Referenz-FAT-Klassen für den Kerbspannungsnachweis bei einem Referenzradius > 1 mm, [1]

Die berechnete FAT-Klasse liegt bei 100 für einen Schleifradius R von 30 mm und entspricht somit der laut FKM 6 erwarteten FAT-Klasse, siehe Tabelle 8.1.

$$FAT\ Klasse_{Schleifradius} = \frac{Maximale\ Spannung}{Referenz\_FAT\_Klasse\ bei\ R = 30\ mm} = \frac{1,39}{140} \approx 100 \quad (8.2)$$

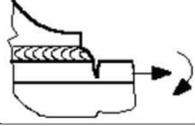
Nr.	Konstruktives Detail	Beschreibung	FAT Stahl	FAT Alu
4		Enden von Befestigungen und Längssteifen, Kehlnähte, im Schweißzustand	100	40
5		Enden von Abdeckplatten und ähnlichen Verbindungen, im Schweißzustand	100	40

Tabelle 8.1 Kerbfallkatalog, FKM 6, Tabelle 5.4.3, [6]

In Abbildung 8.5 ist der Verlauf der FAT-Klassen bei verschiedenen Schleifradien angeführt.

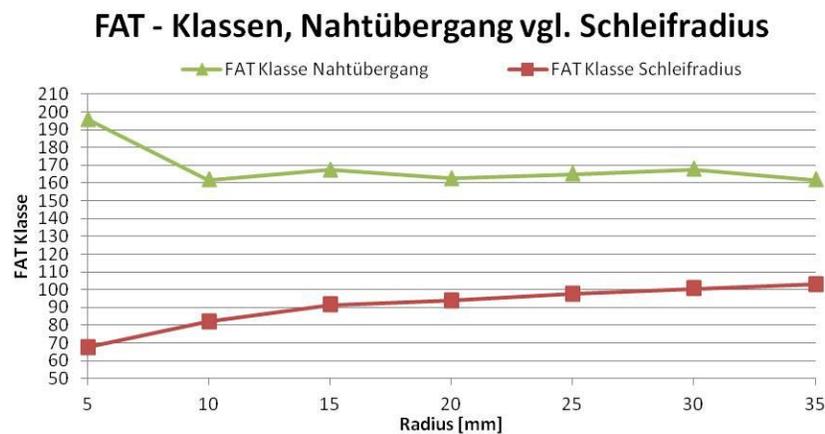


Abbildung 8.5 FAT-Klassen bei unterschiedlichen Schleifradien

## 8.2 Aufbau des Simulationsmodells der Kleinprobe in NX 11

Der notwendige Schleifradius wurde auf 30 mm festgelegt, da dies laut Abbildung 8.2 der größtmögliche Radius ist, bei dem das Maximum der Kerbwirkung im Schleifradius liegt.

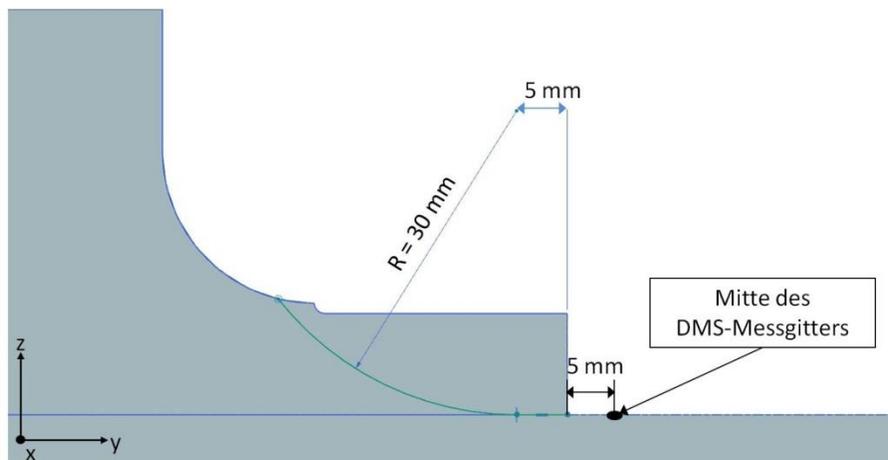


Abbildung 8.6 Ausschnitt der Kleinprobe mit Position des Schleifradius

Da die Kleinprobe (siehe Abbildung 7.1) in der x-, y- und z-Ebene symmetrisch ist, konnte das NX-Modell der Kleinprobe auf 1/8-Modell reduziert werden und die Symmetriebedingungen optimal ausgenutzt werden. Der Ursprung des Modellkoordinatensystems befindet sich genau im Schnittpunkt der drei Symmetrieebenen.

Die verwendeten Werkstoffdaten des hochfesten Stahls Alform 700 M bzw. S700 lauten:

Beschreibung	Bezeichnung	Größe	Einheit
E-Modul	E	$0,21 \cdot 10^6$	MPa
Querkontraktionszahl	$\nu$	0,3	-
Zugfestigkeit	$R_{p0.2}$	700	MPa
Streckgrenze	$R_m$	850	MPa

Tabelle 8.2 Werkstoffdaten Alform 700 M

Bei den zur Simulation verwendeten Elementen des Volumenmodells handelt es sich um Tetraeder-Elemente mit Mittelknoten, wie in Abbildung 8.7. Der Vorteil davon ist, dass das Netz im NX selbst bei einer komplexen Geometrie automatisch erstellt wird. Ein Hexaedermodell ist bei dieser Probengeometrie mit größerem Vernetzungsaufwand verbunden und es kommt beim Übergang des Schleifradius zu verzerrten Elementen.

Die Randbedingungen bzw. Einspannbedingungen der Symmetrieebenen wurden mit einem sogenannten „User defined constraint“ wie folgt definiert:

x-Ebene	Verschiebung in x-Richtung gesperrt
y-Ebene	Verschiebung in y-Richtung gesperrt
z-Ebene	Verschiebung in z-Richtung gesperrt

Da es sich um einen Zugversuch handelt, wird stirnseitig am Modell eine konstante Zugkraft in positive y-Richtung aufgebracht.

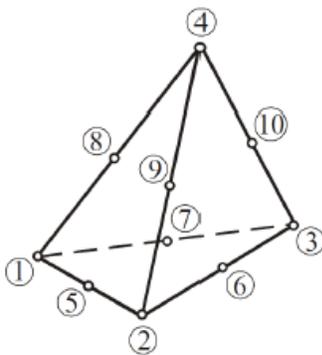


Abbildung 8.7 schematisch, 10-Knoten Tetraeder-Element, [30]

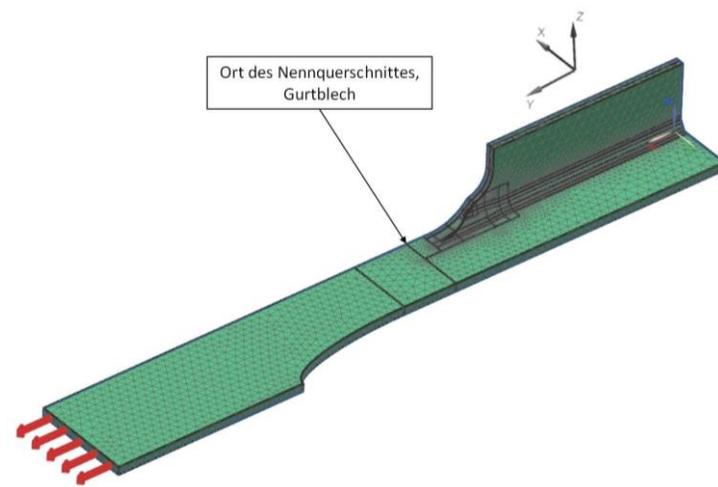


Abbildung 8.8 Simulationsmodell der Kleinprobe

Die Größe der Zugkraft ergibt sich aus der Annahme, dass die Nennspannung  $\sigma_{yy,Nenn}$  im Gurtblech in y-Richtung 1 MPa betragen soll. Die Nennquerschnittsfläche  $A_{Nenn,Modell}$ , wie in Abbildung 8.8 eingezeichnet, beträgt:

$$A_{Nenn,Modell} = d_{Nenn,Modell} * b_{Nenn,Modell} = 5 \text{ mm} * 40 \text{ mm} = 200 \text{ mm}^2 \quad (8.3)$$

Daraus folgt die Zugkraft des Modells in y-Richtung:

$$F_{y,Modell} = \sigma_{yy,Nenn} * A_{Nenn,Modell} = 1 * 200 = 200 \text{ N} \quad (8.4)$$

### 8.2.1 Simulationsergebnisse

Die Simulation bestätigt, dass der Übergang vom verschliffenen Nahtende zum Gurtblech die maximale Kerbwirkung darstellt. Die Kerbwirkung der Nahtübergänge entlang der Längsnähte und die Kerbwirkung des ellipsenförmigen Ausschnittes des Gurtbleches spielen, wie bei dieser Probengeometrie gewünscht, nur eine untergeordnete Rolle.

Das Spannungsergebnis in Abbildung 8.9 zeigt die kritische Stelle und einen in positive y-Richtung absteigenden Spannungsverlauf. Bei 1 MPa Nennspannung beträgt die Maximalspannung 1,3805 MPa und die Spannung am Ort der Messgittermitte des DMS beträgt 1,1605 MPa.

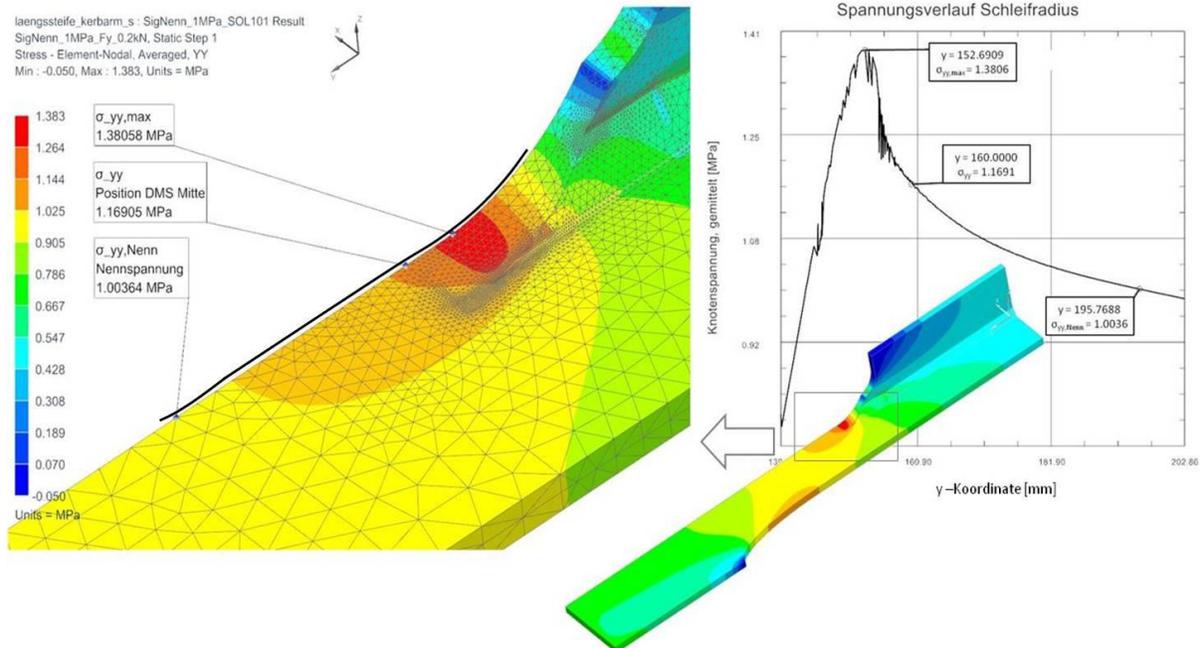


Abbildung 8.9 Spannungsergebnis der Knoten, gemittelt in y-Richtung, schwarze Linie → Graph Spannungsverlauf

Das Gleiche gilt auch für die Dehnungsergebnisse in Abbildung 8.10. Bei 1 MPa Nennspannung beträgt die Maximaldehnung 6,61323  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Die über das DMS-Messgitter gemittelte Dehnung beträgt 5,67449  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

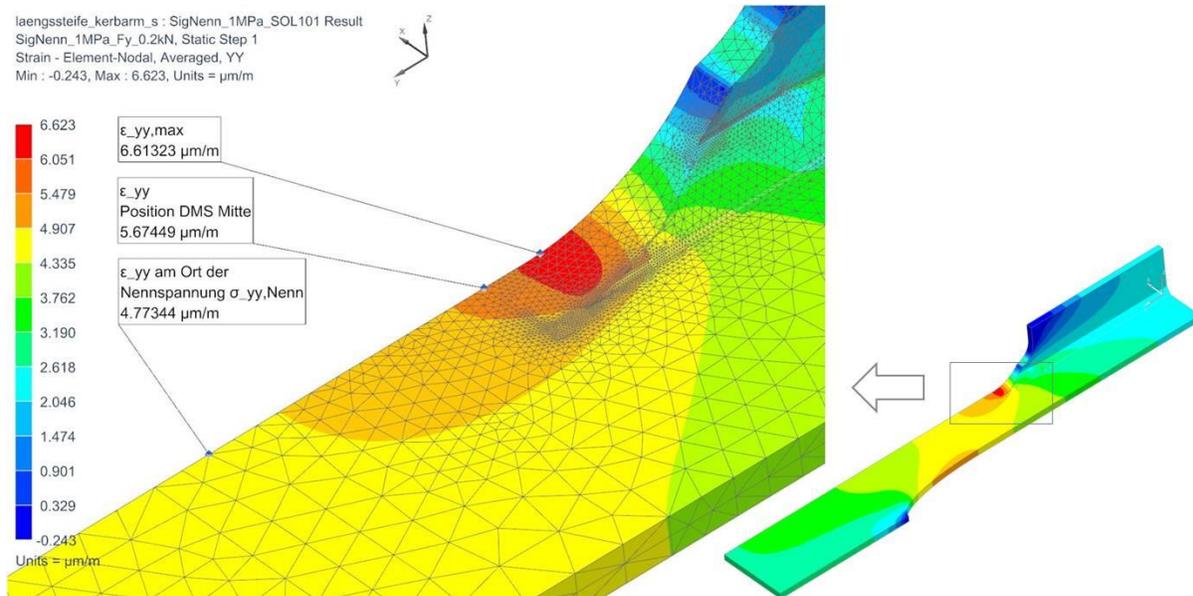


Abbildung 8.10 Dehnungsergebnis der Knoten, gemittelt in y-Richtung

Die Längenänderung des Modells aus Alform 700 M wird ermittelt durch die Verschiebung des Auswertepunktes der Längenänderung in positive y-Richtung, der in Abbildung 7.1 eingezeichnet ist. Die Verschiebung des Auswertepunktes (halbe Verschiebung!) beträgt für das NX Modell 0,00123831 mm bei Nennspannung 1 MPa. Die Auswertepunkte der Längenänderung befinden sich mittig auf den Einspannflächen der Spannbacken (zur Hälfte schraffiert in Abbildung 7.1) der Prüfmaschine. Es kann deshalb nicht die gesamte Längenänderung des NX Modells verwendet werden, da man davon ausgehen muss, dass die Spannbacken einen Einfluss auf die Verformung der Probe haben. Die Auswertepunkte werden daher direkt auf den Einspannflächen gewählt. Nähere Untersuchungen zum Einfluss der Spannbacken finden sich in der Masterarbeit von Dipl.-Ing. Putz, [1].

Zusammenfassend gibt es folgende Ergebnisse in Tabelle 8.3 aus der Simulation mit Siemens NX 11 an der theoretischen Stelle des DMS. Zur Definition der DMS-Position siehe Abbildung 7.1 und Abbildung 9.5.

Beschreibung	Bezeichnung	Größe	Einheit
Längenänderung Modell abzüglich Einspannung	$\Delta l_M^2$	0,00123831	mm pro 0,2 kN
Längenänderung Kleinprobe abzüglich Einspannung	$\Delta l_{KP} = 2 * \Delta l_M$	0,00247662	mm pro 0,8 kN
Spannung in x-Richtung	$\sigma_{xx,M}$	-0,0751933	MPa pro 0,2 kN
Spannung in y-Richtung	$\sigma_{yy,M}$	1,16905	MPa pro 0,2 kN
Spannung in z-Richtung	$\sigma_{zz,M}$	-0,000112408	MPa pro 0,2 kN
Dehnung in x-Richtung	$\epsilon_{xx,M}$	-2,027975370	$\mu\text{m}/\text{m}$ pro 0,2 kN
Dehnung in y-Richtung	$\epsilon_{yy,M}$	5,674488875	$\mu\text{m}/\text{m}$ pro 0,2 kN
Dehnung in xy-Richtung	$\gamma_{xy,M}$	-1,005936001	$\mu\text{m}/\text{m}$ pro 0,2 kN
Dehnung in z-Richtung	$\epsilon_{zz,M}$	-1,563189016	$\mu\text{m}/\text{m}$ pro 0,2 kN

Tabelle 8.3 Ergebnisse aus der NX Simulation des Kleinprobenmodells an der DMS-Position

Die berechneten Werte für  $\epsilon_{yy,M}$  und  $\Delta l_{KP}$  aus Tabelle 8.3 fließen im Kapitel 9 in die Umrechnung der gemessenen Größen des Drehgestells auf die reale Kleinprobe mit ein.

---

<sup>2</sup> Index M oder Modell = 1/8-Modell der Kleinprobe

## 9 Umrechnungsparameter - Vom Drehgestellrahmen zur Kleinprobe

Die Modellähnlichkeitstheorie besagt, dass Größen des originalen Bauteils mit Hilfe von dimensionslosen Kennzahlen, welche durch eine entsprechende Einheitsgröße normiert wurden, auf ein Modell des Bauteils zurückgeführt werden können. Das Kleinprobenmodell eines Bauteils stellt ein vereinfachtes Detailmodell des originalen Bauteils dar. Die Erforschung des Kleinprobenmodells spart Zeit und Kosten bei der Weiterentwicklung des originalen Bauteils. Im folgenden Abschnitt werden daher diese Umrechnungsfaktoren mit Hilfe von Tabelle 8.2 und Tabelle 8.3 ermittelt:

- Umrechnungsfaktor für die Kraft des Zylinders normiert auf  $1 \frac{\mu m}{m}$  Dehnung
- Umrechnungsfaktor für den Weg des Zylinders normiert auf 1 kN Zugkraft

Laut Abbildung 9.1 werden nun die Parameter der Modellähnlichkeit bestimmt. Mit diesen Inputdaten kann in weiterer Folge der Prüfzylinder gesteuert werden und die gleiche Dehnung am Kleinprobenmodell verursachen, die aus dem Streckenversuch bekannt ist.

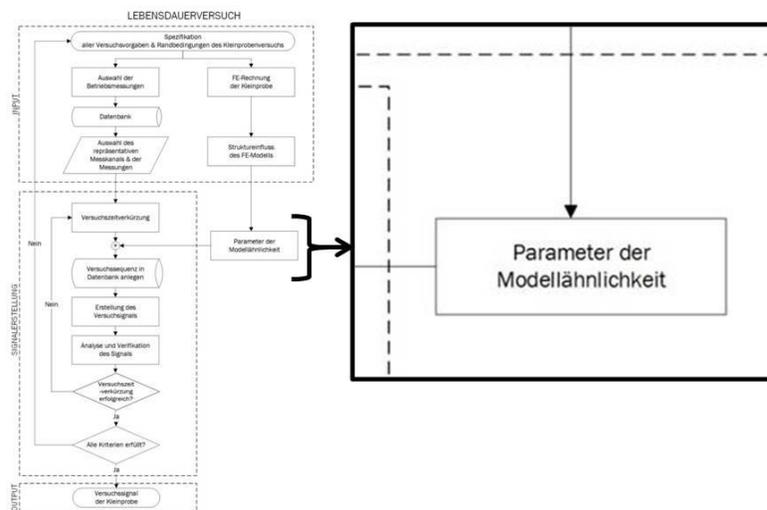


Abbildung 9.1 Umrechnungsparameter der Kleinprobe bestimmen, siehe auch Abbildung 2.3

Die Modellgeometrie des NX Modells entspricht einem 1/8-Modell der Kleinprobe. Das heißt, dass die Zugkraft der Kleinprobe wie auch die Nennquerschnittsfläche 4-mal so groß sein müssen, wie die des NX Modells. Die gesamte Zugkraft der Kleinprobe in y-Richtung bezogen auf den Nennquerschnitt der Kleinprobe ergibt sich damit zu:

$$F_{y,KP^3} = 4 * F_{y,Modell^4} = 4 * 200 = 800 \text{ N} = 0,8 \text{ kN} \quad (9.1)$$

<sup>3</sup> Index KP = Kleinprobe

<sup>4</sup> Index M oder Modell = 1/8tel-Modell der Kleinprobe im NX

### 9.1 Umrechnungsfaktor der Dehnung [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ] in Kraft des Zylinders [kN]

Der Umrechnungsfaktor  $e2F$  (= epsilon to force) für  $\varepsilon_{yy,1} = 1 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$  errechnet sich zu:

$$e2F = \frac{\varepsilon_{yy,1}}{\varepsilon_{yy,M}} * F_{y,KP} \quad (9.2)$$

$$e2F = \frac{1}{5,674488875} * 0,8 = 0,140981861 \text{ kN pro } \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$$

vorausgesetzt die Dehnung bleibt konstant:  $\varepsilon_{yy,M} = \varepsilon_{yy,KP}$

### 9.2 Umrechnungsfaktor der Kraft [kN] in den absoluten Weg des Zylinders [mm]

Der absolute Weg des Zylinders wird immer vom Ausgangszustand  $\text{Hub} = 0 \text{ mm}$  angegeben.

Die Längenänderung des NX Modells bei einer Zugkraft von 0,2 kN abzüglich der Länge der beiden Einspannflächen ist:

$$\Delta l_M = 0,00123831 \text{ mm}$$

Die Längenänderung der Kleinprobe bei einer Zugkraft von 0,8 kN abzüglich der Länge der beiden Einspannflächen ist:

$$\Delta l_{KP} = 2 * \Delta l_M = 2 * 0,00123831 = 0,00247662 \text{ mm} \quad (9.3)$$

Gesucht ist nun der Umrechnungsfaktor der absoluten Längenänderung  $F2d$  (= force to distance) der Kleinprobe bei einer Zugkraft  $F_{y,1}$  von 1 kN:

$$F2d = \Delta l_{KP} * \frac{F_{y,1}}{F_{y,KP}} \quad (9.4)$$

$$F2d = 0,00247662 * \frac{1}{0,8} = 0,003095775 \text{ mm pro kN}$$

### 9.3 Umrechnungsfaktor des absoluten Weges [mm] in den relativen Weg des Zylinders [mm]

Der relative Weg des Zylinders beinhaltet nur die Wegamplitude zwischen minimalem und maximalem Hub beziehungsweise zwischen zwei Hübten. Der Offset vom Ausgangszustand  $\text{Hub} = 0 \text{ mm}$  zur Mittellage wird für jeden Datenpunkt abgezogen.

$$d_{relativ}(x_i, y_i) = d_{absolut}(x_i, y_i) - d_{absolut}(x_1, y_1) \quad (9.5)$$

mit dem Offset  $x_1 = 0 \text{ sec}$ ,  $y_1 = 0,349 \text{ mm}$

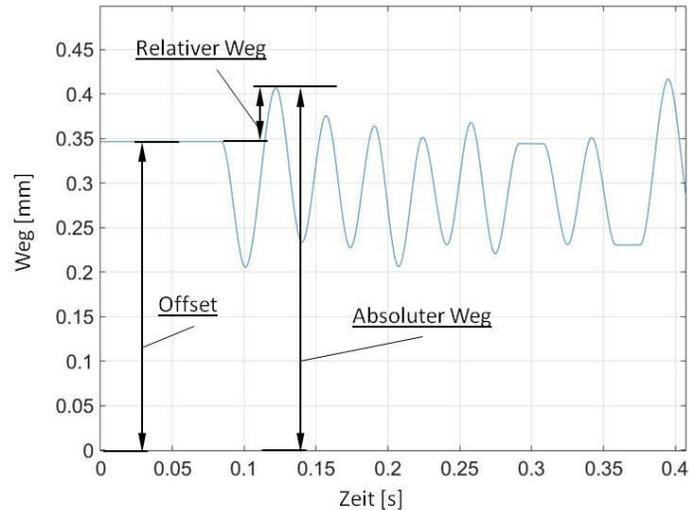


Abbildung 9.2 Wegdefinition Prüfzylinder

## 9.4 Umrechnungsfaktor der Dehnung in $\mu\text{m}/\text{m}$ in die Spannung in MPa

Aus dem Streckenversuch sind nur die Dehnungsergebnisse des linearen DMS am Schweißnahtabbinder vorhanden. Im realen Betrieb herrscht jedoch ein multiaxialer Beanspruchungszustand. Ob die Querdehnung, wenn gleich es sich um einen sehr geringen Anteil handelt, bei der Umrechnung auf die Spannung eine Rolle spielt, wird in diesem Abschnitt behandelt.

Um Kenntnis über die nicht gemessene Querdehnung zu erlangen, wird das Dehnungsverhältnis am Langträger Untergurt aus der FE-Rahmensimulation des SF100L mittels NX verwendet.

### 9.4.1 Dehnungen aus der FE-Rahmenberechnung

Abbildung 9.3 zeigt das Verhältnis der simulierten Dehnung in x-Richtung zur Dehnung in y-Richtung am Nahtende beim Federtopf am Langträger Untergurt des SF100L Rahmens. Die Dehnung (blau) wird über 6251 repräsentative Lastfälle der Rechnung dargestellt. Man kann sehen, dass sich die Werte trotz der Einwirkung der Beanspruchungen verschiedener Lastfälle entlang einer Ausgleichsgeraden sammeln und ein lineares Dehnungsverhältnis aufweisen. Das Strukturdetail des Abbinders beim Federtopf am Untergurt zeigt somit ein charakteristisches Verhalten bei unterschiedlichen Beanspruchungen auf.

Es ist zulässig von der FE-Rechnung auf das Verhältnis der Querdehnung zu schließen, wenn ...  
 ... das Querdehnungsverhältnis der Rahmensimulation linear ist, wie in Abbildung 9.3,  
 ... der Werkstoff unter den betrachteten Beanspruchungen im linear-elastischen Bereich bleibt  
 ... und eine lineare Wöhlerlinie für die Bewertung herangezogen wird.

Diese Forderungen werden in der vorliegenden Masterarbeit erfüllt und der Querdehnungsfaktor darf angeführt werden.

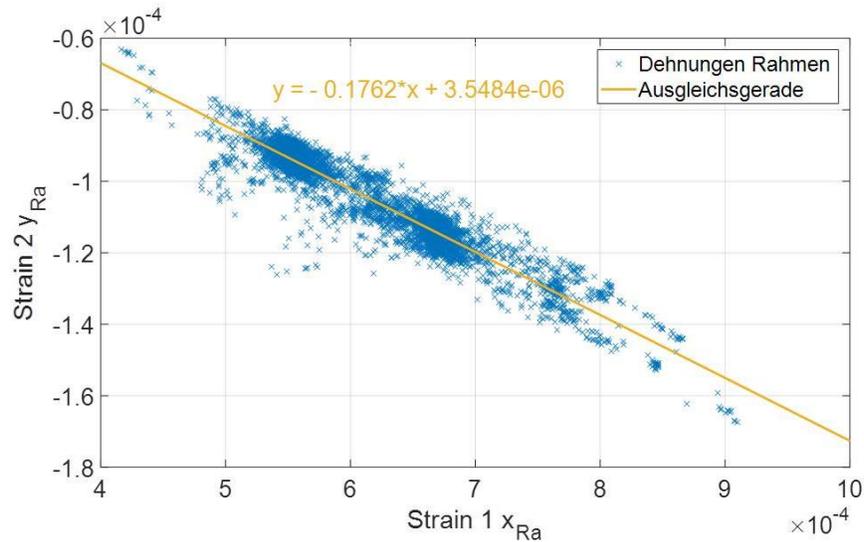


Abbildung 9.3 Ausgleichsgerade der berechneten Dehnungen [2] aus der FE-Rahmenrechnung des SF100L

Bei der Betrachtung der berechneten Dehnungswerte aus der FE-Rechnung muss der Unterschied des Eval Item-Koordinatensystems im Vergleich zum DMS-Koordinatensystem wie in Abbildung 9.4 und Abbildung 9.5 berücksichtigt werden.

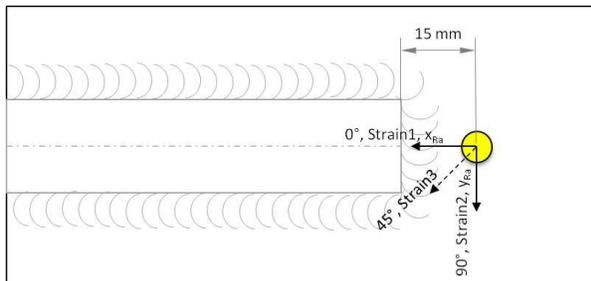


Abbildung 9.4 Koordinatensystem<sup>5</sup> des virtuellen Auswertepunktes (Eval Item) der FE-Rahmenberechnung [2]

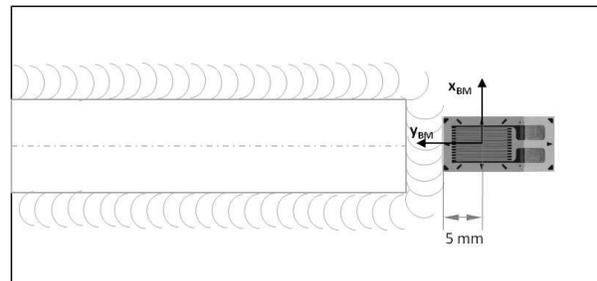


Abbildung 9.5 Um  $-90^\circ$  gedrehtes Koordinatensystem<sup>6</sup> des DMS bei der Messung [25]

Wie sich die Dehnungen Strain 1  $x_{Ra}$  und Strain 2  $y_{Ra}$  jeweils über die Lastfälle der FE-Rechnung verhalten, ist im Anhang 16.8 dokumentiert.

<sup>5</sup> Ra = Rahmen bzw. FE-Rahmenrechnung

<sup>6</sup> BM = Betriebsmessung bzw. Streckenversuch

### 9.4.2 Vorgangsweise zur Bestimmung des Querdehnungsfaktors

Der virtuelle Auswertepunkt, auch Eval Item genannt, am Abbinder des Federtopfes am Untergurt wurde mittels des Programmes FatAss (Fatigue Assessment) generiert. FatAss wurde von Siemens eigens zur automatischen Betriebsfestigkeitsbewertung von Bauteilen mittels technischer Normen entwickelt. Der virtuelle Auswertepunkt befindet sich in 15 mm Abstand zur Blechkante des Steges und auf Höhe der Mitte des Stegbleches, laut Abbildung 9.4. Dieser Abstand wurde anhand der DMS Position im Streckenversuch gewählt. Er enthält die Dicke des Kehlnahtendes, den Nahtübergang zum Gurt und den Abstand von 5 mm zur Mitte des DMS. Abweichungen der idealen zur realen Schweißnahtgeometrie werden hier nicht berücksichtigt.

Aus der Dehnung der FE-Rechnung in x- und y-Richtung ergibt sich eine durchschnittliche, lineare Ausgleichsgerade (gelb), wie in Abbildung 9.3 ersichtlich:

**Durchschnittliche, lineare Ausgleichsgerade:**

$$y = -0,1762 * x + 3,5484 * 10^{-6} \quad (9.6)$$

mit einer Steigung von  $k_1 = -0,1762$

**Zum ebenen Spannungszustand ist folgendes bekannt:**

$$\sigma_{yy} = E * \frac{1}{1 - \nu^2} * (\nu * \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) \quad (9.7)$$

Das Verhältnis von  $\varepsilon_{xx,Ra}/\varepsilon_{yy,Ra}$  ergibt sich somit zu:

$$\varepsilon_{xx,BM} = \varepsilon_{yy,BM} * \frac{\varepsilon_{xx,Ra}}{\varepsilon_{yy,Ra}} = \varepsilon_{yy,BM} * k \quad (9.8)$$

durch einsetzen von Formel (9.8) in Formel (9.7) erhält man den Querdehnungsfaktor  $f_{\varepsilon_{xx,Ra}, \varepsilon_{yy,Ra}, \nu}$ , der von Dehnung des Rahmens in  $x_{Ra}$ - und  $y_{Ra}$ -Richtung und von der Querkontraktionszahl  $\nu$ , siehe Tabelle 8.2, abhängt:

$$\sigma_{yy} = E * \frac{1}{1 - \nu^2} * (\nu * k + 1) * \varepsilon_{yy,BM} = E * f_{\varepsilon_{xx,Ra}, \varepsilon_{yy,Ra}, \nu} * \varepsilon_{yy,BM} \quad (9.9)$$

$$f_{\varepsilon_{xx,Ra}, \varepsilon_{yy,Ra}, \nu} = \frac{1}{1 - \nu^2} * (\nu * k + 1) \quad (9.10)$$

Mit den Werten aus der FE-Rahmenrechnung und Formel (9.4) erhält man den Einfluss der Querdehnung:

$$f_{\varepsilon_{xx,Ra}, \varepsilon_{yy,Ra}, \nu} = \frac{1}{1 - \nu^2} * (\nu * k_1 + 1) = \frac{1}{1 - 0,3^2} * (0,3 * -0,1762 + 1) = 1,040813$$

Daraus folgt, dass die Spannungsüberhöhung in y-Richtung im ebenen Spannungszustand gegenüber dem einachsigen Spannungszustand ca. 4% beträgt.

Der Querdehnungsfaktor beträgt somit  $f_{\varepsilon_{xx,Ra},\varepsilon_{yy,Ra},\nu} = 1,04$ .

Der berechnete Erhöhungsfaktor für die Spannung spielt für die Prüfsignalerstellung selbst keine Rolle, da dies auf Basis der Dehnungen geschieht. Er fließt lediglich in die zu erwartenden Spannungskollektive des Prüfsignals mit ein.

## 9.5 Die Umrechnungsfaktoren

Zusammenfassend lauten die erhaltenen Umrechnungsfaktoren wie folgt:

Beschreibung	Bezeichnung	Umrechnungsfaktor	Einheit
Dehnung in Kraft umrechnen	e2F	0,140981861	kN pro 1 $\mu\text{m}/\text{m}$
Kraft in absoluten Weg umrechnen	F2d	0,003095775	mm pro 1 kN
Dehnung in Spannung umrechnen (ESZ)	$f_{\varepsilon_{xx,Ra},\varepsilon_{yy,Ra},\nu}$	1,040813	[-]

Tabelle 9.1 berechnete Umrechnungsfaktoren für die Modellähnlichkeit

### 9.5.1 Beispiel für die Umrechnung

Bei einer gemessenen maximalen Dehnung  $\varepsilon_{yy,BM,max} = 1388,72 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$  und dem E-Modul laut Tabelle 8.2, errechnet sich die maximale Spannung jetzt folgendermaßen:

$$\sigma_{yy,KP,max} = E * f_{\varepsilon_{xx,Ra},\varepsilon_{yy,Ra},\nu} * \varepsilon_{yy,BM,max} \quad \text{siehe (9.3)}$$

$$\sigma_{yy,KP,max} = 0,21 * 10^6 * 1,040813 * 1388,72 * 10^{-6} = 303,53 \text{ MPa}$$

Um die gleiche Dehnung wie beim Abbinder während des Streckenversuches zu erhalten, lautet die erforderliche maximale Zylinderkraft auf die Kleinprobe:

$$F_{y,KP,max} = \varepsilon_{yy,BM,max} * e2F \quad \text{siehe (9.2)}$$

$$F_{y,KP,max} = 1388,72 * 0,140981861 = 195,78 \text{ kN}$$

Da der Prüfzylinder kraftgeregelt ist, ist in weiterer Folge das Kraftsignal das Inputsignal für den Prüfzylinder.

Der erforderliche Wert des absoluten Zylinderweges ist dann mindestens:

$$d_{y,KP,max} = F_{y,KP,max} * F2d \quad \text{siehe (9.4)}$$

$$d_{y,KP,max} = 195,78 * 0,003095775 = 0,606104 \text{ mm}$$

Der relative Zylinderweg beträgt an dieser Stelle:

$$d_{relativ,max} = d_{y,KP,max} - d_{absolut}(x_1, y_1) \quad \text{siehe (9.11)}$$

mit dem Offset  $x_1 = 0 \text{ sec}$ ,  $y_1 = 0,349 \text{ mm}$

$$d_{relativ,max} = 0,606104 - 0,349 = 0,257104 \text{ mm}$$

Der vorgegebene Zylinderweg ist eine Mindestangabe, da er nur die Verformung des idealen Modells der Kleinprobe enthält und die Steifigkeit des Prüfstandes nicht bekannt ist. Es muss davon ausgegangen werden, dass der Prüfstand ebenfalls einer gewissen Verformung unterliegt. Dadurch muss der gemessene Zylinderweg während der Prüfung der Kleinproben höher sein als der berechnete.

## 10 Prüfsignalerstellung

Um ein realitätsnahes Prüfsignal zu erhalten, sollen die Daten des in Kapitel 6.2 ausgewählten charakteristischen Streckenversuches des SF100 Laufdrehgestells verwendet werden. So können Reihenfolgeeffekte, die Signalform und die Kollektivform weitestgehend erhalten bleiben.

Während des Streckenversuches werden die von den Messaufnehmern erhaltenen Daten gespeichert. Diese riesigen Datenmengen werden in der Datenauswertung bei Siemens mittels eines Matlab Tools eingelesen. Anschließend müssen die Messdaten sorgfältig kontrolliert und Messabweichungen interpretiert werden. Die fehlerhaften Messungen werden aussortiert und die brauchbaren für die Weiterverarbeitung aufbereitet. Große Datenmengen werden in kleinere Einheiten bzw. einzelne Messungen unterteilt und wieder zu Messgruppen zusammengefasst, was die Bearbeitung erleichtert. Abschließend werden die Daten anhand technischer Normen, wie der EN 13749, technischer Richtlinien wie der FKM 6 und weiterer Siemens interner festgelegter Arbeitsprozesse ausgewertet.

### 10.1 Aufbau des Signalerstellungstools

Als Input zur Signalerstellung wird einerseits der ausgewählte Referenzstreckenversuch benötigt und andererseits die in der FE-Rechnung bestimmten Umrechnungsfaktoren. Die Daten werden mit Matlab und Excel weiterverarbeitet bis zum Betriebslastennachfahrtsignal.

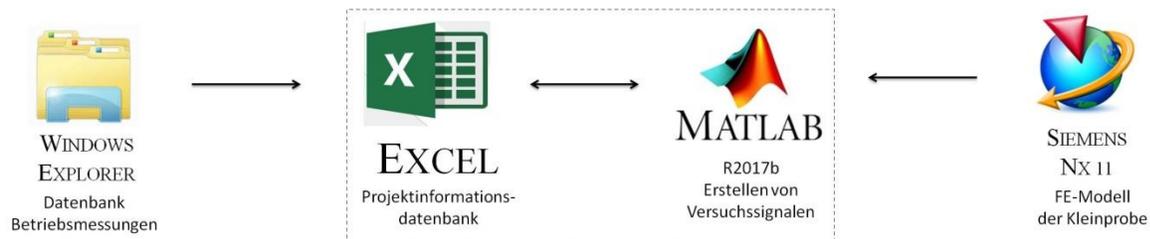


Abbildung 10.1 benötigte Programme und Tools zur Signalerstellung

Der Aufbau der Projektinformationsdatenbank im Excel besteht aus folgenden relevanten Datenblättern:

- Parameter, Project – Allgemeine Projektinformationen
- Channels – Informationen zu den Messkanälen (Nummer, Name, Klassenbreite, usw.)
- Test Rides – Informationen zu den Messungen (Nummer, Name, Beschreibung, usw.)
- Test Ride Groups – Kombinationsmatrix der Messungen
- Payload – Definition der Zuladungen
- Check – Information über den Stand der Daten

In Tabelle 10.1 sind die Bezeichnungen der verwendeten Kanäle (Channels) des Prüfsignalerstellungsprozesses aufgelistet und beschrieben. Die ‚Limit values‘ stellen die oberen und unteren Grenzwerte der in den Kanälen enthaltenen Daten dar und unter ‚Classification‘ findet man die Einteilung und die Breite der Klassen.

Number	Channel Name	Description	Physical Value	Unit	Limit values		Classification			
					min	max	lower limit	upper limit	Number	Class width
1	v_Fzg	Fahrzeuggeschwindigkeit	Geschwindigkeit	km/h	0	162	0	210	211	1,00
2	k.z_1L.Tk	Krümmung über Zeit	Krümmung	1/m	-0,006	0,006	-0,007	0,007	701	0,00002
3	p_1L.RwB6	Druck der Wellenscheibenbremse	Druck	bar	0	4	0	4	201	0,02
4	s.y_1L.Ra1.1L01	Beanspruchung Rahmen	Spannung (Hook'sches Gesetz)	MPa	75	408	30	420	391	1
5	s.y_1L.Ra1.3L01	Beanspruchung Rahmen	Spannung (Hook'sches Gesetz)	MPa	65	270	30	300	271	1
6	s.y_1L.Ra1.4L40	Beanspruchung Rahmen	Spannung (Hook'sches Gesetz)	MPa	79	291	20	300	141	2
7	s.y_1L.Ra1.1L40	Beanspruchung Rahmen	Spannung (Hook'sches Gesetz)	MPa	44	242	20	300	141	2
8	s.y_1L.Ra1.4L01	Beanspruchung Rahmen	Spannung (Hook'sches Gesetz)	MPa	37	222	30	300	271	1
9	d_Fzg	Zurückgelegter Weg (Messstrecke)	Weg	km	0	22	0	30	31	1
10	F_y	notwendige Zugkraft Prüfsignal	Kraft	kN	50	274	10	300	291	1
11	d.y_ absolut	notwendiger Weg Prüfsignal (absolut)	Weg	mm	0,2	1	0,04	1	97	0,01
12	e.y_1L.Ra1.1L01	Beanspruchung Rahmen	Dehnung (gemessen)	µm/m	358	1944	350,00	2000,00	1651	1,00
13	s.y_1L.Ra1.1L01_ESZ	Beanspruchung Rahmen	Spannung (Ebener Spannungszustand)	MPa	75	408	30	420	391	1
14	d.y	relativer Weg Prüfsignal (von Mittellage aus)	Weg	mm	-0,2	0,3	-0,4	1	141	0,01

Tabelle 10.1 Projektinformationsdatenbank Excel, Übersicht Messkanäle (Channels)

## 10.2 Inputdaten aus dem Streckenversuch

Tabelle 10.2 dient der Übersicht und der Erklärung der verwendeten Bezeichnungen zur Benennung von Messfahrtgruppen und Kanälen aus dem Matlab.

Bezeichnung	Typ	Nummer Streckenversuch	Nummer Signalerstellung	Datentyp	Beschreibung
G046_S_B_Betriebsfestigkeit_extrap-4.5Gm	Messgruppe	700	193	beladen, „B“	Beladene Messfahrten
G047_S_L_Betriebsfestigkeit_extrap-4.5Gm	Messgruppe	701	453	leer, „L“	Leere Messfahrten
G054_S_B-L_Betriebsfestigkeit_Einsatz_extrap-4.5Gm	Messgruppe	708	---	variabel, „V“	Messfahrten mit Beladewechsel
e.y_1L.Ra1.1L01	Kanal	176	12	Dehnungen	gemessene Dehnung
s.y_1L.Ra1.1L01	Kanal	258	4	Spannungen	berechnete Spannung
1L01	DMS	---	---	Position	Position des DMS am Rahmen, 1.Quadrant Nahtende Federtopf außen

Tabelle 10.2 Bezeichnung Inputdaten aus dem Streckenversuch (siehe auch Tabelle 6.4 und Abbildung 6.7)

Aus dem Streckenversuch des SF100L zur Repräsentation des Abbinders der DMS Position 1L01 werden die Messfahrtgruppen mit leerem „L“, beladenem „B“ und wechselndem „V“ Beladezustand ausgewählt. Die drei Messfahrtgruppen wurden auf die Designlaufleistung von 4.500.000 km extrapoliert. Im Beladezustand „Leer“ wurden insgesamt 1703 km auf Österreichischem Schienennetz zurückgelegt und im Beladezustand „Beladen“ 1812 km. Die genauen Strecken sind im Anhang in Abbildung 16.1 und Abbildung 16.2 angeführt. Der wechselnde Beladezustand „Variabel“ ergibt sich durch die Addition der Messfahrtgruppe „Leer“ und der Messfahrtgruppe „Beladen“. Durch die Extrapolation auf 4.500.000 km enthält die Gruppe „Variabel“ 15.000 Beladewechsel. [25]

### 10.2.1 Problem bei der Verwendung von Spannungen

Von den aufgelisteten Messfahrtgruppen wurden in der Streckenversuchsauswertung Spannungskollektive erstellt, obwohl es sich bei der gemessenen Größe um Dehnungen handelt. Der Grund für die Verwendung der Spannungskollektive ist, dass die aktuellen, verwendeten Standards und Richtlinien sich mit den Richtwerten auf Spannungen beziehen.

Die Dehnung wurde mit einem linearen Dehnmessstreifen in Querrichtung zur Abbindenaht (siehe Abbildung 6.7) gemessen. Aufgrund der Verwendung von linearen DMS stehen aus dem Streckenversuch keine Informationen zur Querdehnung am Nahtende am Langträger Untergurt zur Verfügung.

Somit kann die tatsächliche Spannung nicht ermittelt werden und es wurde in der Festigkeitsbewertung der einachsige Spannungszustand ausgewiesen. Diese Pseudospannung  $\sigma$  wurde linear mittels des E-Moduls über das Hook'sche Gesetz aus der Dehnung  $\varepsilon$  bestimmt. [25]

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (10.1)$$

Das Spannungskollektiv aus dem Streckenversuch ist in Abbildung 10.2 dargestellt. Es weicht zwar von der Realität ab, enthält aber trotzdem den Hauptanteil des Spannungszustandes.

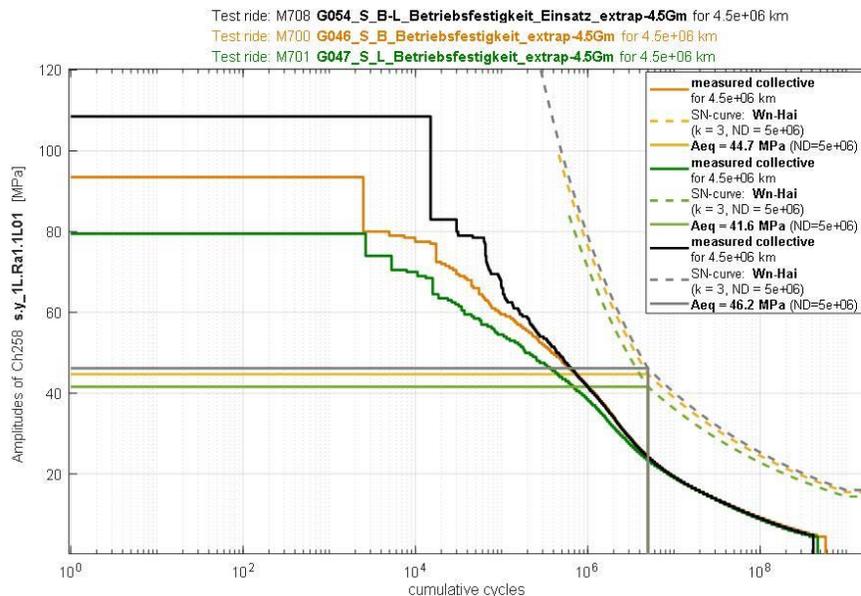


Abbildung 10.2 Rainflow-Kollektive abhängig von der Spannungsamplitude (Pseudospannung OHNE Querdehnung) der leeren (grün), beladenen (orange) und abwechselnd beladenen (schwarz) Streckenversuche des SF100L, [25]

Um die fehlende Querdehnung in die Spannung mit einzubringen, wurde der Querdehnungsfaktor von 1,04 aus der FE-Rechnung berücksichtigt (siehe Abschnitt 9.4.1). Damit kann der ebene Spannungszustand in Abbildung 10.3. abgebildet werden.

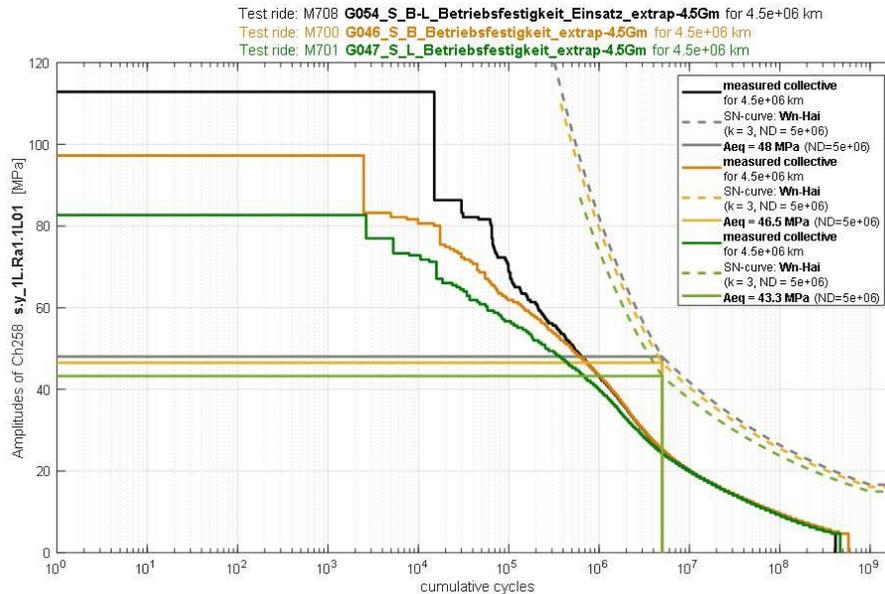


Abbildung 10.3 Rainflow-Kollektive abhängig von der Spannungsamplitude (Pseudospannung MIT Querdehnungsfaktor 1,04) der leeren (grün), beladenen (orange) und abwechselnd beladenen (schwarz) Streckenversuche des SF100L

Die Auswirkungen der Spannungsüberhöhung von 4% auf die Äquivalentamplitude des Betriebskollektivs sind in Tabelle 10.3 dokumentiert.

Messfahrtgruppe	Äquivalentamplitude [MPa]	
	einachsiger Spannungszustand	ebener Spannungszustand (+4%)
Leer	41,6	43,3
Beladen	44,7	46,5
mit Beladewechsel	46,2	48

Tabelle 10.3 Änderung der Äquivalentamplitude bei Berücksichtigung der Querdehnung

Bei der Verwendung der Dehnung stellt sich das beschriebene Problem nicht. Der Prüfsignalerstellungsprozess im Folgenden findet daher auf Basis der gemessenen Dehnung statt, während sich die nachfolgende Auswertung der Prüfsignale auf die umgerechnete Pseudospannung ohne Querdehnungsfaktor bezieht, wie es in der Auswertung der Streckenversuche der Fall ist.

**Weitere Anmerkung zu den Kollektiven in Abbildung 10.2 und Abbildung 10.3:**

Die Kollektive aus der Streckenversuchsauswertung weisen im Bereich von 10<sup>9</sup> Lastwechseln bereits ein gekürztes Kollektiv auf. Dieses kommt durch einen zusätzlich eingeführten Hysteresefilter (relativer Kollektiv-CutOff, laut Formel (10.2)) für kleine Amplituden zustande, um Einflüsse bezüglich gewählter Klassenbreite und Schwingspiele, die kaum Einfluss auf die Bauteilschädigung haben, zu eliminieren.

**Beispiel: Relativer Kollektiv-CutOff für das Betriebslastensignal „Leer“:**

$$CutOff_{rel,orig,L} = \frac{A_{cutOff,orig,L}}{A_{eq_{soll}}} * 100 = \frac{4}{41,6} * 100 \approx 10 \% \quad (10.2)$$

Die hier verwendeten Zahlenwerte sind Abbildung 10.9 zu entnehmen.

**10.3 Anforderungen an das Prüfsignal**

Die Anforderungen an das Prüfsignal sind im Vorfeld genau zu definieren und sollen für die Lebensdauerprüfung so gut wie möglich eingehalten werden, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

- Es ist empfehlenswert, dass das Kollektiv des Prüfsignals ein Lebensdauervielfaches A im Bereich von 256 zu erreichen, da sich damit eine Schadenssumme  $D_m$  von 0,5 wie bei den Streckenversuchen einstellt. Damit ist man unabhängig von den Schädigungstheorien, siehe Abbildung 3.2 und Abbildung 10.18.
- Die Fahrbarkeit des Signals ist ein weiterer wichtiger Punkt, der bei der Erstellung des Betriebslastennachfahrsignals unbedingt beachtet werden muss. Damit ist gemeint, dass das vorgegebene Signal vom Prüfzylinder am Prüfstand umsetzbar sein muss. Die Leistungsparameter sind in Tabelle 7.2 angegeben, wie zum Beispiel die Fahrgeschwindigkeit, die Beschleunigung und die Frequenz des Prüfzylinders und der Systemdruck und die Regelbarkeit des Prüfstandes.
- Die Prüfdauer des Signals spielt eine große Rolle, da sie direkt mit den Kosten zusammenhängt und das Budget der Prüfreihe nicht überschreiten soll.
- Das Prüfsignal soll Beladewechsel während des Betriebes berücksichtigen, siehe Abschnitt 10.6.

Die anfängliche Voraussetzung war es, dass das Versuchssignal eine maximale Dauer von 30 Sekunden bei einer maximalen Abtastrate von 5000 Hz haben darf, da der Speicherplatz des Reglersystems begrenzt war. Daraus ergab sich die maximal mögliche Auflösung des Signals in Datenpunkten:

$$Dauer \text{ in Sekunden} * Abtastrate \text{ in Hz} = \text{Anzahl der Datenpunkte}$$

$$30 \text{ sec} * 5000 \text{ Hz} = 150.000 \text{ Datenpunkte}$$

Während des Signalerstellungsprozesses dieser Masterarbeit wurde schließlich durch das Feedback aus der Signalerstellung der Speicherplatz des Prüfstandes erweitert. Die Signaldauer ist jetzt nicht mehr durch den Speicherplatz begrenzt, sondern nur noch durch das Budget und die Dauer der Versuchsreihe. Die Abtastrate von 5000 Hz wird beibehalten.

- Somit lautet die neue Forderung an die Signalerstellung, laut FKM 6 [6]:

**Loop 1**      1 Signal für Leer, Beladen und mit Beladewechseln      => 3 Signale

Lebensdauer vielfaches  $A \approx 256$ , Schadenssumme  $D_m = 0,5$

**Loop 2**      1 Signal für Leer, Beladen und mit Beladewechseln      => 3 Signale

Lebensdauer vielfaches  $A \approx 16$ , Schadenssumme  $D_m = 1,0$

Loop 1 soll, wie oben erwähnt, Schadenssummen von 0,5 entsprechend der Streckenversuche erreichen und Loop 2 soll, wie es bei Lebensdauerexperimenten gängige Praxis ist, Schadenssummen im Bereich von 1,0 erreichen.

Insgesamt sollen 6 Signale erstellt werden, wobei die 2 Signale mit Beladewechseln für den Lebensdauerexperiment relevant sind, die restlichen 4 werden zur Erstellung dieser benötigt.

Die Inputdaten und die Ergebnisse des Signalerstellungsprozesses sind für die Spannung ohne Querdehnungsfaktor in Tabelle 10.8 dokumentiert.

Es startet nun der Signalerstellungsprozess laut Abbildung 10.4.

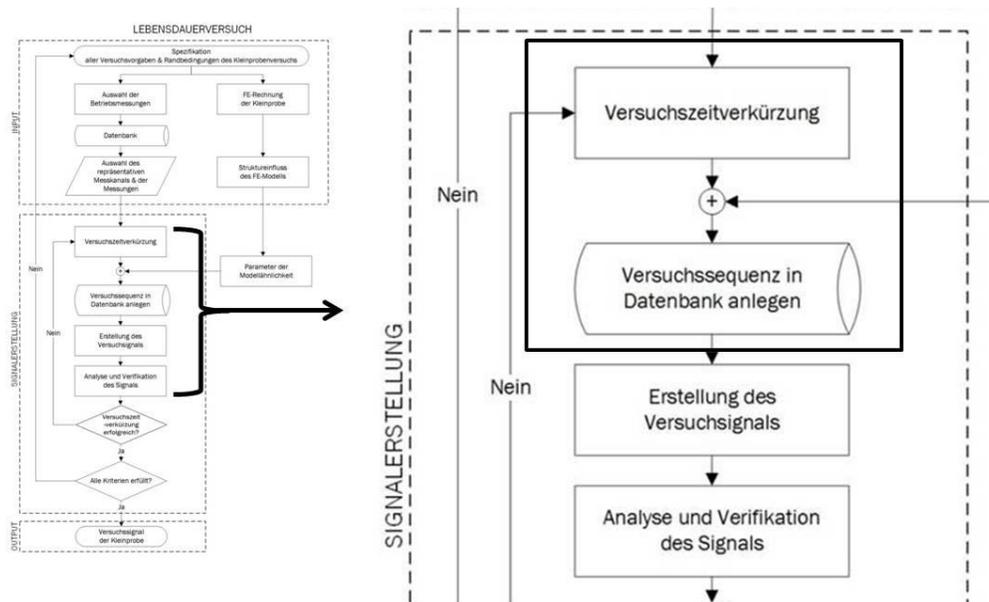


Abbildung 10.4 Erstellung der Versuchssequenz, siehe auch Abbildung 2.3

## 10.4 Erstellen der Versuchssequenz

Eine Sequenz ist eine zeitunabhängige Abfolge von Datenpunkten, die Informationen über die Größe und Reihenfolge der Schwingspiele enthalten.

Die Erstellung der Versuchssequenz aus dem gemessenen, zeitabhängigen Signal wird durch folgende Schritte bestimmt:

1. Wahl der Wöhlerlinie
2. Rainflow-Kollektivierung der Streckenversuchsdaten
3. Versuchszeitverkürzung durch Omission
4. Versuchszeitverkürzung durch Eliminieren von Haltezeiten
5. Optimieren der Sequenz

**Anmerkung:** Die Beschreibung der Erstellung der Versuchssequenz für Loop 1 und Loop 2 erfolgt am Beispiel der Zahlenwerte der Messfahrtgruppe mit Beladezustand „Leer“!

### LOOP 1

---

**Annahme:** Anteil an der ursprünglichen Äquivalentamplitude<sup>7</sup> (41,6 MPa) = 95%

#### 10.4.1 Wahl der Wöhlerlinie

Bei der zur Auswertung gewählten Wöhlerlinie handelt es sich um die Variante Miner modifiziert, auch Wöhlerlinie nach Haibach genannt [3]. Für geschweißte Bauteile werden die Parameter wie folgt, laut FKM 6 [6], gewählt:

Name SN-curve			SN-curve			effective damage sum		relative Cut-off from $A_{eq}$ ( $N_D$ )	Mean stress sensitivity	
Nr.	Id-Name	Description	Miner Method	k	$N_D$	Deff-Method	$D_{m,min}$		Type of overloading	sensitivity M
5	Wn-Hai	SN-curve for normal stresses of weld seams and miner modified according Haibach damage accumulation method according FKM 6	Haibach	3	5,00E+06	DeffFKM6	0,50	10,0%	none	0,15

Tabelle 10.4 gewählte Wöhler-Linie nach Haibach, k=3, [25]

---

<sup>7</sup> zur Erklärung des Wertes siehe Abschnitt 10.4.2 Rainflow-Kollektivierung der Streckenversuchsdaten

### 10.4.2 Rainflow-Kollektivierung der Streckenversuchsdaten

Noch vor der Versuchszeitverkürzung müssen die Rainflow-Kollektive der originalen Spannungsdaten ohne Querdehnungsfaktor erstellt werden. Dadurch erhält man die Äquivalentamplitude des Messfahrtkollektivs als Bezugswert.

$$Aeq_{original} = Aeq_{soll}$$

Die Äquivalentamplitude der Messfahrtgruppe „Leer“, die mit dem gekürzten Signal laut Vorgabe aus Abschnitt 10.3 erreicht werden soll, hat den Wert:

$$Aeq_{original,Leer} = Aeq_{soll} = 41,6 \text{ MPa}$$

Mit der Kenntnis der originalen Äquivalentamplitude wird nun der Anteil an der Äquivalentamplitude angenommen, der im reduzierten Kollektiv erhalten bleiben soll.

**Annahme: Anteil an der Äquivalentamplitude (41,6 MPa) = 95%**

Das reduzierte Kollektiv soll noch 95 % der ursprünglichen Äquivalentamplitude bereitstellen.

Abbildung 10.5 zeigt die dazugehörige originale Rainflow-Matrix der Messdaten für den Beladezustand „Leer“.

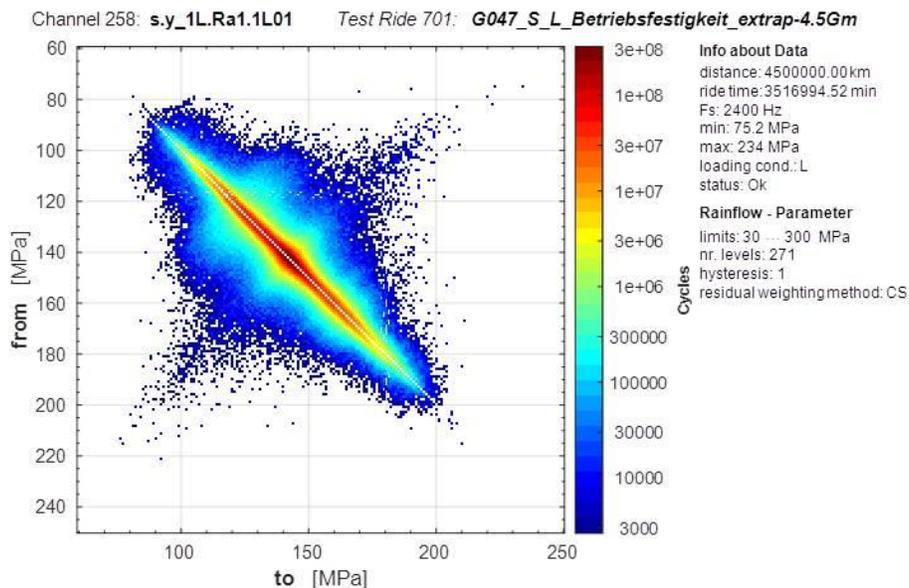
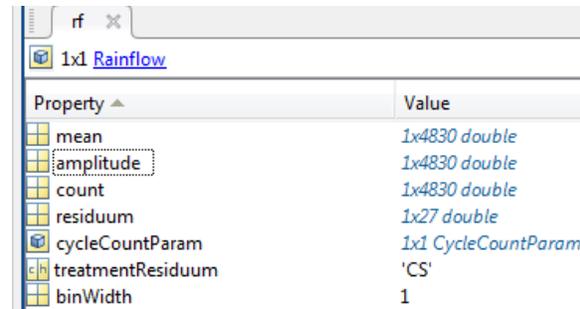


Abbildung 10.5 Rainflow-Matrix, Spannenpaar-Mittelwert-Zählung mittels 4-Punkt-Algorithmus, Matlab

Durch die Rainflow-Zählung sind noch weitere Parameter bekannt, die sich auf die Zusammensetzung der Sequenz nach der Versuchszeitverkürzung auswirken.

- Mittelwert (mean) der Schwingspiele
- Amplitude (amplitude) der Schwingspiele
- Anzahl (count) der Schwingspiele
- Rest (residuum) der nicht geschlossenen Hysteresen
- Zyklusanzahl (cycleCountParam)
- Umgangsweise mit dem Rest (treatmentResiduum, CS: Clormann/Seeger<sup>8</sup>)
- Klassenbreite (binWidth)



Property	Value
mean	1x4830 double
amplitude	1x4830 double
count	1x4830 double
residuum	1x27 double
cycleCountParam	1x1 CycleCountParam
treatmentResiduum	'CS'
binWidth	1

Abbildung 10.6 Rainflow-Objekt definiert mit Matlab

Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass auf die gewählte Klassenbreite, das sich einstellende Residuum und die Umgangsweise mit dem Residuum allgemein bei der Kollektivierung geachtet werden muss. Genauere Ausführungen der Auswirkungen dieser Parameter finden an dieser Stelle aber nicht statt, da sie den Umfang der Masterarbeit überschreiten.

### 10.4.3 Versuchszeitverkürzung durch Omission

Mit Hilfe der Omission ist es möglich, Lastwechsel unter einem definierten Grenzwert, dem sogenannten Threshold-Wert, aus den Daten zu eliminieren. Der Threshold-Wert ist auch im Kollektiv ablesbar, siehe Abbildung 10.9.

$$Threshold \equiv 2 * Amplitude_{CutOff, Kollektiv} \quad (10.3)$$

Es werden alle Werte beibehalten, die zu Lastwechseln führen, die größer sind als der angegebene Threshold-Wert der jeweiligen Messsignale. Das Ergebnis der Omission sind Zeitpunkte in den einzelnen betrachteten Messungen. Zu diesen Zeitpunkten existieren zugehörige Datenpunkte. Diese Datenpunkte bilden die Basis der gekürzten Sequenz und somit auch die Basis dafür den Streckenversuch in einer vertretbaren Versuchsdauer durchführen zu können.

Durch die Angabe des Anteils an der **Äquivalentamplitude (Aeq)** kann das verwendete Matlab Tool den **Omissionsparameter (omp)** ausrechnen. Zusätzlich wird das Minimum und das Maximum der Messfahrtgruppe bestimmt und die **Spanne (Range)** davon angegeben. Daraus lässt sich der Threshold-Wert berechnen:

<sup>8</sup> Methode nach Clormann/Seeger: Das Residuum wird verdoppelt und eine erneute Rainflow-Zählung wird durchgeführt → neues Residuum = 0, [9] [3]

$$Threshold_{Leer} = omp_{Loop 1, Leer} * Range_{max, Leer} \quad (10.4)$$

$$omp_{Loop 1, Leer} (Aeq = 95\%) = 0,1635$$

$$Range_{max, Leer} = 234.39 \text{ MPa} - 75.15 \text{ MPa} \\ = 159.24 \text{ MPa}$$

$$Threshold_{Leer} = 0.1635 * 159.24 \text{ MPa} \\ = 26.04 \text{ MPa}$$

```

ver: 1
time: 7.3694e+05
nMess: 126
xValue: [192*1 double]
Methode: @Raffung_Get_xLocalExtrema_Rainflow
nCh: 4
valueThreshold: 26.0391
TypThreshold: 'relativ'
relativThreshold: 0.1635
nMessThreshold: [1*166 double]
smallestDifference: 0.0500
    
```

Tabelle 10.5 Werte als Beispiel: leere Messfahrt Nr. 126 laut Abbildung 10.8

In Abbildung 10.7 sind alle Einzelmessungen der Messfahrtgruppe „Leer“, sowie alle Minima und Maxima der Messungen in der Messfahrtgruppe dargestellt. Mit dem Minimum und Maximum der Messfahrtgruppe lässt sich der Range angeben, wie oben gezeigt.

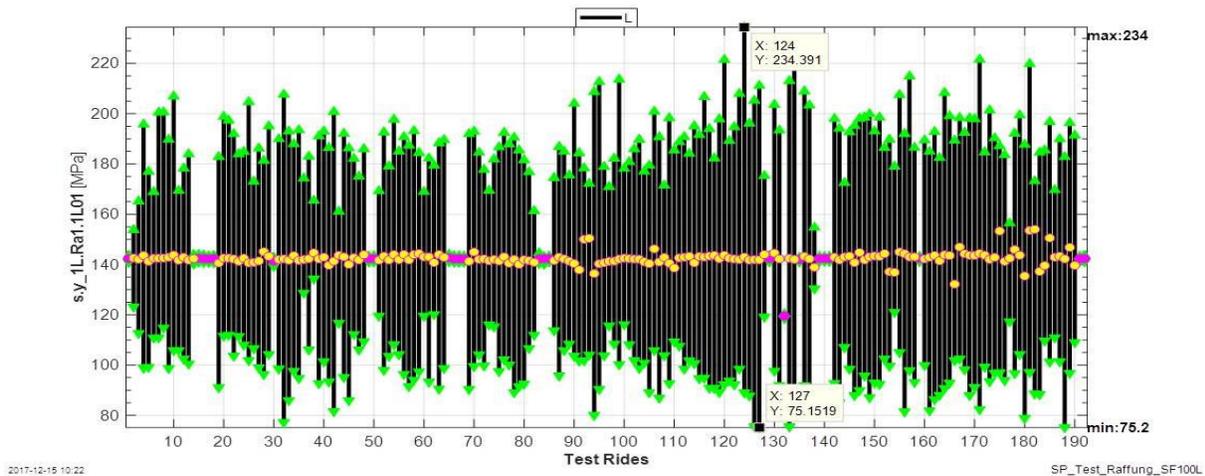


Abbildung 10.7 Darstellung der Min/Max-Werte des gemessenen Signals „Leer“ aus Abbildung 10.7, [25]

Bei der Durchführung der Omission werden alle Zeitpunkte der Schwingspiele mit Zuständen, die größer sind als der Threshold-Wert, herausgesucht und gespeichert. Diese Zeitpunkte dienen zum Erhalt der Zustände für die verkürzte Sequenz, wie beispielhaft in Abbildung 10.8 gezeigt ist.

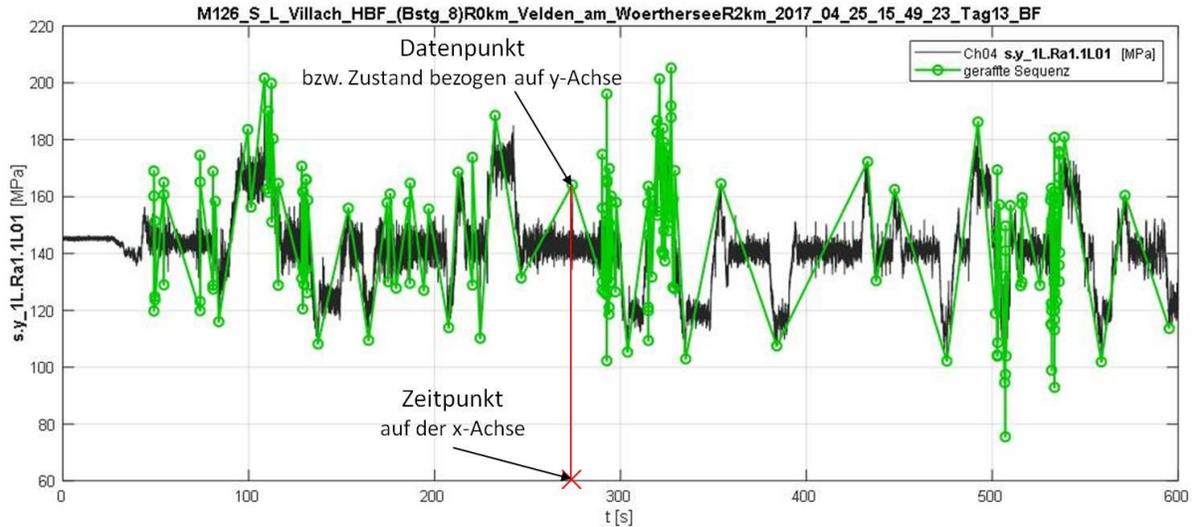


Abbildung 10.8: Beispiel: Darstellung der Umkehrpunkte einer gerafften Sequenz (grün) im Vergleich zum gemessenen Signal (schwarz), [25]

#### Definition Datenpunkt:

*Der Datenpunkt eines Signals wird beschrieben durch einen definierten **Zeitpunkt** (x-Achse) und seinen zugehörigen Größenwert (y-Achse), der auch als **Zustand** bezeichnet wird. (siehe dazu Abbildung 10.8)*

In Abbildung 10.8 kann man erkennen, dass alle Spannen der Schwingspiele (schwarz), die im Bereich des Threshold-Wertes bis 26 MPa liegen, nicht für die Auswahl der Datenpunkte (grün) berücksichtigt werden.

#### 10.4.4 Versuchszeitverkürzung durch Eliminieren von Haltezeiten

Der in Abbildung 10.8 grün dargestellte Verlauf stellt beispielhaft eine verkürzte Sequenz für eine Messfahrt zwischen zwei Bahnhöfen dar. Der gesamte Streckenversuch führte durch ganz Österreich, siehe Abbildung 16.2, und somit werden im Matlab Tool viele solcher gekürzten Einzelsequenzen zu einer Sequenz addiert.

Bei der Addition der Einzelsequenzen muss darauf geachtet werden, dass die Additionspunkte zweier Sequenzen nicht in einem Zustand gleicher Größenordnung sind. Damit ist gemeint, wenn der Endwert einer Sequenz denselben Wert hat wie der Anfangswert der anknüpfenden Sequenz, kann es zu Haltezeiten im Signal kommen. Das bedeutet, dass der Prüfzylinder zwischen diesen zwei Zuständen still steht. So ein Verhalten verlängert die Prüfdauer unnötig und daher muss einer der beiden Zustandspunkte eliminiert werden.

### 10.4.5 Optimieren der Sequenz

Zur Optimierung der gesamten gekürzten Sequenz werden am Anfang und am Ende der Sequenz Nullpunkte auf Höhe der Mittellage hinzugefügt. So hat in weiterer Folge der Weg des Prüfzylinders einen definierten Anfangs- und Endzustand.

Schlussendlich gelangt man zur repräsentativen, gekürzten Sequenz für Loop 1 der Messfahrtgruppe „Leer“ aus dem Streckenversuch.

## Ergebnis LOOP 1

Durch Extrapolation der gekürzten Sequenz auf die Designlaufleistung von 4.500.000 km und anschließende Rainflow-Kollektivierung der extrapolierten Sequenz kommt das Spannungskollektiv für Loop 1 „Leer“, laut Abbildung 10.9, zustande.

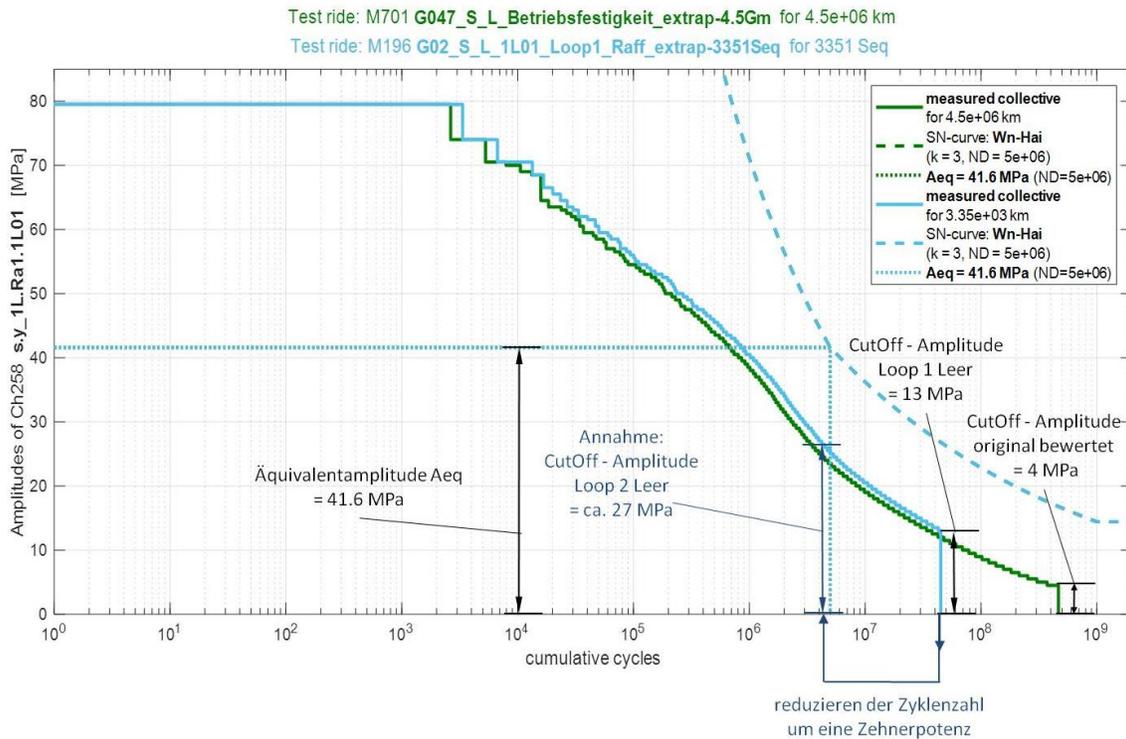


Abbildung 10.9 Spannungskollektiv der originalen Sequenz im Vergleich mit der gerafften Sequenz Loop 1, Beladezustand „Leer“

	Checkliste	
	Forderung	Loop 1 "Leer"
Lebensdauervielfaches A	~ 256	99,11
Schadenssumme D <sub>m</sub>	~ 0,5	0,63
Äquivalentamplitude Aeq	41,6 MPa	41,6 MPa

Wie gefordert entspricht die erhaltene Äquivalentamplitude von Loop 1 „Leer“ der originalen Äquivalentamplitude.

Beim Lebensdauervielfachen und bei der getroffenen Schadenssumme liegt das Ergebnis nur im großräumigen Bereich der Forderung. Eine weitere Annäherung an diese geforderten Werte wird jedoch an dieser Stelle nicht vorgenommen, da auch die Prüfdauer eine große Rolle spielt. Sie gibt die Zeit an, die benötigt wird, um einer Probe das gesamte Betriebsbeanspruchungskollektiv aufzubringen und einen Ausfall herbeizuführen. Die Prüfdauer für das gekürzte Signal aus Loop 1 Leer beträgt 22 Tage mit einer Gesamtlastwechselzahl im Bereich von 45 Millionen Zyklen. Eine weitere Annäherung an die geforderten Werte bedeutet eine noch längere Prüfdauer bei gleichen Leistungsparametern des Prüfzylinders und ist somit nicht sinnvoll.

### **Annahmen für Loop 2**

Unter der Annahme, dass die Sequenzdauer und Zyklenanzahl ein gleichwertiges, zusammenhängendes Verhalten aufweisen, soll eine Reduktion der Zyklenanzahl um eine Zehnerpotenz erfolgen, siehe Abbildung 10.9.

Durch diese Reduktion gelangt man zum Threshold-Wert für Loop 2 „Leer“ nach Formel (10.3):

$$Threshold_{Loop\ 2,Leer} = 2 * A^*_{CutOff,Loop\ 2,Leer}$$

$$Threshold_{Loop\ 2,Leer} = 2 * 27\ MPa = 54\ MPa$$

$$omp_{Loop\ 2,Leer} = \frac{Threshold_{Loop\ 2,Leer}}{Range_{max,Leer}} = \frac{2 * 27}{159,24} = 0,3391 \quad \text{nach Formel (10.4)}$$

Mit Hilfe des Matlab Tools kann der Anteil an der originalen Äquivalentamplitude für Loop 2 bestimmt werden.

$$omp_{Loop\ 2}(Aeq = 41,6\ MPa) = 0,3391 \rightarrow \text{Anteil an Aeq} = 78\%$$

## LOOP 2

---

**Annahme: Anteil an der ursprünglichen Äquivalentamplitude (41,6 MPa) = 78%**

Es werden dieselben Schritte angewandt wie in Abschnitt 10.4 beschrieben. Die Ergebnisdarstellung erfolgt gesammelt in Kapitel 10.9.

Die Schritte von Loop 1 und Loop 2 müssen auch für die Messfahrtgruppe „Beladen“ durchgeführt werden.

### 10.5 Bestimmung der Mittellage

Wenn die zwei Sequenzen „Leer“ und „Beladen“ mit unterschiedlicher Mittellage gemischt werden sollen, ist es empfehlenswert, eine gemeinsame Mittellage zu bestimmen. So können unnötige Amplitudensprünge zwischen den Niveaus der Mittellagen verhindert werden, welche keine realen Lastwechsel darstellen. Über die Mittellage der Spannung kann auf die Mittellage der Prüfkraft umgerechnet werden. Da der Prüfzylinder kraftgeregelt ist, ist es empfehlenswert für die Mittellage der Kraft einen ganzzahligen Wert zu wählen, um die Nachfahr Genauigkeit zu erhöhen.

Am Beispiel der Sequenzen aus Loop 2 „Leer“ und „Beladen“ wird die Berechnung der Mittellage gezeigt:

Die Mittellage der Spannungssequenz von Loop 2 „Leer“ beträgt 143.25 MPa und die Mittellage von Loop 2 „Beladen“ beträgt 190.98 MPa. Die Mittellage der Spannung mit Beladewechsel lautet daher:

$$S_{Mittellage,V} = \frac{(S_{Mittellage,L} + S_{Mittellage,B})}{2} \quad (10.5)$$

$$S_{Mittellage,V} = \frac{(143.25 + 190.98)}{2} = 167.12 \text{ MPa}$$

Umgerechnet nach Formel (9.2) und (10.1) von der Spannung mit Beladewechsel auf die Kraft hat die Mittellage folgenden Wert:

$$F_{Mittellage,V} = \frac{1}{E} * e2F * S_{Mittellage,V}$$

$$F_{Mittellage,V} = \frac{1}{210000} * 0.14098861 * 167.12 = 112.19 \text{ kN}$$

Dieser Wert wird zur einfachen Regelung des Prüfzylinders noch auf eine ganze Zahl gerundet. Die gewünschte Mittellage der Kraftsequenz für den variablen Beladezustand lautet:

$$F_{Mittellage,V} = \text{round}(112.19) = 112 \text{ kN}$$

Um diese Mittellage aus der Umrechnung zu erhalten, wird die Mittellage der Spannung neu bestimmt.

$$S_{Mittellage,V,neu} = \frac{F_{Mittellage,V}}{e2F} * E$$

$$S_{Mittellage,V,neu} = \frac{112}{0.14098861} * 210000 = 166.83 \text{ MPa}$$

Zur klaren Abgrenzung der Sequenz wird das Signal am Anfang und am Ende um Datenpunkte der jeweiligen Mittellage  $nDP_{Mittellage}$  ergänzt.

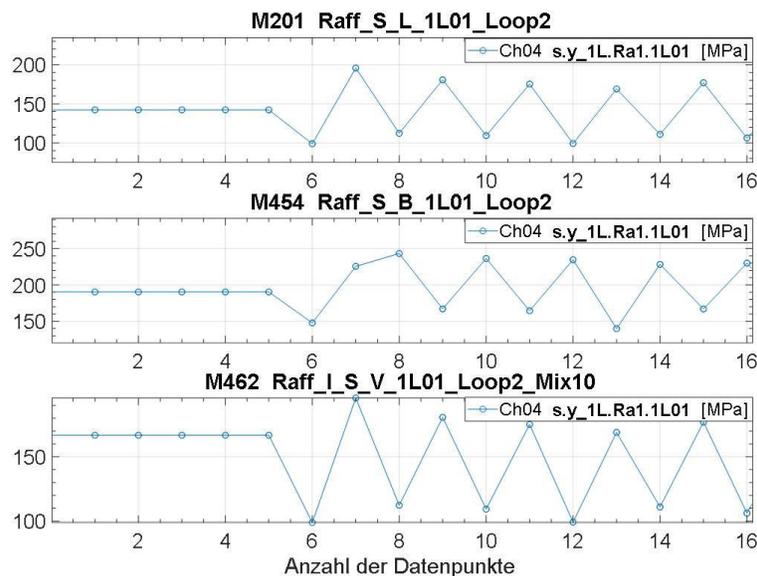


Abbildung 10.10 Darstellung der Mittellage der Sequenzen „L“, „B“ und „V“, Loop 2, Spannungskanal ohne Querdehnungsfaktor

Abbildung 10.12 zeigt deutlich, dass eine Sequenz in diesem Stadium der Signalerstellung nur aus Umkehrpunkten besteht, die linear miteinander verbunden sind. Es handelt sich hierbei noch nicht um ein sinusförmiges Signal!

## 10.6 Mischung – Sequenz mit Beladewechseln

Es existieren nun 4 gerraffte Sequenzen:

Loop 1	Beladezustand „Leer“ und „Beladen“	2 Sequenzen
Loop 2	Beladezustand „Leer“ und „Beladen“	2 Sequenzen

Um ein möglichst realitätsnahes Prüfsignal zu erhalten, ist es sinnvoll Beladewechsel entsprechend des realen Fahrgastbetriebes zu berücksichtigen.

Die Frage, wie die Sequenzen gemischt werden sollen, ist von Bedeutung, wie in Abbildung 10.11 sichtbar. Hier ist ein gemischtes Kollektiv dargestellt, welches nur 1 Beladewechsel



Bei Streckenabschnitten von 150 km auf 3000 km kommen damit im Signal mit Beladewechsel insgesamt 20 Beladewechsel vor.

Für das Aufteilen der Sequenzen „Leer“ und „Beladen“ bedeutet dies:

$$\frac{20}{2} = 10 \text{ Beladewechsel pro Sequenz}$$

Diese beiden Sequenzen werden somit in je 10 gleich große Teile unterteilt, abzüglich der Nullpunkte am Anfang und Ende der Sequenzen, die die Ausgangslage des Prüfzylinders bestimmen (siehe Abschnitt 10.4.5).

### 10.6.2 Mischung der Sequenzen

Die Sequenzen für „Leer“ und „Beladen“ werden in je 10 gleiche Teile geteilt und nacheinander abwechselnd aneinander gereiht. So entsteht die Sequenz mit Beladewechseln („Variabel“).

Über die Anzahl der Datenpunkte  $nDP_{Teil}$  einer Sequenz wird die Größe der einzelnen Teilabschnitte bestimmt:

$$nDP_{Teil} = \text{ceil} \left( \frac{nDP_{Ges} - 2 * nDP_{Mittellage}}{nTeilabschnitte} \right) \quad (10.6)$$

$nDP_{Teil}$	Anzahl der Datenpunkte pro Teilabschnitt
$nDP_{Ges}$	Gesamtanzahl der Datenpunkte einer Sequenz
$nDP_{Mittellage}$	Anzahl der Anfangs- und Endpunkte der Sequenz in Mittellage
$nTeilabschnitte = 10$	Anzahl der Teilabschnitte
$\text{ceil}$	Matlab-Befehl, der eine Kommazahl auf die nächste ganze Zahl aufrundet

#### Beispiel für Loop 2 „Leer“ und „Beladen“:

$$nDP_{Teil,L} = \text{ceil} \left( \frac{2440 - 2 * 6}{10} \right) = 243 \qquad nDP_{Teil,B} = \text{ceil} \left( \frac{2198 - 2 * 6}{10} \right) = 219$$

Mit der Information über die Größe der Teilabschnitte können die Anfangspunkte jedes Teilabschnittes in der Sequenz bestimmt werden, abzüglich der Punkte in Mittellage am Anfang und am Ende der Sequenz. Schlussendlich werden die Sequenzen des Spannungskanals, anhand der bekannten Schnittpunkte, abwechselnd zusammengefügt.

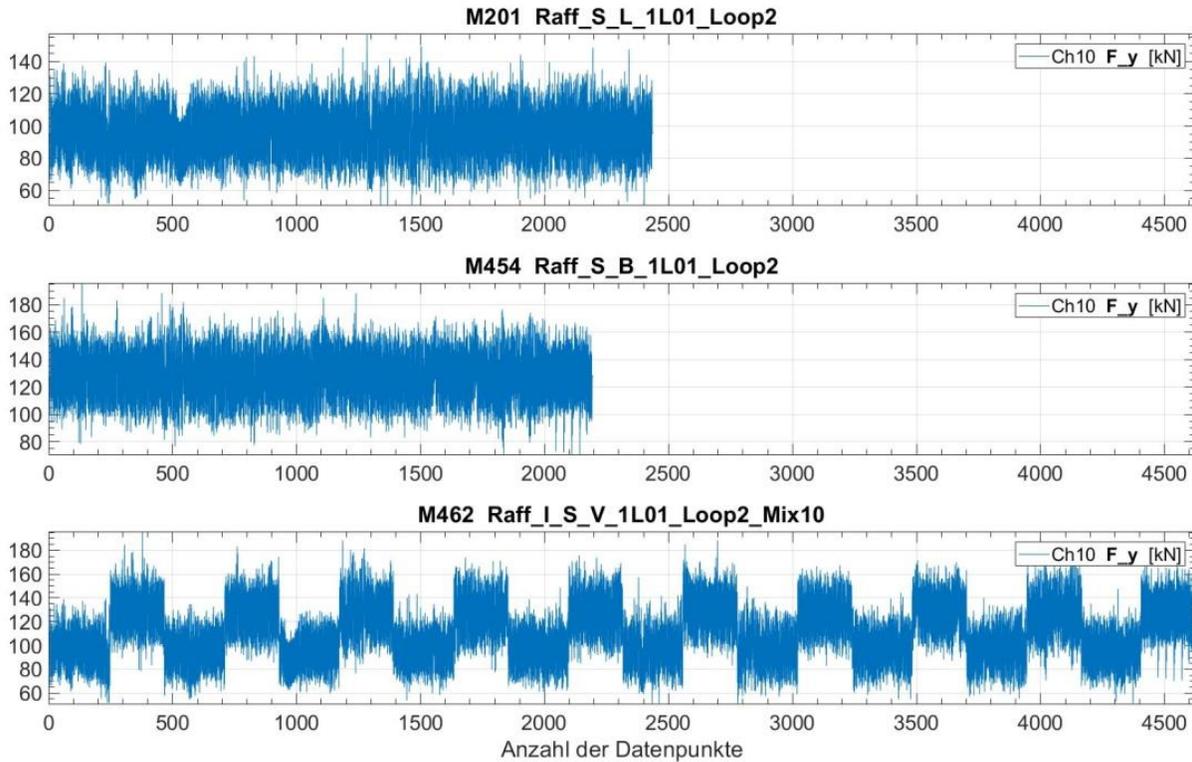


Abbildung 10.12 Loop 2, Sequenz: Leer, Beladen und mit Beladewechsel, Prüfkraft in kN

Die Sequenzen für Loop 1 sind im Anhang 16.10 in Abbildung 16.5 zu finden.

### 10.7 Extrapolationsfaktor bestimmen

Der Extrapolationsfaktor  $epf$  gibt an, wie oft eine Sequenz wiederholt werden muss, um eine äquivalente Schädigung wie im realen Betrieb zu erreichen.

Die Extrapolationsfaktoren der einzelnen Sequenzen sind hier noch einmal aufgelistet:

Laststufensteigerungsfaktor = 1.0			
	„Leer“	„Beladen“	„Variabel“
Loop 1	3351	3089	1610
Loop 2	6612	6050	3166

Tabelle 10.6 Extrapolationsfaktoren  $epf$

$$epf_V = \frac{(epf_L + epf_B)}{2} * \frac{1}{2} \quad (10.7)$$

$$epf_{Loop1,V} = \frac{(epf_{Loop1,L} + epf_{Loop1,B})}{2} * \frac{1}{2}$$

$$epf_{Loop1,V} = \frac{(3351 + 3089)}{2} * \frac{1}{2} = 1610$$

$$epf_{Loop2,V} = \frac{(epf_{Loop2,L} + epf_{Loop2,B})}{2} * \frac{1}{2}$$

$$epf_{Loop2,V} = \frac{(6612 + 6050)}{2} * \frac{1}{2} = 3166$$

Der Extrapolationsfaktor  $epf_V$  muss mit  $\frac{1}{2} * \frac{1}{2}$  erweitert werden. Der erste Faktor  $\frac{1}{2}$  dient dazu, die die Mittelung der beiden Extrapolationsfaktoren zu berücksichtigen. Der zweite Faktor  $\frac{1}{2}$  bezieht sich auf die Gesamtanzahl der Datenpunkte, da die variable Sequenz ca. doppelt so lange ist, wie die Einzelsequenzen für leer oder beladen. Ohne den zweiten Faktor ist die berechnete Schadenssumme doppelt so hoch wie vorgesehen.

Die ausführliche Abbildung aller Sequenzen aus Loop 1 und Loop 2 befindet sich im Anhang 16.9. Jetzt kann aus den Sequenzen von Loop 1 und Loop 2 ein zeitbasiertes Prüfsignal erstellt werden.

## 10.8 Interpolieren der Sequenz

Die Interpolation der Sequenz dient dazu, der Sequenz einen zeitbasierten, sinusförmigen Verlauf zu geben, um das endgültige Prüfsignal zu erhalten.

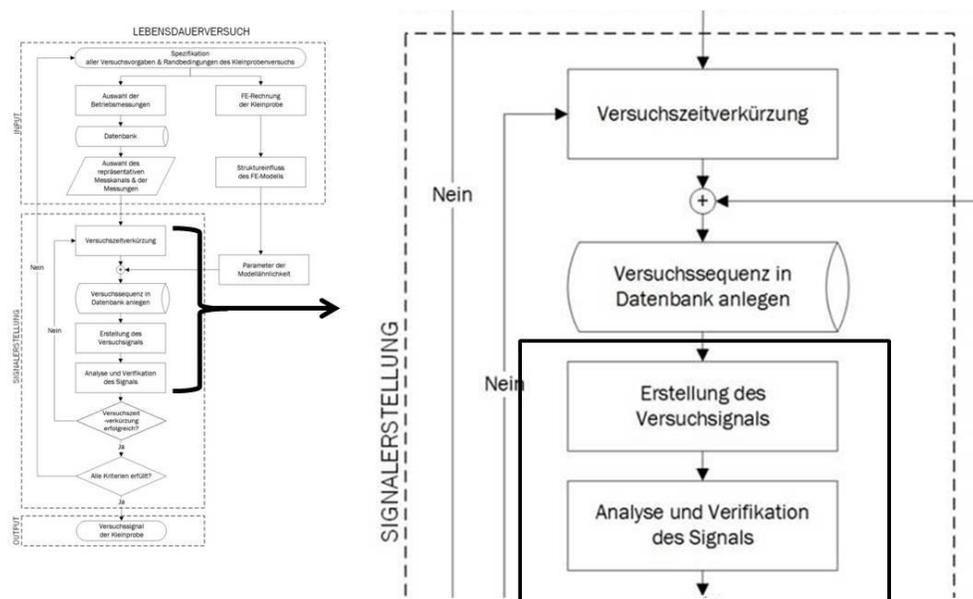


Abbildung 10.13 Erstellung des Versuchssignals, siehe auch Abbildung 2.3

An dieser Stelle ist die Kenntnis der einzustellenden Parameter und Leistungsdaten des Prüfzylinders notwendig, wie sie bereits in Kapitel 7.2 beschrieben wurden.

Eine wichtige Unbekannte, die beachtet werden muss, ist die Steifigkeit des Prüfstandes selbst. Bei einem ideal steifen Prüfstandsaufbau soll durch das Aufbringen der vorgegebenen Kraft der gemessene Weg mit dem vorgegebenen Weg des Zylinders übereinstimmen. Da man aber nicht davon ausgehen kann, dass die Spannbacken und andere Komponenten des Prüfstandes unter Belastung nicht nachgeben, muss dies mit einem Erhöhungsfaktor berücksichtigt werden. Der real gemessene Weg muss also größer sein als der ideale vorgegebene Weg des Zylinders.

Welcher Faktor größenordnungsmäßig dahinter steckt, ist zu diesem Zeitpunkt nicht genau bekannt und kann erst nach dem Prüfen von zumindest einer Kleinprobe ermittelt werden.

*Annahme: Wegsteigerungsfaktor = 2.0*

Der genannte Wegsteigerungsfaktor besteht aus der Dehnung des beladenen Bauteils (1x) und der Dehnung der Prüfmaschineneinspannung (1x). Das heißt es wird der doppelte Weg vorgegeben wie er eigentlich durch die Verformung mittels der FE-Rechnung berechnet wurde.

Wie die Sequenzen auf die Größen Kraft und Weg umgerechnet werden können, wurde bereits in Kapitel 9 gezeigt und wird hier nicht mehr angeführt.

Folgende Angaben müssen vor der Interpolation mit Matlab bekannt sein:

- Leistungsparameter des Zylinders
- Abtastrate = 5000 Hz
- verwendete Signalfrequenz  $f = 30$  Hz

Die Interpolation der Sequenz zu einem sinusförmigen Zeitsignal kann nun mit Matlab durchgeführt werden. Das Ergebnis sieht folgendermaßen aus:

**Darstellung der Sequenz, bestehend aus Umkehrpunkten**

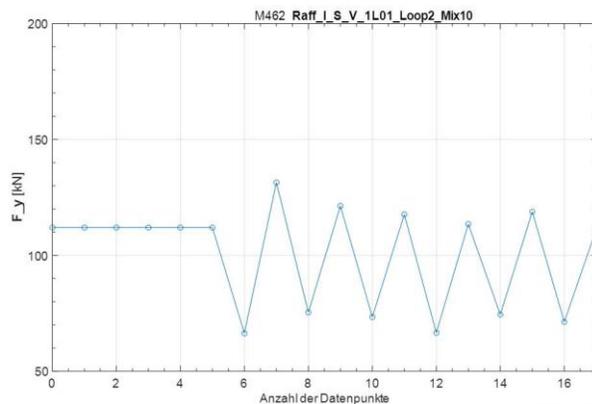


Abbildung 10.14 Sequenzausschnitt mit Umkehrpunkten, Kraftkanal

**Darstellung des interpolierten, sinusförmigen Zeitsignals**

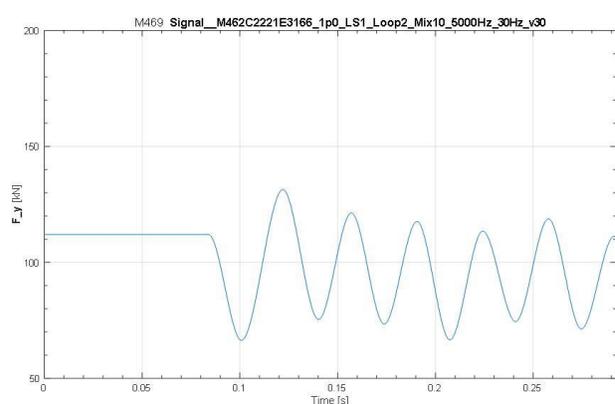


Abbildung 10.15 Ausschnitt des Zeitsignals, sinusförmiger Verlauf, Kraftkanal

**Auflösung des Zeitsignals bei einer Abtastfrequenz von 5000 Hz**

M469 Signal\_\_M462C2221E3166\_1p0\_LS1\_Loop2\_Mix10\_5000Hz\_30Hz\_v30

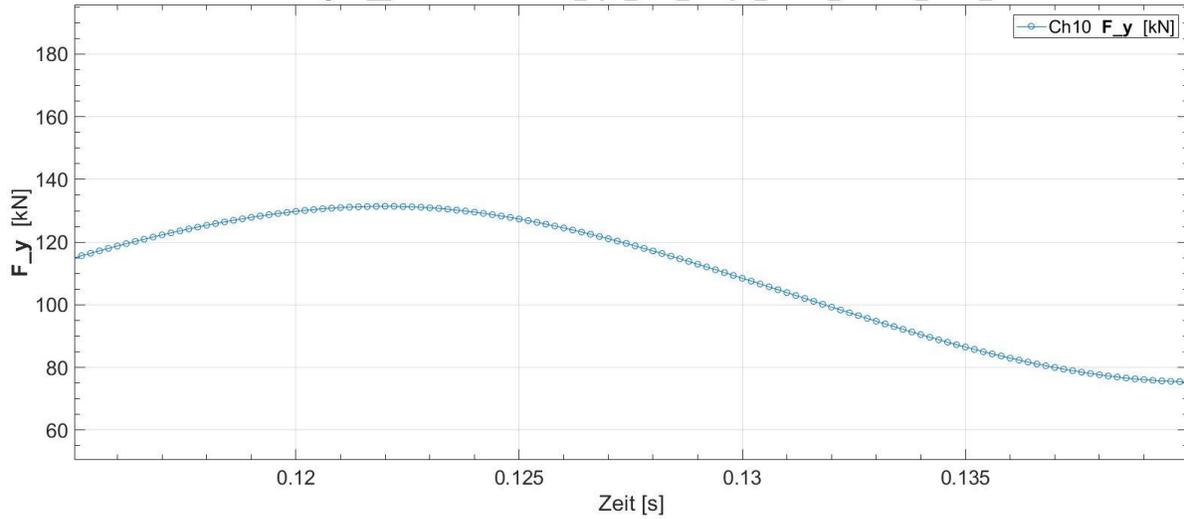


Abbildung 10.16 Ausschnitt des Zeitsignals bei 5000 Hz Abtastrate, erfasste Datenpunkte des Kraftkanals

Die Versuchssignale sind jetzt erstellt, siehe Abbildung 10.17, und werden anschließend interpretiert.

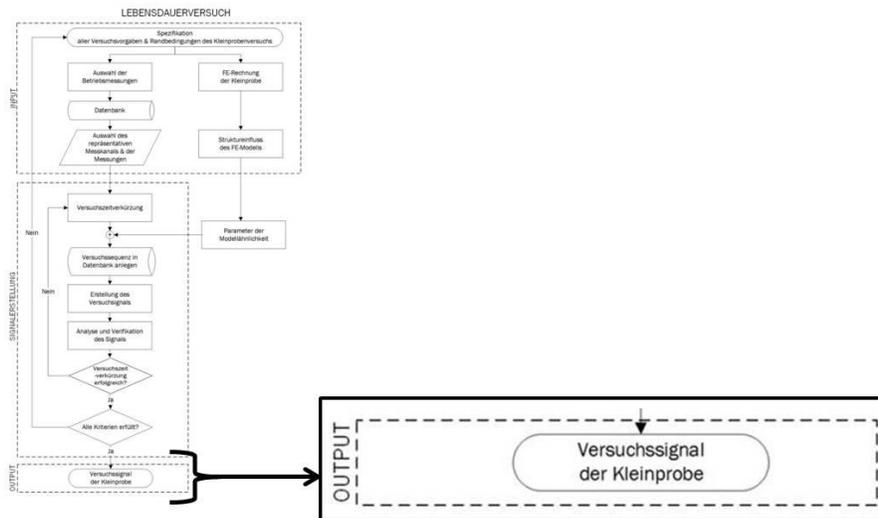


Abbildung 10.17 Versuchssignal erstellt, siehe auch Abbildung 2.3

## 10.9 Interpretation der möglichen Versuchssignale

In Tabelle 10.8 sind die Ergebnisse des Spannungskanals ohne Querdehnungsfaktor der einzelnen Loops und der originalen Messungen mit Zahlenwerten belegt.

Die gesamte Versuchsdauer pro Kleinprobe in Tagen wird mit dieser Formel berechnet:

$$\text{Anzahl der Tage} = \text{AUFRUNDEN} \left( \frac{\text{epf} * \text{Dauer des Signals in Sekunden}}{\text{Anzahl der Stunden pro Tag} * 3600} \right) \quad (10.8)$$

Ausgegangen wird dabei von einer möglichen Prüfdauer von 20 Stunden pro Tag aufgrund von Betriebspausen, Störungen oder Wartungsarbeiten.

Das Prüfsignal soll definierte Beladewechsel enthalten, daher wird nun der Vergleich zwischen Loop 1 und Loop 2 des abwechselnd beladenen Signals durchgeführt.

Die folgenden Aussagen gelten nur für **eine einfache Lebensdauer ohne Statistik**.

Das Signal **Loop 2 mit Beladewechseln** hat eine sehr kurze Signaldauer von rund 83 Sekunden und braucht insgesamt rund 4 Tage pro Kleinprobe für den Lebensdauer Versuch am Prüfstand. Mit ca. 7 Millionen Lastwechseln ist dieses Signal auch kostengünstig und liegt budgetmäßig in einem Rahmen, wie es gängige Praxis bei Lebensdauer Versuchen ist. Das Signal hat eine Schadenssumme  $D_m$  von 0,92 und liegt somit auch im Bereich der Lebensdauer Versuche mit  $D_m = 1$ , wie in Kapitel 10.3 vorgegeben wurde.

Das Signal **Loop 1 mit Beladewechseln** hat eine Signaldauer von rund 854 Sekunden. Mit einer Gesamtdauer von 20 Tagen Prüfdauer pro Kleinprobe dauert es um den Faktor 5 länger als das Signal aus Loop 2. Die Gesamtzyklenzahl des Kollektivs liegt bei 40,5 Millionen Lastwechseln, was sehr hohe Versuchskosten zur Folge hat. Dafür liegt das Signal mit einer Schadenssumme  $D_m$  von 0,52 sehr nahe an der Betriebsbeanspruchung.

### 10.9.1 Skalierung der Prüfkraft

Das Ziel der Lebensdauerersuche ist es, das die Kleinproben durch die Beanspruchung mit dem Betriebskollektiv im Kerbdetail Nahtende versagen. Da das Versagen durch Beanspruchung mit der einfachen vorgegebenen Prüfkraft nicht gewährleistet ist, muss die Prüfkraft in den Versuchen hochskaliert werden. Die theoretische Streckgrenze des hochfesten Werkstoffes der Kleinprobe, Alform 700 M, liegt bei 700 MPa und die Zugfestigkeit bei 850 MPa.

Die einfache maximale Prüfkraft der vorgegebenen Signale beträgt 195,78 kN und erzeugt dabei eine maximale Spannung mit Querdehnungsfaktor von 303,53 MPa.

a) Skalierungsfaktor bei maximaler Nennkraft:

Die maximale Zylindernennkraft liegt bei ca. 588 kN. Die Skalierung der Prüfkraft kann also nur im Bereich 195,78 kN bis 588 kN stattfinden und maximal den Skalierungsfaktor 3 haben.

$$\text{maximal möglicher Skalierungsfaktor}_{F_{max}} = \frac{588 \text{ kN}}{195,78 \text{ kN}} = 3,003$$

$$\text{bei einem Volumenstrom } Q = v * A = 0,03 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,0186 \text{ m}^2 * 60 = 33,48 \frac{\text{Liter}}{\text{min}}$$

erreichte Spannung mit Querdehnungsfaktor:  $3 * 303,53 \text{ MPa} = 910,59 \text{ MPa}$   
 $> 700 \text{ MP} \rightarrow \text{volles Plastifizieren des Nennquerschnittes zu erwarten}$

b) Skalierungsfaktor bei 80% Nennkraft

Die Nennkraft des Zylinders wird mit 80% der Maximalkraft angenommen und beträgt 470,4 kN.

$$\text{Skalierungsfaktor}_{F_{80}} = \frac{470,4 \text{ kN}}{195,78 \text{ kN}} = 2,401$$

$$\text{bei einem Volumenstrom } Q = v * A = 0,03 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,0186 \text{ m}^2 * 60 = 33,48 \frac{\text{Liter}}{\text{min}}$$

erreichte Spannung mit Querdehnungsfaktor:  $2,4 * 303,53 \text{ MPa} = 728,47 \text{ MPa}$   
 $> 700 \text{ MPa} \rightarrow \text{Plastifizierung erreicht}$

c) Skalierungsfaktor zum Ausnutzen der Reserve 1, siehe Abschnitt 7.2, gilt:

Die maximale Zylinderkraft laut Reserve 1 beträgt 161,51 kN.

$$F_{R1,max} = \frac{Hub_{R1}}{F2d}$$

$$F_{R1,max} = \frac{0,5 \text{ mm}}{0,003095775 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}} = 161,51 \text{ kN}$$

$$\text{Range} = 145 \text{ kN}$$

$$\text{Skalierungsfaktor}_{R1,max} = \frac{F_{R1,max}}{\left(\frac{\text{Range}}{2}\right)} = \frac{161,51 \text{ kN}}{72,5 \text{ kN}} = 2,227$$

erreichte Spannung mit Querdehnungsfaktor:  $2,227 * 303,53 \text{ MPa} = 675,96 \text{ MPa}$   
 $< 700 \text{ MPa} \rightarrow$  Plastifizierung nicht erreicht

In Tabelle 10.7 sind Einstellungen für den Prüfzylinder und die daraus resultierenden Skalierungsfaktoren aufgelistet. Außerdem zeigt die Tabelle für Spannungen nach dem Hook'schen Gesetz (Skalierte Spannung E) und für Spannungen im ebenen Spannungszustand (Skalierte Spannung ESZ) an, ob die Streckgrenze mit den Skalierungsfaktoren erreicht werden kann.

Bezeichnung	Einheit	a.)	b.)	Bezeichnung	Einheit	c.)
Q_max	l/min	33,480	33,480	Q_max	l/min	105,181
A_K	cm <sup>2</sup>	186,000	186,000	A_K	cm <sup>2</sup>	186,000
F_Zyl	kN	588,000	470,000	Range	kN	145,000
f	Hz	30,000	30,000	f	Hz	30,000
d_Ampl	mm	0,300	0,300	d_Ampl	mm	0,500
v	mm/s	30,000	30,000	v	mm/s	94,248
F_Prüf_maxSignal	kN	195,780	195,780	F_Prüf_maxSignal	kN	161,510
F2d	mm pro kN	0,003095775	0,003095775	F2d	mm pro kN	0,003095775
Skalierungsfaktor		<b>3,003</b>	<b>2,401</b>	Skalierungsfaktor		<b>2,228</b>
e2F	kN pro µm/m	0,140981861	0,140981861	e2F	kN pro µm/m	0,140981861
e2s_E = E-Modul	N/m <sup>2</sup>	0,21	0,21	e2s_E = E-Modul	N/m <sup>2</sup>	0,21
e2s_ESZ	MPa pro µm/m	0,218570769	0,218570769	e2s_ESZ	MPa pro µm/m	0,218570769
Streckgrenze	MPa	700,000	700,000	Streckgrenze	MPa	700,000
Max. Spannung_E	MPa	291,625	291,625	Max. Spannung_E	MPa	240,578
Skalierte Spannung_E	MPa	875,857	700,090	Skalierte Spannung_E	MPa	535,944
Streckgrenze erreicht?		Ja	Ja	Streckgrenze erreicht?		Nein
Max. Spannung_ESZ	MPa	303,527	303,527	Max. Spannung_ESZ	MPa	250,397
Skalierte Spannung_ESZ	MPa	911,604	728,663	Skalierte Spannung_ESZ	MPa	557,817
Streckgrenze erreicht?		Ja	Ja	Streckgrenze erreicht?		Nein

Tabelle 10.7 Skalierungsfaktoren und zugehörige Einstellungen

### 10.9.2 Effektive Schadenssumme

Die vorgegebene minimale Schadenssumme ist in der FKM 6 [6] mit  $D_{m,min} = 0.5$  für geschweißte Bauteile angegeben.  $D_{m,min}$  ist im Streckenversuch für das originale Signal erreicht worden. Wird das Signal durch Weglassen von kleinen Lastzyklen gekürzt, so ist ersichtlich, dass die effektive Schadenssumme ansteigt und mehr Sequenzwiederholungen benötigt werden. Je mehr Lastzyklen weggeschnitten werden, desto weiter entfernt sich das Signal von der realen Betriebsbeanspruchung.

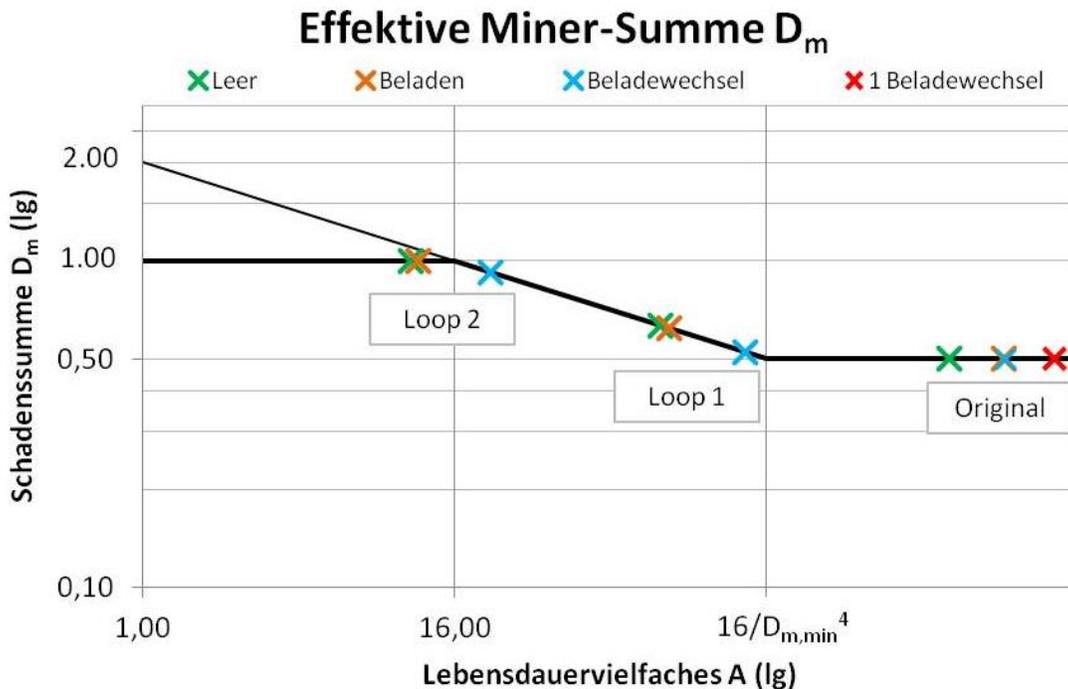


Abbildung 10.18 effektive Schadenssumme  $D_m$  nach [6]

In Abbildung 10.18 sieht man die Auswirkungen der Versuchszeitverkürzung. Am besten wird die Betriebsbeanspruchung durch das gekürzte Signal mit Beladewechseln aus Loop 1 angenähert. Hier entspricht die Schadenssumme am ehesten der geforderten Schadenssumme und somit ist dieses Signal aufgrund seiner Eigenschaften am besten geeignet für einen Betriebslastennachfahrversuch.

Wenn das Signal mit Beladewechseln aus Loop 2 für den Lebensdauerversuch verwendet wird, entfernt man sich immer weiter von der Situation ‚realer Streckenversuch‘.

### 10.9.3 Ergebnisse der betrachteten Signale in Zahlenwerten

PARAMETER	originales Messsignal		gerafftes Signal (L)		gerafftes Signal (B)		gerafftes Signal (V)		
	Beladen	Gemischt	Loop 1	Loop 2	Loop 1	Loop 2	Loop 1	Loop 2	
Iterations-schritt	Leer	701	196	202	461	455	472	473	
Nummer der Messung	701	700	196	202	461	455	472	473	
Nummer des Channels	258	258	4	4	4	4	4	4	
INPUT Name der Messung	G047_S_L_Betriebsfestigkeit_extrap-4.5Gm								
	G046_S_B_Betriebsfestigkeit_extrap-4.5Gm								
	G048_S_B-L_Betriebsfestigkeit_extrap-4.5Gm 1 Beladewechsel								
	G054_S_B-L_Betriebsfestigkeit_Einsatz_extrap -4.5Gm 15.000 Beladewechsel								
	G02_S_L_1L01_Loop1_Raff_extrap-3351Seq								
	G03_S_L_1L01_Loop2_Raff_extrap-6612Seq								
	G10_S_B_1L01_Loop1_Raff_extrap-3089Seq								
	G09_S_B_1L01_Loop2_Raff_extrap-6050Seq								
	G11_S_V_1L01_Loop1_Raff_extrap-1610Seq								
	G12_S_V_1L01_Loop2_Raff_extrap-3166Seq								
Name des Channels	sy_1L.Ra1.1I01	sy_1L.Ra1.1I01	sy_1L.Ra1.1I01	sy_1L.Ra1.1I01	sy_1L.Ra1.1I01	sy_1L.Ra1.1I01	sy_1L.Ra1.1I01	sy_1L.Ra1.1I01	
Defienlaufstreckung [km]	4.500,000	4.500,000	4.500,000	4.500,000	4.500,000	4.500,000	4.500,000	4.500,000	
Wegstrecke [km] oder 1 Sequenz	1703	1812	1	1	1	1	1	1	
Klassenbreite	1	1	1	1	1	1	1	1	
Anteil an Aeq	/	/	95% von 41,5 MPa	78% von 44,7 MPa	95% von 41,5 MPa	78% von 44,7 MPa	/	/	
Threshold-Wert [MPa] = 2 * A <sub>eq,thr</sub>	8	8	26	26	54	54	26	54	
OUTPUT	Extrapolationsfaktor	2643	2484	3351	6612	3089	6050	1610	3166
	Maximalamplitude [MPa]	79,5	93,5	79,5	79,5	93,5	93,5	108,5	108,5
	Äquivalenzamplitude [MPa]	41,591	44,712	41,591	41,591	44,715	44,717	47,262	46,356
	Schadensumme D <sub>in</sub>	0,50	0,50	0,634	1,00	0,621	1,00	0,524	0,923
	Lebensdauererleitetes A	1302,00	2104,00	99,11	10,85	107,29	11,60	211,65	22,07
	Gesamtzyklenanzahl Kollektiv	20.304.428,777	23.066.874,836	44.973,771	7.769,100	36.462,556	6.346,450	40.597,760	7.031,686
	Dauer [s]	101,380	129,660	453,383	42,7216	400,428	40,7095	853,656	83,2676
	Tage (20h pro Tag)	3722	4474	22	4	18	4	20	4
	Prüfdauer in Jahren	11	13	12	12	12	12	12	12

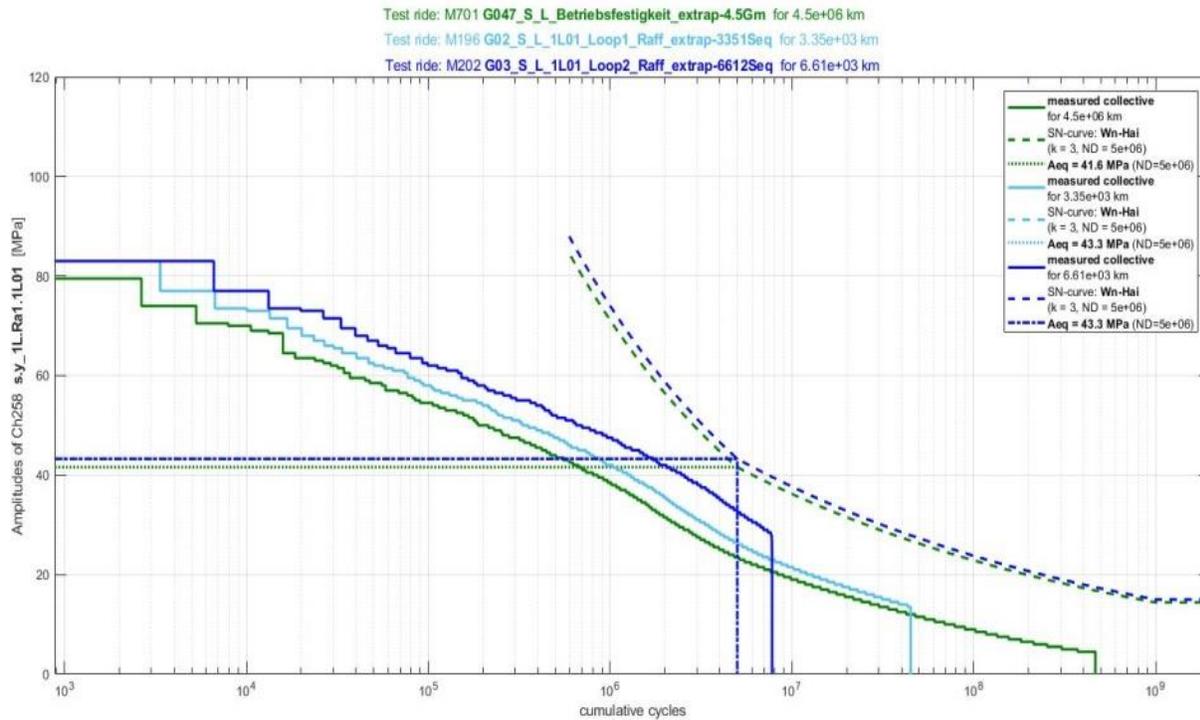
Tabelle 10.8 Ergebnisse der Iterationsschritte der Versuchssignalerstellung für den Spannungskanal ohne Querdehnungsfaktor, Angaben pro Kleinprobe

### 10.9.4 Kollektivvergleiche

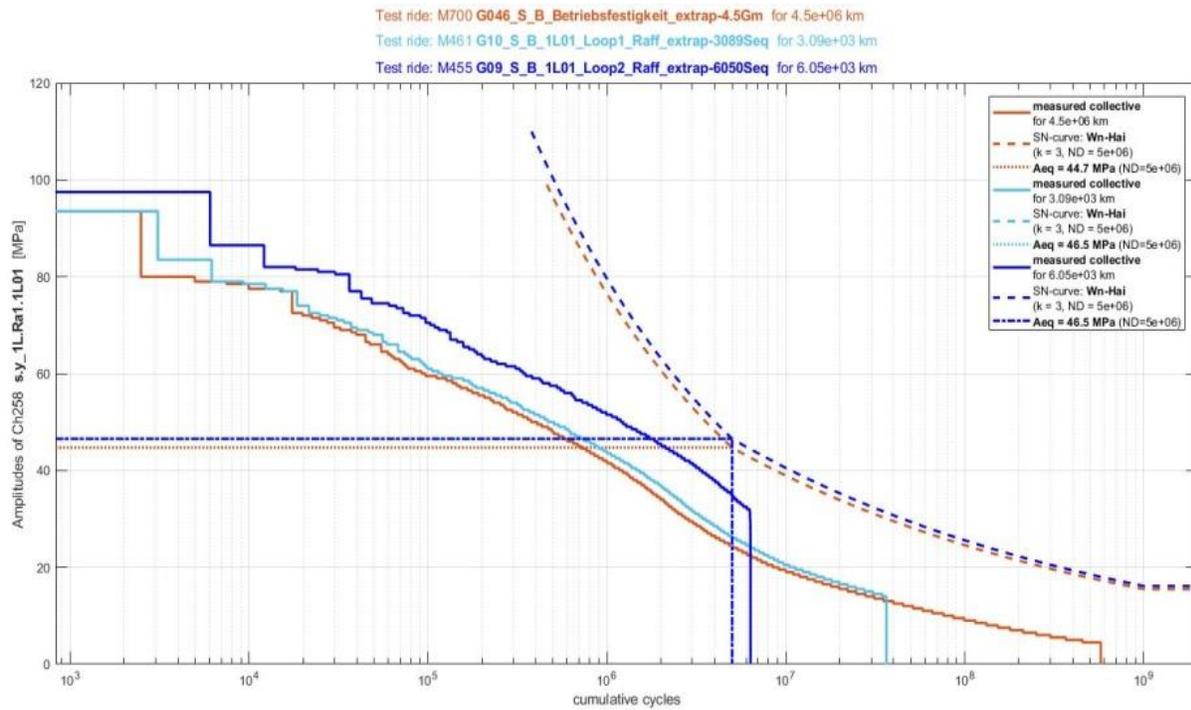
Es folgt eine Darstellung verschiedener Kombinationen der erhaltenen Kollektive.

Anmerkung: Aufgrund der einheitlichen Skalierung aller Diagramme, wurde bei einigen nicht der vollständige Verlauf der Wöhlerlinie dargestellt. Die Wöhlerlinien enden richtigerweise nicht plötzlich, sondern der Verlauf setzt sich fort.

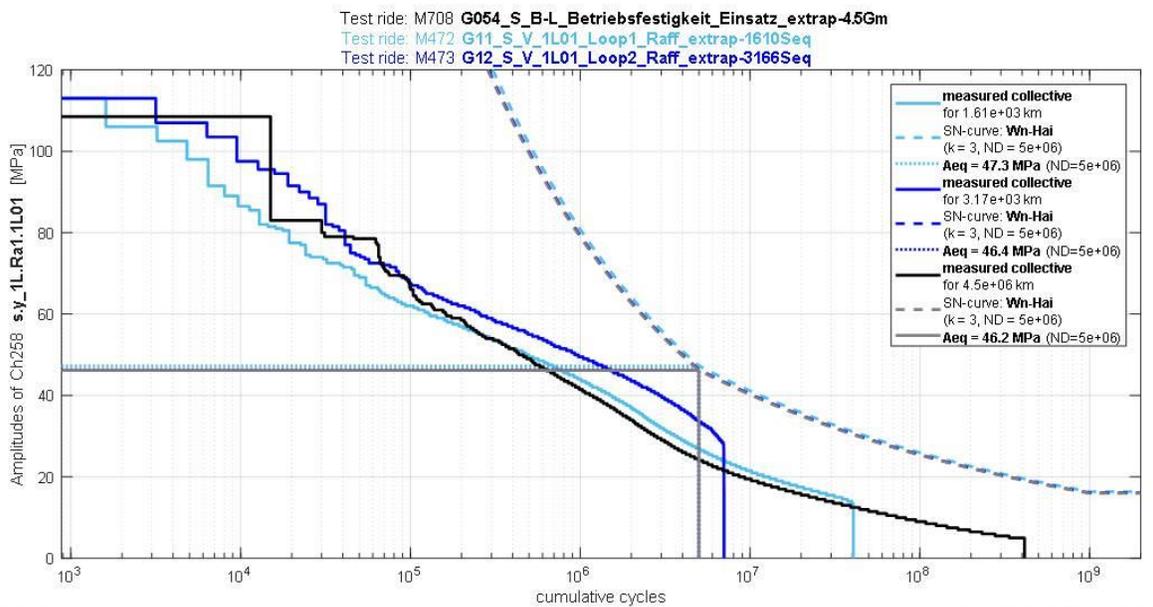
#### **Beladezustand „Leer“ der Signale: original, Loop 1 und Loop 2**



**Beladezustand „Beladen“ der Signale: original, Loop 1 und Loop 2**



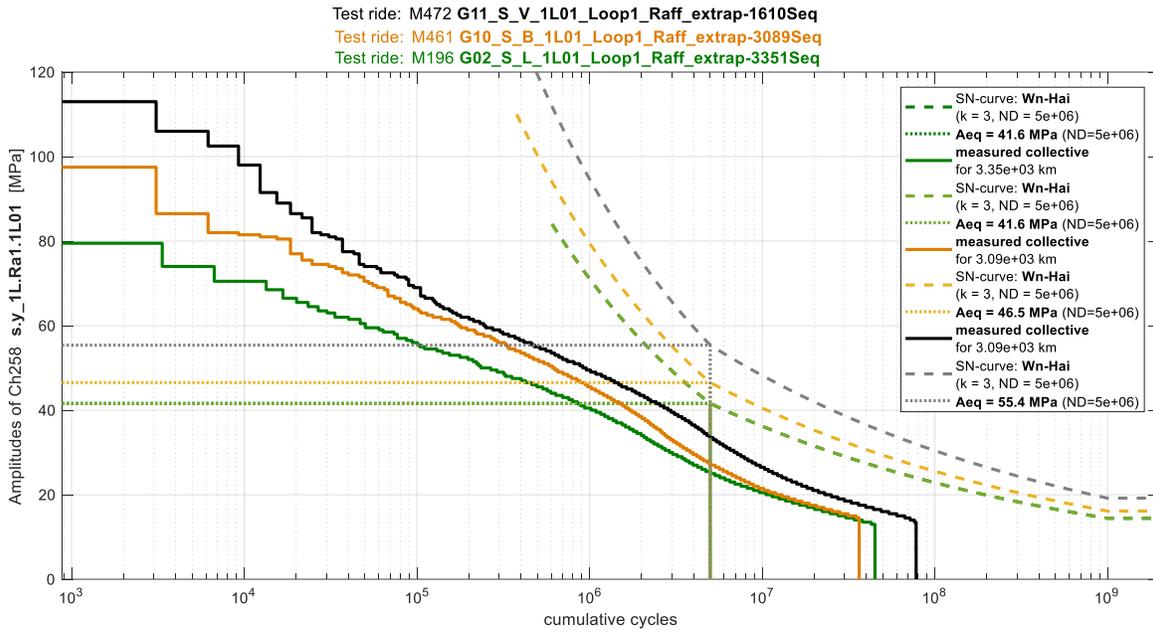
**Beladezustand „mit Beladewechsel“ der Signale: original, Loop 1 und Loop 2**



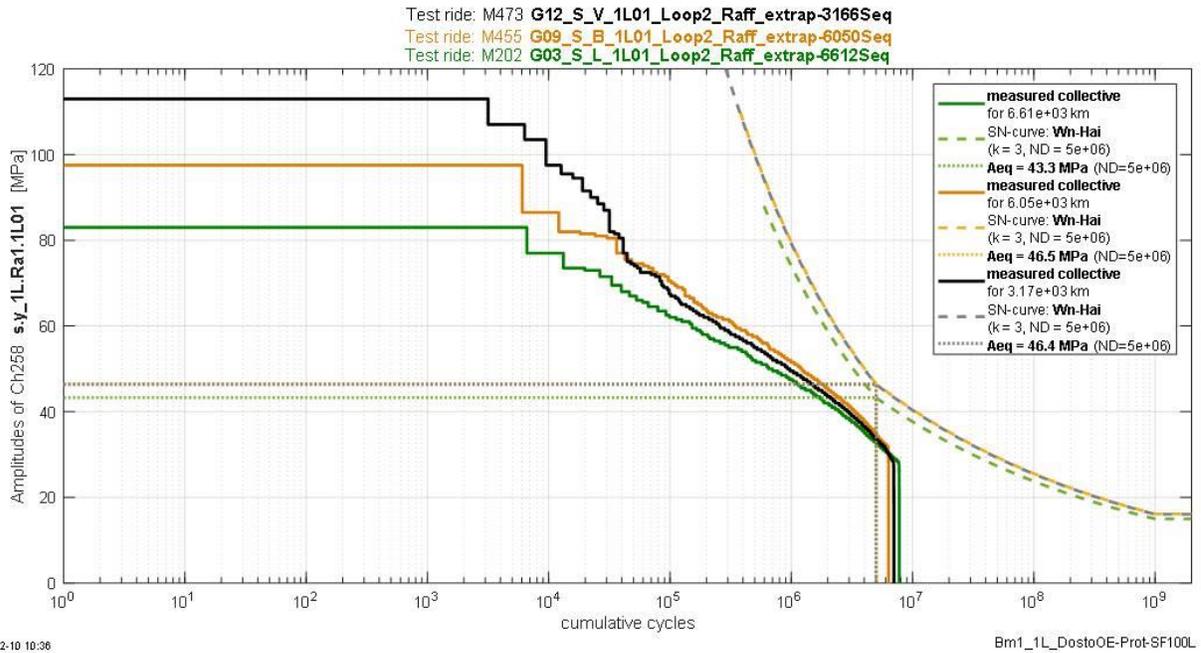
2017-11-29 10:33

Bm1\_1L\_DostoOE-Prot-SF100L

**Beladezustand „Leer“, „Beladen“ & „mit Beladewechsel“ der Signale: Loop 1**



**Beladezustand „Leer“, „Beladen“ & „mit Beladewechsel“ der Signale: Loop 2**



# 11 Statistik

Eine Einschätzung zur Zuverlässigkeit der Lebensdauerersuche bietet die folgende Ausführung. In Abbildung 11.1 und Abbildung 11.2 ist die Mindestzuverlässigkeit  $R_{min}$  über das Lebensdauer Verhältnis LV dargestellt, welches vom Verhältnis der Prüfdauer zur geforderten Lebensdauer abhängt. Zusätzlich sind auf der dritten Achse die Anzahl der Sequenzen angeführt, die den Extrapolationsfaktor repräsentieren. Bei einem Lebensdauer Verhältnis von 1 lässt sich somit die Mindestzuverlässigkeit einer Probe ablesen, wenn insgesamt 15 Proben geprüft werden und gar keine oder eine davon ausfallen. Die Aussagewahrscheinlichkeit wurde mit 95% angenommen und der Formparameter b mit 3,5, womit eine Normalverteilung näherungsweise dargestellt werden kann. [31]

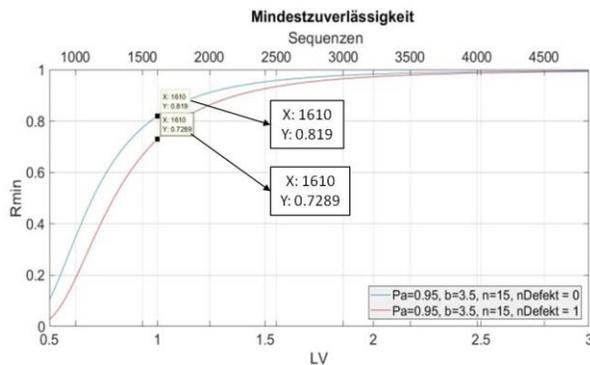


Abbildung 11.1 Mindestzuverlässigkeit mit 1610 Lastzyklen, Loop 1 mit Beladewechsel

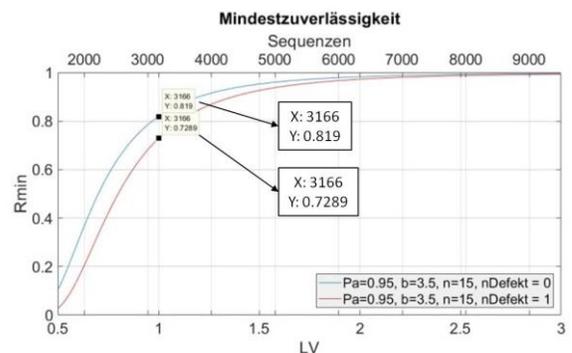


Abbildung 11.2 Mindestzuverlässigkeit mit 3166 Lastzyklen, Loop 2 mit Beladewechsel

Für Loop 1 und Loop 2 mit Beladewechsel erhält man so eine Mindestzuverlässigkeit von 81,9% bei keinem Ausfall und 72,8 % bei einem Ausfall. Um höhere Mindestzuverlässigkeiten zu erreichen, sind höhere Sequenzwiederholungen nötig. Wie in Abbildung 11.1 ersichtlich, sind bei Reduktion der Versuchsdauer höhere Lebensdauer Verhältnisse  $\rightarrow$  höhere Sequenzwiederholungsanzahlen erforderlich.

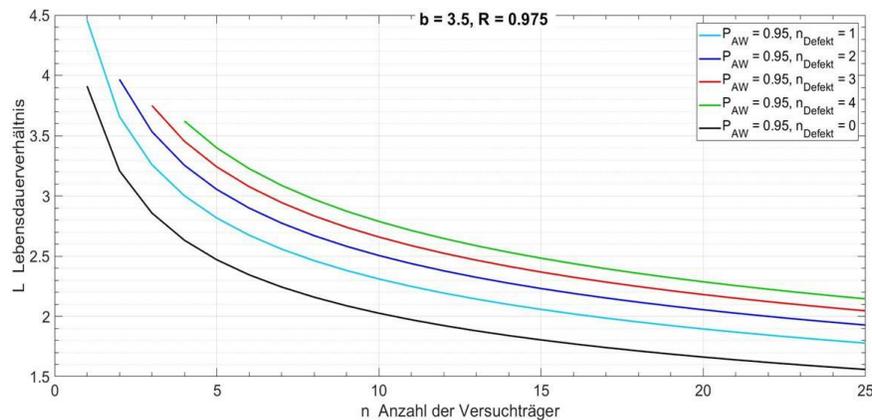


Abbildung 11.3 Lebensdauer Verhältnis in Abhängigkeit der Probenanzahl bei 0 bis 4 Ausfällen

## 12 Ausblick

Diese Masterarbeit beinhaltet den Vorschlag, wie aus den Daten eines realen Streckenversuches ein Betriebslastennachfahrtsignal erzeugt werden kann, siehe Abbildung 2.3. Dieses Vorgehen ist allgemein anwendbar.

Die erstellten Signale, welche Beladewechselzahlen berücksichtigen, sind allgemein gültig für Lebensdauerversuche von Nahtenden am Untergurt eines Langträgers.

Die Firma Siemens kann diese Erkenntnisse jetzt nutzen, um die Ausführung zukünftiger Lebensdauerversuche zu optimieren und um dadurch die vorhandenen Betriebsbeanspruchungen besser am Bauteil abbilden zu können.

Mit den geplanten Lebensdauerversuchen mit Betriebslastennachfahrtsignalen an Längssteifen können die Informationen über das Werkstoffverhalten und das Verhalten von Nahtenden bei hochfestem Stahl gewonnen werden. Das Ziel ist es, mit diesen Erkenntnissen die Bewertungsparameter der Richtlinien für hochfesten Stahl entsprechend anzupassen.

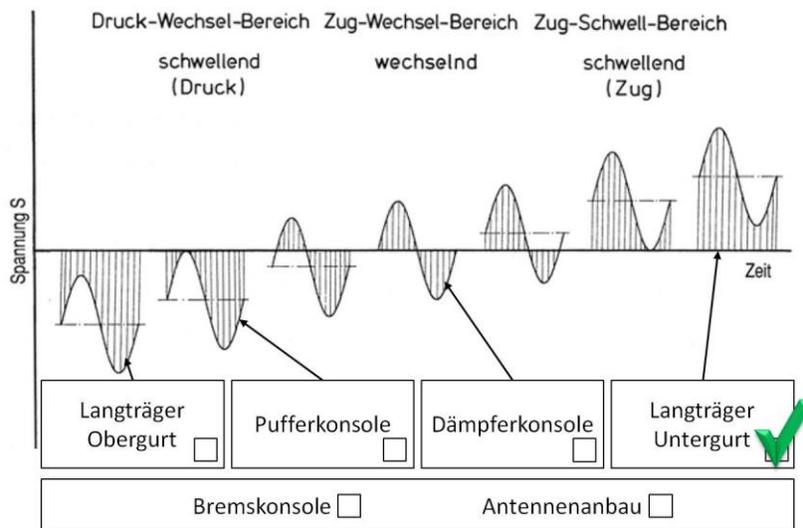


Abbildung 12.1 Beanspruchungsbereiche eines Drehgestellrahmens

Zukünftig kann die Betrachtungsweise über Nahtenden am Untergurt bis zu allen anderen Bereichen des Drehgestellrahmens hinausgehen. In Abbildung 12.1 sind diese Bereiche in Abhängigkeit ihrer Belastungsart dargestellt.

Durch die Ergebnisse der Lebensdauerversuche mit dem Signal aus Loop 2 mit Beladewechseln wird sich zeigen, ob Versuchsprogramme mit geringen Lastwechselzahlen ausreichen oder ob hohe Zyklenzahlen bei Lebensdauerversuchen mit Mischkollektiven erforderlich sind.

## 13 Literaturverzeichnis

---

- [1] A. Putz, Masterarbeit - Leitfaden zur Bewertung von realen Schweißnahtenden, Graz: Siemens AG Austria, 2016.
- [2] W. Mößler, „Interne Unterlagen: FE-Modell SF100L Erprobungsträger,“ Siemens AG Austria, Graz, 2017.
- [3] E. Haibach, Betriebsfestigkeit, Wiesbaden: Springer Verlag, 2005.
- [4] S. Rengo, Masterarbeit - Validierung der Implementierung der FKM Richtlinie 6 im FatAss, Graz: Siemens AG Austria, 2015.
- [5] A. Siemon, Dissertation - Qualitative und quantitative Analysen der linearen und nichtlinearen Schadensakkumulationshypothesen unter Einbeziehung der statistischen Versuchsplanung, ISBN 978-3-89958-350-2 Hrsg., Universität Kassel, 2006.
- [6] Forschungskuratorium Maschinenbau, FKM Richtlinie 6 - Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen, ISBN 978-3-8163-0605-4 Hrsg., Frankfurt am Main: VDMA Verlag GmbH, 2012.
- [7] H. Vajen, Dissertation - Untersuchung des Einflusses praxisnaher Erprobungsbedingungen auf die Schwingfestigkeit von Bauteilen des Common-Rail-Dieseleinspritzsystems, Bremen: Universität Stuttgart, 2014.
- [8] Forschungskuratorium Maschinenbau, FKM Richtlinie 5 - Analytical strength assessment of components in mechanical engineering, ISBN 3-8163-0425-7 Hrsg., Frankfurt: VDMA Verlag GmbH, 2003.
- [9] M. Köhler, S. Jenne, K. Pötter und H. Zenner, Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit, ISBN 978-3-642-13163-9 Hrsg., Deutschland: Springer Verlag, 2012.
- [10] W. Eichlseder, Vorlesungsskriptum - Betriebsfestigkeit, Leoben: Montanuniversität Leoben.
- [11] M. Leitner, M. Ottersböck, S. Pußwald and H. Remes, "Studie - Fatigue strength of welded and HFMI-treated steel joints under constant and variable amplitude loading," IIW - International Institute of welding, Delegation of Austria and Finland XIII-2691-17, Montanuniversität Leoben Austria, Aalto University Finland, 2017.
- [12] Wikipedia, „Kugelstrahlen,“ 02. 10. 2017. [Online]. Available:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Kugelstrahlen>. [Zugriff am 11. 12. 2017].

- [13] Brünierbetrieb Brüfa, „Reinigungsstrahlen,“ [Online]. Available: <http://www.bruefa.de/reinigungsstrahlen-feinstrahlen.html>. [Zugriff am 11 12 2017].
- [14] 3M, „Der Schleifprofi - Schweißnähte schleifen,“ [Online]. Available: <https://www.schleifprofi.com/schleifanwendungen/schweissnaehte-schleifen/>. [Zugriff am 11. 12. 2017].
- [15] Gary B. Marquis, Zuheir Barsoum, IIW Recommendations for the HFMI Treatment - For Improving the Fatigue Strength of Welded Joints, ISBN 978-981-10-2503-7 Hrsg., Paris: Springer Verlag, 2016.
- [16] voestalpine Grobblech GmbH, „Alform - Hochfeste und ultrahochfeste thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle,“ Linz, 2014.
- [17] W. Mößler, „Interne Unterlagen: Übersicht der Kleinprobenversuche mit Alform 700 M,“ Siemens AG Austria, Graz, 2013.
- [18] W. Mößler, „Interne Unterlagen: Ev-St\_PKw\_S700\_B\_V Kleinprobenversuch Stumpfstoß,“ Siemens AG Austria, A6Z00041959567, Graz, 2013.
- [19] F. Prior, „Bericht Siemens - Rissursachenanalyse SF500 ICx,“ Prior - Staatlich befugter und beedeter Ingenieurkonsulent für Werkstoffwissenschaften, Siemens AG Austria, A6Z00037415779, Klingenbach, Austria, 2015.
- [20] M. Rieger, „Prüfbericht - SF100 Laufdrehgestellrahmen, Alform 700, Zusatzversuch (LS4/LS5/LS6),“ Siemens AG Austria, A6Z00038025110, Doc.No.: ILB-P-14.26.2-20160217, Graz, 2016.
- [21] M. Rieger, P. Brunnhofer, C. Moser, „Prüfbericht - Statische und dynamische Festigkeitsprüfung des SF100L,“ Siemens AG Austria, A6Z00038025110, Dok.No.: ILB-P-14.26.1-20151006, Graz, 2015.
- [22] Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF) im DIN, DIN EN 13749:2011-06 Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Festlegungsverfahren für Festigkeitsanforderungen an Drehgestellrahmen, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [23] A. Grantner, M. Lechner und M. Mongold, „Spezifikation Betriebsmessung, Allgemeine Anforderungen und Anweisungen zur Durchführung von Betriebsmessungen an Schienenfahrzeugen,“ Siemens AG Austria, A6Z00034193807, Graz, 2013.
- [24] Siemens AG Austria, „Berichte der Streckenversuche,“ Siemens AG Austria, genaue

Bezeichnung: siehe Anhang 16.4.9, Graz, 2010-2017.

- [25] C. Pankratz, „Bericht Betriebsmessung 1 2017-04 DostoOEBB-Prototyp SF100 Rahmen Lauffahrwerk, Datenanalyse und Festigkeitsbewertung der Streckenversuche nach DIN EN 13749,“ Siemens AG Austria, A2V00002519960, Graz, 2017.
- [26] Siemens AG Austria, „Interne Unterlagen - Datenauswertung,“ Siemens AG Austria.
- [27] Siemens AG Austria, „Interne Unterlagen - Konstruktions- und Schweißnahtzeichnungen der jeweiligen Projekte,“ Siemens AG Austria, Graz, 2010-2017.
- [28] Wikiwand, „Hydraulikzylinder,“ 03. 2016. [Online]. Available: <http://www.wikiwand.com/de/Hydraulikzylinder>. [Zugriff am 16. 11. 2017].
- [29] L. Gao, W. Fricke und H. Paetzold, „Fatigue Assessment of Fillet-Welded Stiffener End with the Effective Notch Stress Approach,“ in *s IIW Interim Meeting of XIII-WG3 in Cambridge*, Cambridge, 2016.
- [30] B. Klein, FEM Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, 9. Auflage, ISBN 978-3-658-06053-4 Hrsg., Wiesbaden: Springer Verlag, 2012.
- [31] Verband der Automobilindustrie (VDA), Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie, Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten, Teil 2, Berlin: Henrich Druck + Medien GmbH, 3. überarbeitete, erweiterte Auflage, 2004.

## 14 Abbildungsverzeichnis

---

ABBILDUNG 1.1 BEISPIEL FÜR EIN DREHGESTELL UND EINEN DREHGESTELLRAHMEN DER FIRMA SIEMENS AG AUSTRIA	1
ABBILDUNG 2.1 DARSTELLUNG EINER ABBINDENAHT (AUCH ABBINDER GENANNT) AM SCHWEIßNAHTENDE, [1]	2
ABBILDUNG 2.2 BETRIEBLICHER AUSLASTUNGSGRAD $A_{BK}$ , SF100 ERPROBUNGSTRÄGER, [2]	3
ABBILDUNG 2.3 VORGANGSWEISE DER VERSUCHSSIGNALERSTELLUNG	5
ABBILDUNG 3.1 PARAMETER DER BETRIEBSFESTIGKEIT BEI SCHWELLBEANSPRUCHUNG, [3]	7
ABBILDUNG 3.2 EFFEKTIVE MINER-SUMME $D_M$ , FKM 6 [6]	9
ABBILDUNG 3.3 SINUSFÖRMIGES SCHWINGSPIEL, [3]	9
ABBILDUNG 3.4 VERSCHIEDENE SCHWINGFORMEN INKLUSIVE PHASEN DES RISSWACHSTUMS, [7]	10
ABBILDUNG 3.5 MÖGLICHE BEANSPRUCHUNGSFÄLLE UND SPANNUNGSVERHÄLTNIS $R$ , [3]	10
ABBILDUNG 3.6 HAIGH-DIAGRAMM MIT MITTELSPANNUNGSEMPFINDLICHKEIT FÜR HOHEN (I), MITTLEREN (1,48) UND NIEDRIGEN (2,19) EIGENSPANNUNGSEINFLUSS LAUT FKM 5 ( $\rightarrow R_I$ ); WEITERE VERGLEICHSWERTE VON IIW UND EUROCODE 3, [8]	11
ABBILDUNG 3.7 KLASSENBREITE, KLASSENGRENZEN UND RÜCKSTELLBREITE, [9]	12
ABBILDUNG 3.8 UNTERSCHIED ZWISCHEN KLASSENDURCHGANGSVERFAHREN UND BEREICHS-PAAR-ZÄHLUNG, [3]	13
ABBILDUNG 3.9 RAINFLOW-ZÄHLUNG, [9]	14
ABBILDUNG 3.10 VOLLMATRIX UND HALBMATRIX MIT RAINFLOW-ERGEBNISSEN, [9]	14
ABBILDUNG 3.11 ZUSAMMENHANG BEANSPRUCHUNGS-ZEIT-FUNKTION UND KOLLEKTIV, [4]	15
ABBILDUNG 3.12 LEBENSDAUERLINIEN IN ABHÄNGIGKEIT DER VÖLLIGKEIT DES KOLLEKTIVS, [3]	15
ABBILDUNG 3.13 TEILSCHÄDIGUNG, [5]	16
ABBILDUNG 3.14 VERSCHIEDENE VERLÄUFE DER WÖHLERLINIE NACH DER LINEAREN SCHADENSAKKUMULATIONSHYPOTHESE, [10]	17
ABBILDUNG 3.15 BESTANDTEILE DER BEANSPRUCHUNGS-ZEIT-FUNKTION BEI BLOCKPROGRAMMVERSUCHEN, [3]	19
ABBILDUNG 3.16 DARSTELLUNG EINES AMPLITUDENKOLLEKTIVS MIT TREPPENSTUFEN UND DARAUS ERSTELLBARE ABLAUFPLÄNE FÜR BLOCKPROGRAMM-VERSUCHE LAUT HAIBACH [3]	19
ABBILDUNG 3.17 BEANSPRUCHUNGS-ZEIT-FUNKTION BEI ZUFALLSLASTEN-VERSUCHEN, [3]	20
ABBILDUNG 3.18 NICHTSTATIONÄRE, STOCHASTISCHE BEANSPRUCHUNGSVERLÄUFE, [3]	20
ABBILDUNG 3.19 MAßNAHMEN ZUR VERSUCHSZEITVERKÜRZUNG VON [7]	22
ABBILDUNG 4.1 EINBRINGEN VON DRUCKEIGENSPANNUNGEN DURCH HFMI, ENTSTEHEN VON RISSÄHNLICHEN STRUKTUREN, [15]	26
ABBILDUNG 4.2 LINKS: NAHTÜBERGANG WIE GESCHWEIßT, RECHTS: NAHTÜBERGANG HFMI NACHBEHANDELT, [15]	26
ABBILDUNG 4.3 AUSZUG AUS DEM BLOCKSIGNAL FÜR S355 VAL TESTS, [11]	27
ABBILDUNG 4.4 NOMINALE WÖHLERLINIE, S355 STAHL, ERMÜDUNGSFESTIGKEITSTESTS, [11]	28
ABBILDUNG 4.5 NOMINALE WÖHLERLINIE, S700 STAHL, ERMÜDUNGSFESTIGKEITSTESTS, [11]	28
ABBILDUNG 4.6 ÄQUIVALENTES NOMINALES SPANNUNGSNIVEAU FÜR S700 PROBEN OHNE NACHBEHANDLUNG, D=1.0, [11]	28
ABBILDUNG 4.7 ÄQUIVALENTES NOMINALES SPANNUNGSNIVEAU FÜR S700 PROBEN HFMI BEHANDELT, D=1.0, [11]	29
ABBILDUNG 4.8 ÄQUIVALENTES NOMINALES SPANNUNGSNIVEAU FÜR S700 PROBEN HFMI BEHANDELT, D=0.2, [11]	29

ABBILDUNG 5.1 GRUNDMATERIALPROBE, EINFACHES BLECH (SYMBOLISCH)	31
ABBILDUNG 5.2 STUMPFSTOß MIT V-NAHT (SYMBOLISCH)	31
ABBILDUNG 5.3 DOPPELSEITIGER HY-KREUZSTOß MIT GEGENLAGE (MIT RESTSTEG) (SYMBOLISCH)	31
ABBILDUNG 5.4 DOPPELSEITIGER HV-KREUZSTOß MIT GEGENLAGE (DURCHGESCHWEIßTER STEG) (SYMBOLISCH)	31
ABBILDUNG 5.5 FAT KLASSEN AUS KLEINPROBENVERSUCHEN MIT ALFORM 700 M IM VERGLEICH MIT NORMWERTEN, [17]	32
ABBILDUNG 5.6 KLEINPROBENVERSUCHE MIT ALFORM 700M, PROBE ALS STUMPFSTOß OHNE NACHBEHANDLUNG AUSGEFÜHRT, [18]	33
ABBILDUNG 5.7 KRITISCHE STELLE - SCHWEIßNAHTABBINDER AN DER RADSATZFÜHRUNGSKONSOLE AM UNTERGURT DES ICX, [19]	34
ABBILDUNG 5.8 ANRISS BEIM SCHWINGVERSUCH AM ICX RAHMEN, [19]	34
ABBILDUNG 5.9 DURCHFÜHRUNG DES SCHWINGVERSUCHES BIS ZUM DURCHBRUCH, [19]	34
ABBILDUNG 5.10 SEITENANSICHT DES SF100 LAUFDREHGESTELLRAHMEN MIT KRITISCHEN ORTEN: ABBINDER PRIMÄRFEDERTOPF LANGTRÄGERUNTERGURT, [20]	35
ABBILDUNG 5.11 ANRISS NAHE DEM ABBINDER DES PRIMÄRFEDERTOPFES, [20]	35
ABBILDUNG 5.12 FINALER RISS ALS FOLGE DER SCHWINGPRÜFUNG, [20]	35
ABBILDUNG 5.13 PRÜFSTANDSAUFBAU DES SF100 ERPROBUNGSTRÄGERS; ZYLINDER: AKTIONSKRÄFTE (ROT), VERWINDUNG (MAGENTA), REAKTIONSKRÄFTE (GRÜN), [21]	36
ABBILDUNG 5.14 KRÄFTESITUATION AM SF100L (ENDGÜLTIGE KONSTRUKTION), SEKUNDÄRFEDERKRAFT DOMINIERT IM BETRIEB (ORANGE), [2]	37
ABBILDUNG 6.1 WAHL DES STRECKENVERSUCHES, BEZOGEN AUF ABBILDUNG 2.3	39
ABBILDUNG 6.2 ERMITTLUNG DES DEHNUNGSOFFSETS D ZUR BERECHNUNG DER DMS MITTELSPANNUNG, [25]	41
ABBILDUNG 6.3 VERHÄLTNISS VON AUFLAST AUF DIE SEKUNDÄRFEDER ZUR ZULADUNG BEI VERSCHIEDENEN SCHIENENFAHRZEUGTYPEN, [24]	43
ABBILDUNG 6.4 MITTELSPANNUNG DER VERSCHIEDENEN DREHGESTELLE, GEMITTELT ÜBER ALLE 4 QUADRANTEN	43
ABBILDUNG 6.5 SPANNUNGSKOLLEKTIVE DER ABBINDER ALLER VERGlichenEN PROJEKTE, AUFGETEILT AUF DIE 4 QUADRANTEN, AUF BASIS EINER WECHSELNDEN BELADUNG, [24]	45
ABBILDUNG 6.6 MESSSTELLENPLAN DER QUADRANTEN 1 BIS 4, UNTERSEITE DES SF100L, [25]	46
ABBILDUNG 6.7 DMS-POSITIONEN, ABBINDER AM UNTERGURT LANGTRÄGER, SF100L, [25]	47
ABBILDUNG 7.1 KLEINPROBE MIT DMS POSITION, DMS KOORDINATENSYSTEM, EINSpanNBEBEREICHE (SCHRAFFIERT) UND AUSWERTEPUNKTE DER LÄNGENÄNDERUNG IM NX	49
ABBILDUNG 7.2 AUSSCHNITT DER SEITENANSICHT DER KLEINPROBE	50
ABBILDUNG 7.3 VORDERANSICHT DER KLEINPROBE	50
ABBILDUNG 7.4 SCHALTBILD DES UNIVERSALPRÜFSTANDES DER TU GRAZ	50
ABBILDUNG 7.5 UNIVERSALPRÜFSTAND DER TU GRAZ	51
ABBILDUNG 7.6 GLEICHGANGZYLINDER, SCHEMATISCH, [28]	51
ABBILDUNG 7.7 STATISTISCHE AUSWERTUNG DER MESSFAHRTGRUPPE „LEER“ DES STRECKENVERSUCHS DES SF100L	52
ABBILDUNG 7.8 STATISTISCHE AUSWERTUNG DER MESSFAHRTGRUPPE „BELADEN“ DES STRECKENVERSUCHS DES SF100L	52
ABBILDUNG 7.9 FREQUENZGANGKURVE DES ZYLINDERS MIT GEWÄHLTEN ARBEITSPUNKT AP	53
ABBILDUNG 8.1 FE-RECHNUNG DER KLEINPROBE, SIEHE AUCH ABBILDUNG 2.3	57
ABBILDUNG 8.2 VERLAUF DER FORMZAHL BEI UNTERSCHIEDLICHEN SCHLEIFRADIEN	57
ABBILDUNG 8.3 SPITZENWERTREDUKTION, [29]	58

ABBILDUNG 8.4 VORSCHLAG REFERENZ-FAT-KLASSEN FÜR DEN KERBSPANNUNGSNACHWEIS BEI EINEM REFERENZRADIUS > 1 MM	58
ABBILDUNG 8.5 FAT-KLASSEN BEI UNTERSCHIEDLICHEN SCHLEIFRADIEN	59
ABBILDUNG 8.6 AUSSCHNITT DER KLEINPROBE MIT POSITION DES SCHLEIFRADIUS	59
ABBILDUNG 8.7 SCHEMATISCH, 10-KNOTEN TETRAEDER-ELEMENT, [30]	60
ABBILDUNG 8.8 SIMULATIONSMODELL DER KLEINPROBE	60
ABBILDUNG 8.9 SPANNUNGSERGEBNIS DER KNOTEN, GEMITTELT IN Y-RICHTUNG, SCHWARZE LINIE → GRAPH SPANNUNGSVERLAUF	61
ABBILDUNG 8.10 DEHNUNGSERGEBNIS DER KNOTEN, GEMITTELT IN Y-RICHTUNG	62
ABBILDUNG 9.1 UMRECHNUNGSPARAMETER DER KLEINPROBE BESTIMMEN, SIEHE AUCH ABBILDUNG 2.3	64
ABBILDUNG 9.2 WEGDEFINITION PRÜFZYLINDER	66
ABBILDUNG 9.3 AUSGLEICHSGERADE DER BERECHNETEN DEHNUNGEN [2] AUS DER FE-RAHMENRECHNUNG DES SF100L	67
ABBILDUNG 9.4 KOORDINATENSYSTEM DES VIRTUELLEN AUSWERTEPUNKTES (EVAL ITEM) DER FE-RAHMENBERECHNUNG [2]	67
ABBILDUNG 9.5 UM -90° GEDREHTES KOORDINATENSYSTEM DES DMS BEI DER MESSUNG [25]	67
ABBILDUNG 10.1 BENÖTIGTE PROGRAMME UND TOOLS ZUR SIGNALERSTELLUNG	71
ABBILDUNG 10.2 RAINFLOW-KOLLEKTIVE ABHÄNGIG VON DER SPANNUNGSAMPLITUDE (PSEUDOSPANNUNG OHNE QUERDEHNUNG) DER LEEREN (GRÜN), BELADENEN (ORANGE) UND ABWECHSELND BELADENEN (SCHWARZ) STRECKENVERSUCHE DES SF100L, [25]	73
ABBILDUNG 10.3 RAINFLOW-KOLLEKTIVE ABHÄNGIG VON DER SPANNUNGSAMPLITUDE (PSEUDOSPANNUNG MIT QUERDEHNUNGSFAKTOR 1,04) DER LEEREN (GRÜN), BELADENEN (ORANGE) UND ABWECHSELND BELADENEN (SCHWARZ) STRECKENVERSUCHE DES SF100L	74
ABBILDUNG 10.4 ERSTELLUNG DER VERSUCHSSEQUENZ, SIEHE AUCH ABBILDUNG 2.3	76
ABBILDUNG 10.5 RAINFLOW-MATRIX, SPANNENPAAR-MITTELWERT-ZÄHLUNG MITTELS 4-PUNKT-ALGORITHMUS, MATLAB	78
ABBILDUNG 10.6 RAINFLOW-OBJEKT DEFINIERT MIT MATLAB	79
ABBILDUNG 10.7 DARSTELLUNG DER MIN/MAX-WERTE DES GEMESSENEN SIGNALS „LEER“ AUS ABBILDUNG 10.7, [25]	80
ABBILDUNG 10.8: BEISPIEL: DARSTELLUNG DER UMKEHRPUNKTE EINER GERAFFTEN SEQUENZ (GRÜN) IM VERGLEICH ZUM GEMESSENEN SIGNAL (SCHWARZ), [25]	81
ABBILDUNG 10.9 SPANNUNGSKOLLEKTIV DER ORIGINALEN SEQUENZ IM VERGLEICH MIT DER GERAFFTEN SEQUENZ LOOP 1, BELADEZUSTAND „LEER“	82
ABBILDUNG 10.10 DARSTELLUNG DER MITTELLAGE DER SEQUENZEN „L“, „B“ UND „V“, LOOP 2, SPANNUNGSKANAL OHNE QUERDEHNUNGSFAKTOR	85
ABBILDUNG 10.11: KOLLEKTIV MIT 1 BELADEWECHSEL (ROT) UND MIT 15.000 LASTWECHSELN (SCHWARZ)	86
ABBILDUNG 10.12 LOOP 2, SEQUENZ: LEER, BELADEN UND MIT BELADEWECHSEL, PRÜFKRAFT IN KN	88
ABBILDUNG 10.13 ERSTELLUNG DES VERSUCHSSIGNALS, SIEHE AUCH ABBILDUNG 2.3	89
ABBILDUNG 10.14 SEQUENZAUSSCHNITT MIT UMKEHRPUNKTEN, KRAFTKANAL	90
ABBILDUNG 10.15 AUSSCHNITT DES ZEITSIGNALS, SINUSFÖRMIGER VERLAUF, KRAFTKANAL	90
ABBILDUNG 10.16 AUSSCHNITT DES ZEITSIGNALS BEI 5000 HZ ABTAstrate, ERFASSTE DATENPUNKTE DES KRAFTKANALS	91
ABBILDUNG 10.17 VERSUCHSSIGNAL ERSTELLT, SIEHE AUCH ABBILDUNG 2.3	91
ABBILDUNG 10.18 EFFEKTIVE SCHADENSSUMME $D_M$ NACH [6]	95
ABBILDUNG 11.1 MINDESTZUVERLÄSSIGKEIT MIT 1610 LASTZYKLEN, LOOP 1 MIT BELADEWECHSEL	100
ABBILDUNG 11.2 MINDESTZUVERLÄSSIGKEIT MIT 3166 LASTZYKLEN, LOOP 2 MIT BELADEWECHSEL	100

ABBILDUNG 11.3 LEBENSDAUERVERHÄLTNIS IN ABHÄNGIGKEIT DER PROBENANZAHL BEI 0 BIS 4 AUSFÄLLEN	100
ABBILDUNG 12.1 BEANSPRUCHUNGSBEREICHE EINES DREHGESTELLRAHMENS	101
ABBILDUNG 16.1 MESSSTRECKE (ROT) DER BELADENEN TESTFAHRTEN DES SF100L, [25]	125
ABBILDUNG 16.2 MESSSTRECKE (ROT) DER LEEREN TESTFAHRTEN DES SF100L, [25]	125
ABBILDUNG 16.3 FAHRZEUGKONFIGURATION SF100L, [25]	126
ABBILDUNG 16.4 AUSZUG AUS DEM VERWIEGEPROTOKOLL DES SF100L FÜR WAGENKASTEN 1, [25]	126
ABBILDUNG 16.5 LOOP 1, SEQUENZ: LEER, BELADEN UND MIT BELADEWECHSEL, PRÜFKRAFT IN KN	137

## 15 Tabellenverzeichnis

---

TABELLE 3.1 UNTERGRENZE EFFEKTIVE MINER-SUMME, FKM 6 [6]	9
TABELLE 3.2 EIGENSPANNUNGSFAKTOREN $K_E$ UND MITTELSPANNUNGSEMPFINDLICHKEIT $M$ FÜR GESCHWEIßTE BAUTEILE, [8]	11
TABELLE 5.1 UNTERSCHIEDE KLEINPROBENVERSUCH – SCHWINGVERSUCH	30
TABELLE 5.2 MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN IM LIEFERZUSTAND LAUT DATENBLATT VOESTALPINE, [16]	31
TABELLE 5.3 ERGEBNISSE: WÖHLERLINIENSTEIGUNG $K$ , FAT-KLASSEN DER KLEINPROBENVERSUCHE MIT ALFORM 700 M, [17]	32
TABELLE 6.1 EINES STRECKENVERSUCHES LAUT DIN EN 13749 [22]UND [23]	38
TABELLE 6.2 NULLPUNKT DES JEWEILIGEN STRECKENVERSUCHES ZUR BERECHNUNG DER DMS MITTELSPANNUNG, [24]	40
TABELLE 6.3 SCHWEIßNAHTTYPEN UND NAHTENDEN AM ABBINDER VERSCHIEDENER DREHGESTELLE, [27] GEWÄHLTER STRECKENVERSUCH: BM1_1L_DOSTOOE_PROT_SF100L, [25]	42
TABELLE 6.4 BESCHREIBUNG DER MESSFAHRTGRUPPEN DES SF100L, [25]	48
TABELLE 7.1 GRENZWERTE DER UNIVERSALPRÜFMASCHINE	51
TABELLE 7.2 VERWENDETE ZYLINDERPARAMETER FÜR MATLAB R2017B	55
TABELLE 8.1 KERBFALLKATALOG, FKM 6, TABELLE 5.4.3, [6]	59
TABELLE 8.2 WERKSTOFFDATEN ALFORM 700 M	60
TABELLE 8.3 ERGEBNISSE AUS DER NX SIMULATION DES KLEINPROBENMODELLS AN DER DMS-POSITION	63
TABELLE 9.1 BERECHNETE UMRECHNUNGSFAKTOREN FÜR DIE MODELLÄHNLICHKEIT	69
TABELLE 10.1 PROJEKTINFORMATIONSDATENBANK EXCEL, ÜBERSICHT MESSKANÄLE (CHANNELS)	72
TABELLE 10.2 BEZEICHNUNG INPUTDATEN AUS DEM STRECKENVERSUCH (SIEHE AUCH TABELLE 6.4 UND ABBILDUNG 6.7)	72
TABELLE 10.3 ÄNDERUNG DER ÄQUIVALENTAMPLITUDE BEI BERÜCKSICHTIGUNG DER QUERDEHNUNG	74
TABELLE 10.4 GEWÄHLTE WÖHLER-LINIE NACH HAIBACH, $K=3$ , [25]	77
TABELLE 10.5 WERTE ALS BEISPIEL: LEERE MESSFAHRT NR. 126 LAUT ABBILDUNG 10.8	80
TABELLE 10.6 EXTRAPOLATIONSFAKTOREN EPF	88
TABELLE 10.7 SKALIERUNGSFAKTOREN UND ZUGEHÖRIGE EINSTELLUNGEN	94
TABELLE 10.8 ERGEBNISSE DER ITERATIONSSCHRITTE DER VERSUCHSSIGNALERSTELLUNG FÜR DEN SPANNUNGSKANAL OHNE QUERDEHNUNGSFAKTOR, ANGABEN PRO KLEINPROBE	96
TABELLE 16.1 PROJEKTBEZEICHNUNGEN UND SAP-NUMMERN DER STRECKENVERSUCHSBERICHTE	124
TABELLE 16.2 AUSWERTUNG DES STRECKENVERSUCHES AN DEN ABBINDERN, SF100L, GEWÄHLT 1L01 (GELB MARKIERT), [25]	128

# 16 Anhang

## 16.1 Werkstoffdatenblatt Alform 700 M

 <small>Winterssteller GmbH Gappenberg Metalltechnik</small>		<b>Prüfbescheinigung nach EN 10204</b> inspection document according to EN 10204	
		<input checked="" type="checkbox"/> 3.1 <input type="checkbox"/> 3.2    Abnahmeprüfzeugnis / inspection certificate	
<b>Kunde / Besteller</b> <small>Customer / purchaser</small>	Siemens Graz	<b>Prüfbescheinigungs-nr.</b> <small>inspection document No.</small>	29557
<b>Kundenvertrags / Bestell- Nr.</b> <small>customer/contract-No.</small>	3202829580	<b>Lieferanten Nr. Kunde / Besteller</b> <small>supplier No. Customer / purchaser</small>	7344
<b>Vertrags-/Bestell- / Pos.-Nr.</b> <small>contract/order/pos. - No</small>	10	<b>Werkauftrags-Nr. Lieferant</b> <small>work order - No. supplier</small>	-
<b>Material Nr. Kunde / Besteller</b> <small>material No. Customer / purchaser</small>	A2 V00 002 684 212	<b>Prüfplan Nr. Lieferant</b> <small>inspection plan No. supplier</small>	-
<b>Materialbezeichnung</b> <small>name of object:</small>	Platte	<b>Lieferschein Nr.</b> <small>delivery note No.</small>	1588162
<b>Stückzahl</b> <small>quantity of pieces</small>	90	<b>Fertigungsauftrag-Nr.</b> <small>No. of workorder</small>	-
<b>Hinweise/Prüfresultate/ Directions:</b> Prüfungen sind gemäß Prüfplan / Kundenvertrag bzw. Bestellung durchgeführt. Ergebnisse entsprechen. <small>Inspections are in accordance the test and inspection plan / customer contract resp. order. The results correspond.</small>			
<b>3.1 Abnahmeprüfzeugnis Rohmaterial Nr:</b> <small>3.1 Inspection certificate raw material No.</small>		<b>Chargennr / Walztafel-Nr. / Tafel-Nr</b> <small>Heat No. / roll plate No. / plate No.</small>	
Q0440692		2273461 - 975965	
 97193227			
<b>ZfP-Prüfprotokoll Nr.</b> <small>Non conformity report No.</small>		<b>Sonstige Qualitätsnachweise</b> <small>other quality reports:</small>	
-		-	
<b>Maßprotokoll Nr.</b> <small>Measurements protocol No.</small>			
-			
<b>Lackprotokoll Nr.</b> <small>paint report No.</small>			
-			
<b>Bemerkungen / Remarks /</b> ..			
<b>Q-Meldungs-Nr.</b> <small>non conformity report no.</small>		<b>Abweichungsbericht Nr.</b> <small>deviation report no</small>	
-		-	
Der Hersteller / Lieferant bestätigt durch einen von der Fertigung unabhängigen Abnahmebeauftragten (und Kunde / Güteprüfer), daß oben angeführte Gegenstände, Prüfungen sowie Prüfergebnisse den Vereinbarungen der Bestellung entsprechen (Ausnahme siehe Bemerkungen). Alle Prüfdokumente werden über einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren sicher aufbewahrt. Der Besteller hat das Recht, bei Bedarf diese Unterlagen kostenlos anzufordern. Eine Überprüfung der Dokumente durch den Besteller ist zu jeder Zeit möglich. <small>The manufacturer / supplier declare by an authorized inspection representative independent of the manufacturing department (and customer QA / representative consultant), that the above-listed parts, the inspections and their results are complying with the order specifications (exception see remarks). All the documents will be kept in a safe place for at least 30 years. In case of order, customer will get copies of these documents without costs. The customer may check the documents at any time.</small>			
<b>Abnahmebeauftragter</b> <small>QA - supplier</small>	<b>Datum</b> <small>Date</small>	<b>Güteprüfer (nur bei 3.2)</b> <small>Customer QA representative / consultant (only 3.2)</small>	<b>Datum</b> <small>Date</small>
 PENDL Andreas	16.10.2017		
<small>Dok. Nr. / Art / Rev. doc. no. / type / rev.</small>	<small>Änderungsbeschreibung description</small>	<small>Vorlage erstellt von / Abt template prepared by / dept.</small>	<small>genehmigt und freigegeben checked and approved</small>
			<small>Seite page</small> 1/1

voestalpine Grobblech GmbH

**A02**  
**Abnahmeprüfzeugnis**  
**Inspection certificate**  
EN 10294 - 3.1

Seite 1 von 7  
Page 1 of 7  
Date 22-06-2017  
voestalpine-Strße 3  
4020 Linz, Austria  
www.voestalpine.com/grobblech

A03 Bestellungs-Nr. Document number	Q0440692	A06 Auftrag-Nr. Order-No.	7100241	A07 Bestell-Dat. Order Date	13-03-2017	Versanddatum Date of dispatch	22-06-2017	40
A04 Besucher Customer	Mechel Service Stahlhandel Austria GmbH Lunzerstraße 105 A-4020 Linz	B01 Fabrik Product	Tafelblech Plate	B02 Werkstoff Material	ALFORM PLATE 700M	B03 Norm Standard	ALFORM PLATE : 2010	
A07 Best-Nr. Order No.	17EB14015	B04 Lieferzustand Delivery condition	thermomechanisch gewalzt + beschleunigt abgekühlt thermomechanical rolled + accelerated cooled					
A08 Empfänger Consignee	Siemens Aktiengesellschaft Österreich Eggenberger Straße 31 A-8021 Graz	A10 - Ergänzende Angaben - Supplementary information SIEMENS MK 3800320025 / G36						
A10 - Ergänzende Angaben - Supplementary information		B05 - Zusätzliche Anforderungen - Supplementary requirements MATERIAL IS FULLY KILLED, FINE GRAINED AND VACUUM DEGASSED AND PRODUCED BY BOF. MATERIAL IS IN ACC. WITH CUSTOMER SPECIFICATION A620037961440-A BUT TAKING ACCOUNT OF THE ORDER AGREEMENT. COLD FORMING PROPERTIES ARE GUARANTEED ACC. TTD - ALFORM PLATE 700M, VAGB.						

Z01 - Besichtigung und Maßprüfung: keine Beanstandung. Die Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen entsprechen den Vorschriften.  
Z01 - Visual Examination and dimensional checking: satisfactory. The results of tests performed are in compliance with the requirements.

**Umfang der Lieferung - Detail of supply**

B07 Schmelze Heat No.	B06 Blech-Nr. Plate No.	Dimensionen - Dimensions			B08 Stück Pieces	B09 theor. Masse theor. Mass kg	B10 ist. Masse act. Mass kg	B11 Länge Length mm	B12 Breite Width mm	B13 Dicke Thickness mm	A09 Lief-Nr. Del. No.	Sachnummer reference no.
		mm	mm	mm								
780613	217805/1	50	40,00	2000,0	8010	1	5.233	60838	A2V0002534812			
780613	217805/2	60	40,00	2000,0	8010	1	5.233	60838	A2V0002534812			
780614	219906/1	50	40,00	2000,0	8010	1	5.234	60838	A2V0002534812			
780614	219970/1	50	30,00	2000,0	8010	1	3.944	60838	A2V0002540270			
780614	219970/3	50	30,00	2000,0	8010	1	3.945	60838	A2V0002540270			
780614	219970/2	50	30,00	2000,0	8010	1	3.943	60838	A2V0002540270			
781191	227494/2	10	8,00	2000,0	8010	1	1.080	60838	A2V0002617854			

A03  
Bestellungs-Nr.  
Document number

Q0440692

A06  
Auftrag-Nr.  
Order-No.

7100241

Z01  
Datum  
Date

22-06-2017

Seite  
Page

2

von  
of

7

**Umfang der Lieferung - Detail of supply**

B07 Schmelze Heat No.	B06 Blech-Nr. Plate No.	Dimensionen - Dimensions			B08 Stück Pieces	B09 theor. Masse theor. Mass kg	B10 ist. Masse act. Mass kg	B11 Länge Length mm	B12 Breite Width mm	B13 Dicke Thickness mm	A09 Lief-Nr. Del. No.	Sachnummer reference no.
		mm	mm	mm								
781191	227494/1	10	8,00	2000,0	8010	1	1.080	60838	A2V0002617854			
975955	220093/3	40	16,00	2000,0	8010	1	2.095	60838	A2V0002534806			
975955	220093/1	40	16,00	2000,0	8010	1	2.094	60838	A2V0002534806			
975955	220093/2	40	16,00	2000,0	8010	1	2.094	60838	A2V0002534806			
975955	226825/1	10	8,00	2000,0	8010	1	1.079	60838	A2V0002617854			
975955	226825/2	10	8,00	2000,0	8010	1	1.079	60838	A2V0002617854			
975955	226826/2	10	8,00	2000,0	8010	1	1.079	60838	A2V0002617854			
975955	226826/1	10	8,00	2000,0	8010	1	1.092	60838	A2V0002617854			
975955	226833/2	10	8,00	2000,0	8010	1	1.073	60838	A2V0002617854			
975955	226833/1	10	8,00	2000,0	8010	1	1.073	60838	A2V0002617854			
975955	226834/1	10	8,00	2000,0	8010	1	1.079	60838	A2V0002617854			
975955	226834/2	10	8,00	2000,0	8010	1	1.079	60838	A2V0002617854			
975955	227343/1	30	12,00	2000,0	8010	1	1.079	60838	A2V0002617854			
975955	227344/3	30	12,00	2000,0	8010	1	1.573	60838	A2V0002617908			
975955	227344/1	30	12,00	2000,0	8010	1	1.586	60838	A2V0002617908			
975955	227345/1	20	10,00	2000,0	8010	1	1.586	60838	A2V0002617908			
975955	227345/2	20	10,00	2000,0	8010	1	1.319	60838	A2V0002617906			
975955	227346/1	20	10,00	2000,0	8010	1	1.320	60838	A2V0002617906			
975955	227346/2	20	10,00	2000,0	8010	1	1.320	60838	A2V0002617906			
975955	227488/2	10	8,00	2000,0	8010	1	1.093	60838	A2V0002617854			
975955	227488/1	10	8,00	2000,0	8010	1	1.092	60838	A2V0002617854			
975955	227489/1	10	8,00	2000,0	8010	1	1.092	60838	A2V0002617854			
975955	227489/2	10	8,00	2000,0	8010	1	1.093	60838	A2V0002617854			
975955	227490/1	10	8,00	2000,0	8010	1	1.093	60838	A2V0002617854			
975955	227490/2	10	8,00	2000,0	8010	1	1.093	60838	A2V0002617854			
Summen - Sum					32		61.198					

C78 - Erhitzungsverfahren - Stranggussmaterial: LD-Verfahren mit Vakuumbehandlung, Stahl ist voll beruhigt. - Method of steelmaking: strand casted material: pure oxygen blown with vacuum treatment; steel is fully killed.

B14 - Ergänzende Angaben - Supplementary information

Tol. n. EN 10029/10 / Dimensional tolerances acc. EN 10029/10  
Normalen nach EN 10029/10 Klasse N / Flatness acc. EN 10029/10 class N

EN10163-2: Klasse B3 - Reparaturschweißung nicht erlaubt / EN10163-2: Class B3 - Repair-welding not permitted.  
 Thickness-tolerance acc. EN 10029/10 tab.1 class C

**Chemische Zusammensetzung (Schmelzanalyse) - Chemical composition (Heat analysis)**

Schmelze		C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Ti	N	B	Sn	Ca	LF02	LF04
Heat No.	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Sollwerte >=							.020	1.500	2.000	.500		.120	.060	.050		.0050		.46	.220	.40
Set values <=		.120	.400	2.100	.020	.0080														
781191		.043	.322	1.910	.007	.0003	.040	.177	.022	.121	.010	.005	.042	.012	.0055	.0012	.0030	.42	.059	.03
975955		.047	.352	1.940	.008	.0003	.034	.181	.028	.117	.010	.005	.043	.011	.0053	.0012	.0030	.43	.059	.03
Sollwerte >=							.020	1.500	2.000	.500		.120	.060	.050		.0050		.46	.220	.40
Set values <=		.120	.400	2.100	.020	.0080														
780613		.054	.334	1.610	.011	.0012	.036	.430	.023	.219	.012	.038	.039	.013	.0038	.0013	.0030	.46	.090	.04
780614		.055	.338	1.660	.010	.0008	.035	.440	.049	.224	.011	.038	.036	.013	.0037	.0013	.0020	.48	.087	.03

C39 - Ergänzende Angaben - Supplementary information  
 Ca: C+(Mn/6)+(Cr+Mo+W)/5+(Ni+Cu)/15  
 LF04: Cu+8\*Sn  
 LF02: Nb+W+Ti

**Ergebnisse der Prüfungen - Test results: C40-C49 Kerbschlagbiegeversuch nach EN ISO 148-1 - C40-C49 Impact Test acc. EN ISO 148-1**

Schmelze	C40	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08	C09	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28	C29	C30	C31	C32	C33	C34	C35	C36	C37	C38	C39	C40	C41	C42	C43	C44	C45	C46	C47	C48	C49	C50	C51	C52	C53	C54	C55	C56	C57	C58	C59	C60	C61	C62	C63	C64	C65	C66	C67	C68	C69	C70	C71	C72	C73	C74	C75	C76	C77	C78	C79	C80	C81	C82	C83	C84	C85	C86	C87	C88	C89	C90	C91	C92	C93	C94	C95	C96	C97	C98	C99	C100
Heat No.	shape	loc.	PosTh.	Dir	temp	SV	SV	SV	AV	°C	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J																																																																														
Sollwerte >=										-20	14	14	14	20																																																																																							
Set values <=																																																																																																					
781191	CV 10x5	F	O	L	-20	104	103	103	103																																																																																												
975955	CV 10x5	F	O	L	-20	98	100	101	100																																																																																												
	CV 10x5	F	O	L	-20	79	80	83	81																																																																																												
	CV 10x5	F	O	L	-20	106	104	105	105																																																																																												
Sollwerte >=										-20	21	21	21	30																																																																																							
Set values <=																																																																																																					
975955	CV 10x7,5	F	O	L	-20	177	194	187	186																																																																																												
	CV 10x7,5	F	O	L	-20	189	195	180	188																																																																																												
Sollwerte >=										-20	28	28	28	40																																																																																							
Set values <=																																																																																																					
780613	CV 10x10	F	V	L	-20	281	295	275	283																																																																																												
780614	CV 10x10	F	2B2	L	-20	251	316	306	291																																																																																												
	CV 10x10	F	V	L	-20	264	305	312	294																																																																																												
975955	CV 10x10	F	2B2	L	-20	333	289	330	317																																																																																												

C40;Pf;shape:  
 CV 10x10: Probenform, Abmessung;Test shape, Dimensions  
 CV 10x7,5: Probenform, Abmessung;Test shape, Dimensions  
 CV 10x5: Probenform, Abmessung;Test shape, Dimensions  
 C01;Prüf;loc.:  
 F: Fuss;Bottom  
 LageDicke;PosTh.: Probenposition über Dicke;Pos Thickness  
 O: Oberfläche;surface  
 V: V  
 2B2: 2mm unter Oberfläche;2mm below surface  
 C02;Lage;Dir:  
 L: längs;longitudinal  
 C04;EW;SV: Einzelwert;single value  
 C03;MW;AV: Mittelwert;average value

Ergebnisse der Prüfungen - Test results: C10-C29 Zugversuch nach EN ISO 6892-1 - C10-C29 Tensile Test acc. EN ISO 6892-1												
B06 Blech-Nr Plate No	C41 Breite Width	PrDicke SpThickn mm	C01 PrLage Loc.	LageDicke Posth.	C02 Lage Dir	C11 Reh MPa	C11 Rp0,2 MPa	C12 Rm MPa	C13 LO %	A	E	
Sollwerte >=						700	700	770	12.0			
Set values <=						1050						
226825	Ø	5.01	F	O	Q	903	1043	A5	13.4			
226826	Ø	5.01	F	O	Q	867	1047	A5	14.0			
226833	Ø	4.99	F	O	Q	844	1024	A5	14.0			
226834	Ø	4.98	F	O	Q	860	1023	A5	15.1			
227343	Ø	8.01	F	O	Q	928	1045	A5	12.8			
227344	Ø	8.01	F	O	Q	935	1048	A5	12.9			
227345	Ø	5.99	F	O	Q	900	1049	A5	13.4			
227346	Ø	5.99	F	O	Q	876	1024	A5	13.8			
227488	Ø	5.01	F	O	Q	860	1048	A5	14.4			
227489	Ø	5.00	F	O	Q	889	1042	A5	15.0			
227490	Ø	4.99	F	O	Q	916	1046	A5	14.0			
227494	Ø	5.00	F	O	Q	868	1030	A5	14.6			
Sollwerte >=						680	680	770	12.0			
Set values <=						1050						
217805	Ø	7.95	F	O	Q	710	880	A5	17.7			
219906	Ø	8.03	F	O	Q	745	939	A5	17.2			

Ergebnisse der Prüfungen - Test results: C10-C29 Zugversuch nach EN ISO 6892-1 - C10-C29 Tensile Test acc. EN ISO 6892-1												
B06 Blech-Nr Plate No	C41 Breite Width	PrDicke SpThickn mm	C01 PrLage Loc.	LageDicke Posth.	C02 Lage Dir	C11 Reh MPa	C11 Rp0,2 MPa	C12 Rm MPa	C13 LO %	A	E	
Sollwerte >=						680	680	770	12.0			
Set values <=						1050						
219970	Ø	8.01	F	O	Q	748	883	A5	17.4			
220093	Ø	7.99	F	O	Q	744	876	A5	17.9			

PrDicke/SpThickn: Probendicke/specimen thickness  
 C01:PrLage/Loc.:  
 F: Fuss/Bottom  
 LageDicke/Posth.: Probenposition über Dicke/Pos Thickness  
 Q: Oberfläche/surface  
 C02:Lage/Dir:  
 Q: quer/transverse  
 C12: Rm: Zugfestigkeit/Tensile Strength  
 LO: Messlänge/gauge  
 A5: Länge = 5.65 \* sqr (Fläche) mm/Length = 5.65 \* sqr (area) mm  
 C13:A/E: Bruchdehnung/elongation

Anmerkungen - Remarks  
 Ultraschallprüfung gemäß EN 10160, EN 10160 Qualitätsklasse S2 /Fläche, Raster 100 mm, EN 10160 Qualitätsklasse E3 /Randzone, Randzone 50 mm : Bedingung erfüllt

Ultrasonic examination acc. to EN 10160, EN 10160 class S2/Body, Grid 100 mm, EN 10160 class E3/Edge Zone, Edge zone 50 mm : satisfactory

Wir bestätigen, dass die oben angeführte Lieferung den Bestellvorschriften (Normvorschriften) entspricht.

Die Unterschrift des Abnahmebeauftragten der voestalpine Grobblech GmbH wird durch eine elektronische Unterschrift ersetzt, da die Atteste bei voestalpine Grobblech GmbH mittels eines geeigneten Datenverarbeitungssystems erstellt werden (EN 10204, Pkt.5).

We confirm that the above-mentioned delivery corresponds to the order (and standard).

The signature of the inspection representative from voestalpine Grobblech GmbH is substituted by a electronic signature, because the

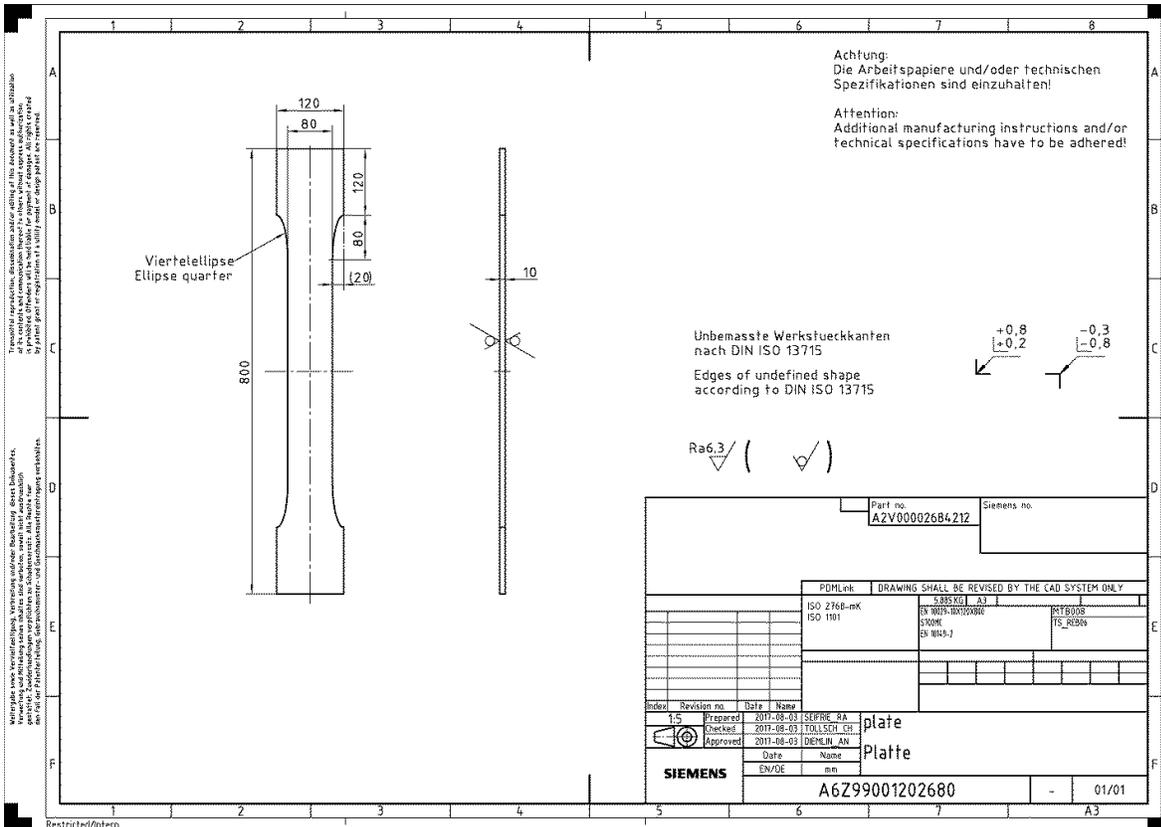
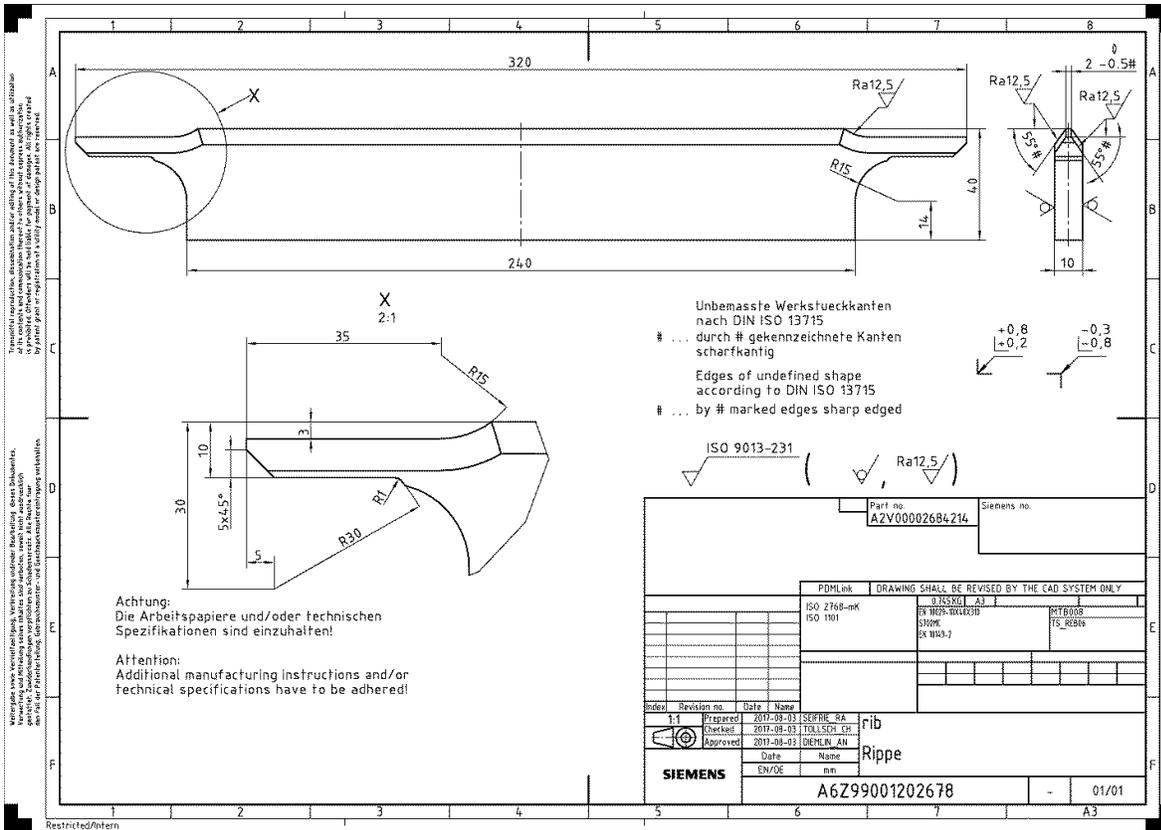
voestalpine

Z02  
 Abnahmebeauftragter voestalpine  
 Grobblech  
 Inspection representative voestalpine  
 Grobblech  
 HUBER Christine

**voestalpine**  
 ONE STEP AHEAD.

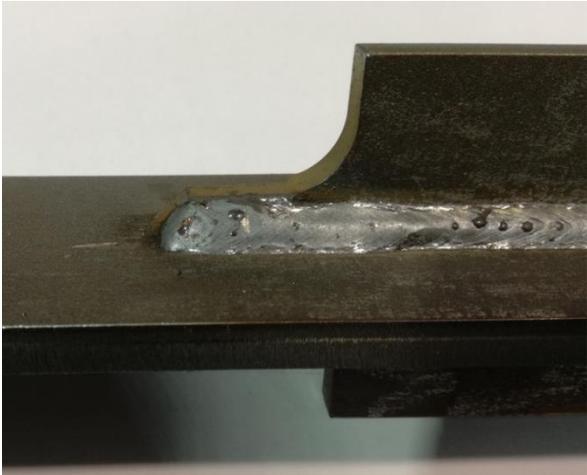
Anmerkungen - Remarks  
 certificates of voestalpine Grobblech GmbH are prepared by a suitable data processing system (EN 10204, Pt.5).





**16.4 Reale Kleinproben**

**Kleinprobe mit Abbindenaht**

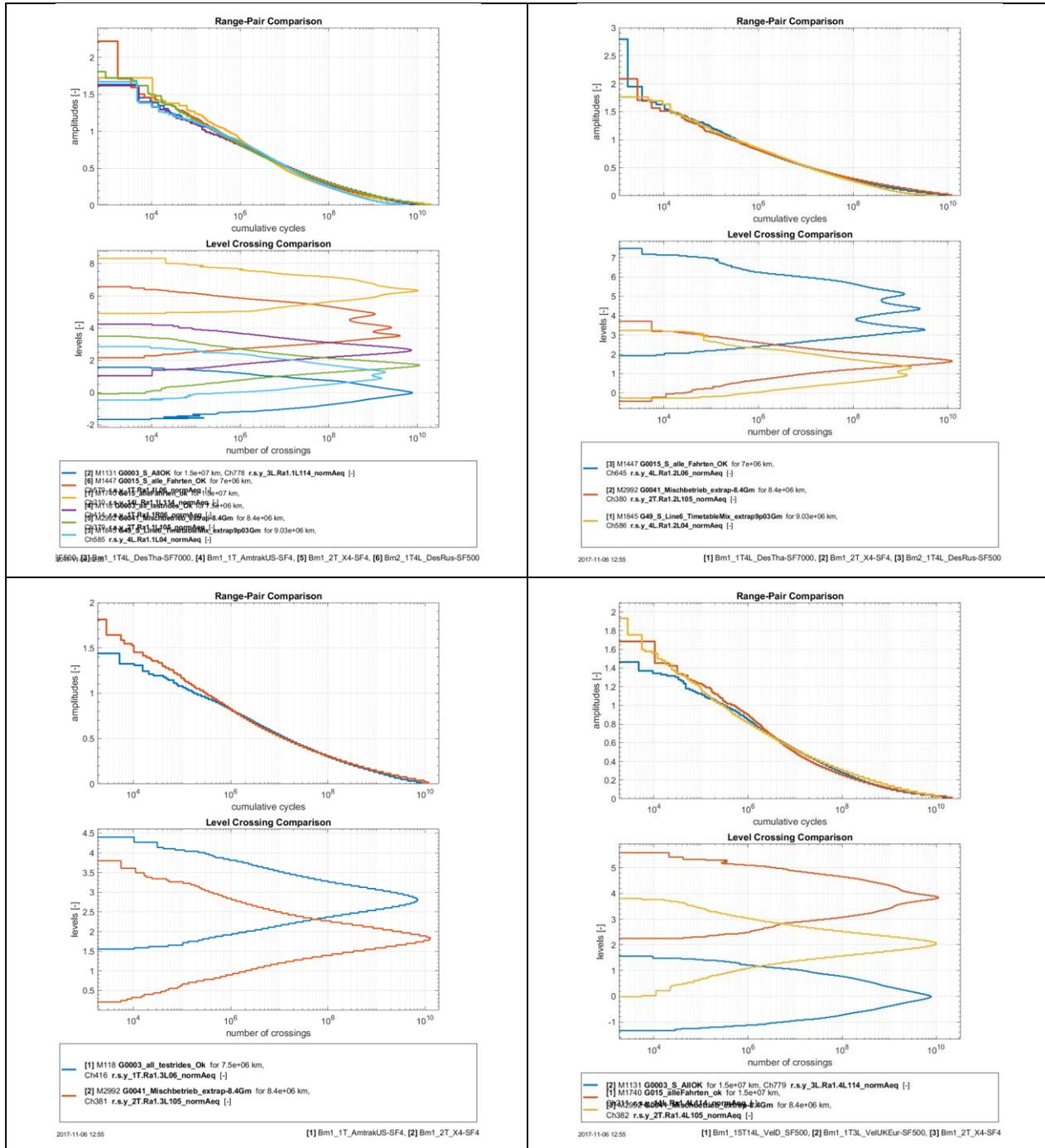


**Kleinprobe mit verschliffenem Nahtende**



# 16.5 Spannkolkollektive im Projektvergleich<sup>10</sup>

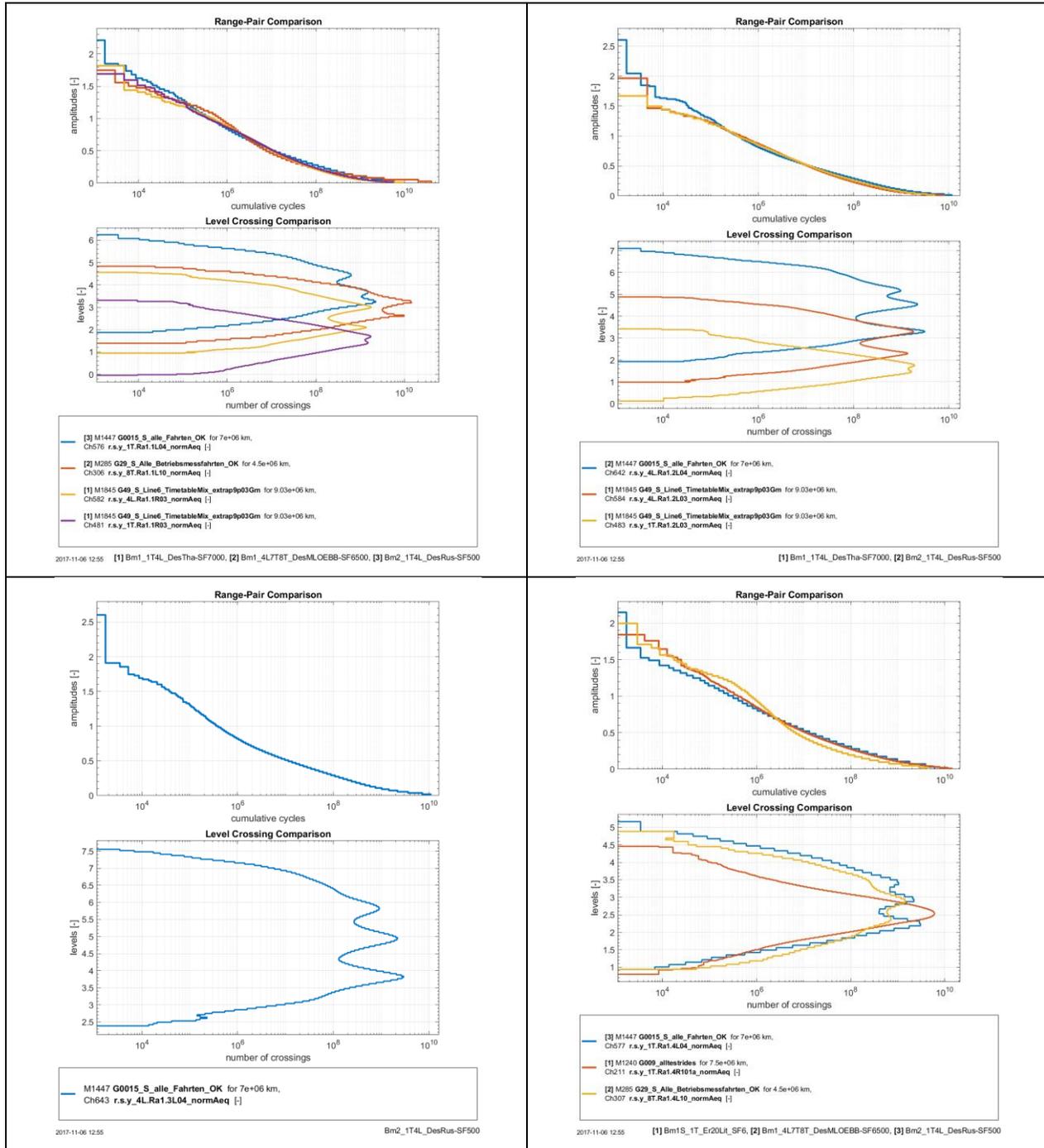
## 16.5.1 Abbinder Radsatzföhrungsbuchse oben auöen



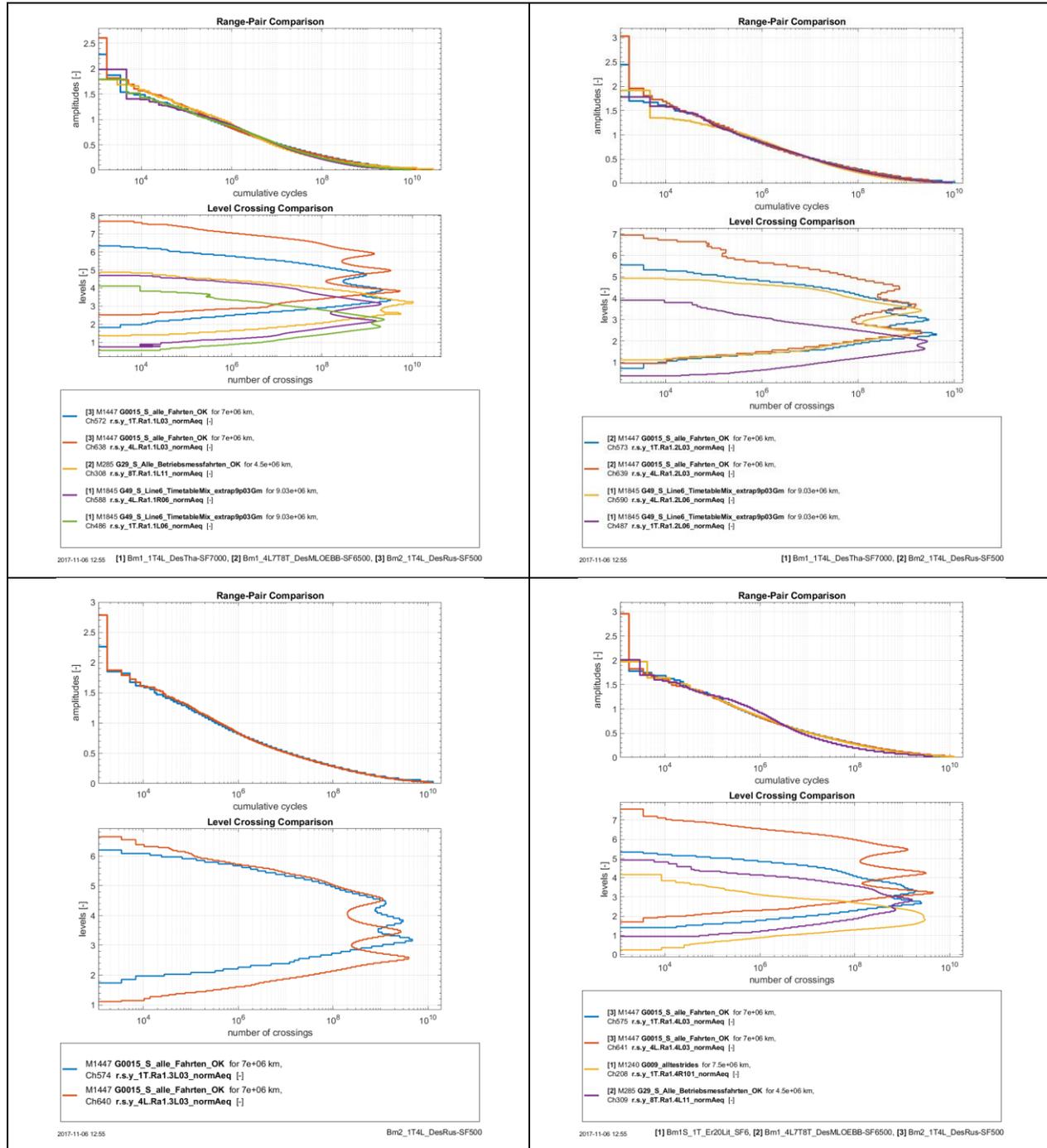
<sup>10</sup> von links nach rechts: 1. Zeile: 1.Quadrant und 2.Quadrant  
2. Zeile: 3.Quadrant und 4.Quadrant



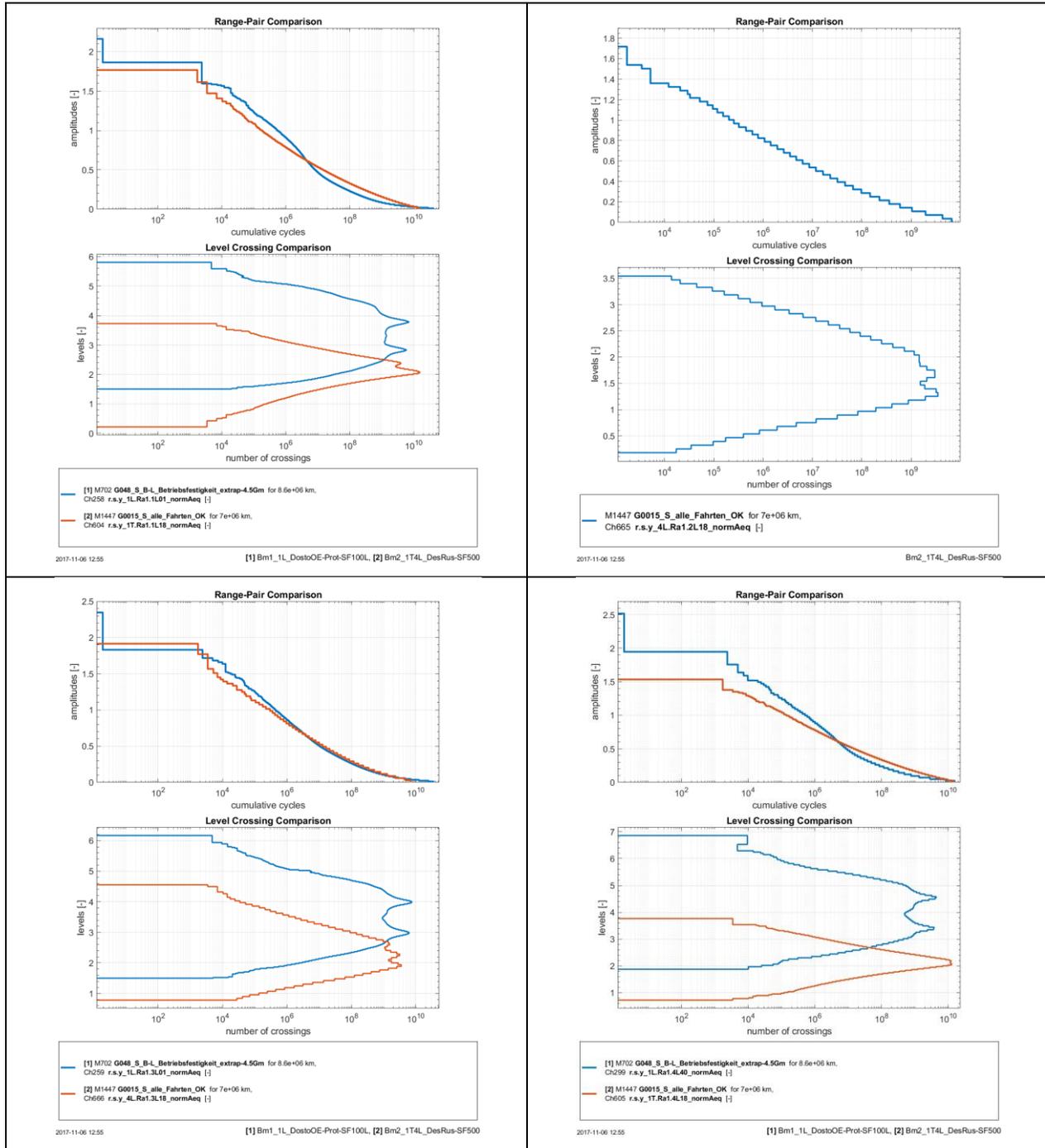
### 16.5.3 Abbinder Radsatzführungsbuchse unten außen



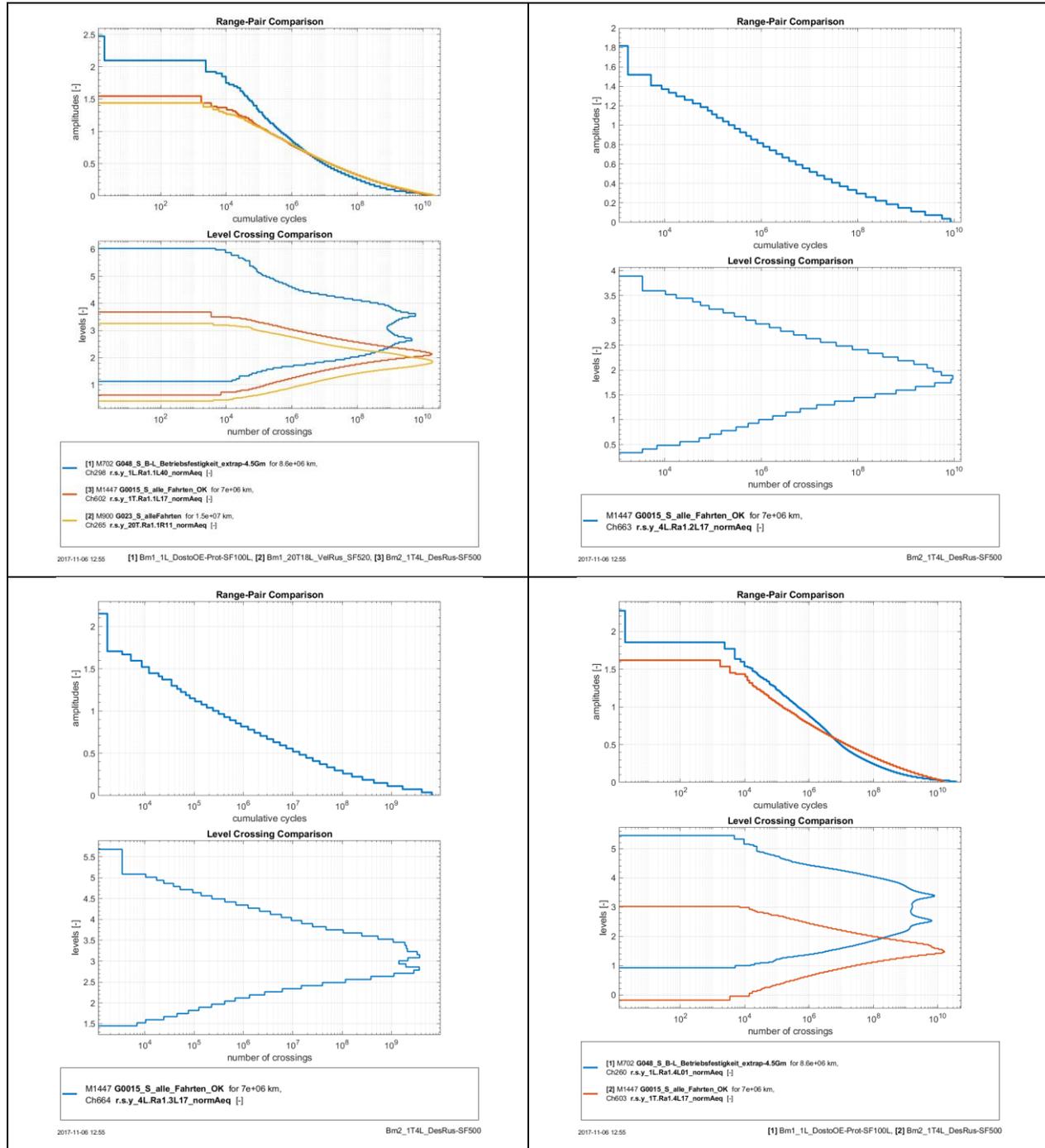
## 16.5.4 Abbinder Radsatzführungsbuchse unten innen



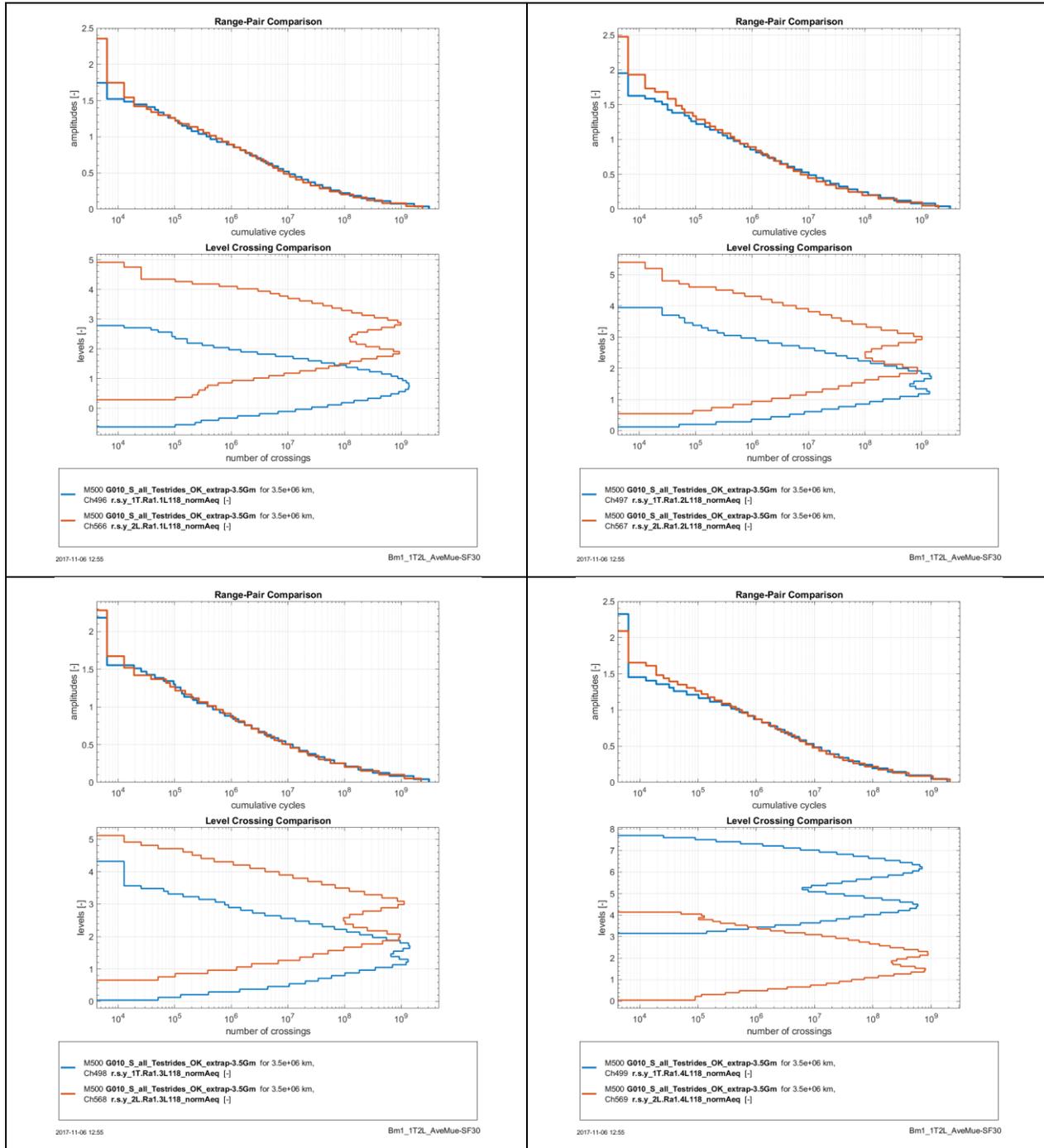
# 16.5.5 Abbinder Primärfedertopf außen



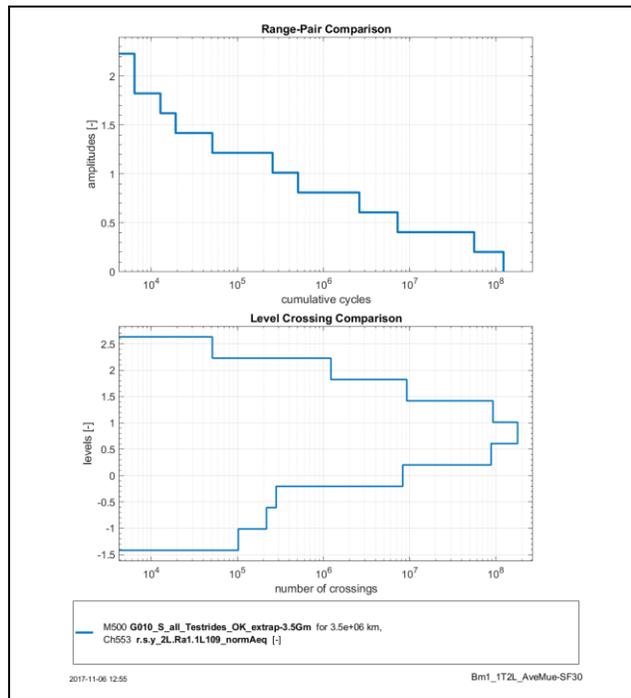
## 16.5.6 Abbinder Primärfedertopf innen



## 16.5.7 Abbinder primäre Abhebesicherung oben außen



## 16.5.8 Abbinder primäre Abhebesicherung unten außen



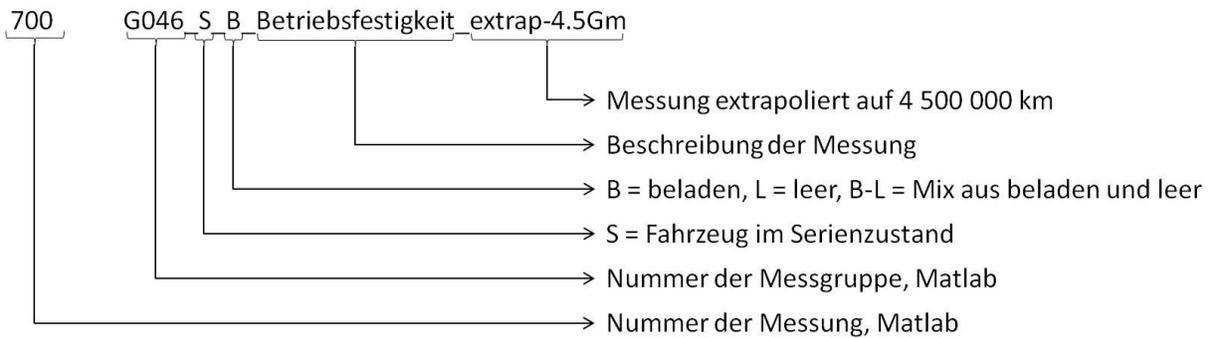
## 16.6 Erklärung der Projektbezeichnungen

	Bezeichnung Betriebsmessung	Fahrwerkskategorie	Name	Zugtyp	Fahrwerkstyp	SAP Nr.
I	Bm1_1L_DostoOE_Prot_SF100L	SF100L	Doppelstockzug ÖBB Prototyp	Nahverkehrszug	Laufdrehgestell	A6Z00041649484
	Bm1_3L_VelUKEur_SF500	SF500	Velaro United Kingdom Eurostar	Hochgeschwindigkeitszug	Laufdrehgestell	A6Z00039410583
	Bm2S_1T_DesRus_SF500	SF500	Desiro Russland	Nahverkehrszug	Triebdrehgestell	A6Z00035298600
	Bm2S_4L_DesRus_SF500	SF500	Desiro Russland	Nahverkehrszug	Laufdrehgestell	A6Z00035298604
	Bm1_14L_VelD_SF500	SF500	Velaro Deutschland	Hochgeschwindigkeitszug	Laufdrehgestell	A6Z00033150894
	Bm1_20T_VelRus_SF520	SF520	Velaro Russland	Hochgeschwindigkeitszug	Triebdrehgestell	A6Z00014632921
Bm1S_22T_ICxDB_SF500	SF500	Intercity X Deutsche Bahn	Fernverkehrszug	Triebdrehgestell	A6Z00039235189	
II	Bm1_1T_AmtrakUS_SF4	SF4	Amtrak United States	Lokomotive	Triebdrehgestell	A6Z00036189148
	Bm1_2T_X4_SF4	SF4	Vectron X4	Lokomotive	Triebdrehgestell	A6Z00034427893
	Bm1_1T_X4B_Fin_SF4B	SF4B	Vectron X4B Finland	Lokomotive	Triebdrehgestell	A6Z00040386381
	Bm1_1T_ER20Lit_SF6	SF6	EuroRunner Litauen	Lokomotive	Triebdrehgestell	A6Z00032418141
III	Bm1_1T_AveNMue_SF30	SF30	Avenio München	Straßenbahn	Triebdrehgestell	A6Z00036763754
	Bm1_2L_AveNMue_SF30	SF30	Avenio München	Straßenbahn	Laufdrehgestell	A6Z00036763836
IV	Bm1_8T_DesMLOEBB_SF6500	SF6500	Desiro Mainline ÖBB	Nahverkehrszug	Triebdrehgestell	A6Z00035319268
	Bm1_4L_DesTha_SF7000	SF7000	Desiro Thameslink	Nahverkehrszug	Laufdrehgestell	A6Z00039405523A
	Bm1_1T_DesTha_SF7000	SF7000	Desiro Thameslink	Nahverkehrszug	Triebdrehgestell	A6Z00039405523A

Tabelle 16.1 Projektbezeichnungen und SAP-Nummern der Streckenversuchsberichte

## 16.7 Auszug aus dem Streckenversuch des SF100L

### 16.7.1 Erklärung der Messungsbezeichnung:



### 16.7.2 Messstrecken



Abbildung 16.1 Messstrecke (rot) der beladenen Testfahrten des SF100L,[25]

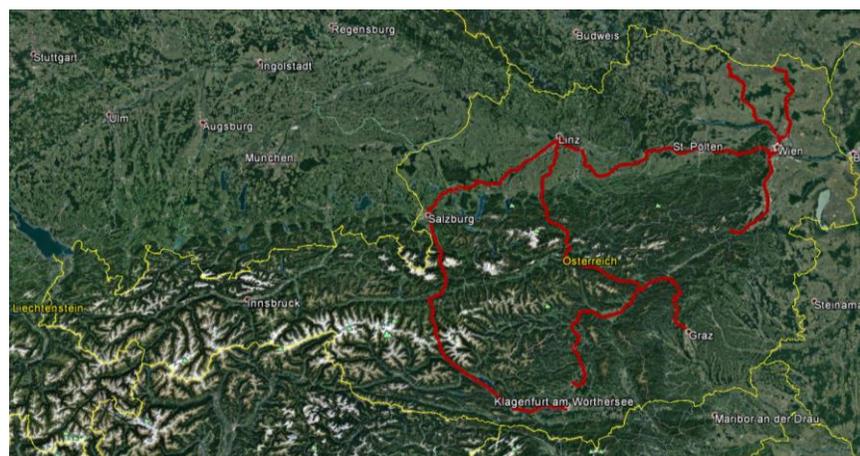


Abbildung 16.2 Messstrecke (rot) der leeren Testfahrten des SF100L, [25]

### 16.7.3 Fahrzeugkonfiguration

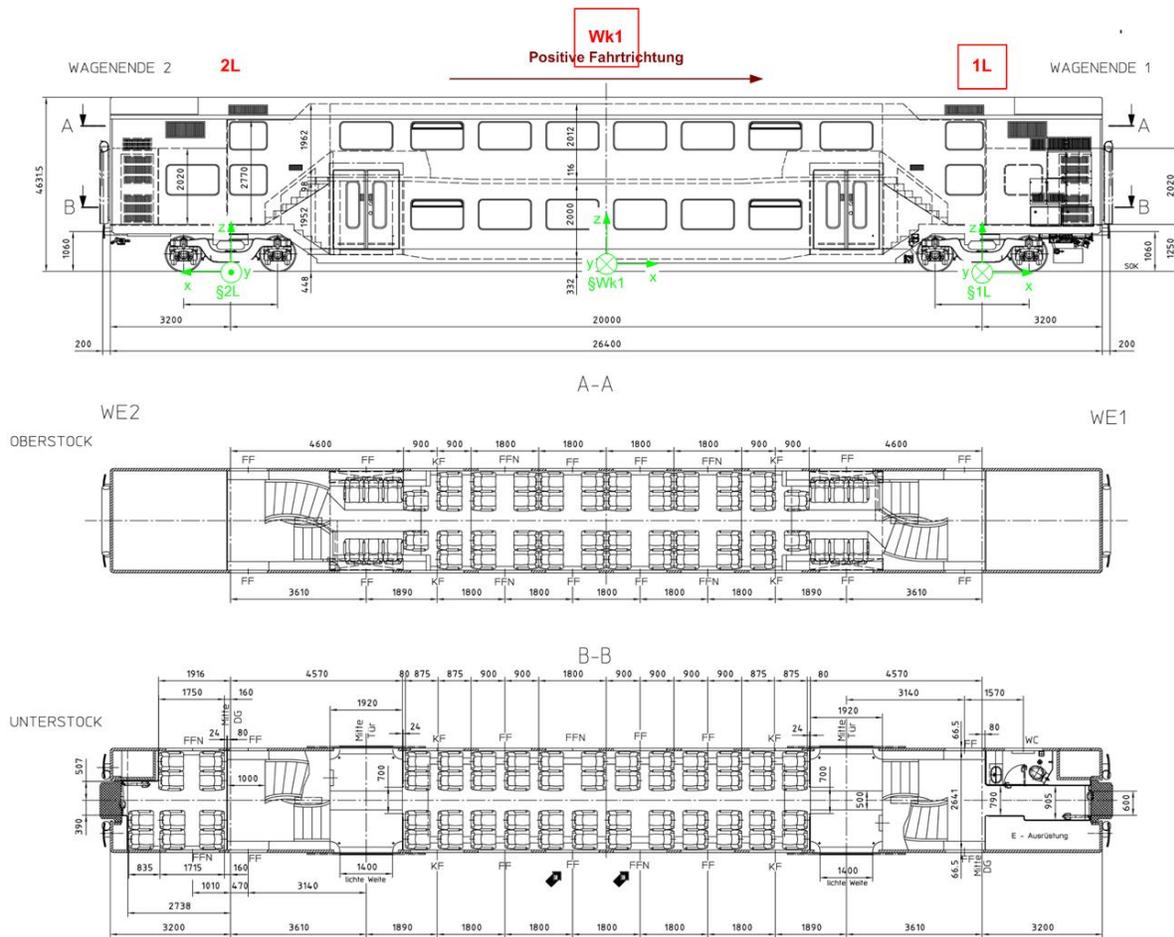


Abbildung 16.3 Fahrzeugkonfiguration SF100L, [25]

### 16.7.4 Verwiegeprotokoll

Fahrzeug unbeladen				Fahrzeug beladen				Differenz (Zuladung)			
Wagen	Wk1	unbeladen	Summe	Wagen	Wk1	beladen	Summe	Wagen	Wk1	Zuladung	Summe
	links	rechts				links		rechts		links	
Achse 1	59,44	67,86	127,30	Achse 1	77,02	82,98	160,00	Achse 1	17,58	15,12	32,70
Achse 2	60,12	66,98	127,10	Achse 2	77,06	82,80	159,86	Achse 2	16,94	15,82	32,76
Summe	119,56	134,84	254,40	Summe	154,08	165,78	319,86	Summe	34,52	30,94	65,46
Fahrwerksmasse [kg]			6095	Sekundärfederlast			260,07				
Sekundärfederlast			194,61								

Abbildung 16.4 Auszug aus dem Verwiegeprotokoll des SF100L für Wagenkasten 1, [25]

### 16.7.5 Auswertung des Streckenversuches an den Abbindern

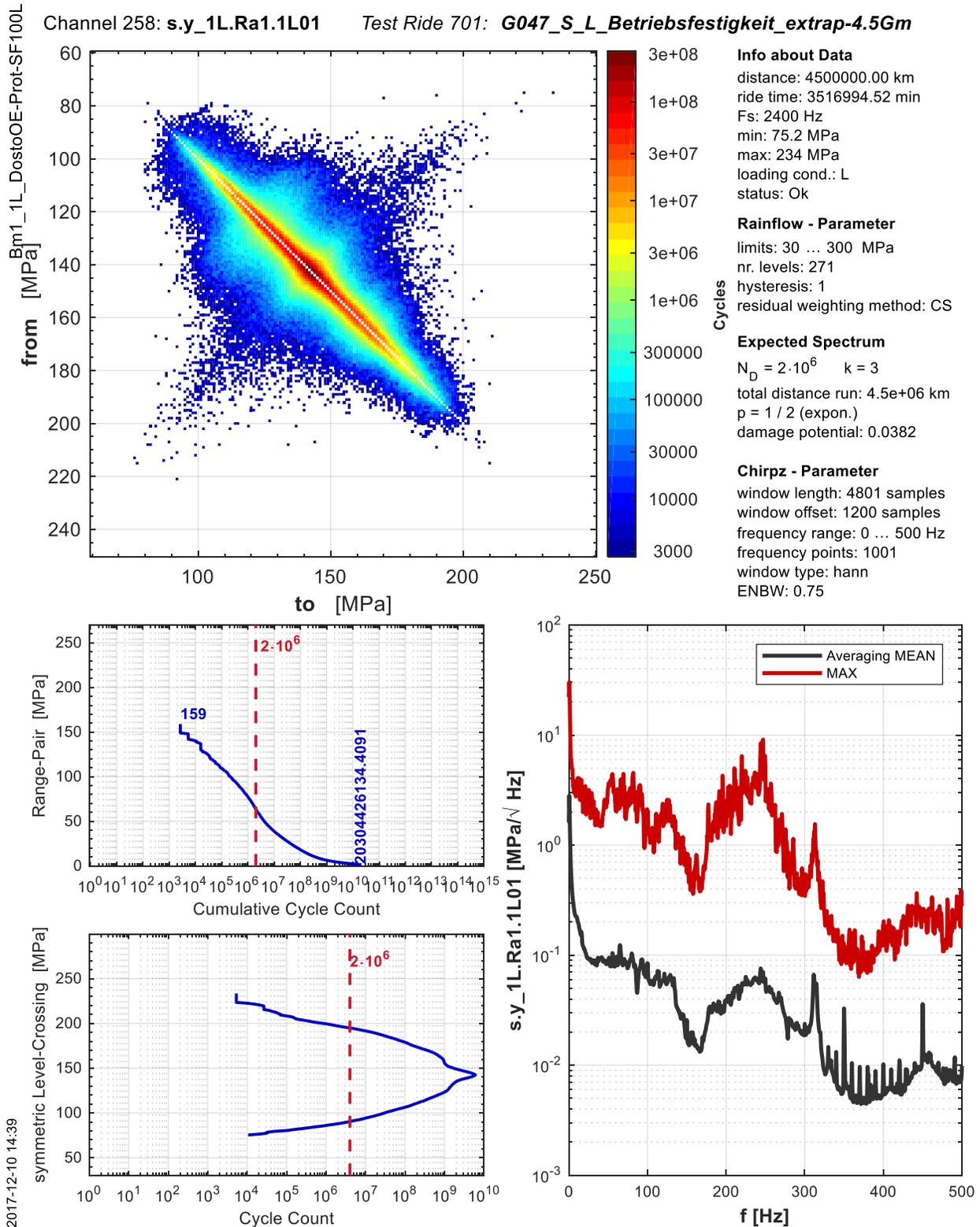
Project ID		Number of evaluation				
Vehicle Configuration		1	2	3	4	5
Payload		Lauffahrwerk 1	Lauffahrwerk 1	Lauffahrwerk 1	Lauffahrwerk 1	Lauffahrwerk 1
Total distance run [km]		Component				
Number of Test		Rahmen				
Name of Test		Position number				
		1	1	1	1	1
		Description				
		Beanspruchung Rahmen				
		Direction				
		-	-	-	-	-
		Quadrant				
		+X+Y	-X-Y	+X-Y	+X+Y	+X-Y
		Number of channel				
		258	259	260	298	299
		Name of channel				
		s.y_1L.Ra1.1 L01	s.y_1L.Ra1.3 L01	s.y_1L.Ra1.4 L01	s.y_1L.Ra1.1 L40	s.y_1L.Ra1.4 L40
		Unit				
		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
		SN-curve Id-name				
		Wn-Hai	Wn-Hai	Wn-Hai	Wn-Hai	Wn-Hai
		Miner Method				
		Haibach	Haibach	Haibach	Haibach	Haibach
		k				
		3	3	3	3	3
		N <sub>D</sub>				
		5.00E+06	5.00E+06	5.00E+06	5.00E+06	5.00E+06
		k <sub>D</sub>				
		5	5	5	5	5
		N <sub>D,II</sub>				
		1.00E+09	1.00E+09	1.00E+09	1.00E+09	1.00E+09
		k <sub>D,II</sub>				
		∞	∞	∞	∞	∞
		Deff-Method				
		DeffFKM6	DeffFKM6	DeffFKM6	DeffFKM6	DeffFKM6
		D <sub>m,min</sub>				
		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
		rel Cut off [%]				
		10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%
		Type of overloading				
		none	none	none	none	none
		sensitivity M				
		0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
		Scale factor				
		1	1	1	1	1
		Offset				
		0	0	0	0	0
		j <sub>s</sub>				
		1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
Bm1_1L_DostoOE-Prot-SF100L		Measured distance [km]				
S		1811.59	1811.59	1811.59	1811.59	1811.59
B		Min [Unit]				
4,500,000		104.67	109.92	70.55	73.50	126.39
700		Max [Unit]				
G046_S_B_Betriebsfestigkeit_extrap-ALC-ss		291.63	270.24	221.58	241.67	290.68
		Range [Unit]				
		186.96	160.32	151.03	168.18	164.29
		CLC [Unit]				
		190.50	174.50	138.50	145.00	193.00
		N <sub>ges</sub>				
		5.754E+08	8.549E+08	6.569E+08	8.212E+08	8.006E+08
		A				
		2.10E+03	3.02E+03	2.52E+03	4.55E+03	3.33E+03
		D <sub>m</sub>				
		0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
		A <sub>max</sub> [Unit]				
		93.50	80.00	75.50	84.00	82.00
		A <sub>eq</sub> (N <sub>D</sub> ) [Unit]				
		44.71	38.69	35.55	34.98	37.51

Bm1_1L_DostoOE-Prot-SF100L						$A_{eq}(N_{D,jS})$ [Unit]	46.95	40.63	37.33	36.73	39.39
S						Measured distance [km]	1702.93	1702.93	1702.93	1702.93	1702.93
L						Min [Unit]	75.15	65.13	37.26	44.06	78.66
						Max [Unit]	234.39	214.95	180.59	198.26	225.95
						Range [Unit]	159.24	149.82	143.32	154.20	147.29
						CLC [Unit]	142.50	130.50	103.50	107.00	145.00
						$N_{ges}$	4.662E+08	6.734E+08	6.986E+08	6.374E+08	6.041E+08
						A	1.30E+03	2.21E+03	2.46E+03	2.94E+03	2.28E+03
						$D_m$	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
						$A_{max}$ [Unit]	79.50	75.00	72.00	77.00	74.00
						$A_{eq}(N_D)$ [Unit]	41.59	37.20	34.89	34.09	35.00
						$A_{eq}(N_{D,jS})$ [Unit]	43.67	39.06	36.63	35.79	36.75

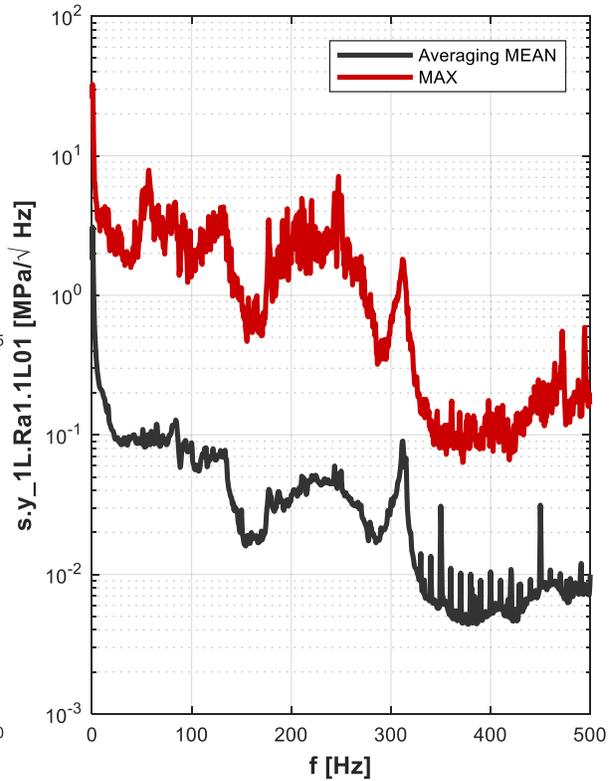
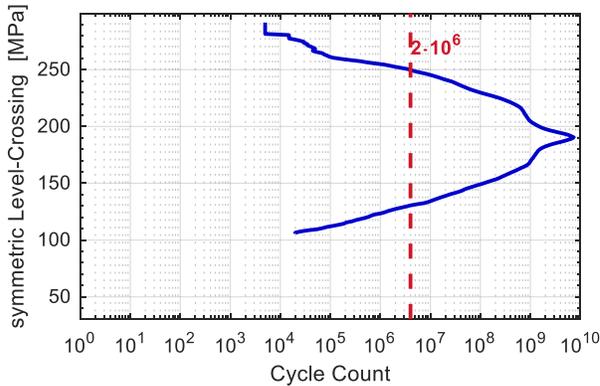
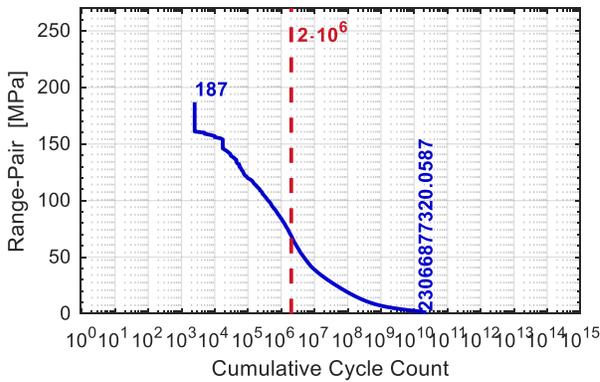
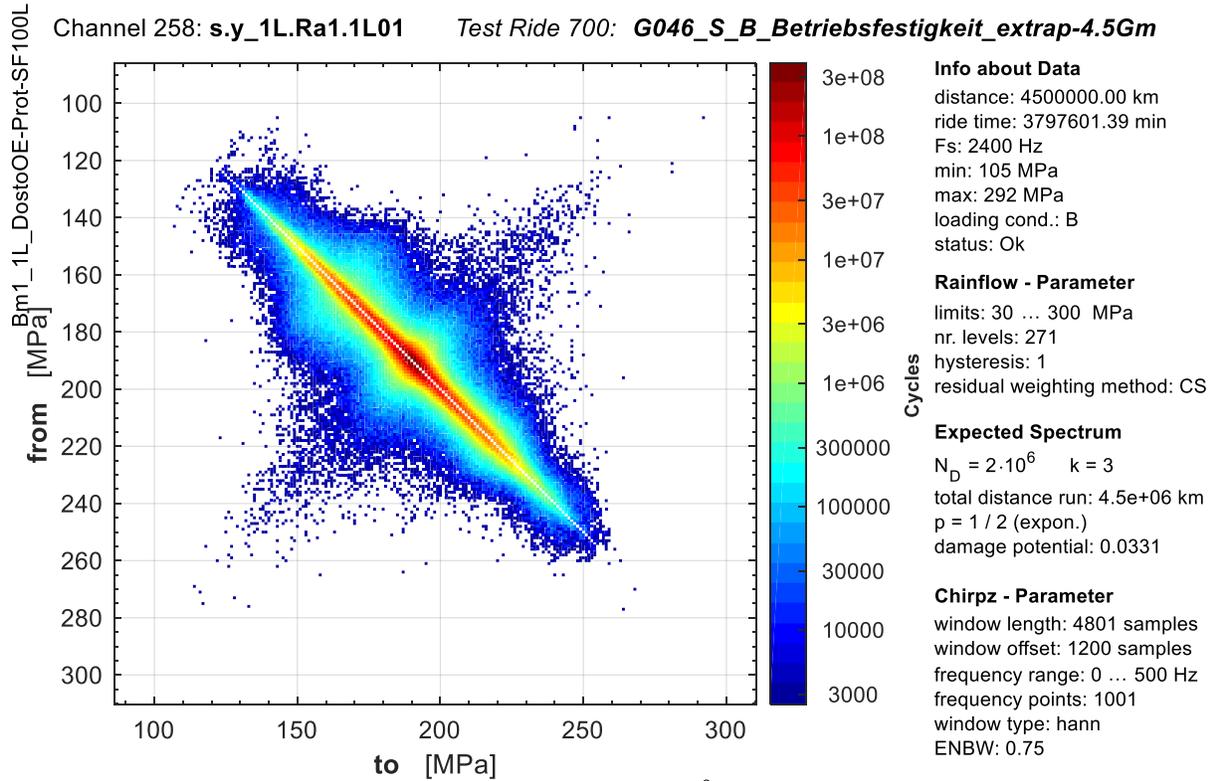
Tabelle 16.2 Auswertung des Streckenversuches an den Abbindern, SF100L, gewählt 1L01 (gelb markiert), [25]

## 16.7.6 Rainflow-Kollektive und Frequenzbereich

Streckenversuch, Beladezustand: Leer



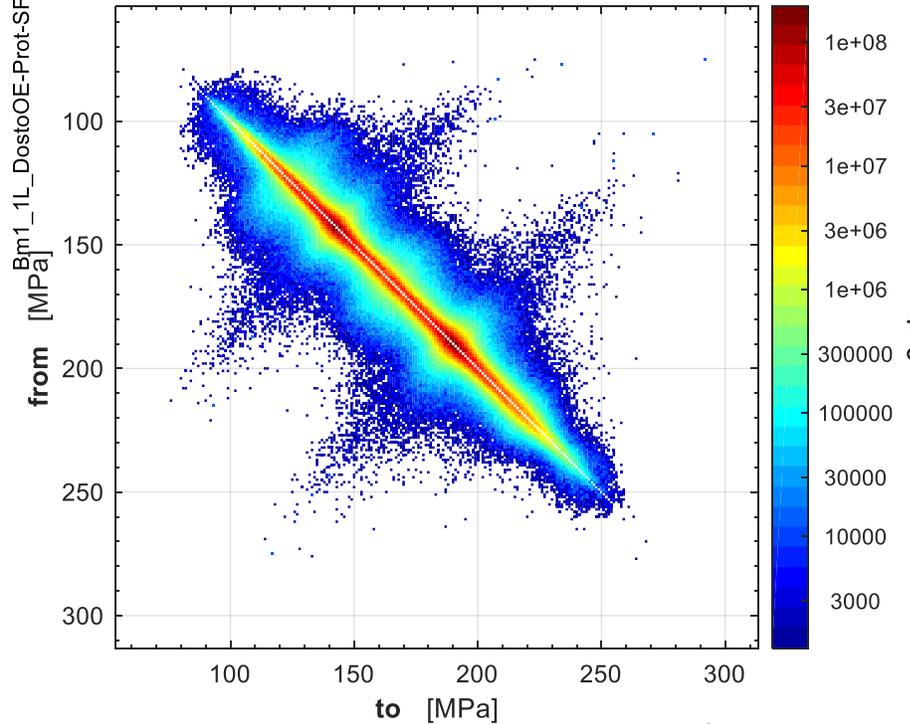
# Streckenversuch, Beladezustand: Beladen



2017-12-10 14:39

# Streckenversuch, Beladezustand: mit 15000 Beladewechseln

Channel 258: s.y\_1L.Ra1.1L01 Test Ride 708: G054\_S\_B-L\_Betriebsfestigkeit\_Einsatz\_extrap-4.5Gm

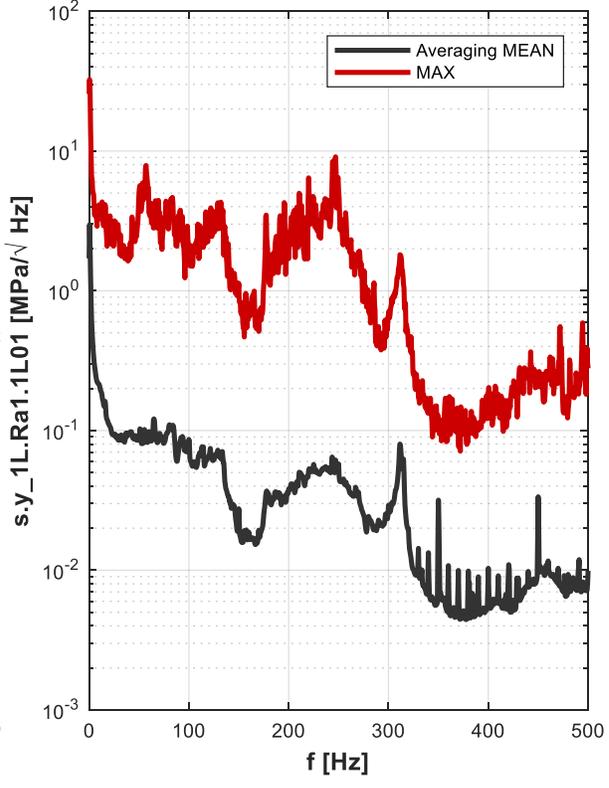
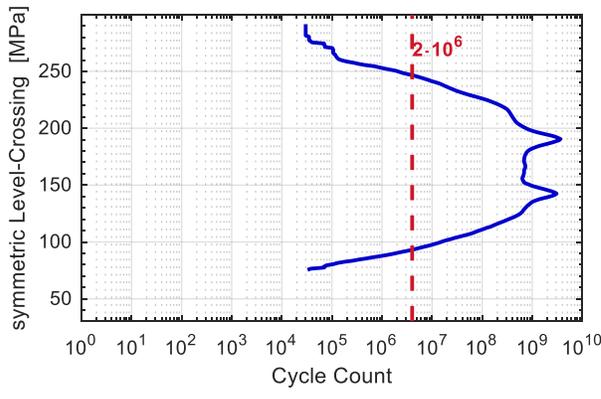
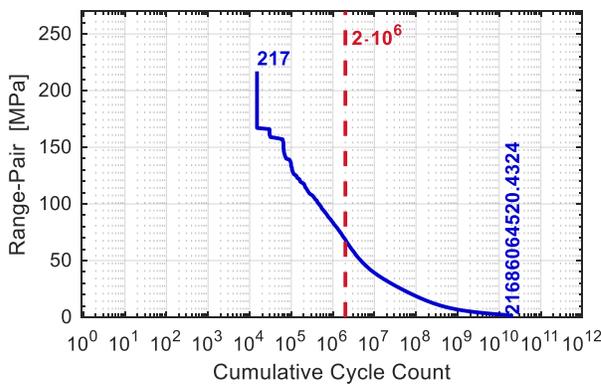


**Info about Data**  
 distance: 4500000.00 km  
 ride time: 3657297.96 min  
 Fs: 2400 Hz  
 min: 75.2 MPa  
 max: 292 MPa  
 loading cond.: V  
 status: Ok

**Rainflow - Parameter**  
 limits: 30 ... 300 MPa  
 nr. levels: 271  
 hysteresis: 1  
 residual weighting method: CS

**Expected Spectrum**  
 $N_D = 2 \cdot 10^6$   $k = 3$   
 total distance run: 4.5e+06 km  
 $p = 1/3$  (expon.)  
 damage potential: 0.0292

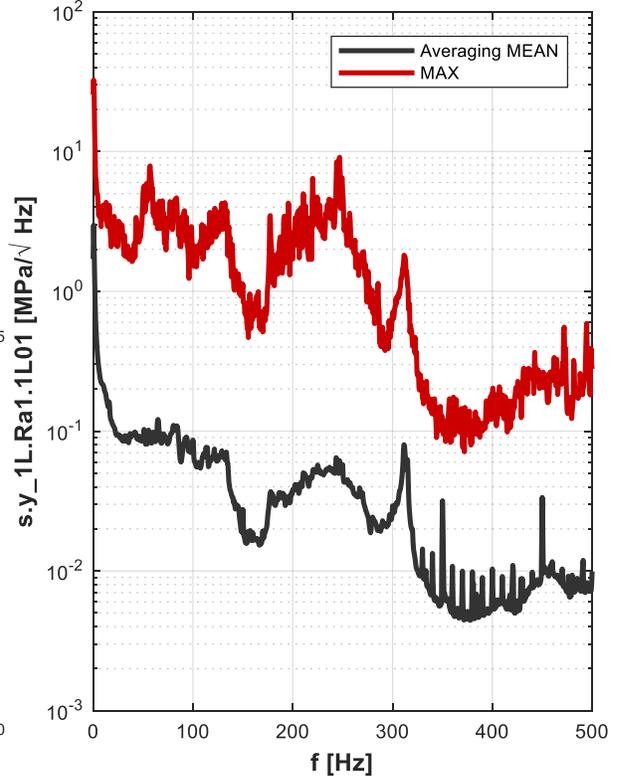
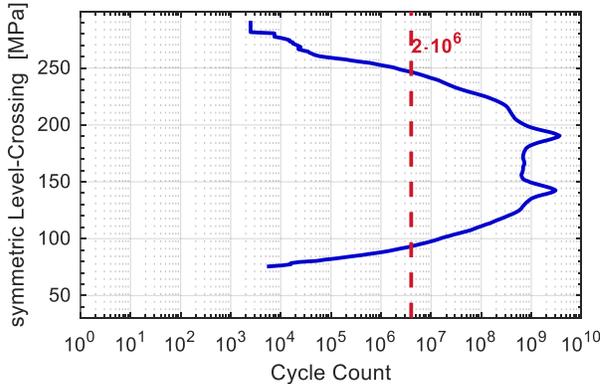
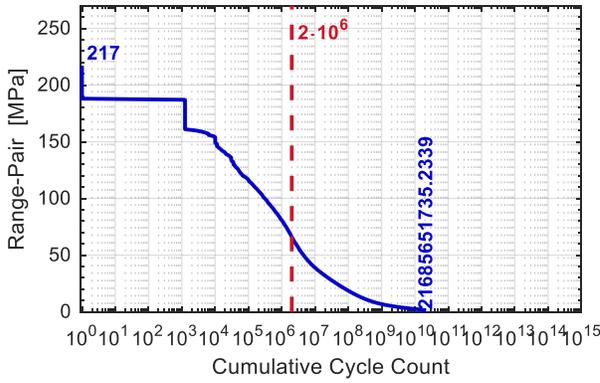
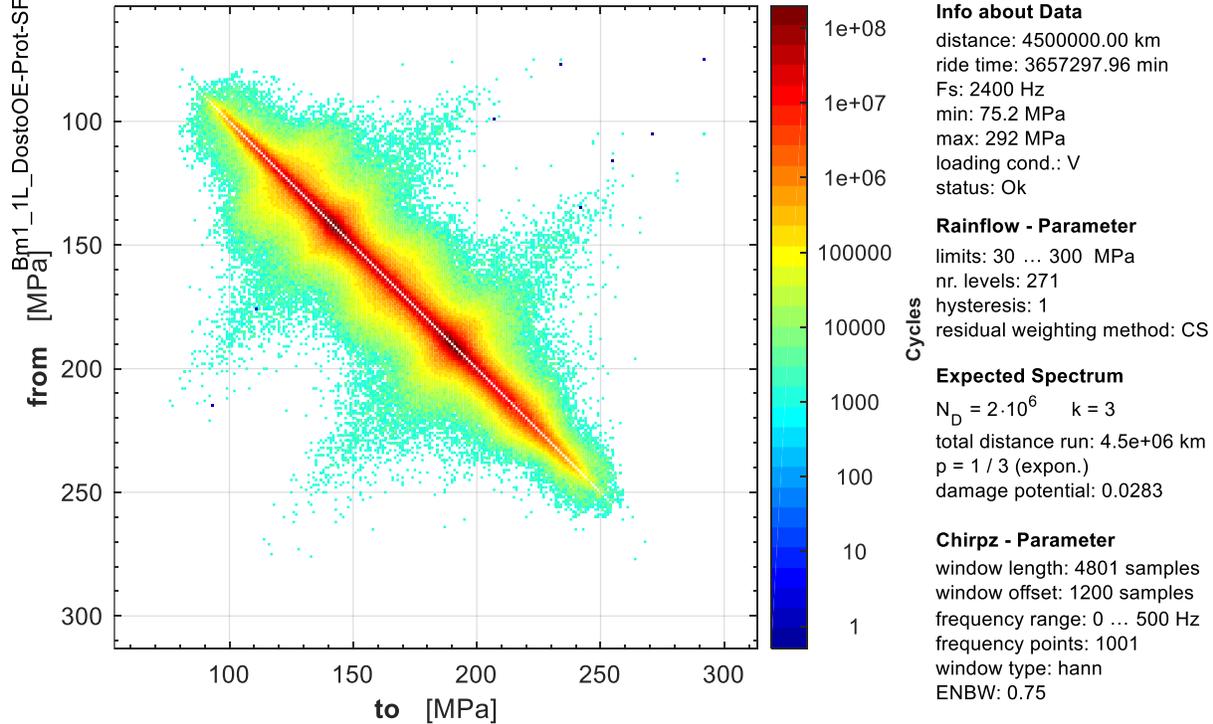
**Chirpz - Parameter**  
 window length: 4801 samples  
 window offset: 1200 samples  
 frequency range: 0 ... 500 Hz  
 frequency points: 1001  
 window type: hann  
 ENBW: 0.75



2017-12-10 14:39

# Streckenversuch, Beladezustand: mit 1 Beladewechsel

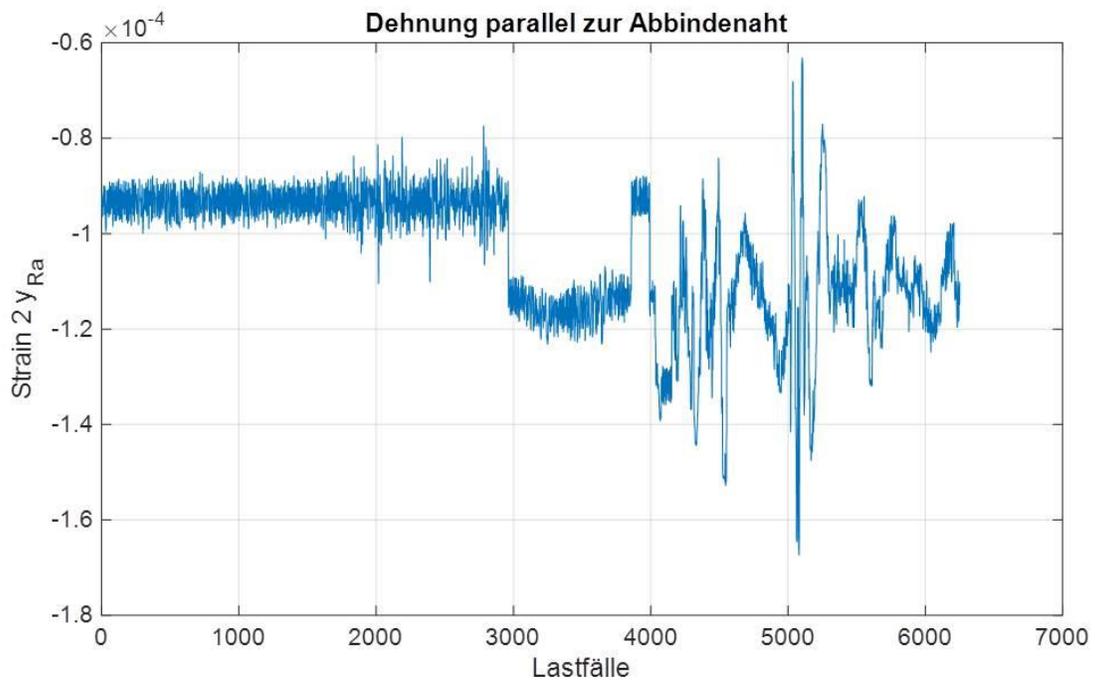
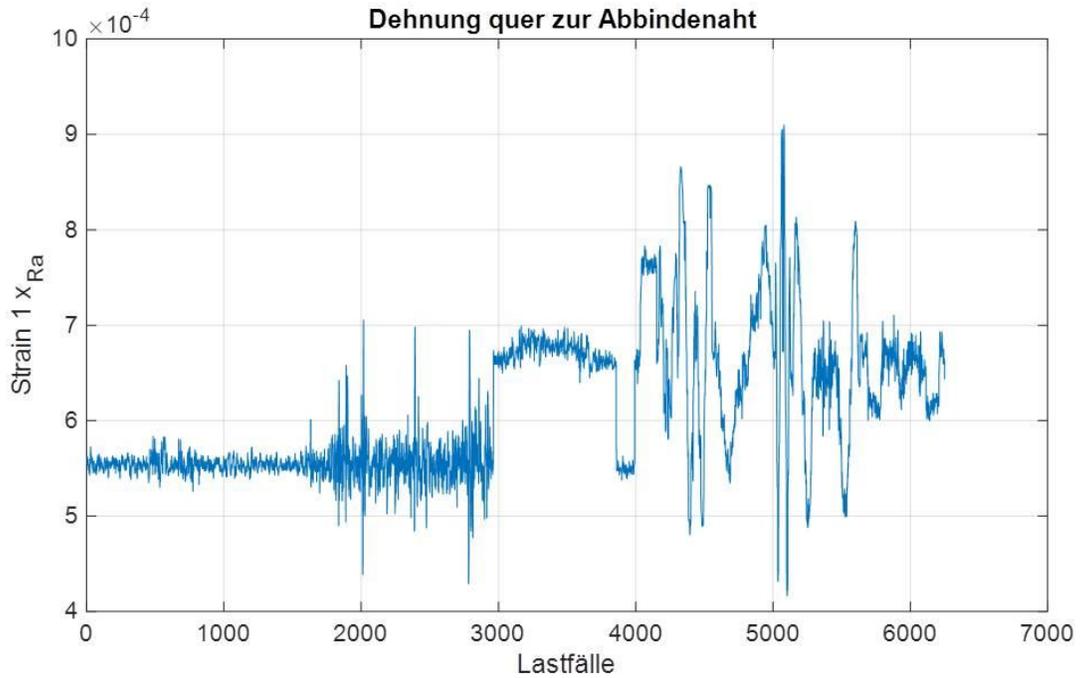
Channel 258: s.y\_1L.Ra1.1L01 Test Ride 702: G048\_S\_B-L\_Betriebsfestigkeit\_extrap-4.5Gm



2017-12-15 15:19

## 16.8 Dehnungen aus der FE-Rahmenrechnung des SF100L

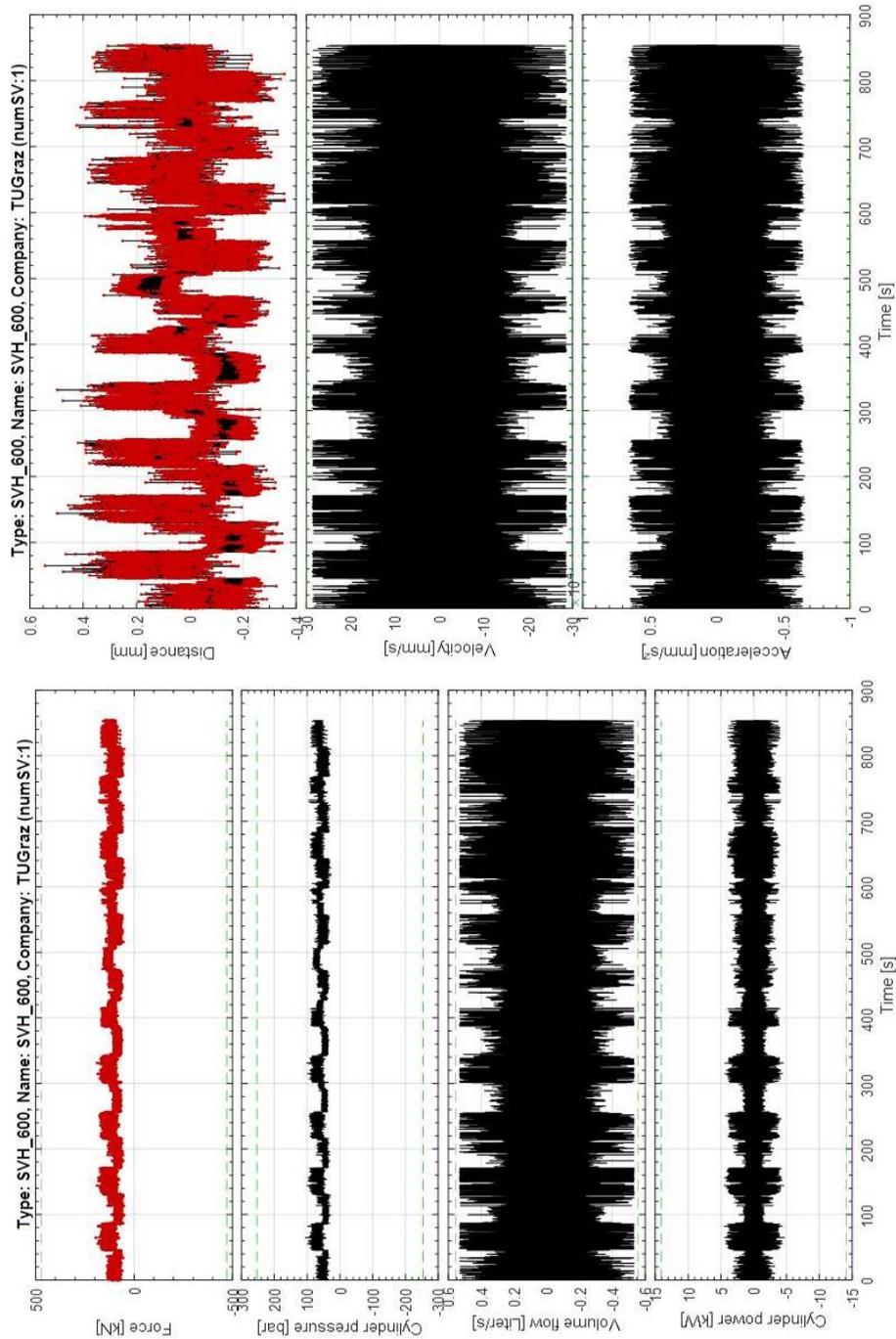
Hier sind die Dehnungen der FE-Rahmenrechnung von Strain 1  $x_{Ra}$  und Strain 2  $y_{Ra}$ , laut Abschnitt 9.4.1, über die Lastfälle angeführt. [2]

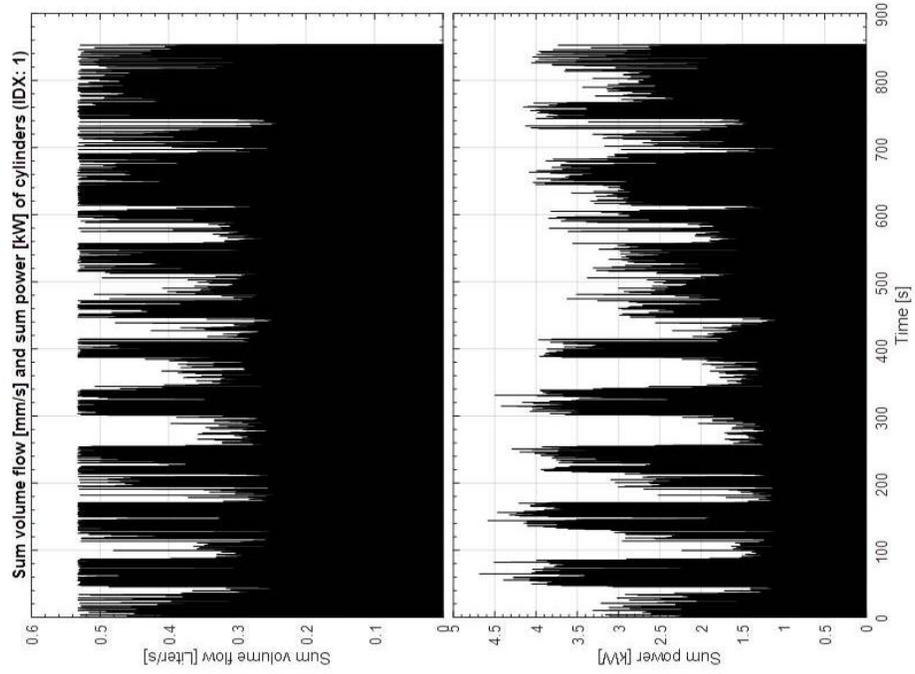


## 16.9 Prüfzylindereinstellungen

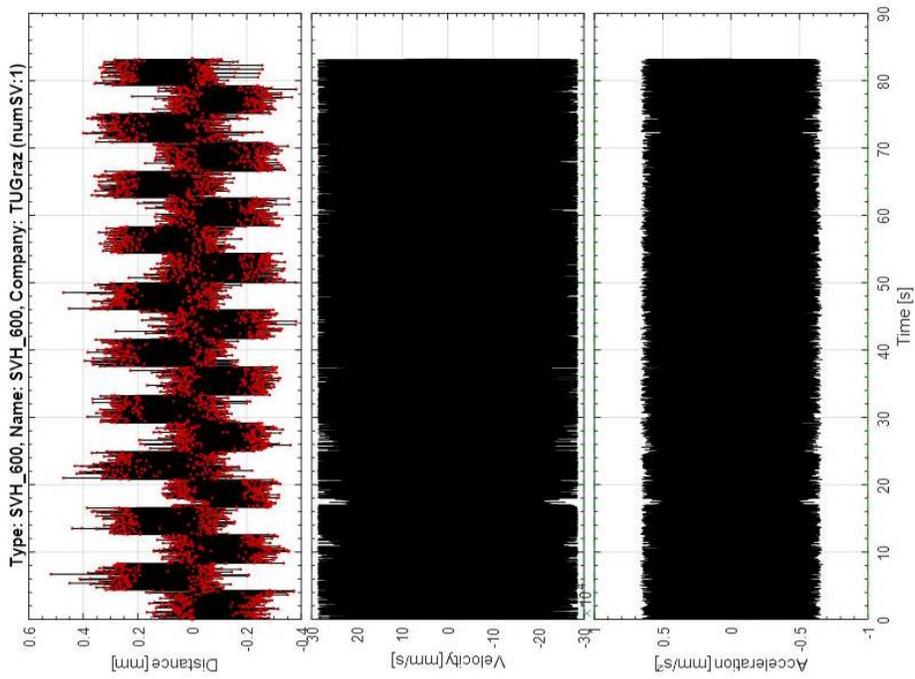
In den folgenden Diagrammen sind die Prüfzylindereinstellungen, die in Tabelle 7.2 festgelegt sind, für die Signale Loop 1 mit Beladewechsel und Loop 2 mit Beladewechsel dargestellt.

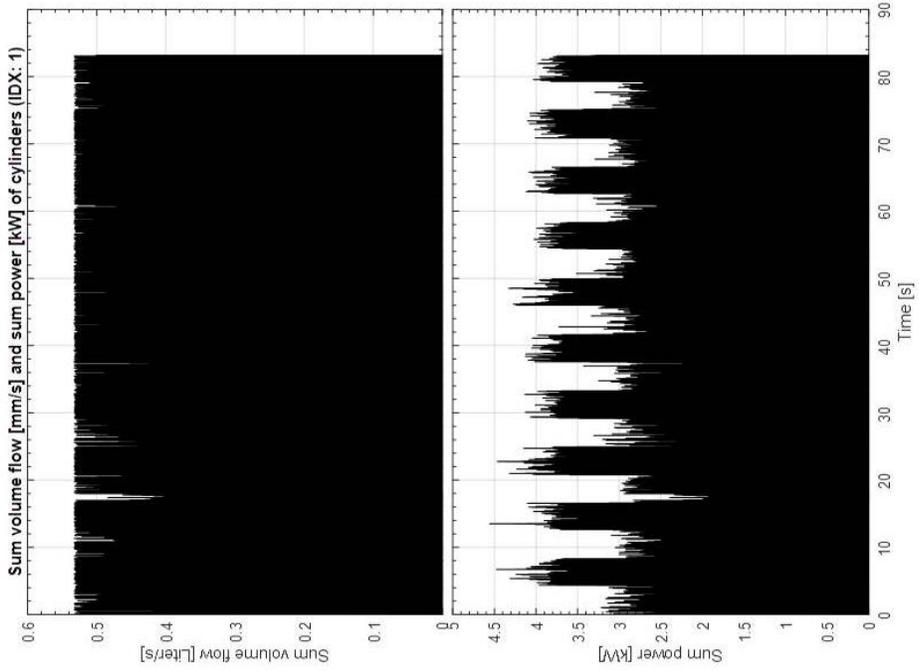
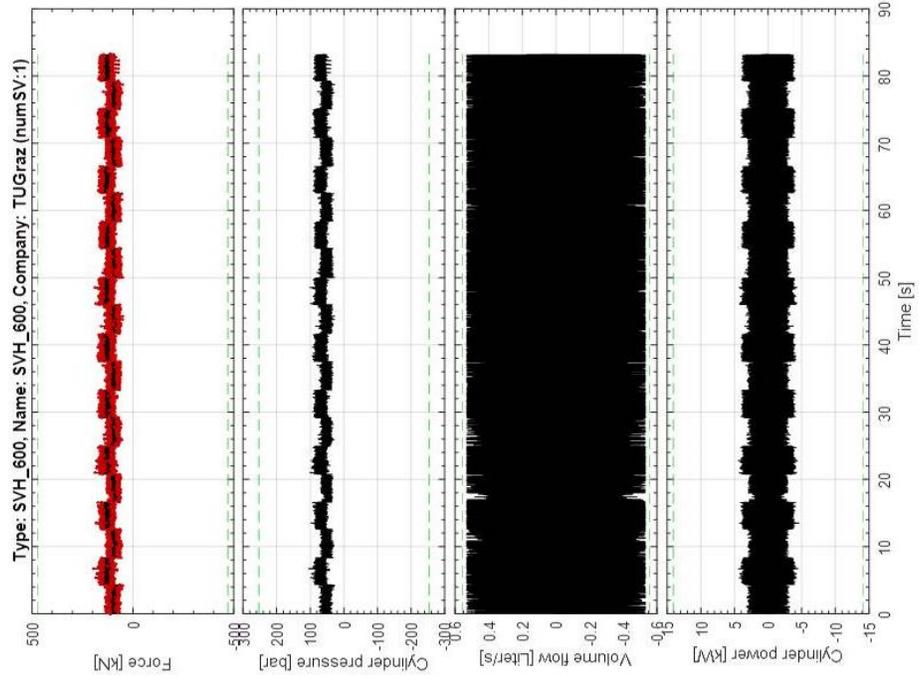
### 16.9.1 Loop 1 mit Beladewechsel





### 16.9.2 Loop 2 mit Beladewechsel





## 16.10 Darstellung der Mischung der Sequenzen von Loop 1

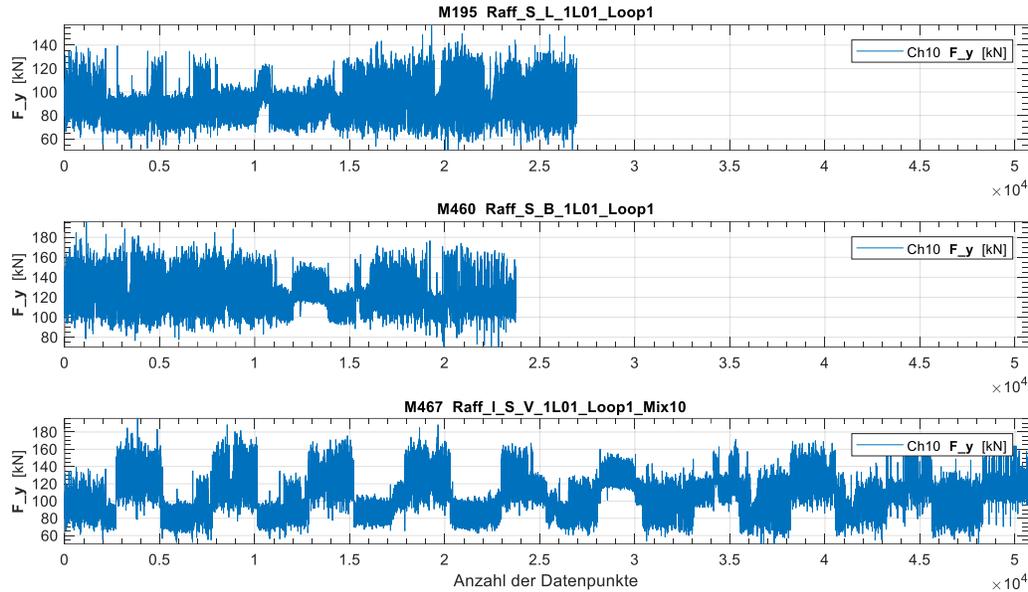


Abbildung 16.5 Loop 1, Sequenz: Leer, Beladen und mit Beladewechsel, Prüfkraft in kN

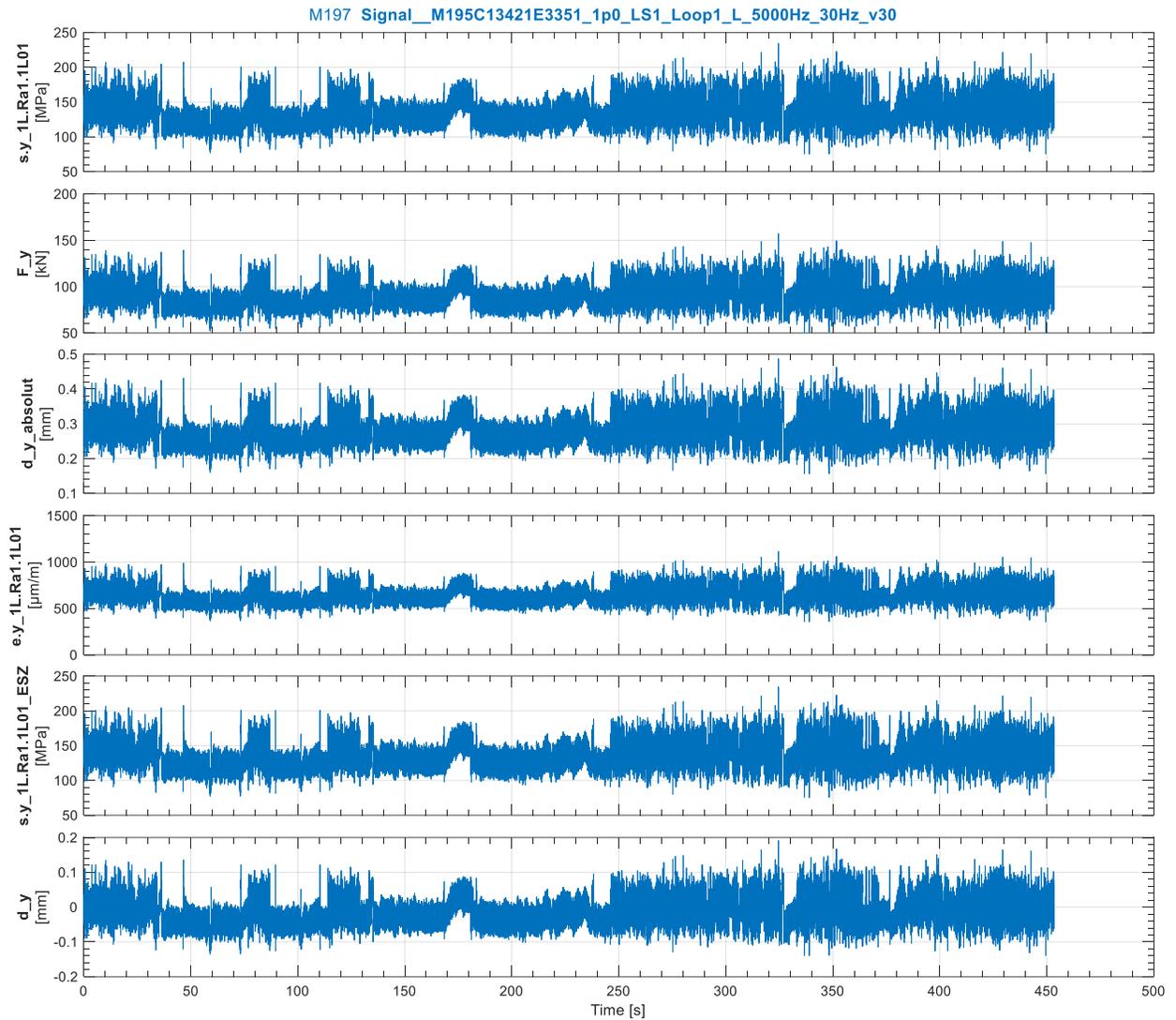
## 16.11 Abbildung der Prüfsignale

### 16.11.1 Loop 1

In den folgenden Diagrammen über die Zeitdauer eines Signals sind dargestellt:

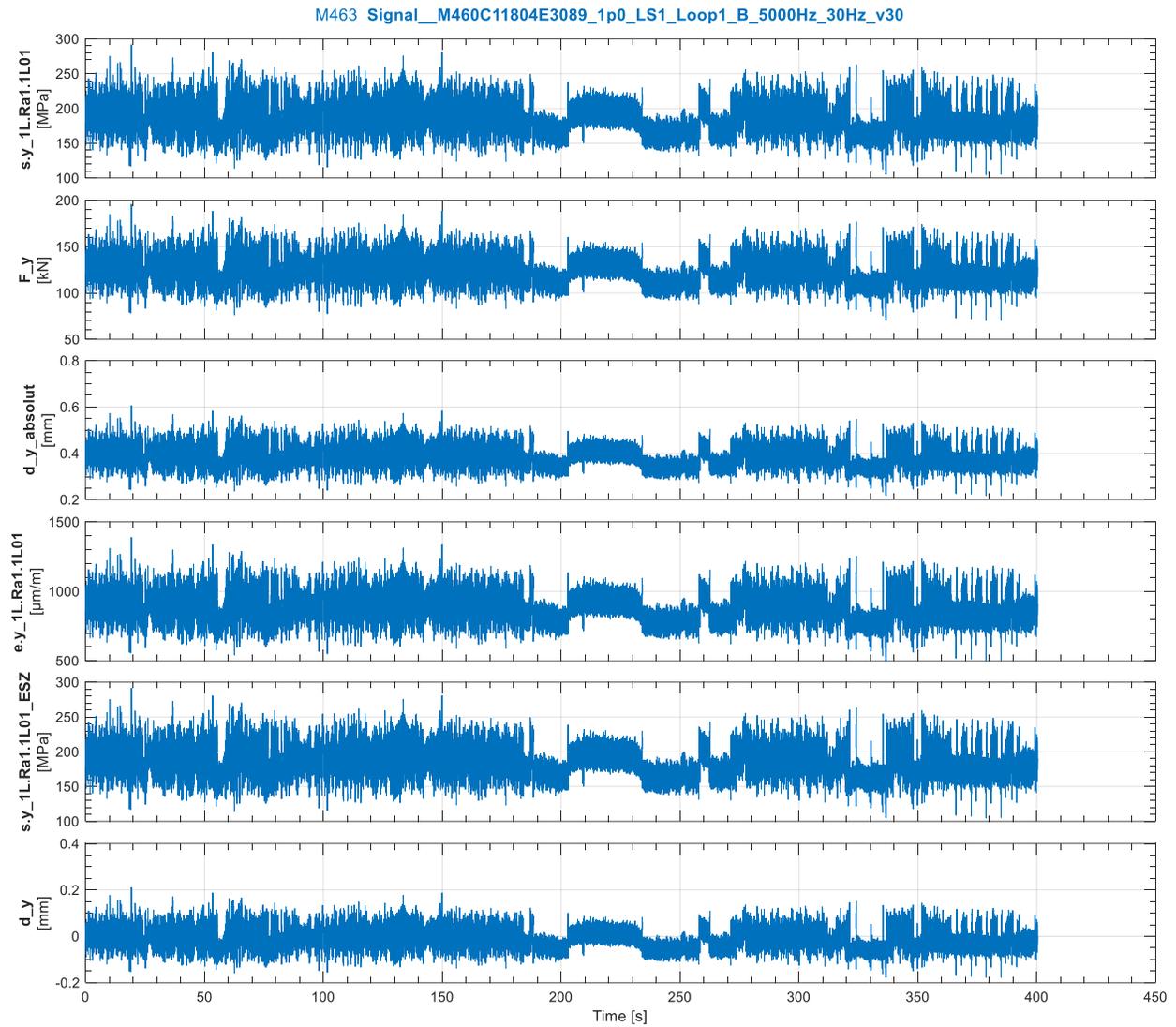
- Spannung nach dem Hook'schen Gesetz (ohne Querdehnungsfaktor)
- Prüfkraft des Zylinders
- absoluter Weg des Zylinders
- Dehnung
- Spannung im ebenen Spannungszustand (mit Querdehnungsfaktor)
- relativer Weg des Zylinders

**Loop 1 Leer:**



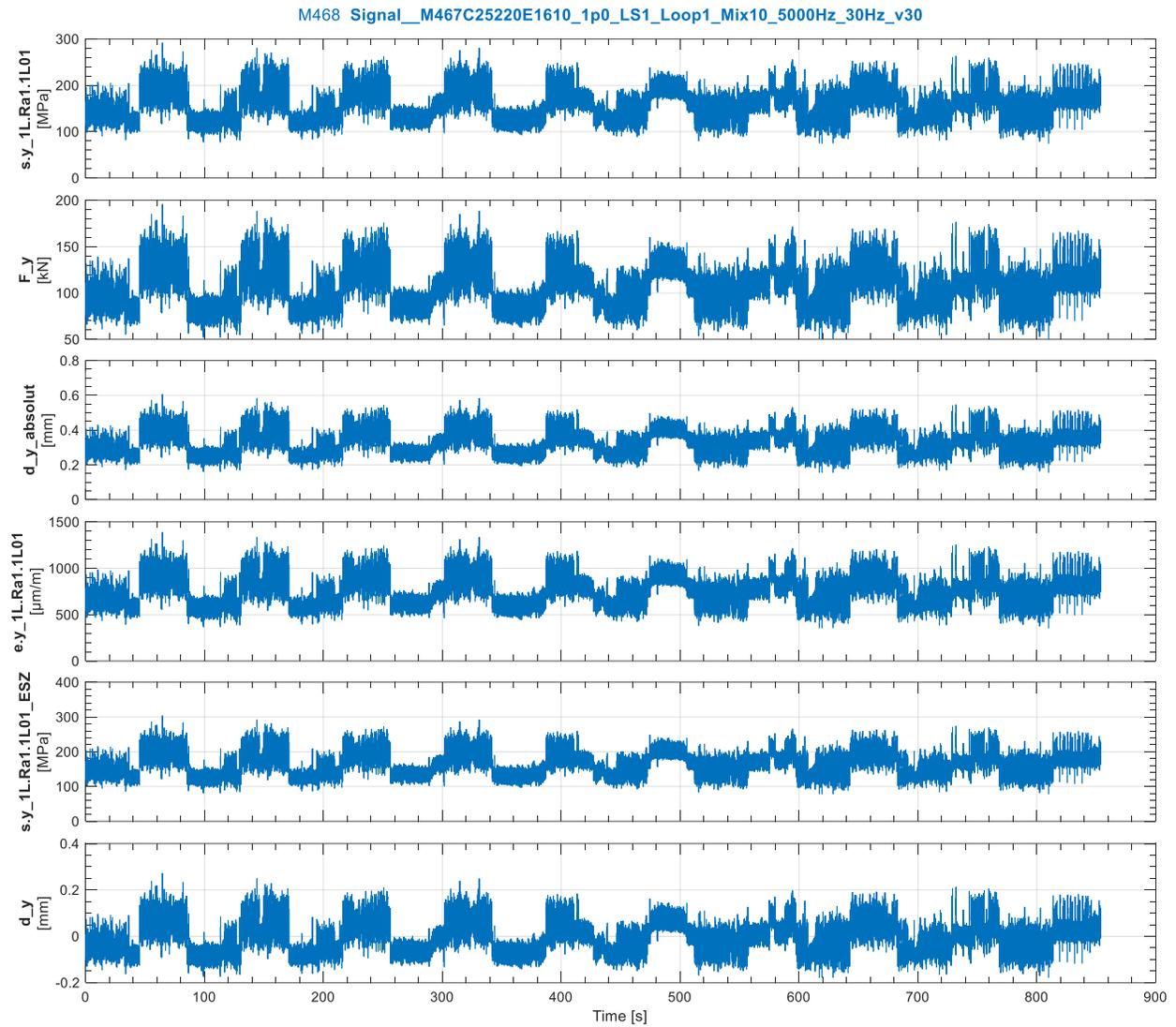
SP\_Test\_Raffung\_SF100L

### Loop 1 Beladen:



SP\_Test\_Raffung\_SF100L

**Loop 1 mit Beladewechsel:**

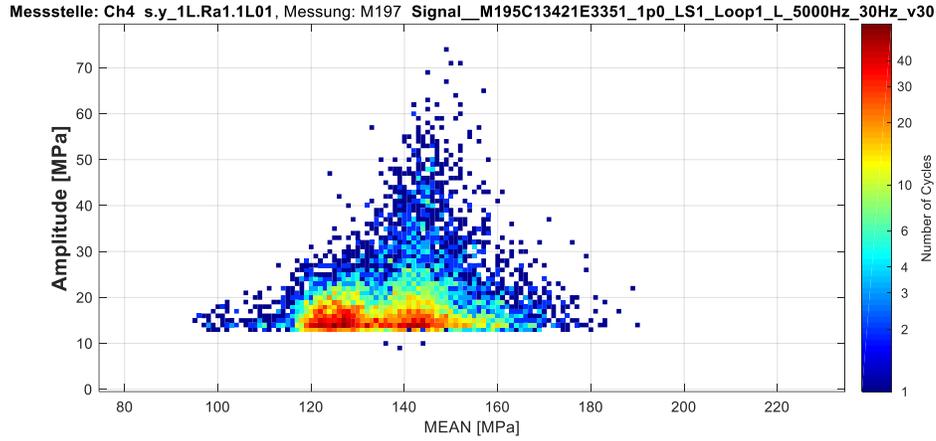


SP\_Test\_Raffung\_SF100L

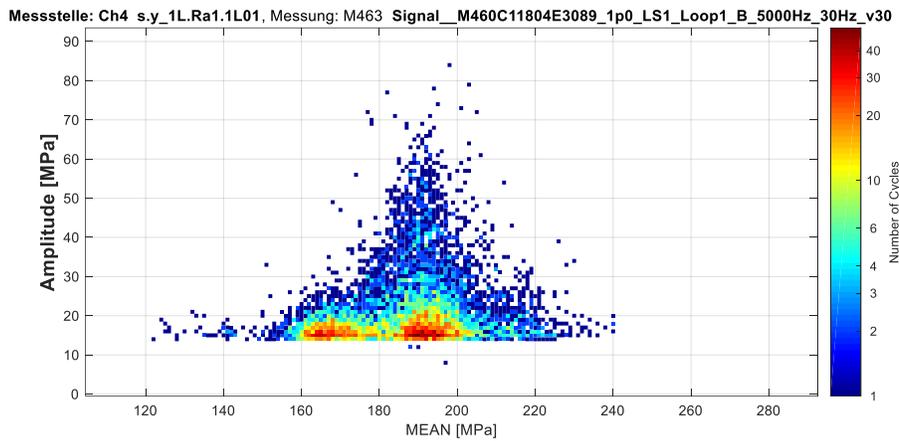
## 16.11.2 Rainflow-Kollektive der Prüfsignale aus Loop 1

Es folgen die Spannungskollektive ohne Querdehnungsfaktor.

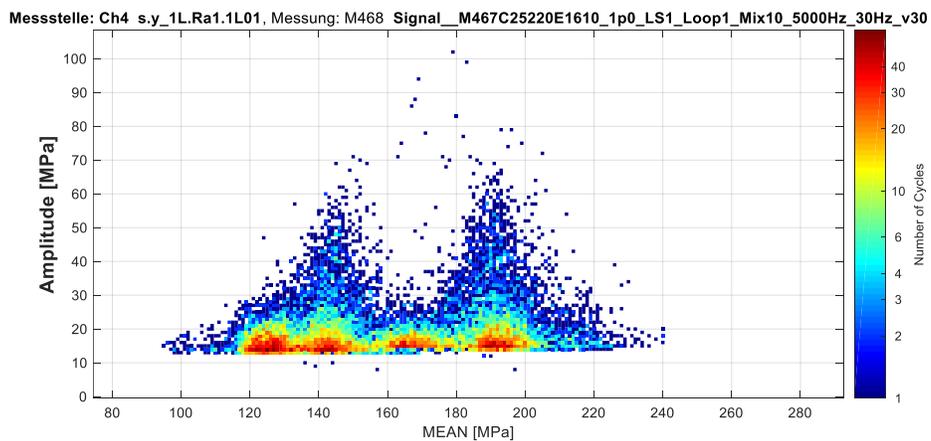
**Leer:**



**Beladen:**



**mit Beladewechsel:**

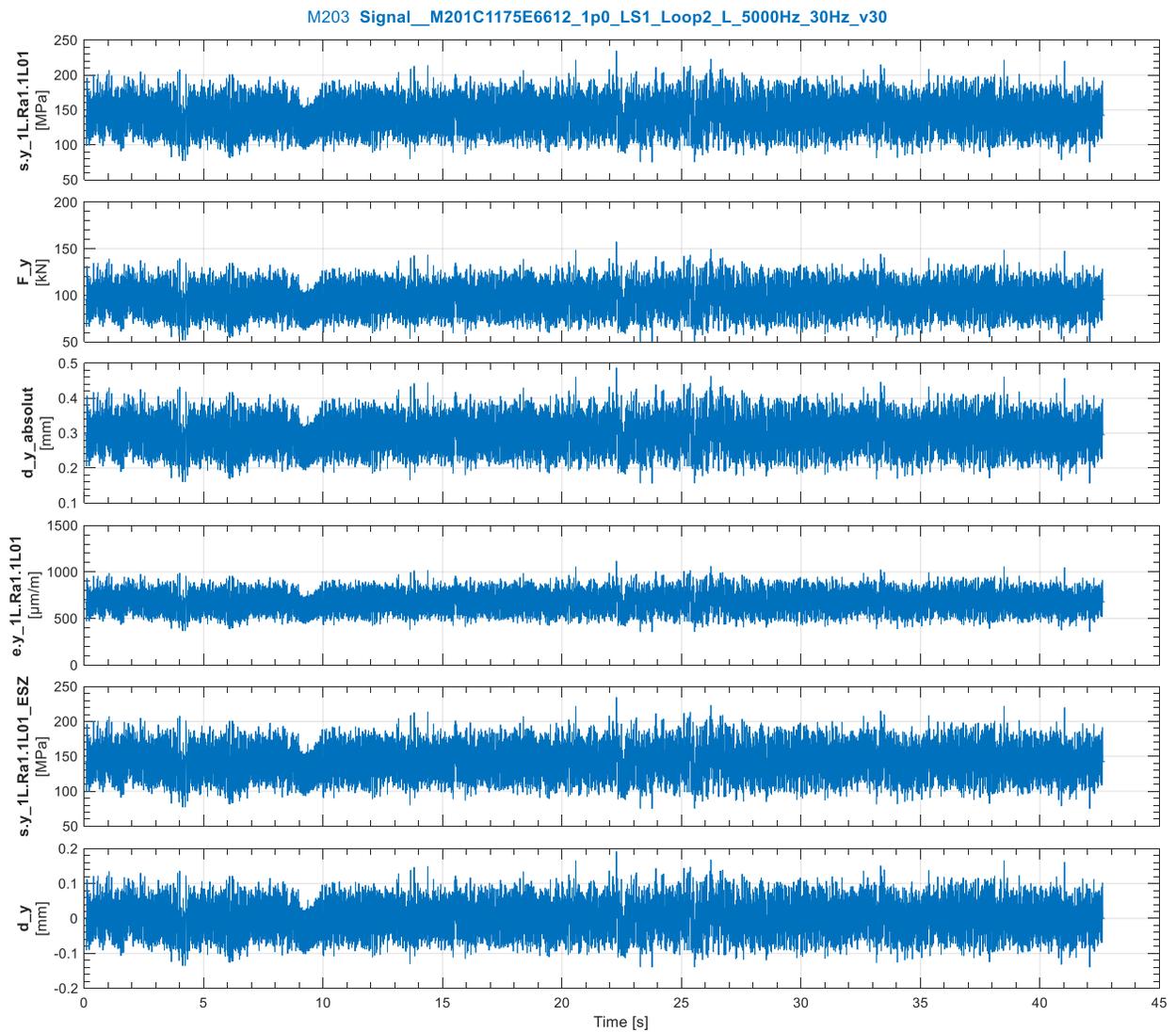


### 16.11.3 Loop 2

In den folgenden Diagrammen über die Zeitdauer eines Signals sind dargestellt:

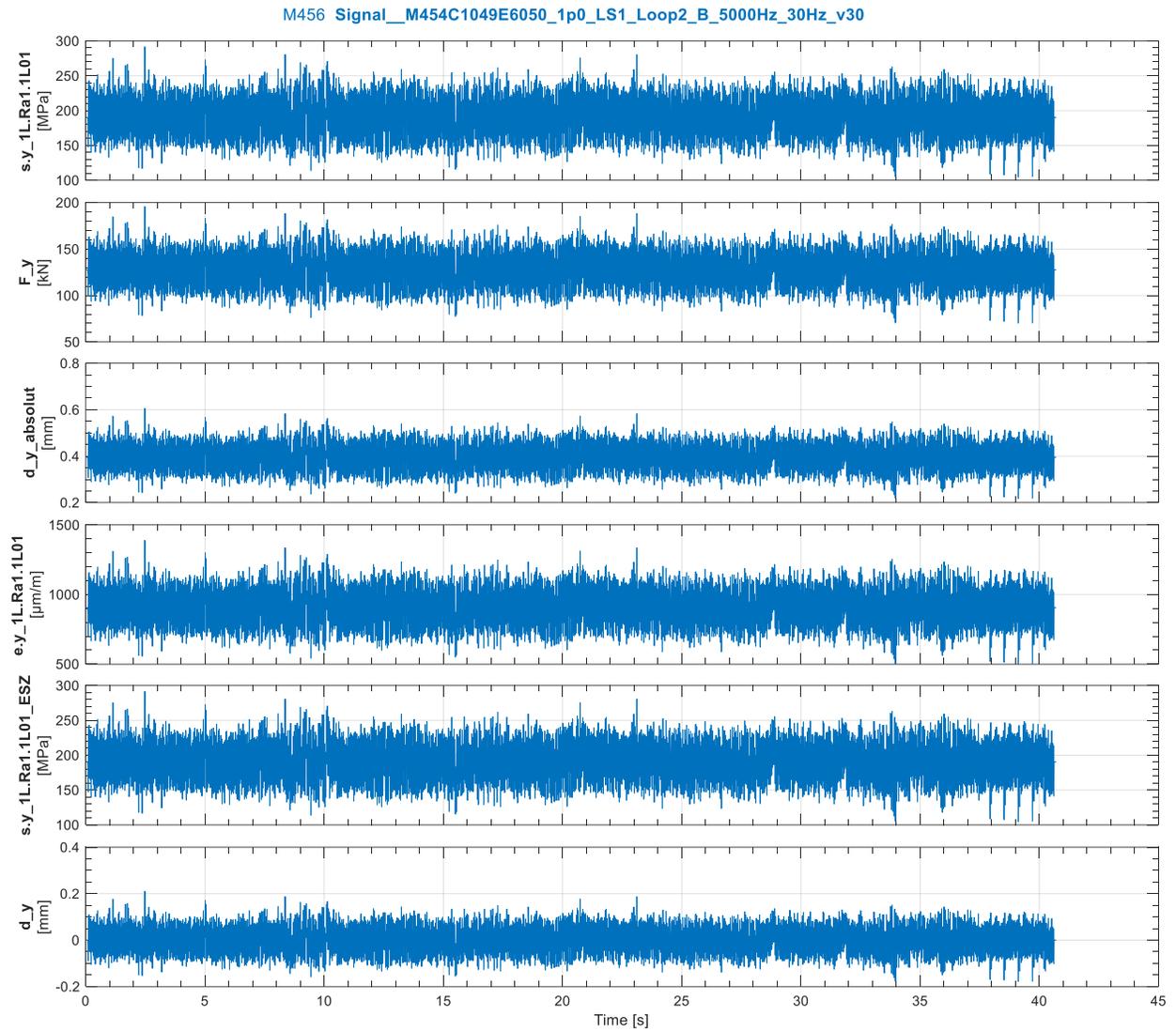
- Spannung nach dem Hook'schen Gesetz (ohne Querdehnungsfaktor)
- Prüfkraft des Zylinders
- absoluter Weg des Zylinders
- Dehnung
- Spannung im ebenen Spannungszustand (mit Querdehnungsfaktor)
- relativer Weg des Zylinders

**Loop 2 Leer:**



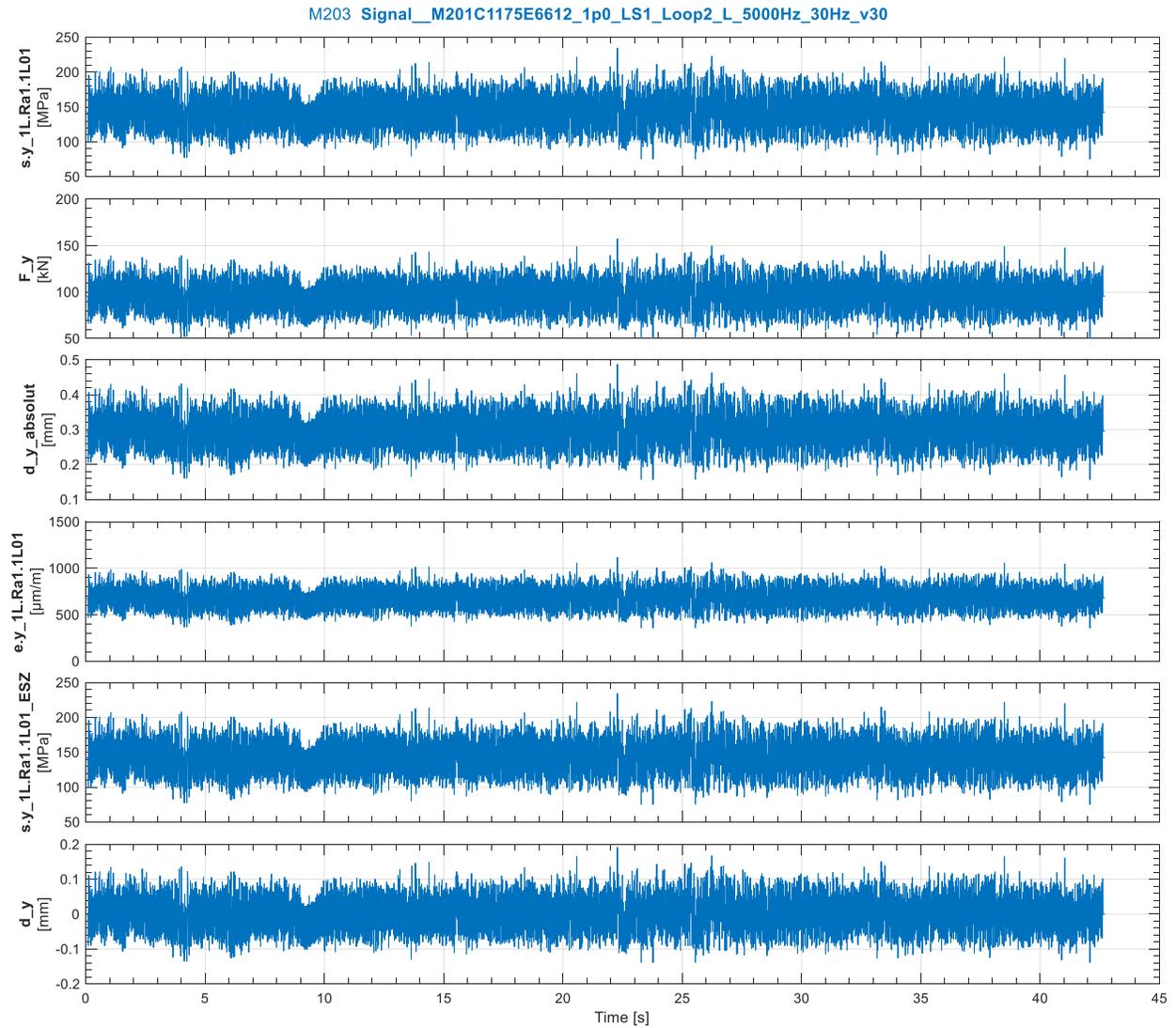
SP\_Test\_Raffung\_SF100L

## Loop 2 Beladen:



SP\_Test\_Raffung\_SF100L

## Loop 2 mit Beladewechseln:

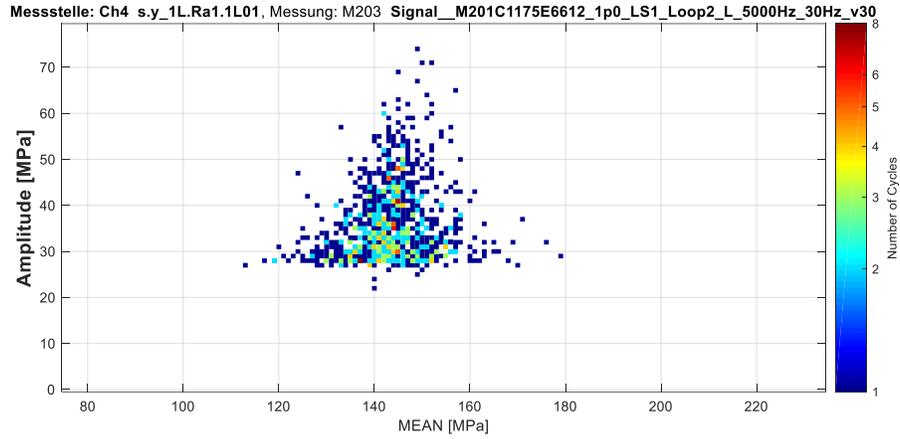


SP\_Test\_Raffung\_SF100L

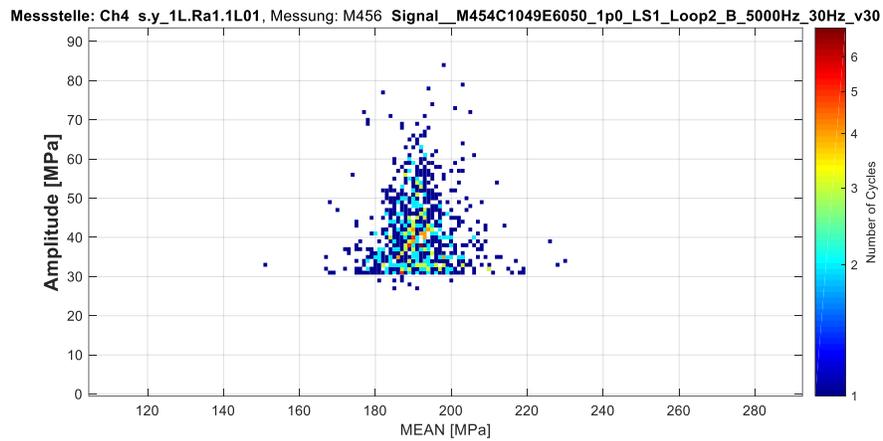
### 16.11.4 Rainflow-Kollektive der Prüfsignale aus Loop 2

Es folgen die Spannungskollektive ohne Querdehnungsfaktor.

**Leer:**



**Beladen:**



**mit Beladewechsel:**

