



Valiollah Pashangpour

November 2020

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meines Masterstudiums Montanmaschinenbau am Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau an der Montanuniversität Leoben, in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Fiedler GmbH.

Dem Leiter des Lehrstuhls, Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Florian Grün danke ich für die Schaffung der Voraussetzungen zur Durchführung dieser Arbeit und für seine Unterstützung.

Mein besonderer Dank gilt Herrn assoz. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. MBA Martin Leitner, Herrn Dipl.-Ing. Georg Fiedler und Herrn Dipl.-HTL-Ing. Peter Siebenbäck für die Betreuung und Bemühungen, die mir im Laufe der Arbeit entgegengebracht wurde.

Ganz herzlich möchte ich mich bei meinen Freunden Isabell und Maximilian Reiter und bei meiner lieben Frau Fariba bedanken, die mich stets unterstützt und motiviert haben.



MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN
www.unileoben.ac.at

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 11.11.2020

Unterschrift Verfasser/in
Valiollah Pashangpour

Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine automatisierte Rainflow-Zählung (RFZ) von Belastungszeitfunktionen (BZFn) nach dem internationalen Standard ASTM E 1049 85 mit dem Softwarepaket IBF-Fatigue vom Ingenieurbüro Fiedler GmbH auf Basis von Finite-Elemente- (FE-) Spannungsergebnissen zu ermöglichen.

Die verschiedenen Methoden der ein- und zweiparametrischen Zählverfahren werden im Kapitel Stand der Technik auf ihre Vor- und Nachteile untersucht um deren Anwendungsfähigkeit zur Ermittlung der Belastungsschwingbreiten, Mittelwerte sowie der Ober- und Unterbelastungen für die Zählung der BZFn zu bestimmen.

Für die Aufbereitung der ausgewählten RFZ in Form eines Mathcad-Files wurde sowohl ein Rechenablauf für ein Residuum von 0 und 0,5 als auch für die verschobene Kurve Max_Max erstellt. Die Validierung der Funktion und der Ergebnisse im Softwaretool erfolgte mit händisch erarbeiteten Ergebnissen.

Eine Analyse des Einflusses der Residuen zeigt, dass die Ergebnisse wesentlich von der Position des maximalen bzw. minimalen Spitzenwertes abhängig sind. Die Klasse 64 kann für beliebige BZFn mit großer Zuverlässigkeit und die Klasse 32 unter Vorbehalt verwendet werden. Der Software wurde zur Reduzierung unnötiger kleiner Schwingbreiten eine optionale Funktion mit auswählbarer Toleranz hinzugefügt, welche den Verarbeitungsprozess mit nur kleinen Abweichungen beschleunigt.

Abschließend wurden im Programm die Rainflow-Ergebnisse der exakten Lastkollektive mit den Ergebnissen der klassifizierten Lastkollektive (Klasse 64), sowohl mit dem Residuum von 0,5 als auch mit der Verschiebung Max_Max, verglichen. Dies erfolgte anhand von Testrechnungen der FKM-Richtlinie für Lastkollektive auf geschweißte und nicht geschweißte Stahlbaukomponenten einer exemplarischen Maschine mit verschiedenen FAT-Klassen.

Bei der Berechnung nach der FKM-Richtlinie gibt es innerhalb einer FAT-Klasse zwischen dem exakten Lastspiel und dem Residuum von 0,5 eine Abweichung des Auslastungsgrades von bis zu 2% aufgrund von Klassifizierungen der Lastkollektive. Mit Max_Max kann gegenüber dem exakten Lastspiel ein um bis zu 5% höherer Auslastungsgrad erreicht werden.

Abstract

The aim of this master thesis is to set-up an automatic Rainflow Counting of load-time functions according to the international standard ASTM E 1049 85 within the software package IBF-Fatigue by Ingenieurbuero Fiedler GmbH based on FE stress results.

The various methods of the one- and two-parameter counting procedures are examined in the state-of-the-art with regard to their advantages and disadvantages for the counting of the stress-time functions on the basis of stress range and mean values as well as upper and lower loads.

For the preparation of the selected method Rainflow Counting within a Mathcad file, a calculation process was created for both a residual of 0 and 0,5 as well as for a shifted line Max_Max. The validation of the function and results by the software tool was conducted by a comparison with manually evaluated results. An analysis of the influence of the residuals show that the main difference between the results without and with considering the residuals depends on both the position of the largest peaks and the number and difference in values between the largest peak and other values. For any load-time function class 64 is feasible with high reliability and class 32 may be selected with reservation. An optional function with selectable tolerance was added to the software to reduce unnecessary small vibration range, which can speed up the processing process, albeit with a small error.

Finally, the results according to the rainflow-exact load spectra are compared with the results of the rainflow-classified load spectra (class 64) by both a residual of 0,5 and the displacement Max_Max in the software tool. This was performed on the basis of test calculations of the FKM guideline for load spectra on welded steel construction components of an exemplary heavy machine with different FAT classes.

If calculating according to the FKM guideline, a deviation of up to 2% in the same FAT-class occurs, mainly due to the classification of the load spectra between the exact and the classified load spectra with the residual of 0,5. The shifted curve- Max_Max is up to 5% more reliable compared to the original curve.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung und Ziele der Arbeit	1
2.	Stand der Technik	3
2.1.	Grundlagen	3
2.1.1.	Ermüdung.....	3
2.1.2.	Beanspruchungskennwerte	3
2.1.3.	Mittelspannungsempfindlichkeit.....	4
2.1.4.	Beanspruchung-Zeit-Funktion	6
2.1.5.	Einfluss des Regelmäßigkeitsfaktors	7
2.1.6.	Statistische Zählverfahren	8
2.1.7.	Klassen und Klassenbreite	9
2.1.8.	Rückstellbreite.....	9
2.1.9.	Lebensdauerberechnung nach der elementaren Miner-Regel.....	11
2.2.	Einparametrische Zählverfahren	12
2.2.1.	Spitzenzählung SZ	12
2.2.2.	Klassengrenzenüberschreitungs-zählung KGÜZ	13
2.2.3.	Bereichszählung BZ	15
2.2.4.	Bereichspaarzählung BPZ.....	16
2.3.	Zweiparametrische Zählverfahren	18
2.3.1.	Bereichs-Mittelwert-Zählung BMZ	18
2.3.2.	Von-Bis-Zählung VBZ.....	19
2.3.3.	Bereichspaar-Mittelwert-Zählung BPMZ	21
2.3.4.	Rainflow-Zählung RFZ.....	22
2.4.	Vergleich der Zählverfahren	31
3.	Auswahl und Aufbereitung einer repräsentativer RFZ	32
3.1.	Auswahl einer repräsentativer RFZ	32
3.2.	Aufbereitung einer repräsentativer RFZ	33
3.2.1.	Einfügen der Eingabekurve	34
3.2.2.	Bereinigung und Vereinfachung der Kurve	35
3.2.3.	Bestimmen der Klassenzahl	37
3.2.4.	Verschiebung der Kurve nach ASTM Norm	38
3.2.5.	Bereinigung der verschobenen Kurve.....	39
3.2.6.	Bestimmung der VON_NACH-Matrix	40
3.2.7.	Bestimmung der Maximum_Minimum-Matrix.....	42
3.2.8.	Bestimmung der Schwingbreite_Mittelwert-Matrix	44

3.2.9.	Bestimmung der Schädigung.....	45
4.	Test der RFZ	46
4.1.	Test der Belastungs-Zeit-Funktion	46
4.2.	Tests der Von_Nach-Matrix.....	49
4.3.	Tests der Max_Min-Matrix	52
4.4.	Test der Schwingbreite_Mittelwert-Matrix.....	54
4.5.	Test der Schädigung	56
5.	Untersuchung verschiedener Einflüsse auf Gesamtschädigung	58
5.1.	Einfluss des Residuums	58
5.2.	Einfluss der Klassenanzahl	61
5.2.1.	Stochastische Kurve.....	61
5.2.2.	Kurve mit geringen Stützpunkten.....	62
5.3.	Einfluss der Toleranz.....	64
5.3.1.	Beispiel eines Kraftverlaufs	64
5.3.2.	Beispiel eines Momentenverlaufs	67
5.4.	Einfluss der Kurvenverschiebungen	70
5.4.1.	Einfluss der Spiegelung.....	70
5.4.2.	Einfluss der Duplizierung.....	71
5.4.3.	Einfluss der Verschiebung von Stützpunkten	73
6.	Erprobung der Lebensdauerberechnung	74
6.1.	Beschreibung der Probe.....	74
6.2.	Beschreibung der Belastung	75
6.3.	Ermittlung des Lastspiels nach der RFZ.....	76
6.3.1.	Exakte Ermittlung des Lastspiels nach der RFZ	76
6.3.2.	Ermittlung der Lastklassen nach der RFZ mit Klasse 64	77
6.4.	Lebensdauerberechnung mit IBF-Fatigue nach der FKM-Richtlinie.....	80
6.4.1.	Softwarepaket IBFatigue	80
6.4.2.	Lebensdauerberechnung mit RFZ-Ergebnissen für exakte Lastspiele.....	81
6.4.3.	Lebensdauerberechnung mit RFZ-Ergebnissen für Residuum 0,5	82
6.4.4.	Lebensdauerberechnung mit RFZ-Ergebnissen für Verschiebung Max_Max	83
6.4.5.	Vergleich der Ergebnisse	84
7.	Zusammenfassung und Ausblick	85
8.	Wesentliche Erkenntnisse für die praktische Anwendung der Rainflowzählung mit IBF-Fatigue	87
	Abbildungsverzeichnis.....	88
	Tabellenverzeichnis.....	92
	Literaturverzeichnis	93

Abkürzungsverzeichnis

ASTM	American Society for Testing and Materials
BMZ	Bereichs-Mittelwert-Zählung
BPMZ	Bereichspaar-Mittelwert-Zählung
BPZ	Bereichspaarzählung
BZ	Bereichszählung
BZF	Beanspruchungszeitfunktion
BZFn	Beanspruchungszeitfunktionen
DMS	Dehnungsmessstreifen
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau
FVA	Forschungsvereinigung Antriebstechnik
GV	Geradlinienverteilung
HCF	High Cycle Fatigue
KGÜZ	Klassengrenzenüberschreitungs-zählung
RF	Rainflow
RFZ	Rainflow-Zählung
SZ	Spitzenzählung
TGL	Technische Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen, DDR 1955–1990
ÜM	Übergangsmatrix
VBZ	Von-Bis-Zählung

Formelzeichen

D	Gesamtschädigung
i_0	Regelmäßigkeitsfaktor
k	Zeitfestigkeitsgerade
N_0	Mittellastüberschreitungszahl
N_D	Eckschwingspielzahl
N_i	Schwingspielzahl
n_i	Gefahrene Zyklus
N_{Sp}	Lastspitzenzahl
R	Spannungsverhältnis
R_e	Streckgrenze des Werkstoffs
R_m	Zugfestigkeit des Werkstoffs
S_a	Spannungsamplitude
S_{aD}	Dauerfeste Schwingamplitude
S_D	Dauerfestigkeit
t	Zeit
ΔD_i	Teilschädigung
$\Delta\sigma$	Spannungsschwingbreite
σ_a	Spannungsamplitude
σ_m	Mittelspannung
σ_o	Oberspannung
σ_u	Unterspannung

1. Einleitung und Ziele der Arbeit

Unter Verwendung der Finite-Elemente- (FE-) oder durch Versuche können die lokalen Spannungen und Materialkennwerte für die Entwicklung, Optimierung und Lebensdauerabschätzung von Bauteilen mit komplexen Geometrien bestimmt werden (Abb. 1.1). Dieses Verfahren wird weltweit für die Konstruktion von Bauteilen in allen Produktionsprozessen eingesetzt. Grundlage der Lebensdauerberechnung sind Spannungen, welche mithilfe von Belastungszeitfunktionen (BZFn) und der Bauteilgeometrie berechnet werden. Durch Anwendung einer linearen Schadensakkumulation kann die Bauteillebensdauer abgeschätzt werden, indem die zeitlich veränderlichen Belastungen als klassifizierte Lastkollektive mit den Materialkennwerten verglichen werden. [1]

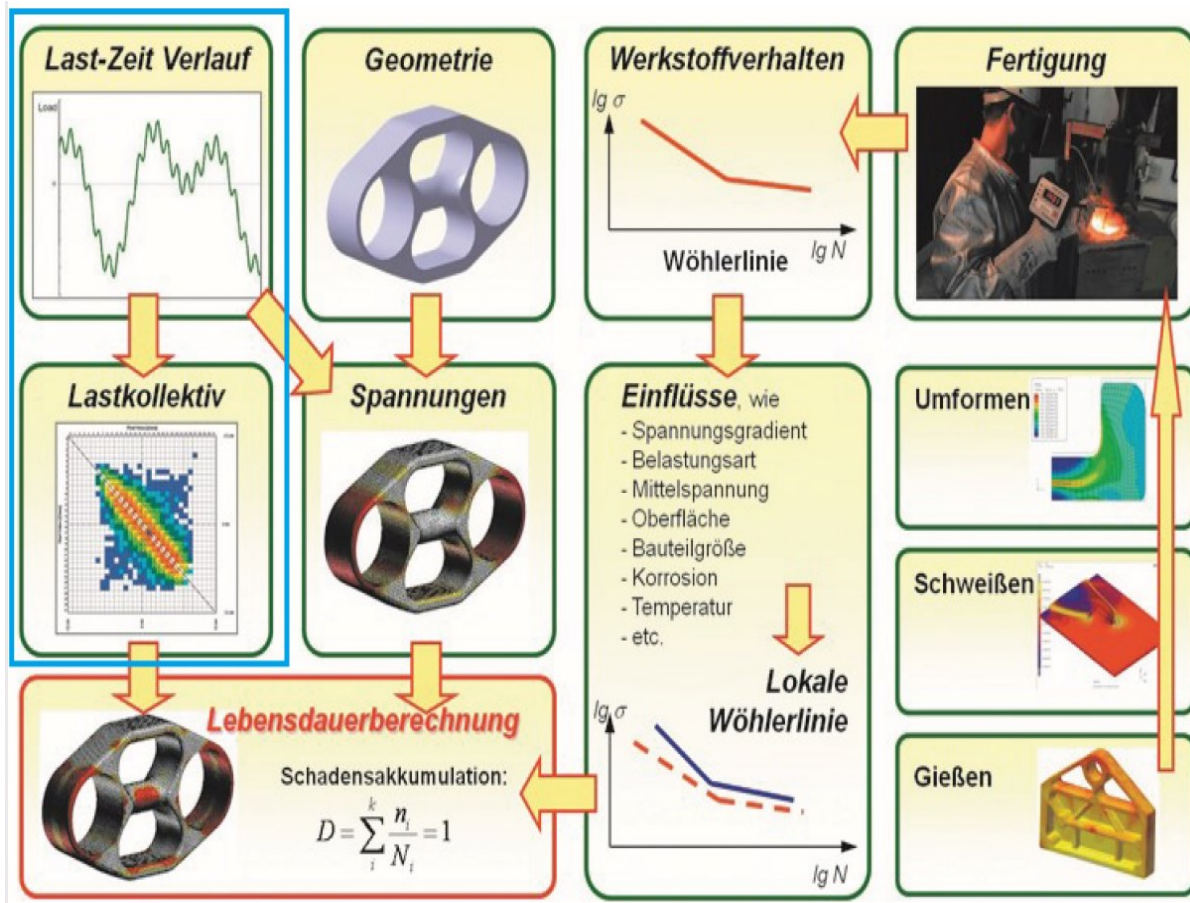


Abb. 1.1 Ablaufschema zur Lebensdauerabschätzung [1]

Die betriebsfeste Auslegung hat in den letzten Jahrzehnten, ausgehend vom Flugzeugbau und Fahrzeugbau, in nahezu allen technischen Bereichen eine steigende Anwendung gefunden. Typische Anwendungsgebiete sind Anlagenbau, Maschinenbau bis hin zum Schwermaschinenbau, Kraftwerksbau, Schiffbau, Brückenbau, Schienenfahrzeuge, Kranbau und Landmaschinen. Kritische Bereiche sind Spannungskonzentrationen an Komponenten und Strukturen, insbesondere bei Maschinenelementen.

Von besonderer Bedeutung sind Fügungen, wie zum Beispiel Schweißnähte. Eine zyklische dauerfeste Auslegung und Dimensionierung ist heutzutage keinesfalls der Regelfall.

In Abb. 1.2 ist für Nennspannungen der dauerfesten Auslegung die betriebsfeste Auslegung gegenübergestellt. Kollektiv I bzw. Dauerfeste Bemessung zeigt nur die Summenhäufigkeit bzw. Schwingspiele der Spannungsamplituden in BZF, die kleiner als Dauerfestigkeit sind. Aber bei der Kollektiv II bzw. betriebsfeste Bemessung werden Amplituden größer als Dauerfestigkeit zugelassen, deswegen kann eine Auslegung der Komponenten mit geringerem Gewicht vorgenommen werden als bei der dauerfesten Bemessung. [2]

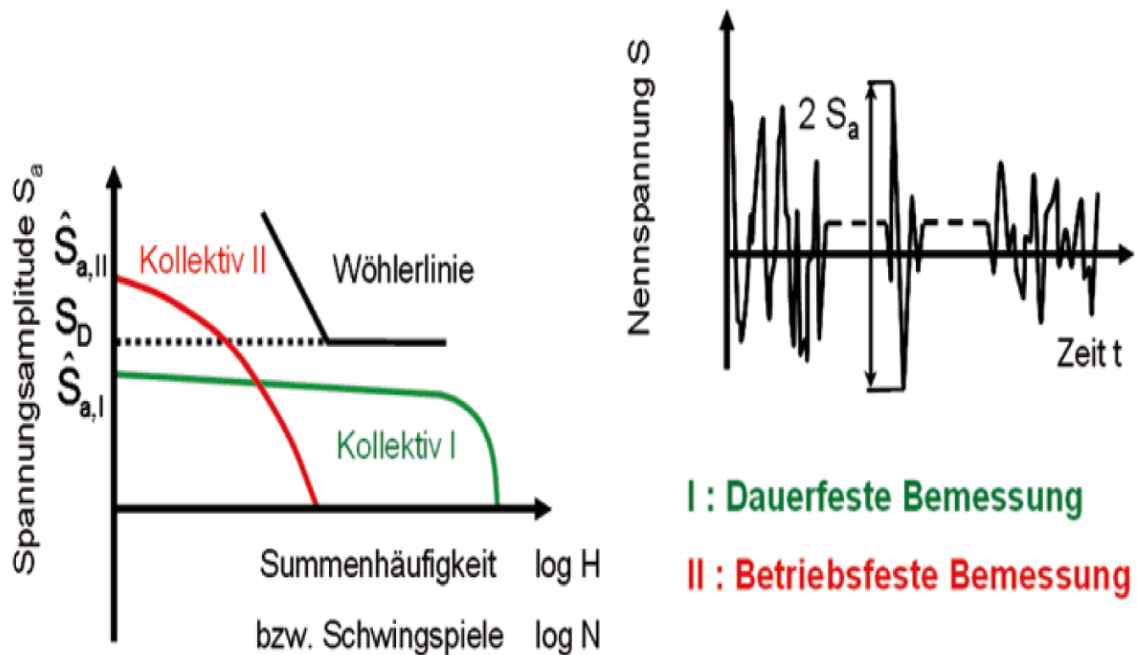


Abb. 1.2 Dauer- und betriebsfeste Bemessung von Bauteilen [2]

Da bei den vielen Komponenten schwingende Lasten mit variabler Amplitude auftreten, muss die zugrunde liegende Beanspruchung durch Kollektive und Matrizen klassifiziert werden. Diese sind die Grundlage für die rechnerische Lebensdauerabschätzung und werden aus Betriebsmessungen gewonnen. [3]

Um diese Beanspruchung zu ermitteln werden Zählverfahren eingesetzt.

Die Ziele der Arbeit:

- Ausarbeitung der Vor- und Nachteile der einzelnen Zählverfahren
- eine automatische und zuverlässige Rainflow-Zählung zu ermöglichen
- Vergleichbare Untersuchung der Klassenzahl von Lastkollektive auf der Schädigung
- Untersuchung der Verschiebung von BZF auf der Gesamtschädigung
- Einfluss der Toleranz auf der Gesamtschädigung
- Ermittlung der Abweichung zur exakten Lösung anhand eines Praxisbeispiels

2. Stand der Technik

2.1. Grundlagen

2.1.1. Ermüdung

Unter Ermüdung versteht man Materialschädigung, Rissbildung und Risswachstum unter zeitlich veränderlicher, oftmaliger Beanspruchung. [4]

2.1.2. Beanspruchungskennwerte

Einige oft verwendete Beziehungen (Abb. 2.1) sind:

$$\text{Spannungsamplitude } \sigma_a = \frac{1}{2}(\sigma_o - \sigma_u) = \frac{1}{2}\sigma_o(1 - R) = \sigma_m \frac{1 - R}{1 + R} \quad (2-1)$$

$$\text{Mittelspannung } \sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_o + \sigma_u) = \frac{1}{2}\sigma_o(1 + R) = \sigma_a \frac{1 + R}{1 - R} \quad (2-2)$$

$$\text{Oberspannung } \sigma_o = \sigma_m + \sigma_a = \frac{2\sigma_a}{1 - R} = \frac{2\sigma_m}{1 + R} \quad (2-3)$$

$$\text{Unterspannung } \sigma_u = \sigma_m - \sigma_a = \frac{2\sigma_a R}{1 - R} = \frac{2\sigma_m R}{1 + R} \quad (2-4)$$

$$\text{Spannungsschwingbreite } \Delta\sigma = \sigma_o - \sigma_u = 2\sigma_a \quad (2-5)$$

$$\text{Spannungsverhältnis } R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} \quad (2-6)$$

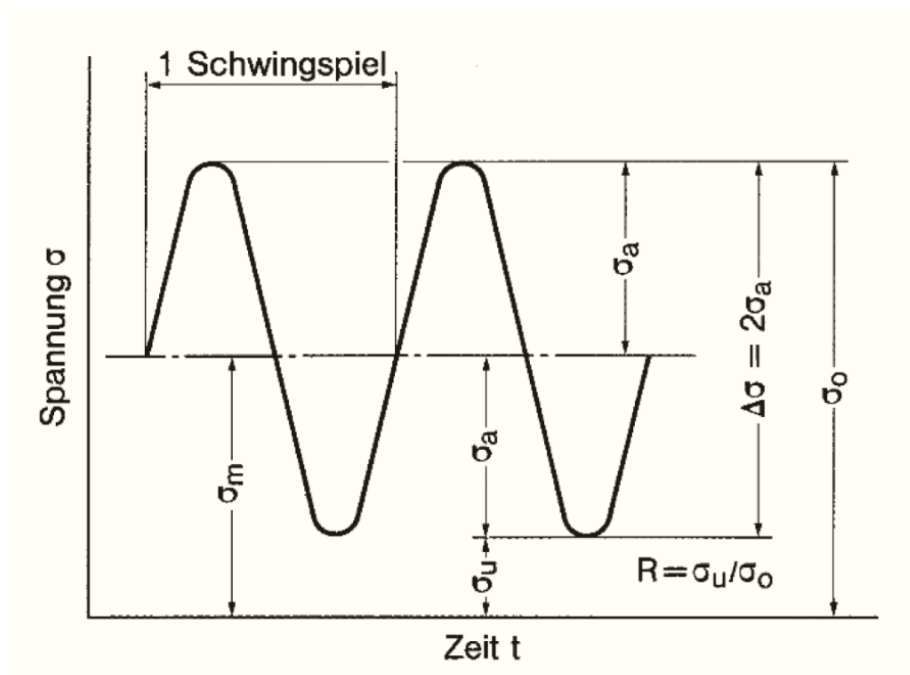


Abb. 2.1 Beanspruchungskennwerte von der BZF [4]

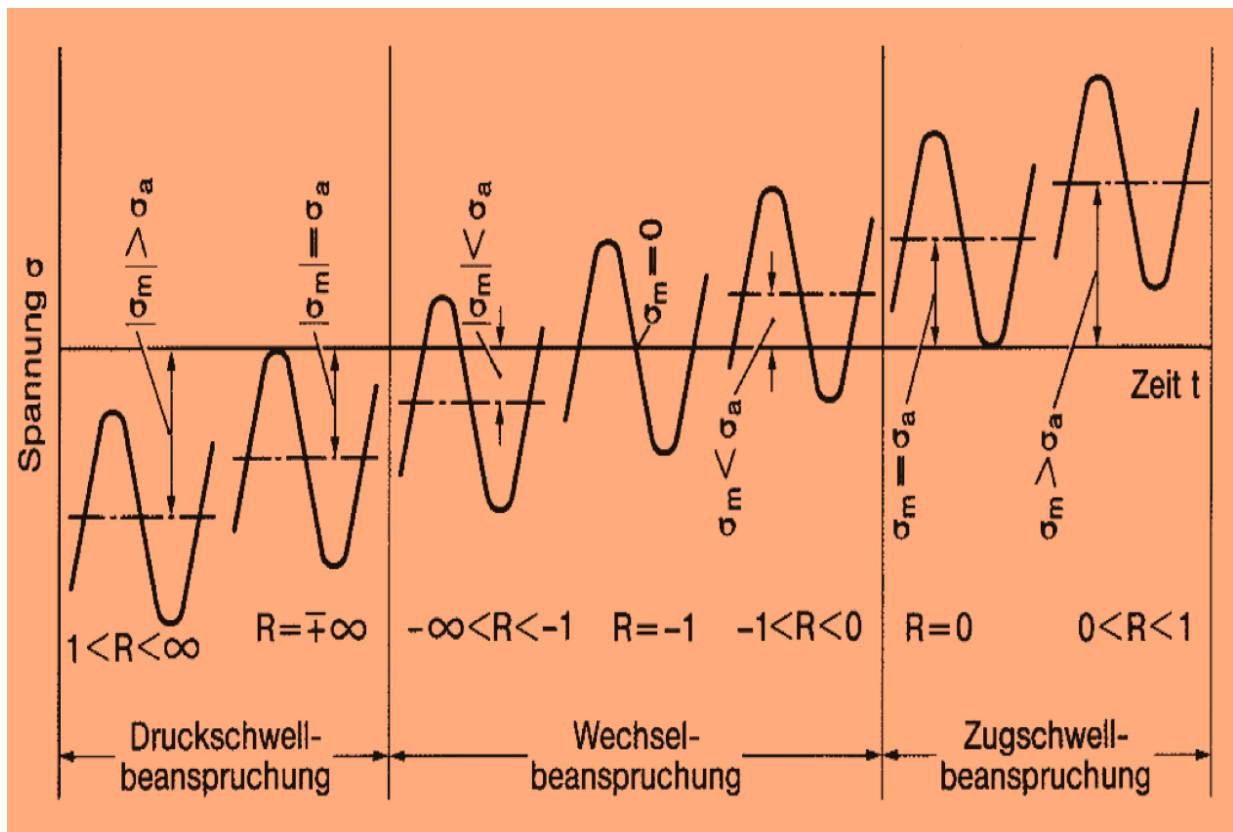


Abb. 2.2 Trennung der Beanspruchungsfälle nach dem Mittelspannungszustand [4]

Je nach Position des Mittelwertes, um welche die Belastung schwankt, lassen sich Druckschwellbeanspruchung, Wechselbeanspruchung und Zugschwellbeanspruchung unterteilen (Abb. 2.2).

2.1.3. Mittelspannungsempfindlichkeit

Das Smith-Diagramm (Abb. 2.3) zeigt die über die Mittelspannung aufgetragene Ober- und Unterspannung. Das Dauerfestigkeitsschaubild wird vielfach aus der Wechselfestigkeit, der Zugfestigkeit R_m und der Streckgrenze R_e konstruiert. In der Regel wird das Diagramm zur Darstellung der Dauerfestigkeitskennwerte in Abhängigkeit der Mittelspannung verwendet. [5]

Auf Abb. 2.4 sieht man die schematische Darstellung des Zeit- und Dauerfestigkeitsschaubildes nach Haigh. In dieser Darstellung kann man die Amplitude über der Mittelspannung sehen. [5]

2.1.4. Beanspruchung-Zeit-Funktion

In Abb. 2.5 ist der Beanspruchungsablauf durch eine Beanspruchung-Zeit-Funktion (BZF) dargestellt. Besonders die Beanspruchungsamplitudenfolge ist für die Betriebsfestigkeit von entscheidender Wichtigkeit. [6]

Bei der BZF kann man sowohl zwischen Grund- und Zusatzbeanspruchung (Abb. 2.6) als auch zwischen deterministischen und stochastischen Vorgängen unterscheiden (Abb. 2.7).

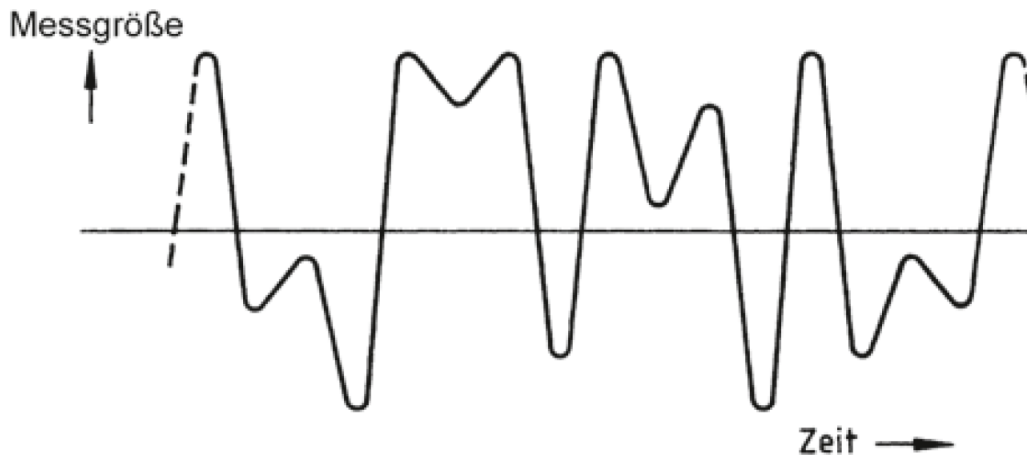


Abb. 2.5 Beispiel-BZF [2]

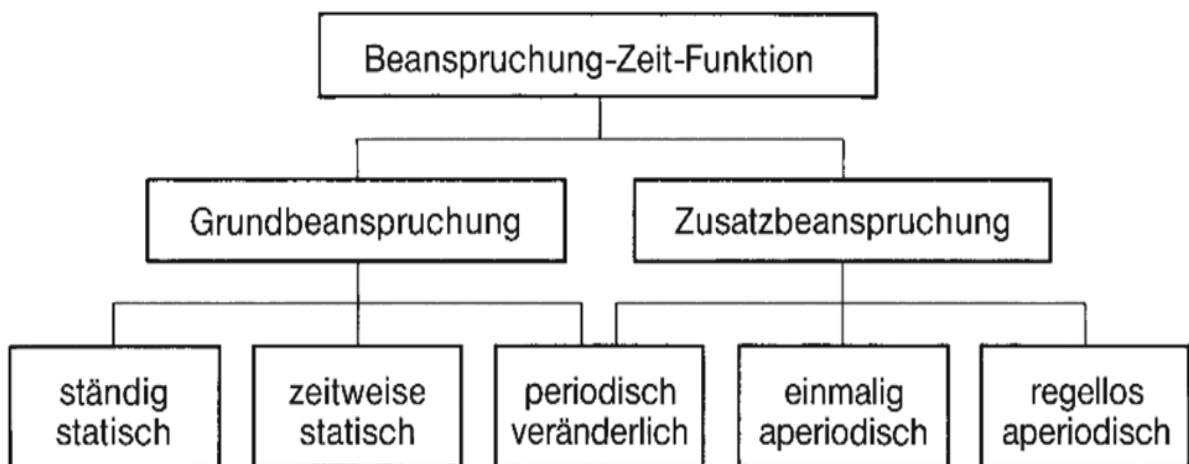


Abb. 2.6 Unterscheidung zwischen Grund- und Zusatzbeanspruchung bei der BZF, in Anlehnung an Buxbaum [6]

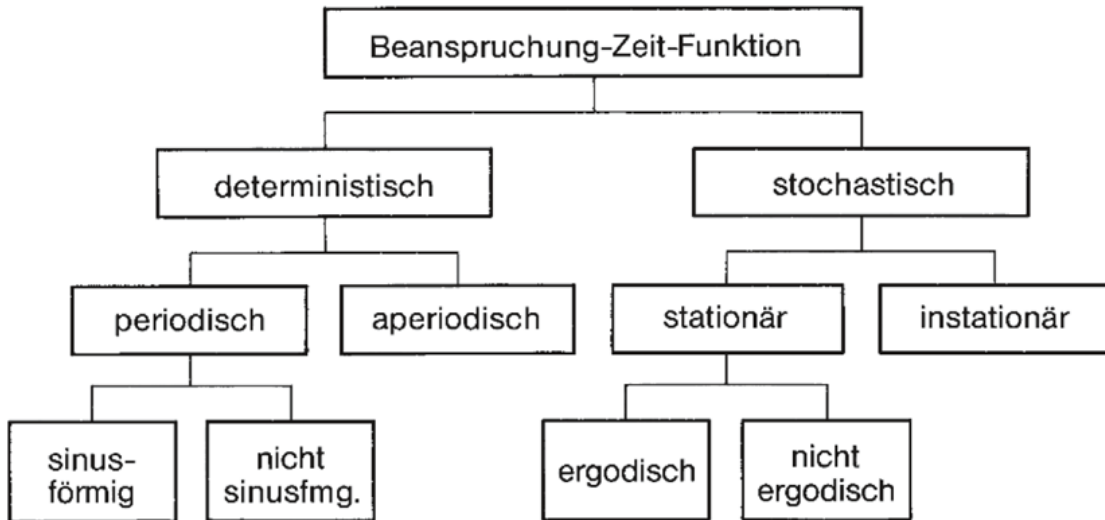


Abb. 2.7 Unterscheidung zwischen deterministischer und stochastischer BZF, in Anlehnung an Buxbaum u. Svenson [7]

Periodische Vorgänge können sinusförmig oder komplex periodisch bzw. nicht sinusförmig sein. das einmalige gedämpfte Ausschwingen einer Glocke ist als ein nicht-periodischer BZF. Deterministische BZFn sind mathematisch vorhersagbar. [7]

Stochastische BZFn kann man nur statistisch beschreiben. Die Kennwerte der instationären Kurve wird zeitabhängig geändert, aber die stationäre Kurve haben zu jeder Zeit die gleichen statistischen Zahlenwerte. Wenn der Wahrscheinlichkeitsraum mit zeitlicher Entwicklung des Systems vollständig ausgefüllt wird, spricht so man von einem ergodischen Vorgang. [7]

2.1.5. Einfluss des Regelmäßigkeitsfaktors

Für eine einfachere Kennzeichnung der relativen Frequenz bzw. der relativen Mittellastabweichung stochastischer BZF wird der Regelmäßigkeitsfaktor $i_0 = N_0 / N_{Sp}$, das Verhältnis von Mittellastüberschreitungszahl N_0 zur Lastspitzenzahl (Maximum oder Minimum) N_{Sp} (Bezeichnung nach [6], im Gebrauch auch „Unregelmäßigkeitsfaktor“ [8], und $1/i_0$ [9]) verwendet. [10]

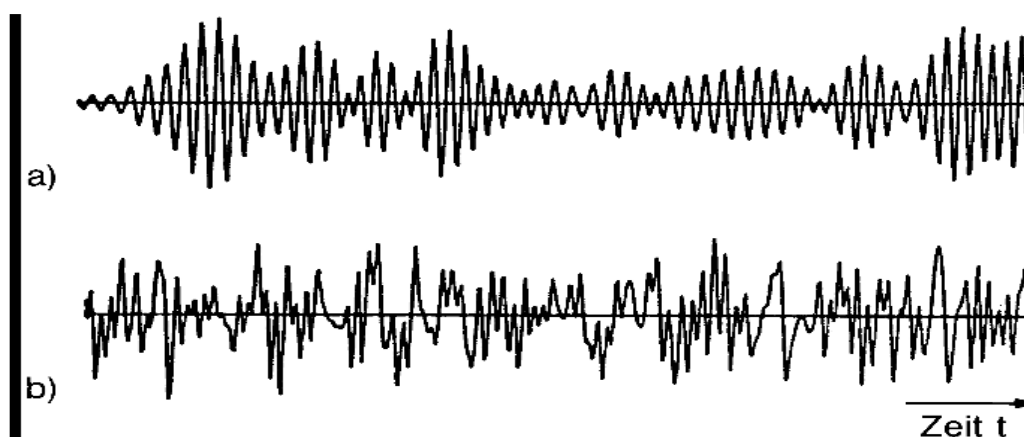


Abb. 2.8 Schmalbandige (a) und breitbandige (b) Schwingungserregung; nach Hesselmann [10]

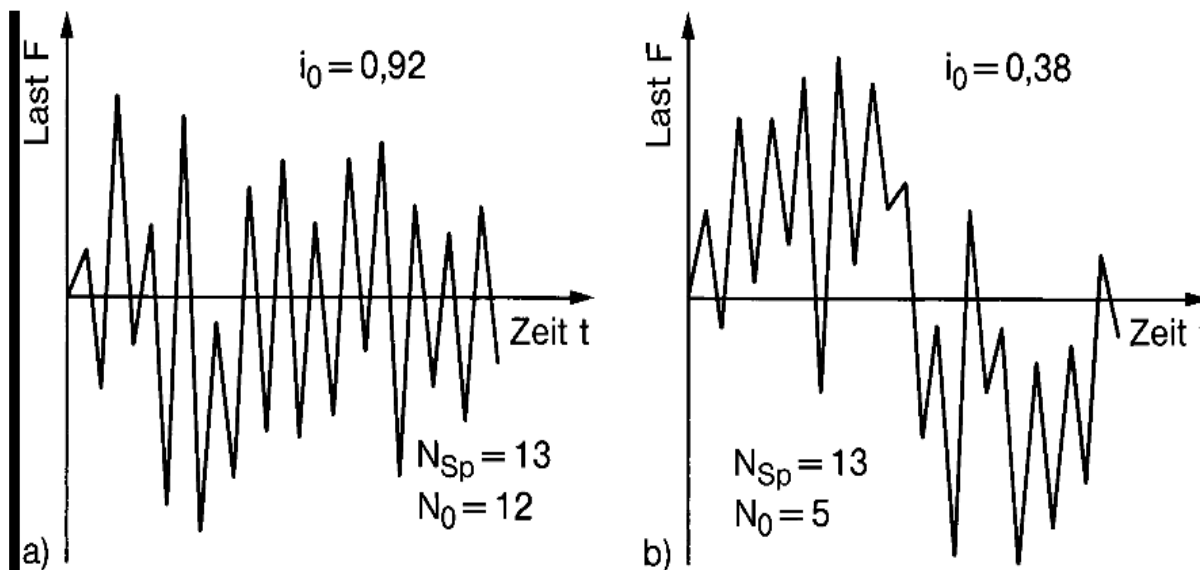


Abb. 2.9 Regelmäßigkeitsfaktor i_0 , beispielhaft für schmalbandige (a) und breitbandige (b) Schwingungserregung [10]

Die schmalbandige Erregung des Bauteils in Nähe einer isolierten Eigenfrequenz, die häufig für Versuchsbelastungen typisch ist, ist durch Werte $i_0 \approx 1,0$ gekennzeichnet. Im praktischen Einsatzfall von Bauteilen tritt häufig breitbandige Erregung unter Mitwirkung einiger Eigenfrequenzen auf, was zu Werten $i_0 \ll 1,0$ führt. Wenn Eigenschwingungen keine Rolle spielen, können sogar innerhalb derselben Baugruppe stark unterschiedliche Regelmäßigkeitsfaktoren auftreten. So kann dem Achsschenkel mit $i_0 \ll 1,0$ eine Nabe mit $i_0 \approx 1,0$ zugeordnet sein. Schmalbandige und breitbandige Erregung sind in Abb. 2.8 einander gegenübergestellt. Eine konkrete Zählung ist in Abb. 2.9 dargestellt. Bei schmalbandiger Erregung liegt zwischen Lastmaximum und Lastminimum in den meisten Fällen ein Mittellastdurchgang. Bei breitbandiger Erregung tritt der Mittellastdurchgang nur selten auf. [4]

2.1.6. Statistische Zählverfahren

Zählverfahren werden in der Betriebsfestigkeit verwendet, um für beliebige BZFn die Häufigkeitsverteilung der Amplituden festzulegen. Eine entscheidende Größe für die Lebensdauer schwingend beanspruchter Bauteile ist die Häufigkeitsverteilung der Amplituden bzw. die Beanspruchungsmatrix. Diese Zählung bietet, im Vergleich mit der BZF, eine Datenreduktion, die für den Festigkeitsnachweis gebraucht wird. [11]

Die Zählungsverfahren kann man unterteilen in einparametrische Verfahren, bei denen nur eine Eigenschaft zugewiesen ist und in zweiparametrische Verfahren, bei denen zwei verwandte Eigenschaften aufgezeichnet werden. Bei Verwendung der Zählungsmethode gehen jedoch erhebliche Dateien, wie z.B. die Abfolge der einzelnen Schwankungen in diesem Prozess und die Frequenz der BZF verloren. [12]

Im Labor wird die Wirksamkeit der Lastsequenz auf die Lebensdauer des Bauteils als bedeutsam nachgewiesen, z.B. beim Anwenden von zusätzlichen Lasten zu verschiedenen Zeiten. Erfahrungen und Experimente zeigen, dass bei BZFn mit hohen Schwingenspielzahlen, welche viele kleine und große Schwingbreiten enthalten, die Lastsequenz keinen Einfluss hat. [13]

2.1.7. Klassen und Klassenbreite

Die Unterteilung des Messbereichs in Klassen gleicher Größe ist eine Voraussetzung für eine Zählung. Die Klasseneinteilung reduziert sowohl Daten gegenüber BZFn als auch den Speicheraufwand und beschleunigt die Simulation des Pfades. Die Klassen müssen in Richtung positiver Messgröße fortlaufend nummeriert werden. Der Klassenbereich hat einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Zählungsverfahren. Bei 128 Klassen beschreibt eine Klassenbreite weniger als 1 % des Messbereichs. Die Verwendung von 64 Klassen hat sich jedoch vorwiegend durchgesetzt. Früher wurde bei online-Klassierverfahren mit 8, 16, 32 oder einem Vielfachen an Klassen gearbeitet. Zur besseren Übersichtlichkeit werden in Abb. 2.10 nur acht Klassen verwendet.

In der folgenden Abbildung befindet sich die Nulllinie des Messwertes an der Grenze der Klasse 6, d. h. zwischen den Klassen 6 und 7. [14]

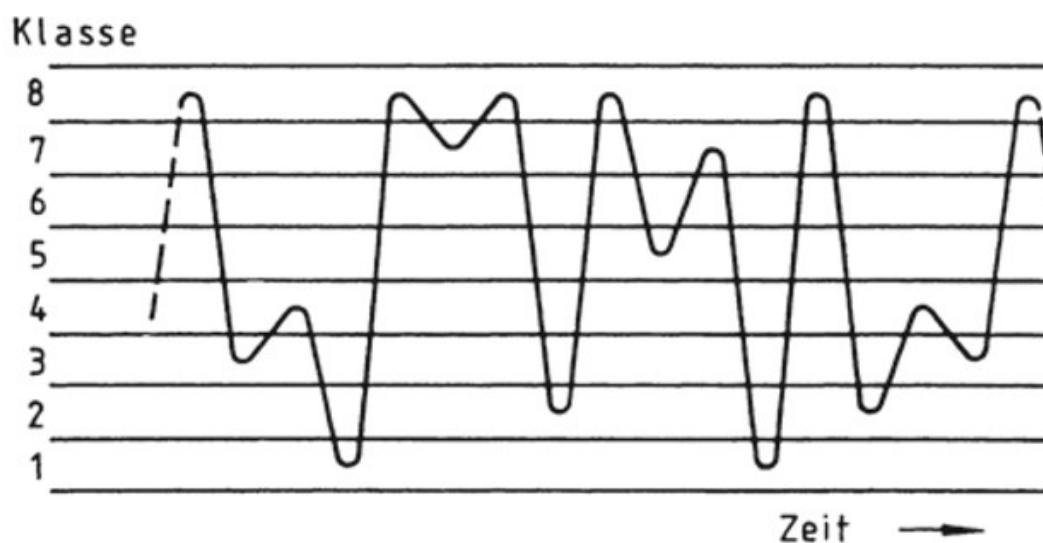


Abb. 2.10 Klasseneinteilung für Zählungen [12]

2.1.8. Rückstellbreite

Schwingungen, die innerhalb einer Klasse auftreten, werden bei allen Zählverfahren nicht erkannt und damit automatisch unterdrückt. Wenn eine derartige Schwingung mit kleiner Amplitude die anliegende Klassengrenze überschreitet, löst dies eine Zählung aus. Um solche zufälligen Messwerte zu vermeiden, besonders aber um kleine Schwingungen von Anfang an herauszufiltern, die nicht zu einer Schädigung

führen und oft vom Brummen oder Rauschen der elektronischen Messkette stammen, wird eine Rückstellbreite (Hysterese) eingeführt. [15]

Bei rechnergestützter Messdatenerfassung und -auswertung kann man ohne Probleme eine feine Klasseneinteilung wählen. Eine sinnvolle Festlegung von Messbereich und Klassenanzahl muss jedoch beachtet werden (Abb. 2.11). [2] [16]

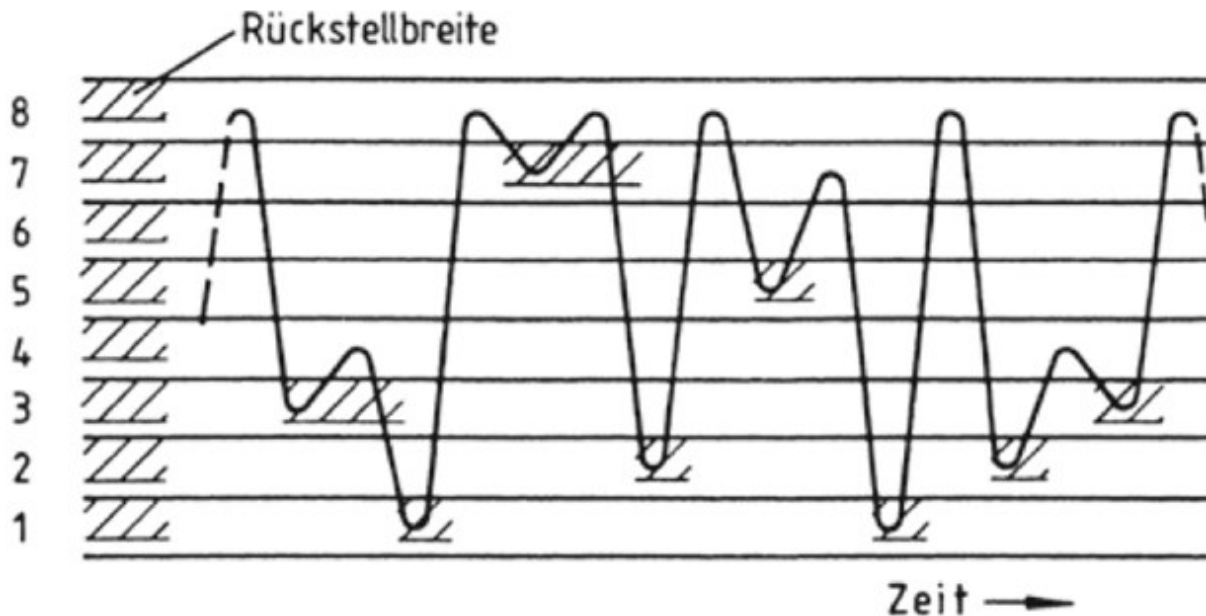


Abb. 2.11 Rückstellbreite klassengrenzenorientiert [2]

Bei Zählverfahren, welche Klassenbereiche verwenden, orientiert sich die Rückstellbreite an den Extremwerten. Eine erneute Zählung findet dann statt, wenn der zu zählende Klassenbereich größer ist als die Rückstellbreite (Abb. 2.12). [2] [17]

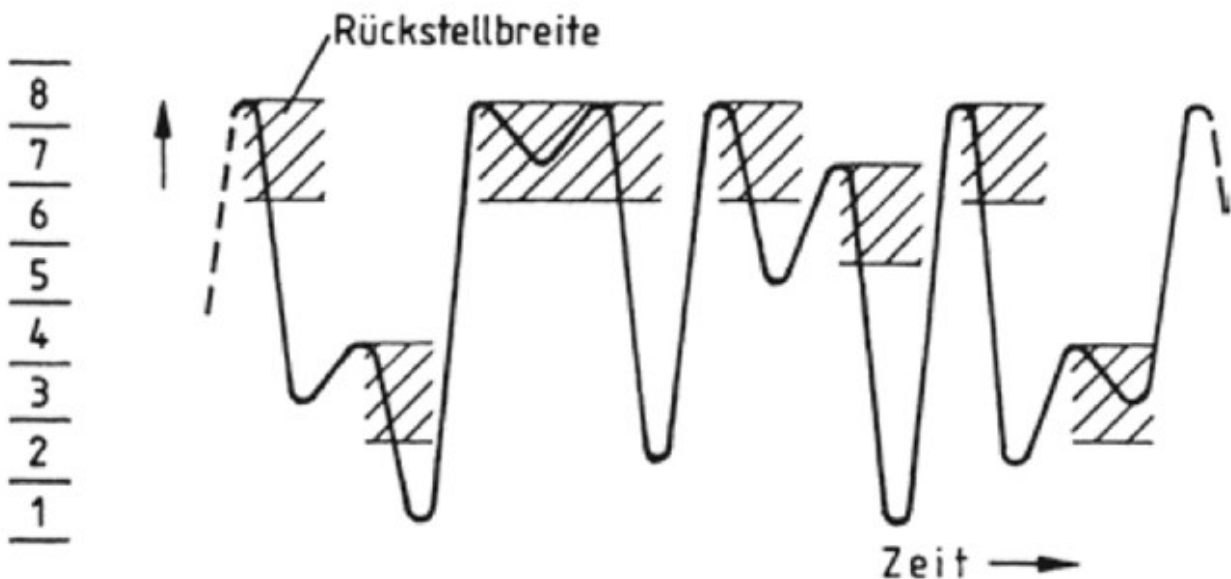


Abb. 2.12 Rückstellbreite extremwertorientiert [2]

2.1.9. Lebensdauerberechnung nach der elementaren Miner-Regel

Die Miner-Regel bzw. die lineare Schädigungsakkumulations-Hypothese nach Palmgren (1924) [18] und Miner (1945) [19] gilt als das einfachste, bekannteste und am Häufigsten angewendete Verfahren für eine Lebensdauerberechnung.

Die ertragbaren Nennbelastungsamplituden N_i werden mit der Wöhlerlinie, mit der Steigung der Zeitfestigkeitsgeraden k (3 bis 5 für aufgeschweißte Stahlbaukomponenten), Ecklastspielzahl N_D und Dauerfestigkeit S_{aD} berechnet (Abb. 2.13). Die ertragbaren Nennbelastungsamplituden N_i sind für $R =$ konstant definiert

$$N_i = N_D \cdot (S_{ai} / S_{aD})^{-k} \quad (2-7)$$

Die Grundidee der Miner-Regel -Hypothese ist, dass die schwingende Belastung des Werkstoffs eine „Schädigung“ verursacht, die sich im Laufe ihres Einflusses akkumuliert, und zwar bis zum Erfolgen eines entscheidenden Schädigungswertes, bei dem der Schwingbruch erreicht wird [4].

Der Gesamtschädigung D ist aus den Teilschädigungen ΔD_i eines Schwingspiels definiert

$$\Delta D_i = n_i / N_i \quad \text{mit} \quad N_i = N(S_{ai}, S_{mi}) \quad (2-8)$$

Dabei bedeutet N_i die unter der Spannungsamplitude S_{ai} und der Mittelspannung S_{mi} des Schwingspiels i nach der Wöhlerlinie ertragbare Zyklen und n_i gefahrene Zyklen. Als entscheidender Schädigungsgrad gilt eine Gesamtschädigung

$$D = \sum \Delta D_i = 1 \quad \text{bzw.} \quad D = \sum (n_i / N_i) = 1 \quad \text{für Bauteilversagen. [4]} \quad (2-9)$$

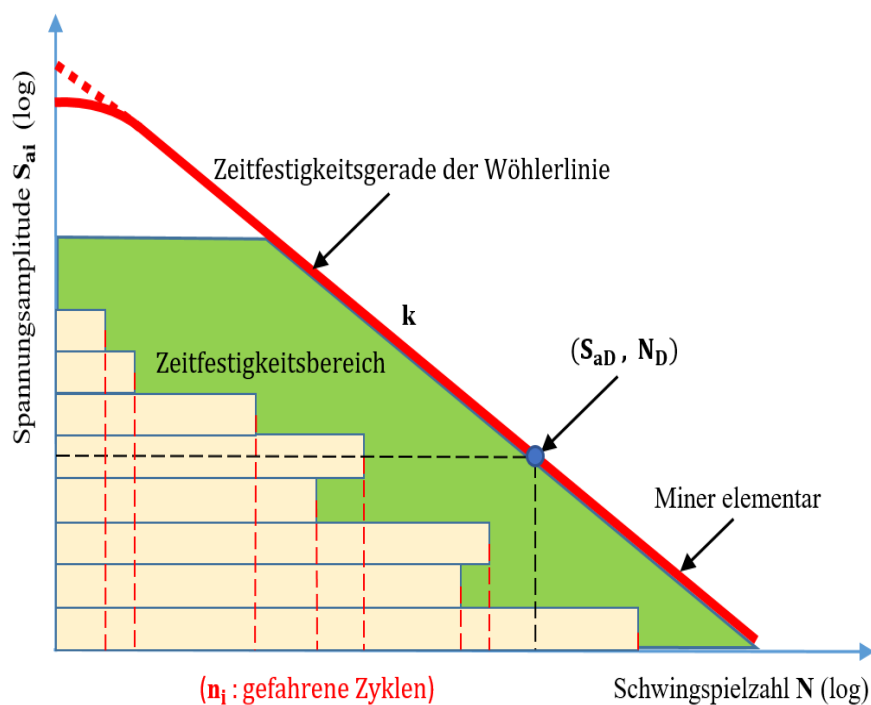


Abb. 2.13 Amplitudenkollektiv mit seiner Treppenkurve [4]

2.2. Einparametrische Zählverfahren

Die vier einparametrischen Verfahren Spitzenzählung (SZ), Klassengrenzenüberschreitungs-zählung (KGÜZ), Bereichszählung (BZ) und Bereichspaarzählung (BPZ) werden folgend genauer beschrieben.

2.2.1. Spitzenzählung SZ

2.2.1.1. Beschreibung des Verfahrens

Die Häufigkeitsverteilung der Umkehrpunkte einer BZF wird durch die Spitzenzählung (peak counting) berechnet, wobei normalerweise nur die Maximalwerte gezählt werden. Das Kollektiv wird als Gesamthäufigkeit aufgetragen. Die SZ ist wahrscheinlich das älteste Zählverfahren. [11]

Vorteile:

- Einfachstes Zählverfahren

Nachteile:

- Amplitude und Mittelwert der einzelnen Schwingung gehen verloren

Die im Kollektiv dargestellten Schwingbreiten sind im Allgemeinen größer als die tatsächlich vorhandenen Schwingbreiten. [11]

2.2.1.2. Beschreibung des Zählalgorithmus

Das Verfahren fängt bei einem Maximal- oder Minimalwert an. In Abb. 2.14 werden die Extremwerte den entsprechenden Klassen zugeordnet. In Abb. 2.15 ist das sich daraus ergebende Beanspruchungskollektiv dargestellt.

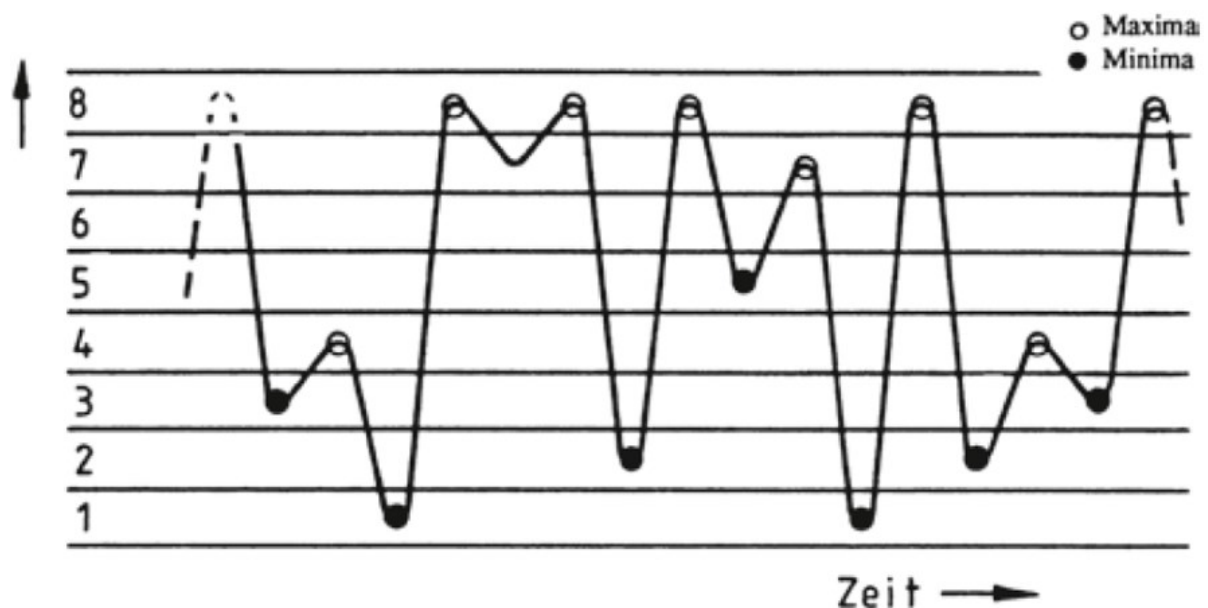


Abb. 2.14 BZF Spitzenzählung [2]

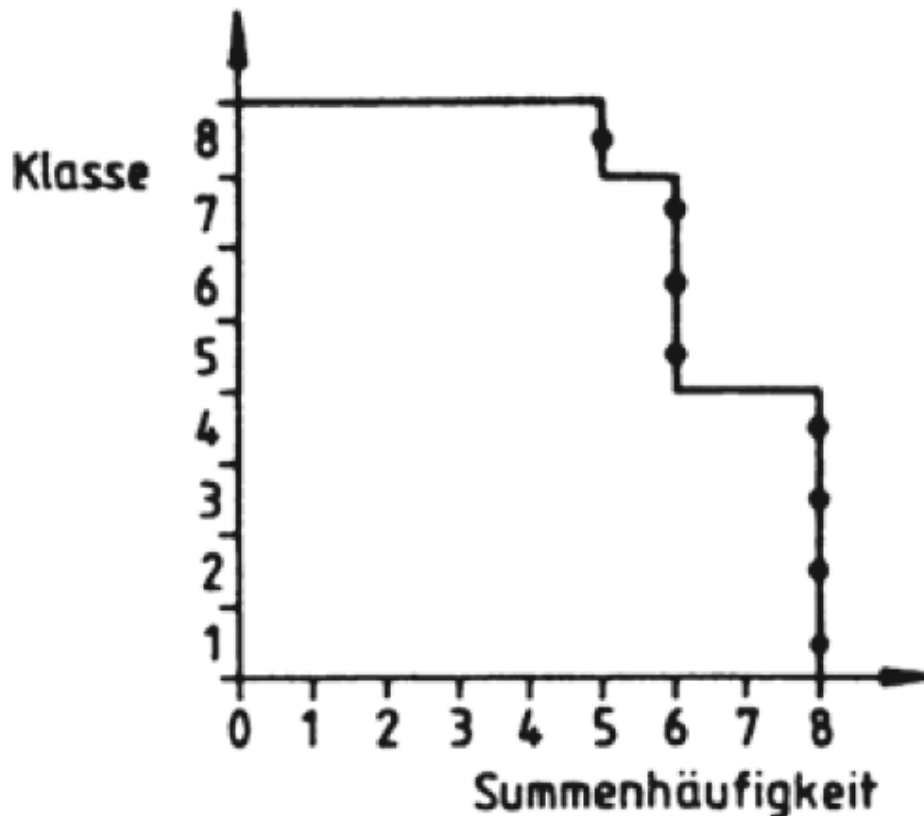


Abb. 2.15 Zählergebnis Spitzenzählung (nur Maxima) [2]

Das Verfahren hat drei mögliche Varianten:

Variante I: Zählung der Minima, dadurch ändert sich das Ergebnis im Vergleich zur Anzahl der maximalen Werte (Abb. 2.15).

Variante II: Zählung der positiven Spitzen oberhalb und der negativen unterhalb der Grundbeanspruchung (peaks and troughs counting). Bei einem „Nulldurchgang“ der Beanspruchung beginnt dann die Zählung (hier zwischen Klasse 4 und 5).

Variante III: Zählung der Extremwerte zwischen den Nulldurchgängen (mean-crossing-peak-counting).

Alle Varianten führen zu unterschiedlichen Ergebnissen. [11]

2.2.2. Klassengrenzenüberschreitungszählung KGÜZ

2.2.2.1. Beschreibung des Verfahrens

Die Zählung nach der KGÜZ (level crossing counting) liefert als Ergebnis die Überschreitungshäufigkeit von Klassengrenzen, wobei es sich um Summenhäufigkeiten handelt. Die KGÜZ wurde früher häufig für Lebensdauerabschätzungen verwendet. [2] [20]

Vorteile:

- Schnelle Überprüfung der Extremwerte
- Besonders für einen Kollektivvergleich und ebenso zur Kontrolle der Betriebsmessung geeignet.

Nachteile:

- Amplitude und Mittelwert der einzelnen Schwingung gehen verloren
- Das Verfahren ist nicht geeignet, um die Größe der Amplituden zu berechnen
- Dieses Verfahren ist abhängig von dem Unregelmäßigkeitsfaktor und der Art der BZF, jedoch ist es schwieriger als andere Verfahren, z. B. die Bereichspaarzählung
- Die KGÜZ ist für Lebensdauerabschätzungen nach jetzigem Kenntnisstand ungeeignet
- Im Vergleich zur Bereichspaarzählung hat die KGÜZ eine beträchtliche Abweichung zwischen experimentellen und rechnerischen Lebensdauern für realistische BZFn [2] [21]

2.2.2.2. Beschreibung des Zählalgorithmus

Unter dem Minimalwert wird die Nullklassengrenze gemessen (Abb. 2.16). An den positiven (aufsteigenden) Flanken der BZF werden die Überschreitungen der Klassengrenzen gezählt (Abb. 2.17). Ebenso ist es möglich eine Zählung an den negativen (abfallenden) Flanken durchzuführen.

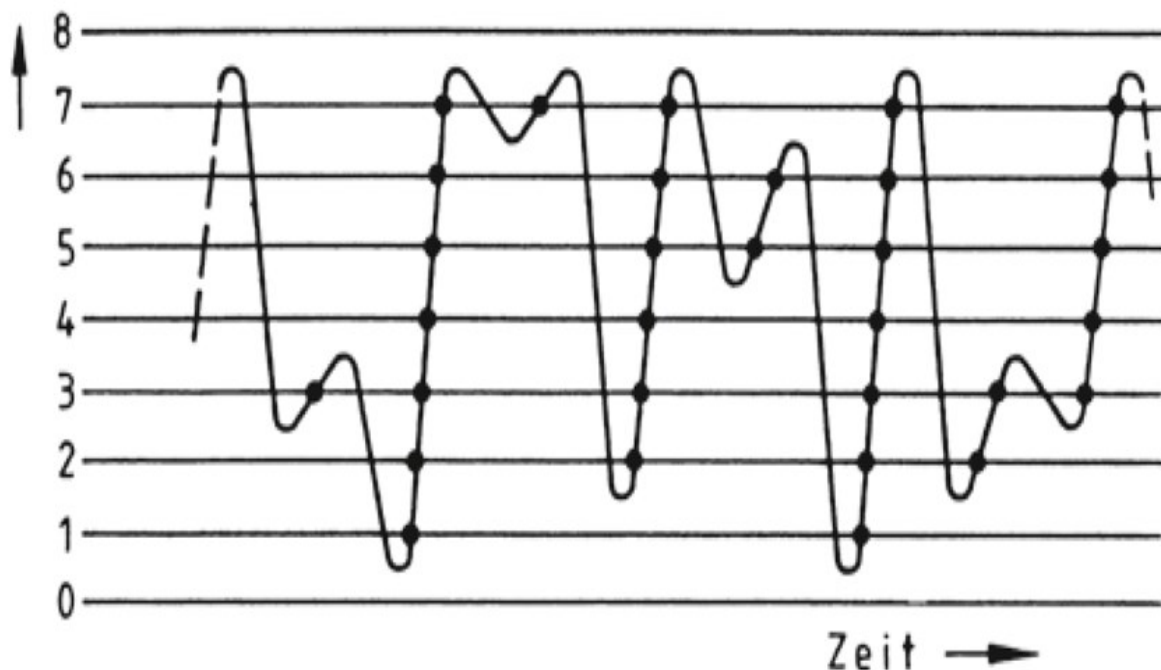


Abb. 2.16 BZF Klassengrenzenüberschreitungs-zählung [2]



Abb. 2.17 Zählergebnis der Klassengrenzenüberschreitungszählung [2]

2.2.3. Bereichszählung BZ

2.2.3.1. Beschreibung des Verfahrens

Das Ergebnis der BZ (range counting) wird als Gesamthäufigkeit dargestellt. Die Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Umkehrpunkten wird als Bereich gezählt (Abb. 2.18).

Vorteile:

- Zählung aller einzelner Bereiche

Nachteile:

- Die Höhe der Extremwerte geht verloren
- Je nachdem ob positive oder negative Flanken gezählt werden, führt die BZ zu unterschiedlichen Ergebnissen
- Das Verfahren wird weder für einen Kollektivvergleich noch für eine Lebensdauerabschätzung empfohlen
- Da alle Bereiche auf ein fiktives Niveau bezogen werden, ergibt die BZ ein zu schmales Beanspruchungskollektiv

2.2.3.2. Beschreibung des Zählalgorithmus

Das Verfahren erfolgt in positiver Richtung (Abb. 2.19). Es entstehen variable Klassengrenzen, da die Bereichsgröße vom vorhergehenden Extremwert (hier: Minimum) bestimmt wird.

An den negativen Flanken ist ebenfalls eine Zählung möglich. [2] [22]

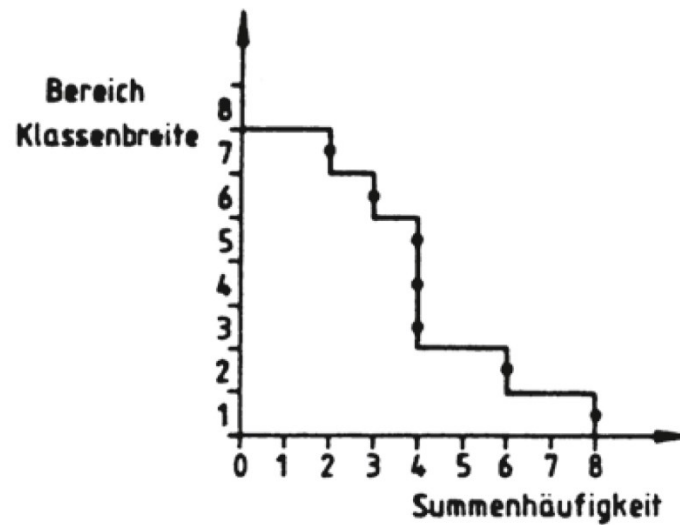


Abb. 2.18 Zählergebnis der Bereichszählung [2]



Abb. 2.19 BZF Bereichszählung [2]

2.2.4. Bereichspaarzählung BPZ

2.2.4.1. Beschreibung des Verfahrens

Die Häufigkeit von Schwingbreiten wird mit der Bereichspaarzählung (range pair counting) ermittelt. Ein Bereichspaar besteht aus einer negativen und einer positiven Flanke gleicher Größe und Mittelspannung. Je nach Verlauf der BZF können die zueinander passenden Flanken direkt nacheinander oder in größeren Abständen auftreten. Dadurch ergibt sich eine nichtsequenzielle Zählung.

Vorteile:

- Die BPZ erfasst die Amplituden und deren Häufigkeit als wichtigste Schädigungsgröße richtig

Nachteile:

- Wenn Schwingbreiten mit unterschiedlichen Mittelspannungen zusammengefügt werden, wird die BPZ fehlerhaft angewendet

- Der Absolutwert der Signale (Max, Min, Mittelwert) geht verloren [2] [23]

2.2.4.2. Beschreibung des Zählalgorithmus

Die positiven und negativen Flanken werden in Klassen geteilt. Das nächste Maximum bzw. Minimum stellt immer den neuen Zählnullpunkt dar. Die Zählung fängt bei einem beliebigen Extremwert an.

Bereiche mit identischen Größen und Mittelwerten werden auf der an- bzw. absteigenden Flanke zu einem BP zusammengefasst (Abb. 2.20). Das Zählergebnis wird als Summenhäufigkeitskurve dargestellt (Abb. 2.21).

Kann ein Bereichspaar nicht sofort geschlossen werden, wird die eine Flanke „gespeichert“, bis die passende Gegenflanke auftritt. Das Residuum wird durch jene Bereiche gebildet, die nicht zu Bereichspaaren zusammengefasst werden. [2] [24]

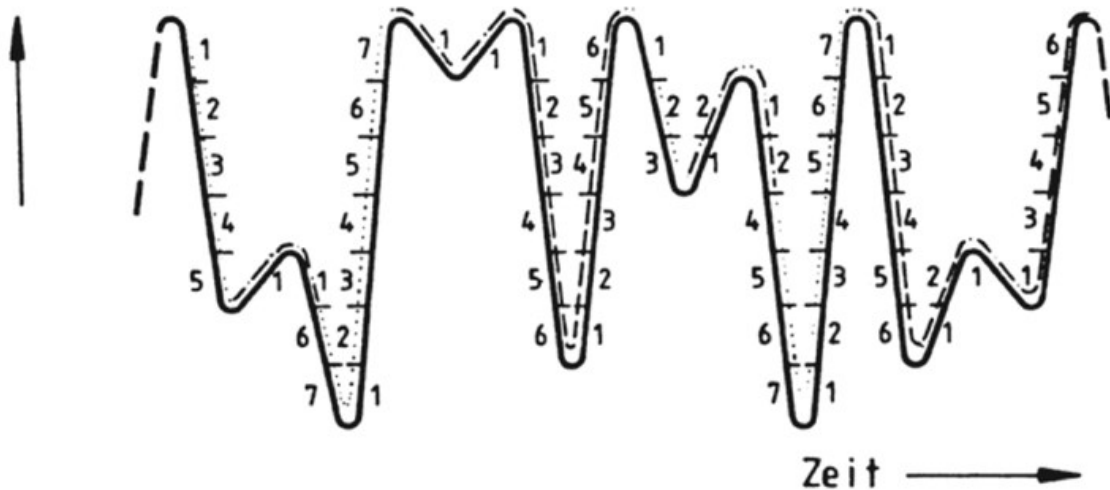


Abb. 2.20 BZF Bereichspaarzählung [2]

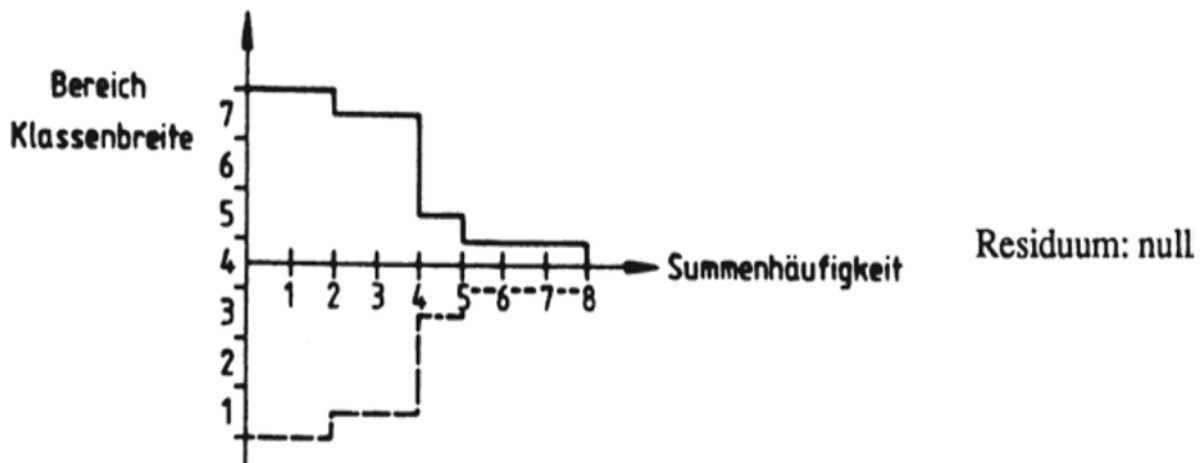


Abb. 2.21 Zählergebnis der Bereichspaarzählung [2]

2.3. Zweiparametrische Zählverfahren

Im Weiteren werden die vier zweiparametrische Verfahren Bereichs-Mittelwert-Zählung (BMZ), Von-Bis-Zählung (VBZ), Bereichspaar-Mittelwert-Zählung (BPMZ) und Regenfluss-Zählung (RFZ) genauer beschrieben. Die Ergebnisse werden normalerweise in einer Matrix gespeichert. [2]

2.3.1. Bereichs-Mittelwert-Zählung BMZ

2.3.1.1. Beschreibung des Verfahrens

In Erweiterung der einparametrischen Bereichszählung wird der jeweilige Mittelwert bei der BMZ (range mean counting) mitgezählt (Abb. 2.22). Die BMZ wird üblicherweise nicht mehr eingesetzt.

Vorteile:

- Das Ergebnis ist eine Häufigkeitsmatrix für Schwingbereiche und Mittelwerte (Abb. 2.23)

Nachteile:

- Der Absolutwert (Maximum, Minimum) geht verloren [2] [25]

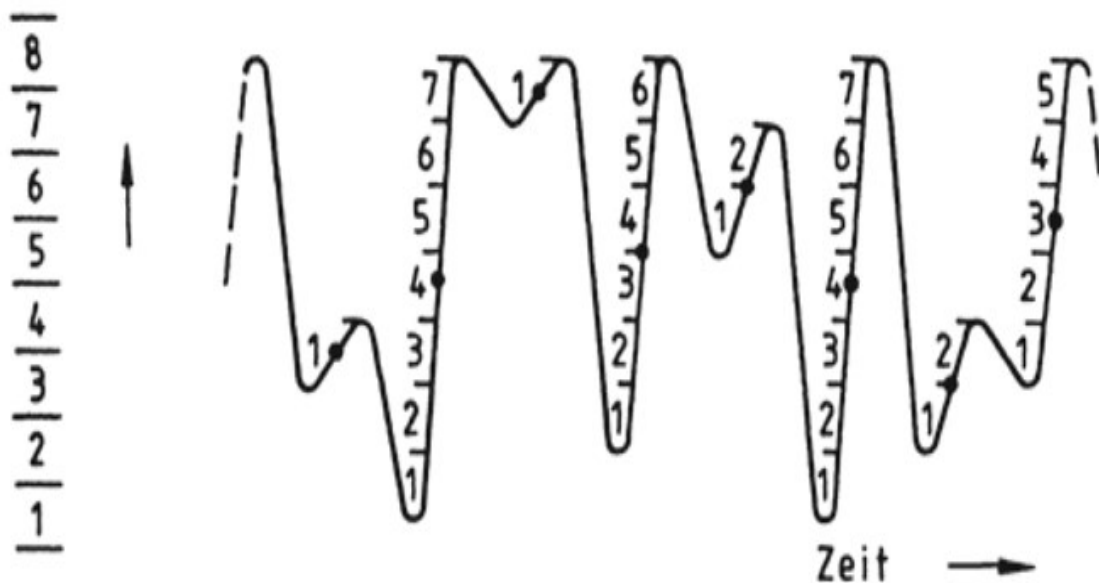


Abb. 2.22 BZF Bereichs- Mittelwert-Zählung [2]

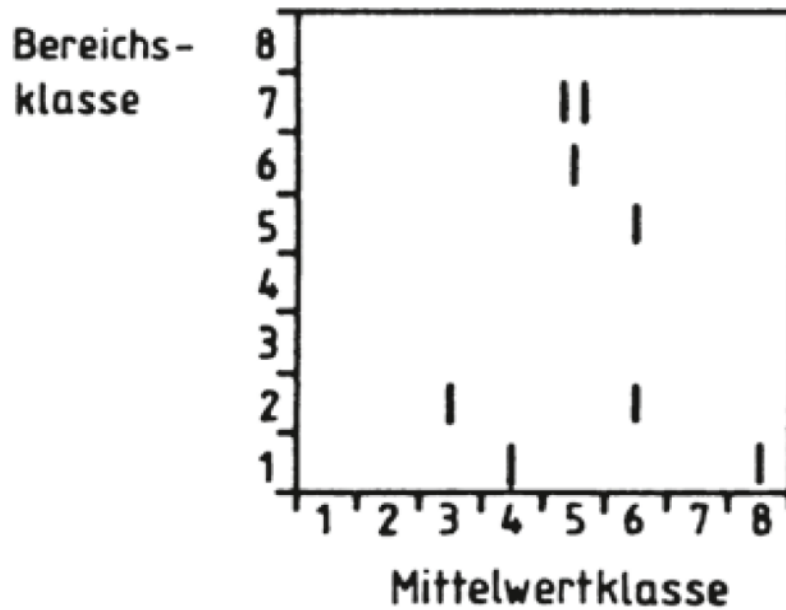


Abb. 2.23 Zählergebnis der Bereichs-Mittelwert-Zählung [2]

2.3.1.2. Beschreibung des Zählalgorithmus

Der Zählalgorithmus ist identisch zur Bereichszählung. Zusätzlich zu jedem Bereich wird die Mittellast aufgezeichnet. [2]

2.3.2. Von-Bis-Zählung VBZ

2.3.2.1. Beschreibung des Verfahrens

Übergangsmatrizen (ÜMn) sind bekannt aus Übergangswahrscheinlichkeiten Markov'scher Ketten (1906) [26]. Die Ergebnisse der VBZ (transition counting) kann man in eine ÜM, als sogenannte Von-Bis-Matrix, Transitionsmatrix (TM), Korrelationsmatrix bzw. Markov-Matrix speichern. [27]

Vorteile:

- Alle an- bzw. absteigende Flanken werden in ihrer Reihenfolge, in einer Matrix gespeichert (Abb. 2.24)
- Die Übergangsmatrix zeigt in übersichtlicher Weise wesentliche Inhalte der BZF
- Die Unregelmäßigkeit kann in einer BZF unmittelbar sichtbar gemacht werden
- Die VBZ ist sehr einfach und transparent

Nachteile:

- Die Von-Bis-Zählung ist kein sequenzielles Zählverfahren und ist daher nicht in der Lage, bei überlagerten Schwingungen eine langsamere Grundschwingung zu erkennen. Das ist für die Lebensdauerabschätzung ein deutlicher Nachteil [2] [28]

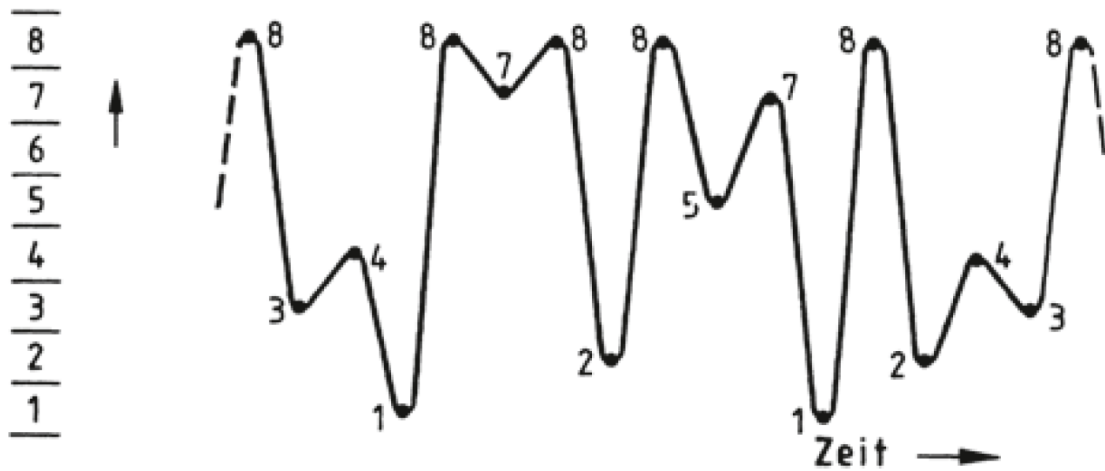


Abb. 2.24 BZF Übergangsmatrix [2]

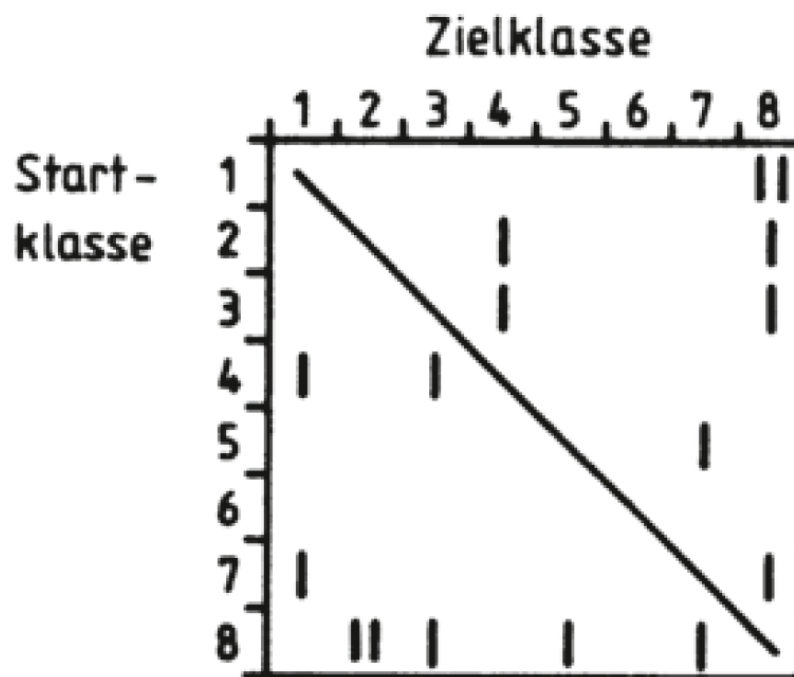


Abb. 2.25 Zählergebnis der Übergangsmatrix [2]

2.3.2.2. Beschreibung des Zählalgorithmus

Die Zählung wird von einem Extremwert aus begonnen. Der Startwert und der Zielwert werden für die zu zählende Flanke ermittelt und in die entsprechende Klasse der Ergebnismatrix eingetragen. Ansteigende

Flanken befinden sich dabei an der Oberseite der Diagonalen, absteigende an der Unterseite. Die Diagonale ist definitionsgemäß nicht besetzt (Abb. 2.25). [2] [29] [30]

2.3.3. Bereichspaar-Mittelwert-Zählung BPMZ

2.3.3.1. Beschreibung des Verfahrens

Dieses Verfahren (range pair mean counting or range pair range counting) ist ähnlich wie BP, allerdings wird der Mittelwert hier mitgezählt. Die an- bzw. absteigenden Flanken identischer Messgrößen werden als BP gezählt. Diese an- bzw. absteigenden Flanken haben eine identische Mittelspannung (Abb. 2.26) [31]

Vorteile:

- Für eine Lebensdauerabschätzung kann die BPMZ verwendet werden. Sie führt zu gleichen oder zu nahezu gleichen Zählergebnissen wie die RFZ
- Die Darstellung kann auch als Summenhäufigkeitskurve mit einzeln getrennten Mittellasten erfolgen (Abb. 2.27) [32]

Nachteile:

- Der Absolutwert (Max, Min) geht verloren [33]

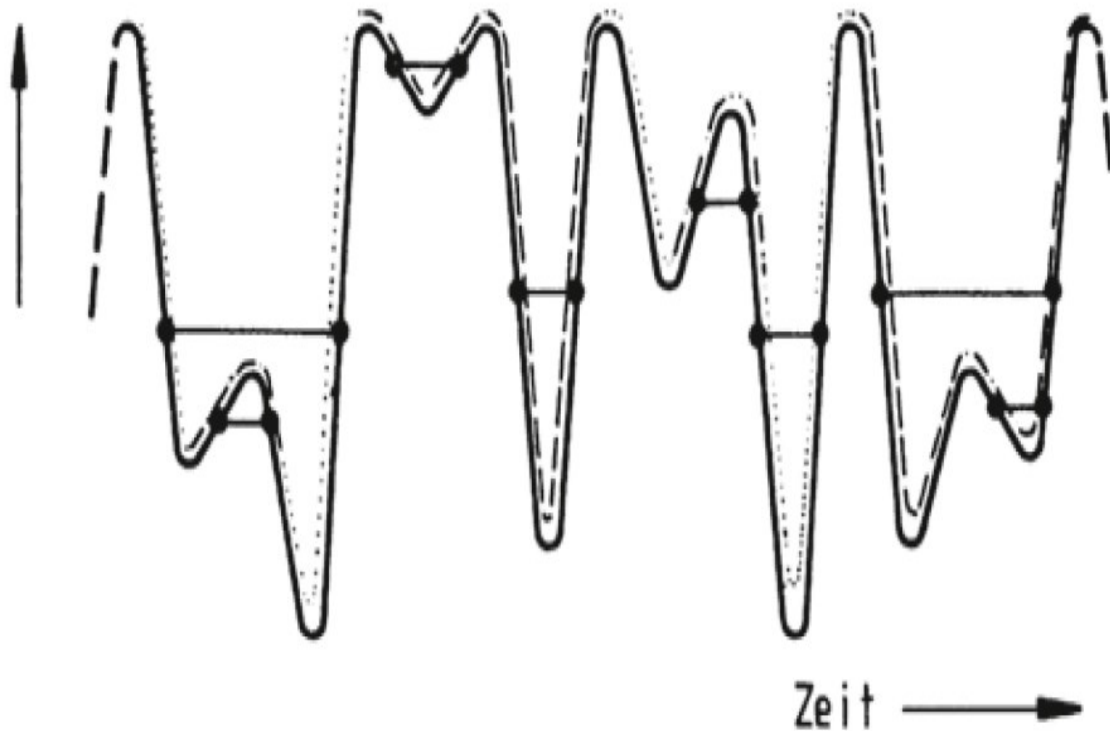


Abb. 2.26 BZF Bereichspaar- Mittelwert-Zählung [2]

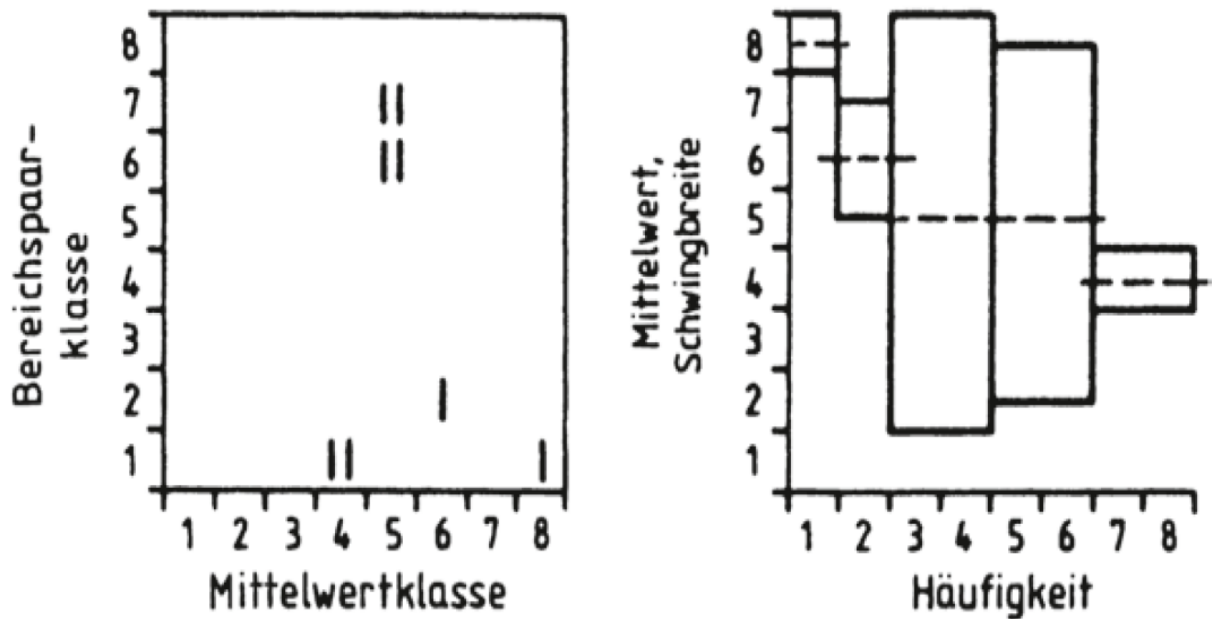


Abb. 2.27 Zählergebnis der Bereichspaar-Mittelwert-Zählung, Matrix und Häufigkeitsverteilung [2]

2.3.3.2. Beschreibung des Zählalgorithmus

Der BPMZ-Algorithmus ist sehr ähnlich wie die BP-Zählung. Jede Amplitude wird der entsprechenden Mittellast zugeordnet (Abb. 2.27). [2] [34] [35]

2.3.4. Rainflow-Zählung RFZ

2.3.4.1. Beschreibung des Verfahrens

Die Maxima und Minima werden bei der RFZ (rain flow counting) nicht in regelmäßiger Folge wie bei der ÜM gezählt. Der Algorithmus ist so gewählt, dass jeweils geschlossene Hysteresen (volle Zyklen) erfasst werden. Nichtgeschlossene Hysteresen (halbe Zyklen) werden als Residuum abgelegt (Abb. 2.28). RF-Zählergebnisse werden in Matrizen eingetragen. Die RFZ ist das für die Lebensdauerberechnung am Besten geeignete Verfahren. [36] [37] [38]

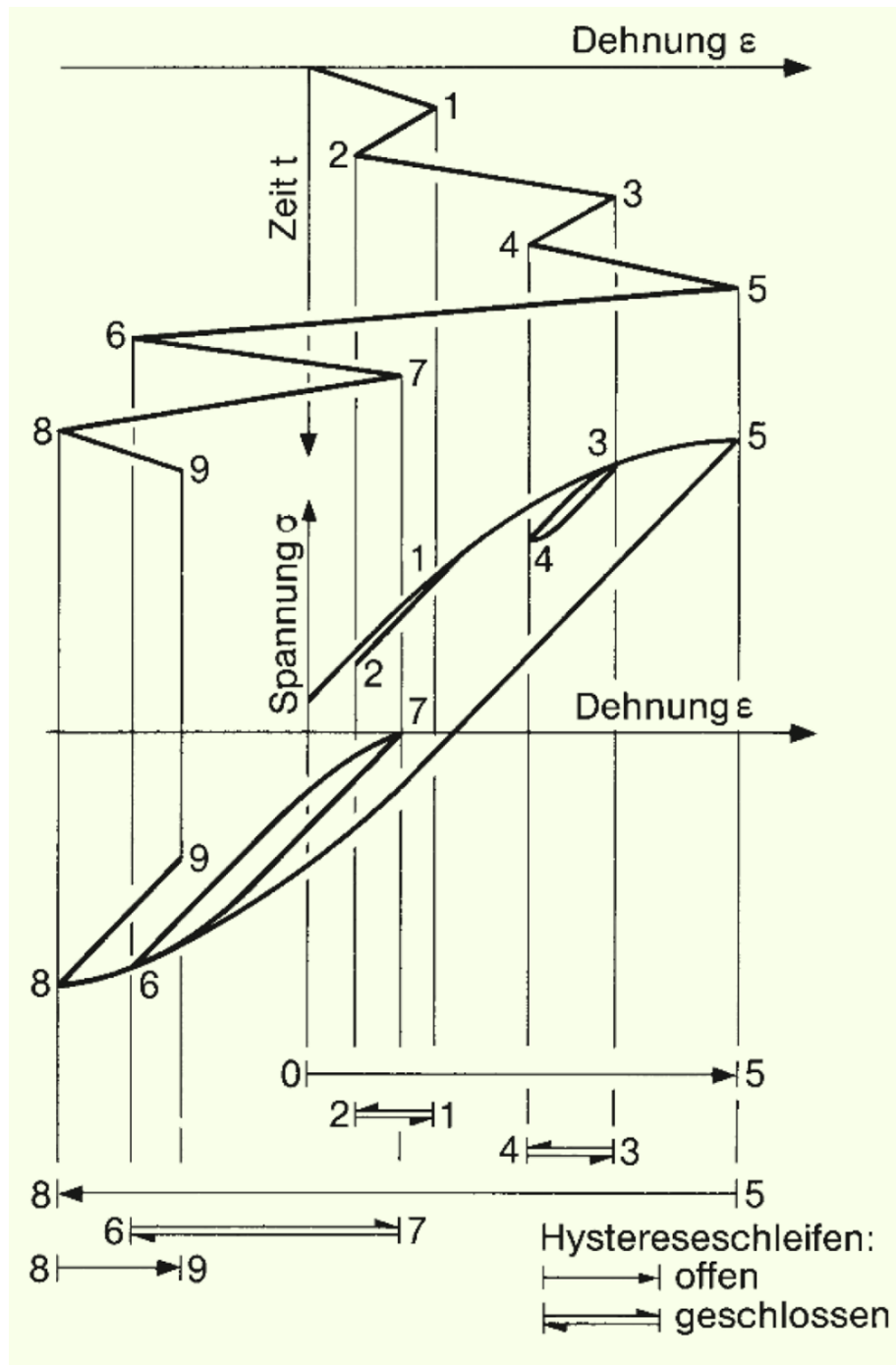


Abb. 2.28 RFZ, Relation zwischen Dehnung- Zeit-Funktion; nach Steinhilber u. Schütz [39]

Vorteile:

- Wie beim örtlichen Konzept [40] werden auch bei der RFZ Vollzyklen betrachtet. Der Vollzyklus der Spannungs-Dehnungs-Funktion kann als Energie betrachtet werden. Diese Energie wird von einem Werkstoffelement während eines Schwingenspiels aufgenommen [41]
- Die Rainflow-Matrix ist geeignet, Manipulationen wie Amplitudenunterdrückung (Omission) oder das Abschneiden von hohen Beanspruchungen (Truncation) in einfacher Weise durchzuführen

- Amplitudenunterdrückung wird zum Löschen nicht schädigender Zyklen mit kleiner Schwingsamplituden verwendet [42]
- Aus der RF-Matrix können andere Zählverfahren wie BPZ, KGÜZ, SZ und der Unregelmäßigkeitsfaktor abgeleitet werden [42]
- Die RFZ wird nicht für das elastisch-plastische Materialverhalten verwendet
- Es kann eine Abfolgeinformation über an- bzw. absteigende Zyklen ermittelt werden
- Die RFZ bietet durch die Ablage der Zyklen nach Schwingbreite und Mittelwert die Möglichkeit, bei der Lebensdauerberechnung den Einfluss der Mittelwerte auf die Schädigung zu berücksichtigen. Die so genannte Amplitudentransformation transformiert alle Zyklen einer RF-Matrix in schädigungsäquivalente Zyklen identischer Mittelwerte bzw. identischen Spannungsverhältnissen, hierzu ist das Haigh-Diagramm die Basis [43]

Nachteile:

- Es kann mit den verschiedenen Algorithmen, die von dem in Abb. 2.29 gezeigten Ergebnis abweichen [44]

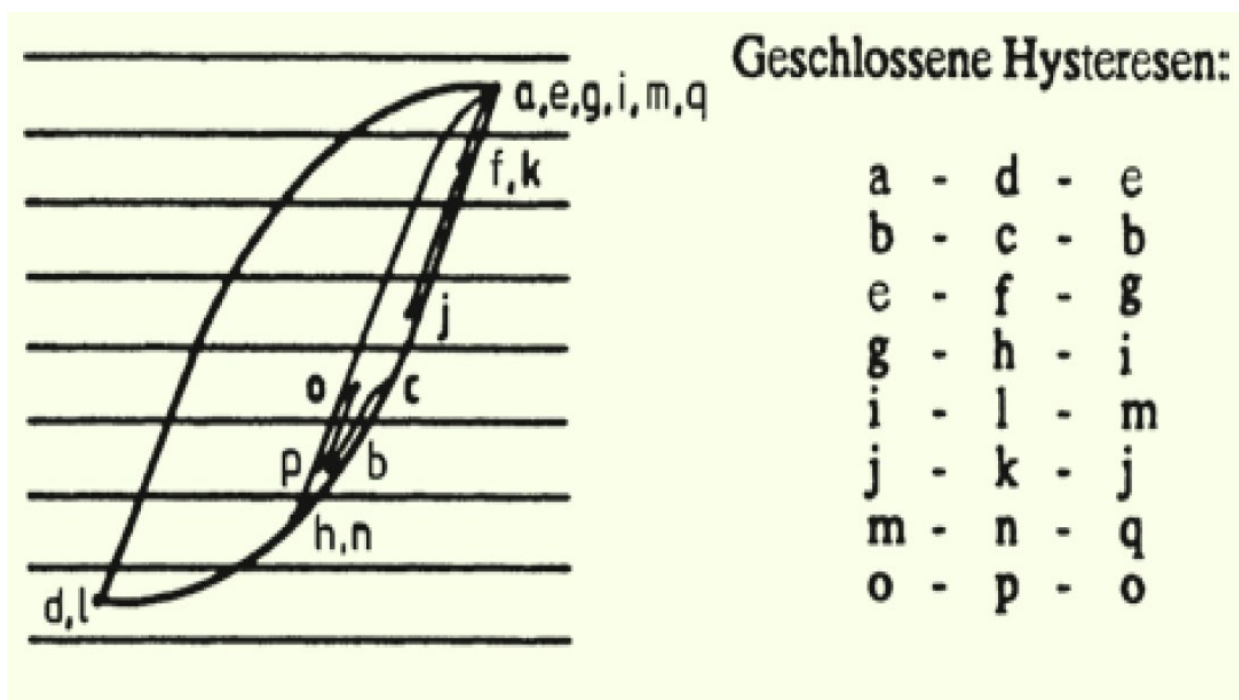


Abb. 2.29 Geschlossene Hysteresen für die Beispiel-BZF [44]

Diese Beschreibung zeigt nicht auf, dass der Erfolg des Rainflow- Zählverfahrens in der werkstoffmechanischen Analogie begründet ist. Die Betrachtung des Spannungs-Dehnungs-Verlaufs nach dem örtlichen Konzept ist besser geeignet für Veranschaulichungen. Abb. 2.29 zeigt, dass sich an- und absteigende Spannungs-Dehnungs-Zyklen ergeben, die sich innerhalb der durch die Maxima erzeugten Zyklen befinden. [2] [44]

2.3.4.2. Beschreibung des Zählalgorithmus

Für die Rainflow-Zählung gibt es verschiedene Algorithmen. In Abb. 2.30 ist die ursprünglich gewählte Form des „Regenfließens“ dargestellt, wobei man sich die Zeitachse um 90° im Uhrzeigersinn gedreht vorstellen muss. Über die Seiten kommt Wasser, das von einem Extremwert zum Nächsten fließt.

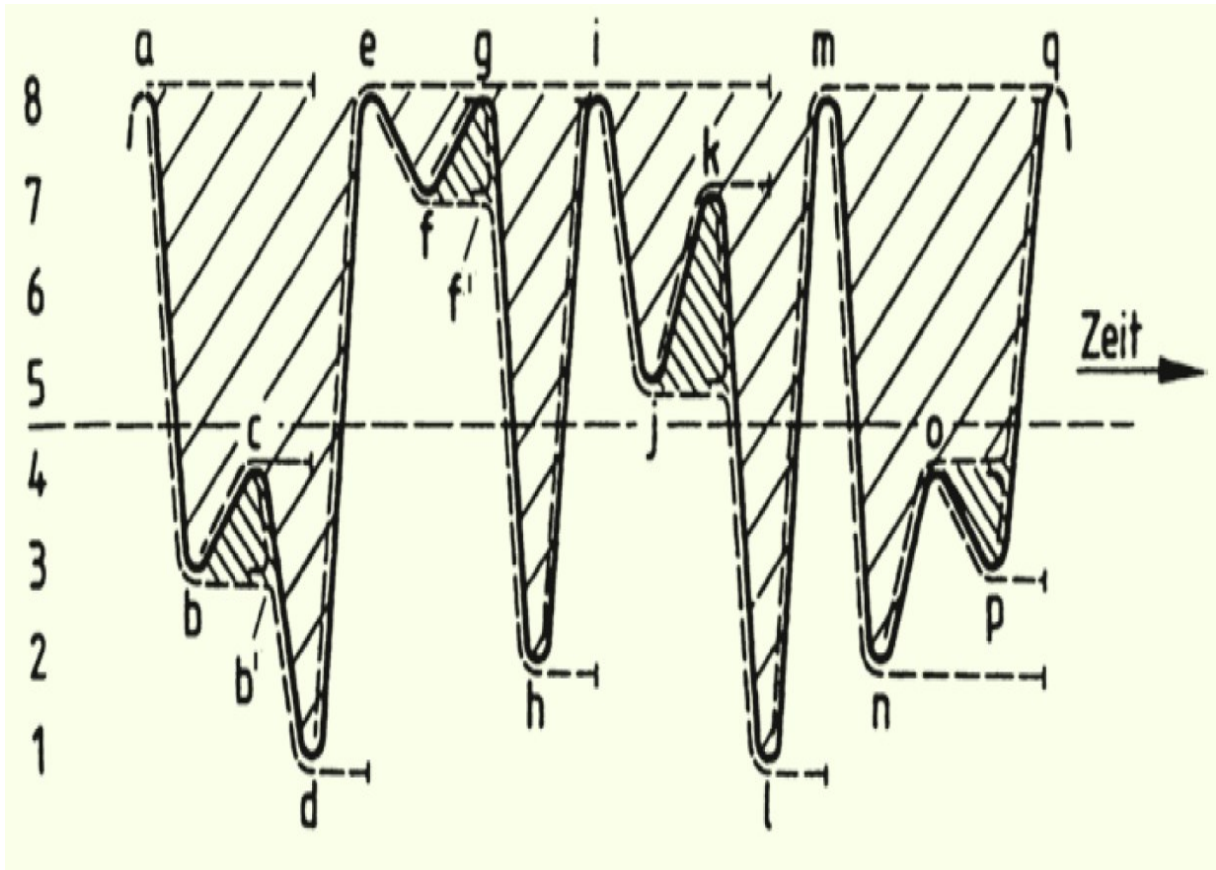


Abb. 2.30 BZF-Rainflow [36]

Es gelten folgende Bedingungen:

- Das Wasser tropft von Spitzen abwärts, beispielweise von b auf die Gerade c-d oder von f auf die Gerade g-h. Halbzyklen werden gefüllt, wenn das Wasser nach unten fließt und eine neue Spitze kommt (beispielweise Bereich a-b, b-c bzw. f-g) bzw. wenn das Wasser an den Auftreffpunkt des Wassers kommt, das von einer darüber sitzende Spitze tropft (beispielweise Bereich c-b' und g-f)
- Aus zwei Halbzyklen derselben Schwingbreite und derselben Lage (Maximum, Minimum) werden Vollzyklen gebildet, z. B. die schraffierten Flächen a-d-e, b-c-b', f-g-f', e-h-i.

Der Regenwasserfluss wird nach Maddox [45] in Abb. 2.31 erläutert. „RainFlow“ starten an jedem positiven bzw. negativen Extremwert der BZF. Sie bewegen sich geneigt abfallend in negativer oder positiver

Richtung, bis sie auf die entgegengerichtete Spitze trifft, um von hier vertikal auf das darunterliegende „Dach“ zu fallen und dann weiterzufließen. [4] [45]

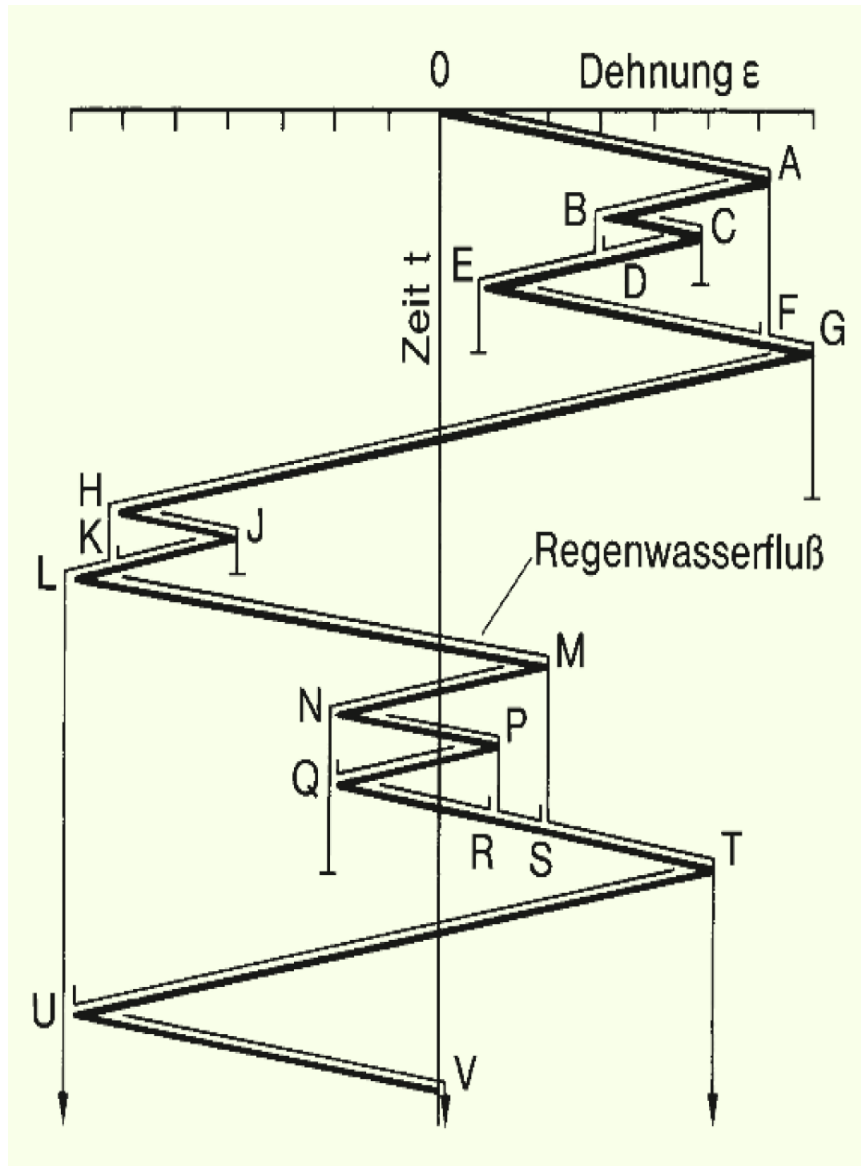


Abb. 2.31 Rainflow-Zählung, Regenwasserflüsse zwischen Ausgangs- und Endpunkt; nach Maddox [45].

In der Vergangenheit wurden verschiedene Algorithmen zur Erkennung von Vollzyklen vorgeschlagen. In der Regel unterscheidet man zwischen so genannten Drei- und Vier-Punkt-Algorithmen. Jeweils drei bzw. vier aufeinander folgende Extremwerte werden bezüglich der Bildung geschlossener Hysteresen untersucht (Abb. 2.32).

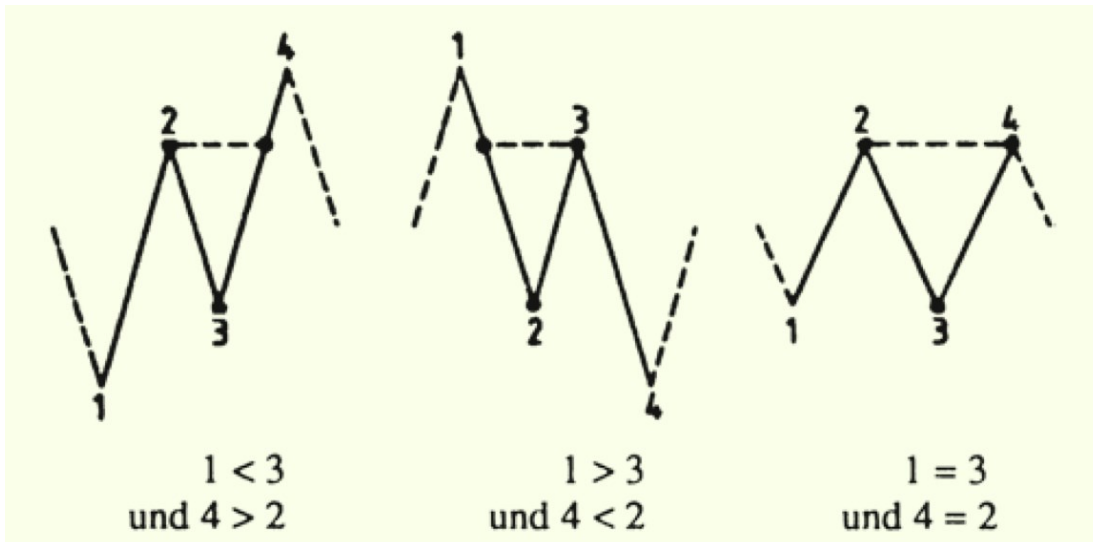


Abb. 2.32 Logik des Vierpunktalgorithmus zur Erkennung geschlossener Hysteresen [2]

In der Behandlung von Residuen unterscheiden sich die verschiedenen Algorithmen. Man unterscheidet wie Anfangs- und Endzustände des Zeitsignals bewertet werden und wie das Zählergebnis durch die Reihenfolge der Extrema beeinflusst wird. Man unterscheidet auch, ob die Methoden die Position der Spitzen, die vor der Zählung auftreten, bestimmen können, oder ob diese offengelassen werden. Umkehrpunkte können verschiedenen Zyklen zugeordnet werden. Vierpunkt-Algorithmen sind Dreipunkt-Algorithmen vorzuziehen. Eine Bewertung von Algorithmen ist jedoch nicht das Ziel der vorliegenden Arbeit.

Die hier angeführte Beispiel-BZF liefert nur geschlossene Zyklen. Man spricht von einem sogenannten Residuum, wenn Halbzyklen übrigbleiben. Die maximale Wahrscheinlichkeit von Residuen für jede Belastungs-Zeit-Funktion gewünschter Länge entspricht maximal einer ansteigenden oder hängenden Abfolge von Halbzyklen. Bei kurzen Belastungs-Zeit-Funktionen können aufgrund der Lebensdauer erhebliche Belastungen als Residuum gespeichert werden, wenn die Zyklen nicht geschlossen sind. So hat beispielweise eine gedämpfte BZF keinen einzelnen Vollzyklus, vergleichsweise „Walzstichbeanspruchung“. Man muss z. B. bei kurzen BZF bei der Lebensdauerabschätzung das Residuum berücksichtigen.

Hat die BZF eine große Anzahl von Schwingspielen (geschlossene Hysteresen), z. B. $N > 10^5$, kann man bei der Lebensdauerberechnung das Residuum in der Regel vernachlässigen. Bei kurzen BZF sollte man versuchen, den Schädigungsinhalt des Halbzykluses abzuschätzen. Diese Faktoren muss man bei der anschließenden Lebensdauerberechnung berücksichtigen. [2] [31] [46]

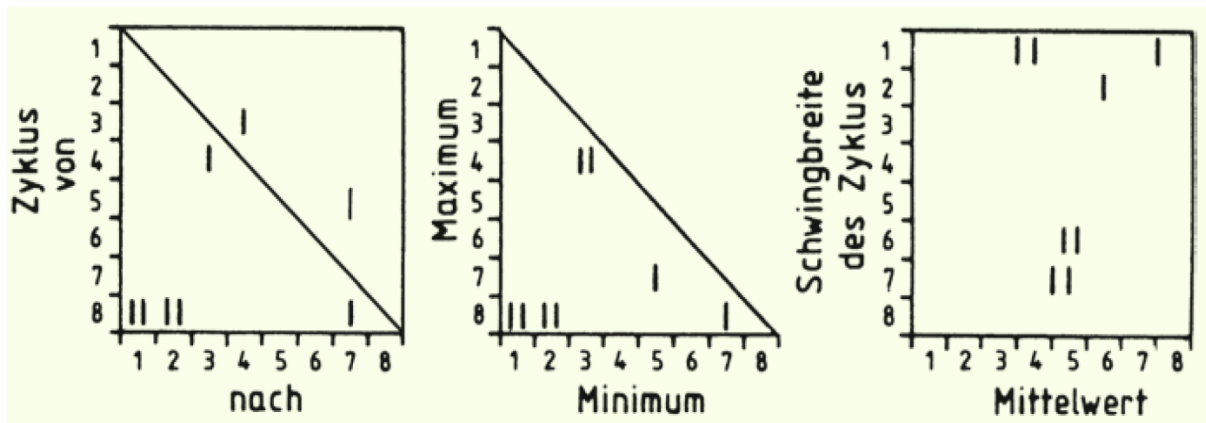


Abb. 2.33 Zählergebnis Rainflow, drei verschiedene Matrizendarstellungen [2]

Man kann das Rainflow-Zählergebnis auf verschiedene Arten in Matrizen speichern (Abb. 2.33):

- Vollmatrix, bei der die Zyklen mit ihren Maximal- und Minimalwerten der Richtung entsprechend gespeichert werden
- Halbmatrix, wobei die Halbzyklen mit ihren Extremwerten eingetragen werden. Dadurch geht jedoch die Richtungsinformation der Flanke verloren
- Vollmatrix, bei der die Zyklen mit ihren Schwingbreiten und Mittelspannungen gespeichert werden, wobei dies der BPM- Zählung entspricht. Ohne Mittelwerte ist dies dem Ergebnis der Bereichspaarzählung gleich [2]. In Richtung der Diagonalen sind Zyklen gleicher Schwingbreite (Abb. 2.34a) zu finden, während senkrecht zur Diagonalen die Zyklen gleicher Mittelwerte (Abb. 2.34b) gespeichert sind. Die Schwingbreiten und Mittelwerte erhöhen sich in Pfeilrichtung. [2] [12]

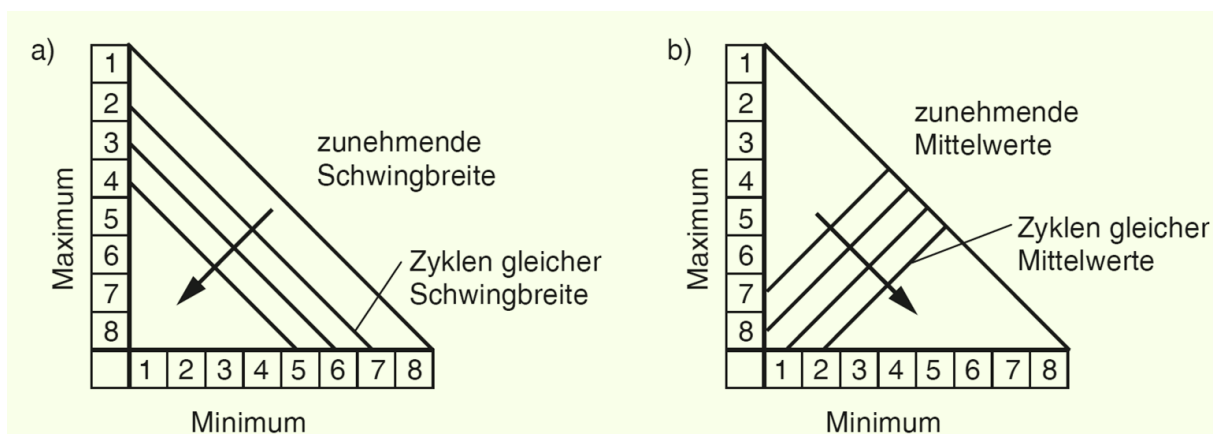


Abb. 2.34 Halbmatrizen mit schematischer Darstellung [2] [12] [44]

a) der Zyklen mit steigender Breite

b) der Zyklen mit steigendem Mittelwert

2.3.4.3. Entwicklung

Die RFZ wurde erstmals 1968 in japanischer Sprache publiziert. Seither wurden viele Veröffentlichungen über RF-Zählung publiziert. [47] [48] [49] [50] [51] [52] [53] [54]

2.3.4.4. RFZ nach dem ASTM-Standard

Nach ASTM E1049 – 85 (2017) wird jeder Halbzyklus im Residuum mit einer Häufigkeit von 0,5 und jeder Vollzyklus mit einer Häufigkeit von 1,0 in der RF-Matrix eingetragen (Abb. 2.35). [23]

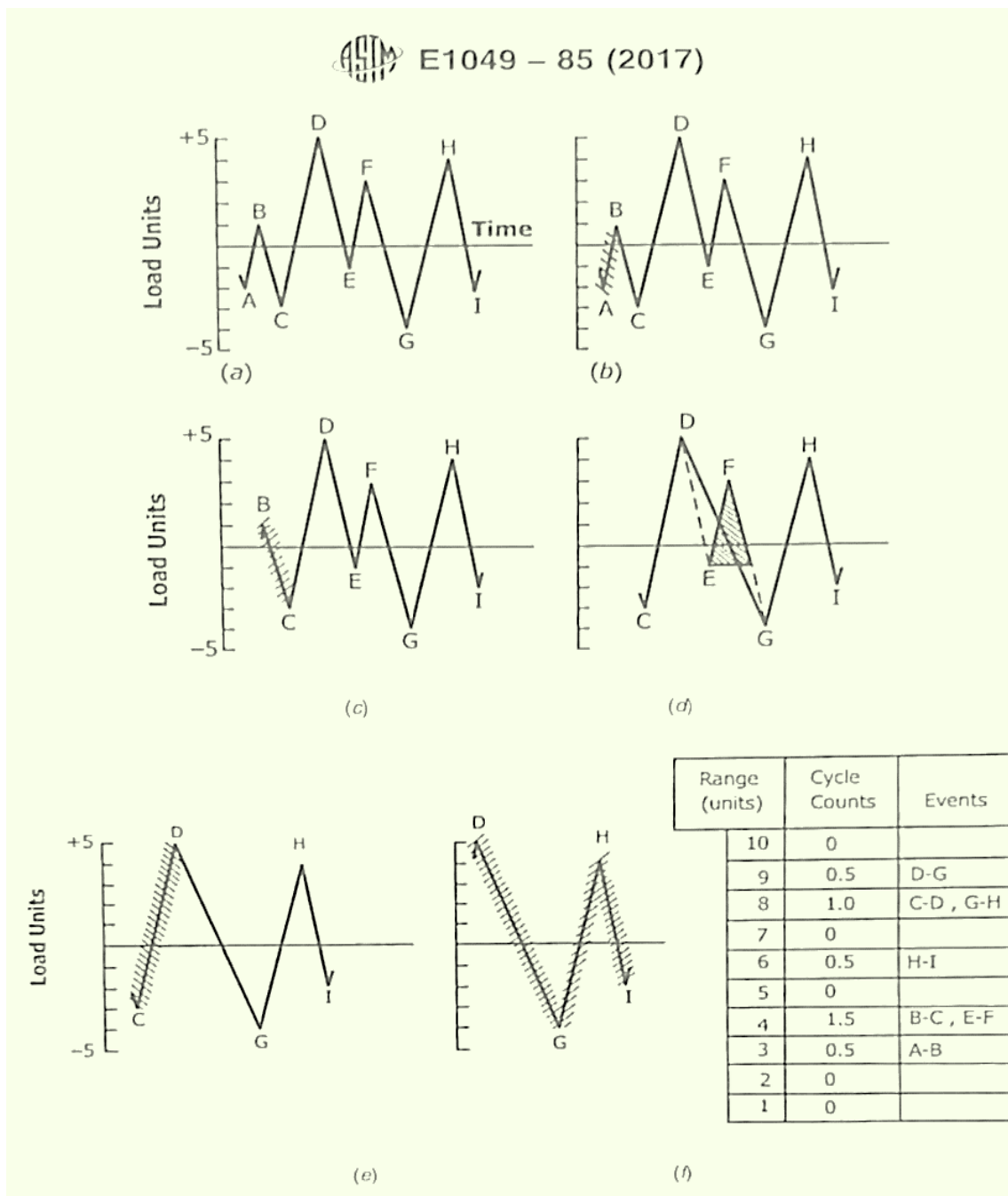


Abb. 2.35 RFZ nach dem ASTM-Standard für die Beispiel-BZF [55]

Nach ASTM E1049 – 85 (2017) kann man auch sogenannte "Vereinfachte RFZ für eine wiederholte Historie" verwenden (Abb. 2.36).

Es ist vorteilhaft anzunehmen, dass ein typisches Segment eines Lastverlaufs wiederholt angewendet wird. Sobald zum ersten Mal entweder der maximale oder der minimale Wert erreicht ist, ist die Anzahl der Entfernungspaare für jede nachfolgende Wiederholung des Verlaufs identisch. Die Anzahl der Regenflüsse ist auch für jede nachfolgende Wiederholung des Verlaufs identisch und entspricht der Anzahl der Bereichspaare. Eine solche sich wiederholende Zykluszahl enthält keine halben Zyklen, nur Vollzyklen. Jeder Zyklus entspricht dadurch einer geschlossenen Spannungs-Dehnungs-Hystereseschleife. [55]

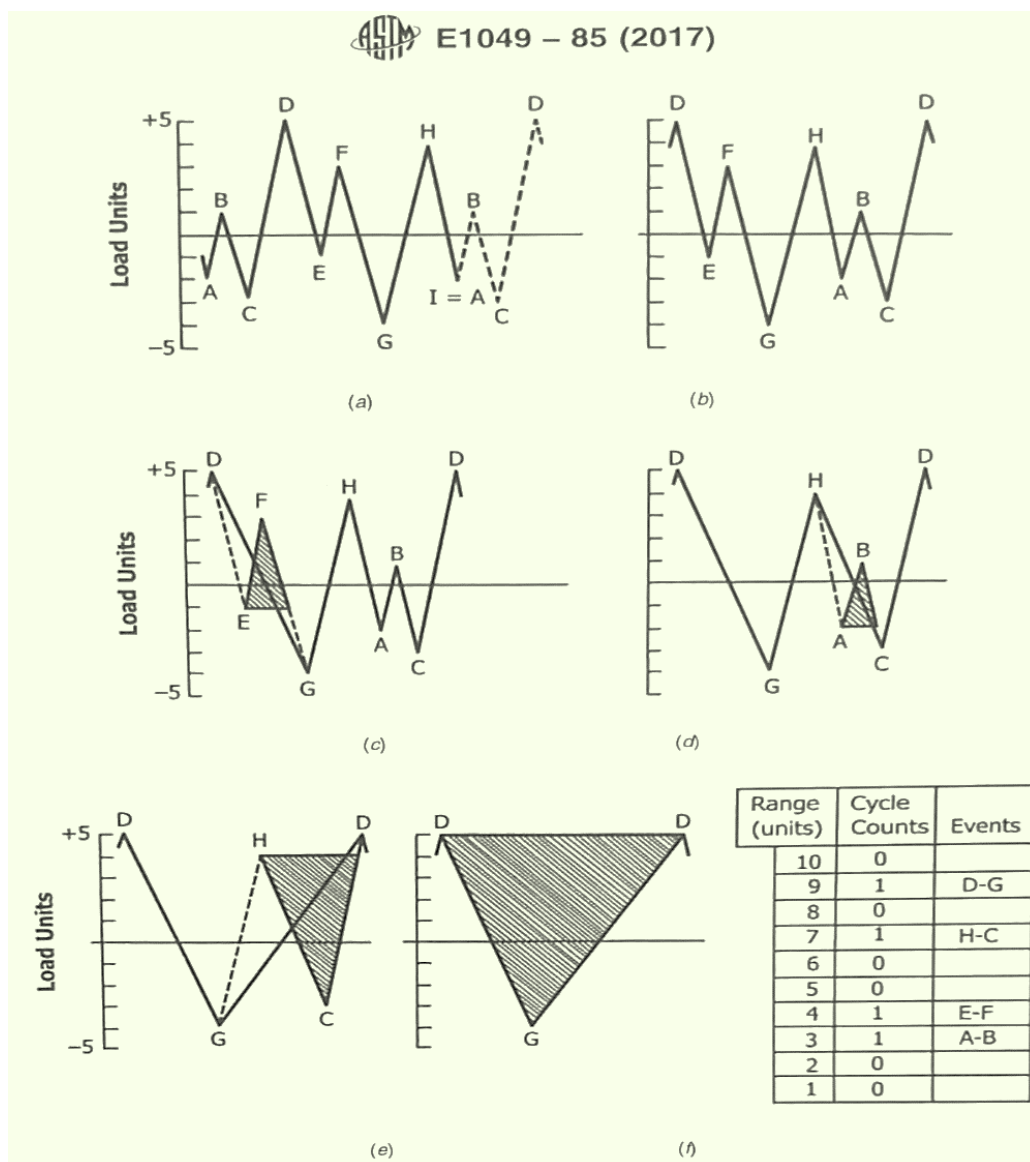


Abb. 2.36 Vereinfachte RFZ für eine wiederholte Zykluszahl nach ASTM für die Beispiel-BZF [55]

2.4. Vergleich der Zählverfahren

Wichtige Parameter für die Lebensdauerberechnung	Zählverfahren							
	SZ	KGÜZ	BZ	BPZ	BMZ	VBZ	BPMZ	RFZ
Extremewerte	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Schwingbreiten	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja
Mittelwerten	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja
Auftretensrichtung	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja
geschlossene Hysteresen	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja
Residuen	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja

Tabelle 2.1 Vergleich verschiedener Zählungsmethoden

SZ: Spitzenzählung (peak counting)

KGÜZ: Klassengrenzenüberschreitungs-zählung (level crossing counting)

BZ: Bereichszählung (range counting)

BPZ: Bereichspaarzählung (range pair counting)

BMZ: Bereichs-Mittelwert-Zählung (range mean counting)

VBZ: Von-Bis-Zählung (transition counting)

BPMZ: Bereichspaar-Mittelwert-Zählung (range pair mean counting or range pair range counting)

RFZ: Rainflow-Zählung bzw. Pagodendach- und Regenfluss-Verfahren (rain flow counting)

In Kapitel Zwei wurden verschiedene Zählverfahren untersucht, wobei die daraus resultierenden Ergebnisse in Tabelle 2.1 zusammengefasst sind. Wie in dieser Tabelle zu sehen ist, kann das Rainflow-Zählverfahren (RFZ) alle wichtigen und notwendigen Parameter wie Extremwerte, Schwingbreiten, Mittelwerte, Auftretensrichtungen, sowie geschlossene und offene Zyklen ermitteln.

3. Auswahl und Aufbereitung einer repräsentativen RFZ

3.1. Auswahl einer repräsentativen RFZ

In vielen Fällen werden Maschinen mit Momenten und Kräften gleichzeitig, In-phase und Out-phase, regellos aperiodisch und mit variablen Mittelwerten belastet (Abb. 3.1)

Die zeitlichen Kurvenverläufe zeigen Walzkräfte und Momente einer Walzstrecke und wurden für die Verifizierung der Rainflow Klassifizierung



Abb. 3.1 BZF einer Walzstrecke

Die Ermittlung der Schwingbreite und der Mittelwerte sind wesentlich für die Lebensdauerberechnung jeder Belastung. Auch die Ermittlung der Extremwerte und die stehenden bzw. hängenden Flanken sind für eine bessere Wahrnehmung der BZF wichtig.

3.2. Aufbereitung einer repräsentativen RFZ

Für die Erstellung des Programms der Rainflow-Zählung wurde das Flussdiagramm in Abb. 3.2 als Grundlage verwendet.

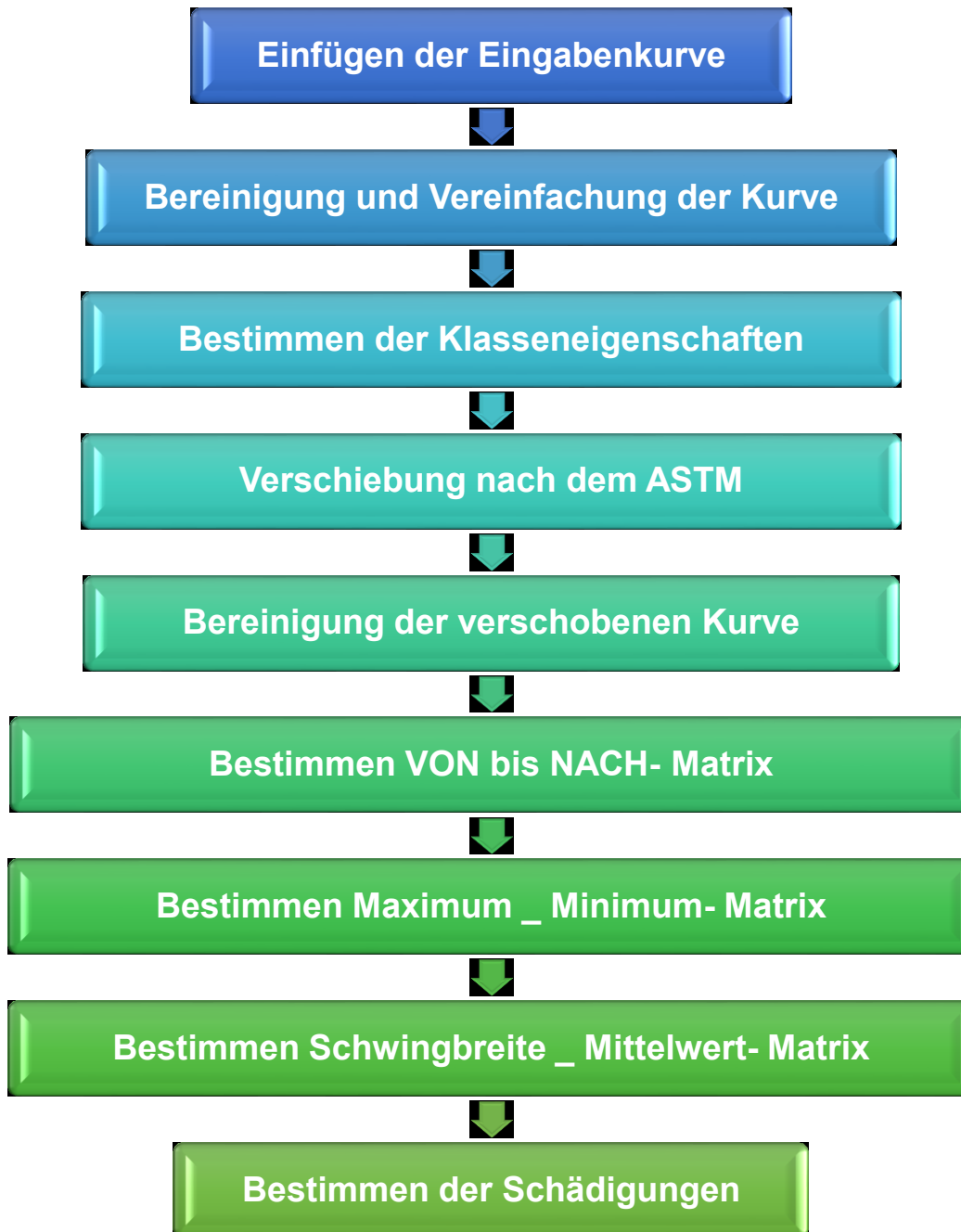


Abb. 3.2 Flussdiagramm des Programms

Die Programmierung des Programms erfolgt in Mathcad Version 14.

3.2.1. Einfügen der Eingabenkurve

Wenn die ausgewählte Belastungs-Zeit-Funktion mehrmals, z.B. 10^5 mal (zyklischer Kurvenverlauf), wiederholt wird, entspricht der erste Wert dem letzten Wert (Abb. 3.3).

	A
1	550
2	950
3	650
4	850
5	550
6	850
7	250
8	650
9	550
10	1141
11	750
12	850
13	450
14	750
15	550
16	650
17	450
18	550
19	150
20	750
21	650
22	550

Abb. 3.3 Ausgewählte wiederholte Belastungen

Man kann die Dateien, welche in einer Spalte in csv-Format gespeichert wurden, als Eingabe im Mathcad-Programm einfügen.

3.2.2. Bereinigung und Vereinfachung der Kurve

Im Folgenden werden zwei verschiedene Fälle, welche keinen maßgeblichen Einfluss auf die Schädigung haben und daher entfernt werden können, gezeigt.

3.2.2.1. Entfernung von Belastungen zwischen den Extremwerten

Die Belastungswerte zwischen den Extremwerten verringern die Berechnungsgeschwindigkeit und haben auch keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Rainflow-Zählung. Deswegen werden diese unnötige Werte mit Hilfe des Mathcad-Programms gelöscht. Die Bereinigung wird zur besseren Verständlichkeit in der folgenden Abbildung gegübertgestellt (Abb. 3.4).

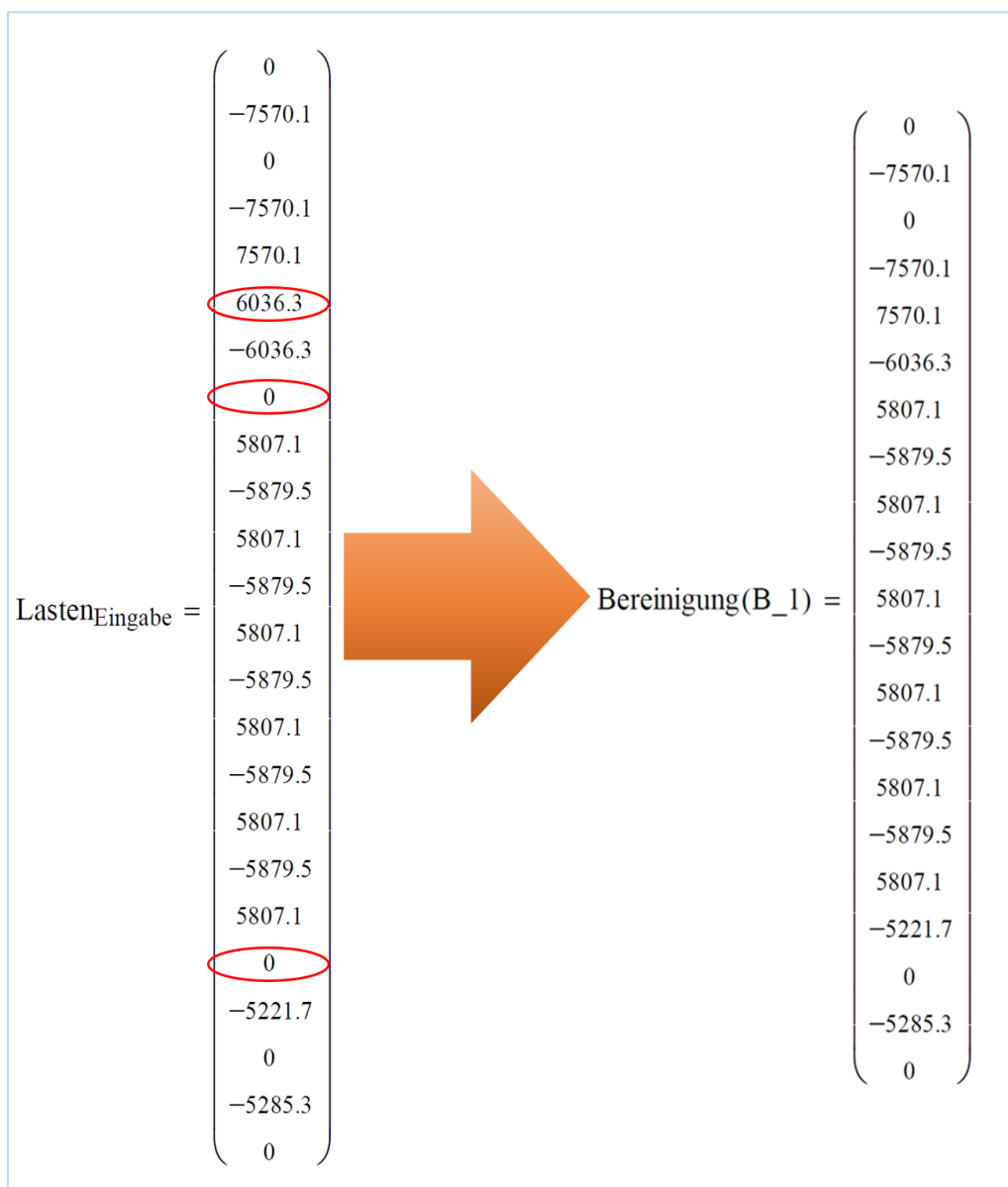


Abb. 3.4 Löschen der Belastungen zwischen den Extremwerten im Mathcad-Programm

3.2.2.2. Entfernung kleiner Schwingbreiten

Da eine große Anzahl von Schwingbreiten die Berechnungsgeschwindigkeit verringert und auch keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Rainflow-Zählung hat, werden sehr kleine Schwingbreiten, beispielsweise wie in Abb. 3.5 alle Schwingbreiten $< \left(\frac{1}{1000}\right) \cdot (\text{Max} - \text{Min})_{\text{Eingabe}}$, entfernt. Dabei wird eine beliebige Toleranz als Eingabe im Mathcad-Programm bestimmt, wodurch alle kleineren Schwingbreiten gelöscht werden.

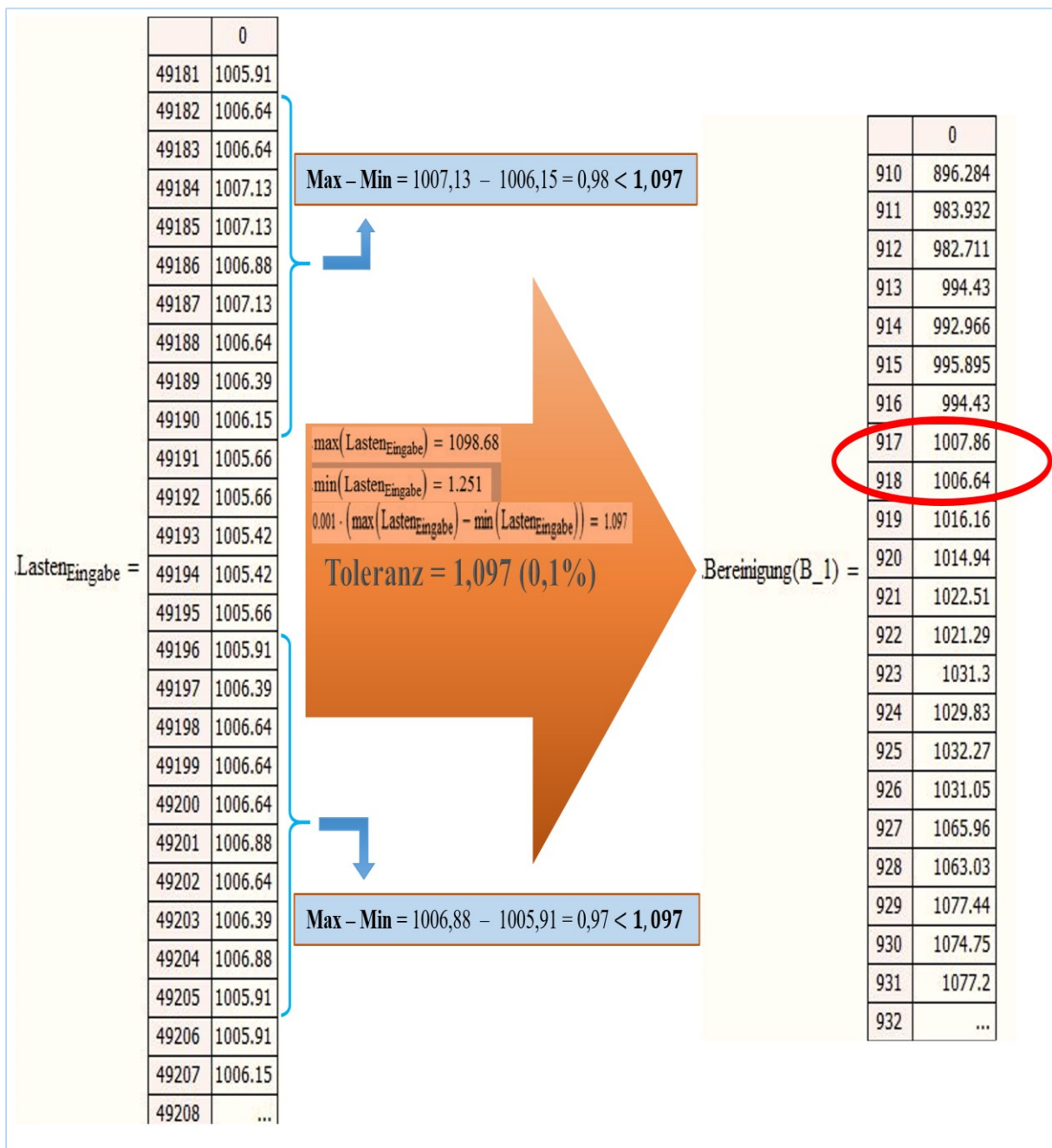


Abb. 3.5 Löschen der kleinen Schwingbreiten im Mathcad-Programm

3.2.3. Bestimmen der Klassenzahl

- Auswahl der Klassenzahl als Eingabewert, wobei die Klassenzahl die Unterteilung zwischen Maximum und Minimum angibt
- Klassenbreite, Klassengrenze und Schwingbreitenklassenwerte werden in Abb. 3.6 durch entsprechende Formeln definiert und anhand eines Beispiels erklärt

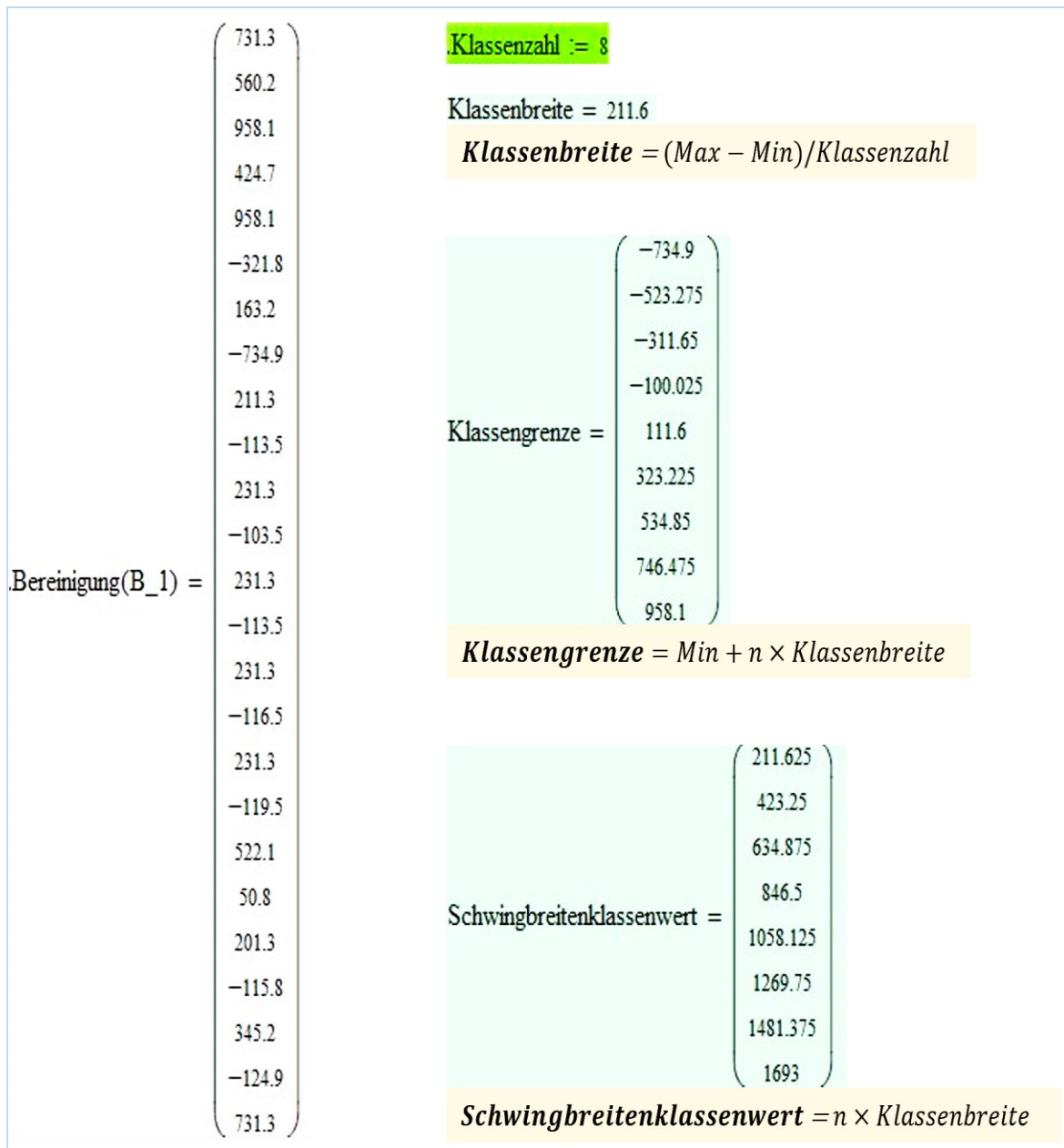


Abb. 3.6 Formeln und Beispiel für die Klasseneigenschaften im Mathcad-Programm

3.2.4. Verschiebung der Kurve nach ASTM Norm

Im Folgenden wird die Verschiebung (Maximum bis Maximum) nach Kapitel 2.3.4.3 (ASTM E1049 – 85 (2017)) [55] für die wiederholten Zyklen gezeigt.

Ob der Maximalwert oder der Minimumwert an die erste bzw. letzte Position der BZF verschoben wird, ist für das Ergebnis der Rainflow- Zählung unerheblich, da in beiden Fällen die wiederholten Zyklen kein Residuum enthalten.

Für die Verschiebung wird die bereinigte BZF in zwei Teile unterteilt, wobei der Teil vom Maximalwert bis zum Ende nach oben und der Teil vom Anfang bis zum Maximalwert nach unten verschoben wird. (Abb. 3.7)

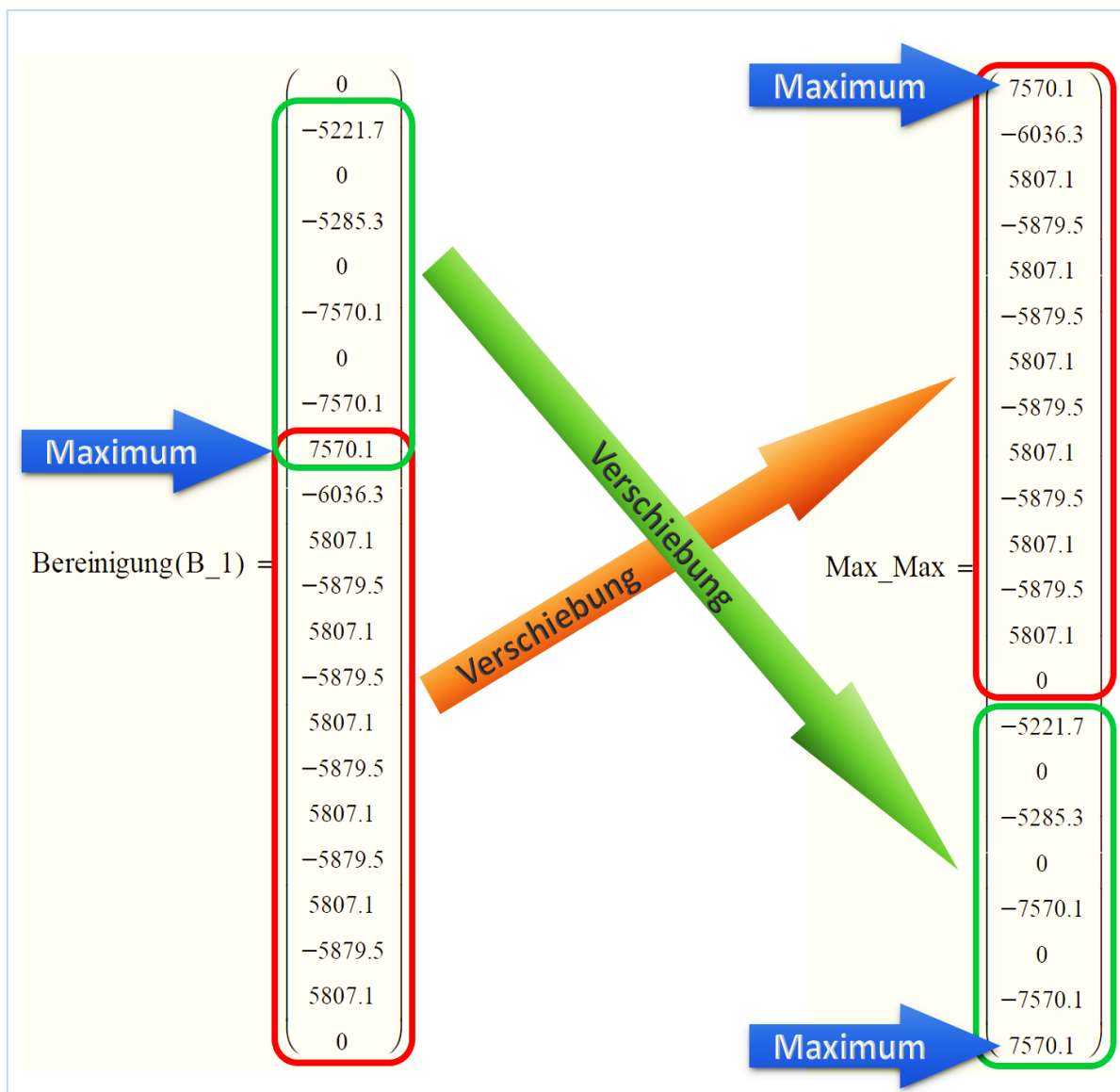


Abb. 3.7 Verschiebung nach ASTM E1049 – 85 (2017) im Mathcad-Programm

3.2.5. Bereinigung der verschobenen Kurve

In einigen Fällen kann es vorkommen, dass sich durch die Verschiebung ein Wert an einer Position befindet, an dem er keinen Umkehrpunkt mehr darstellt. Daher werden diese Werte nach der Verschiebung noch einmal bereinigt (Abb. 3.8).

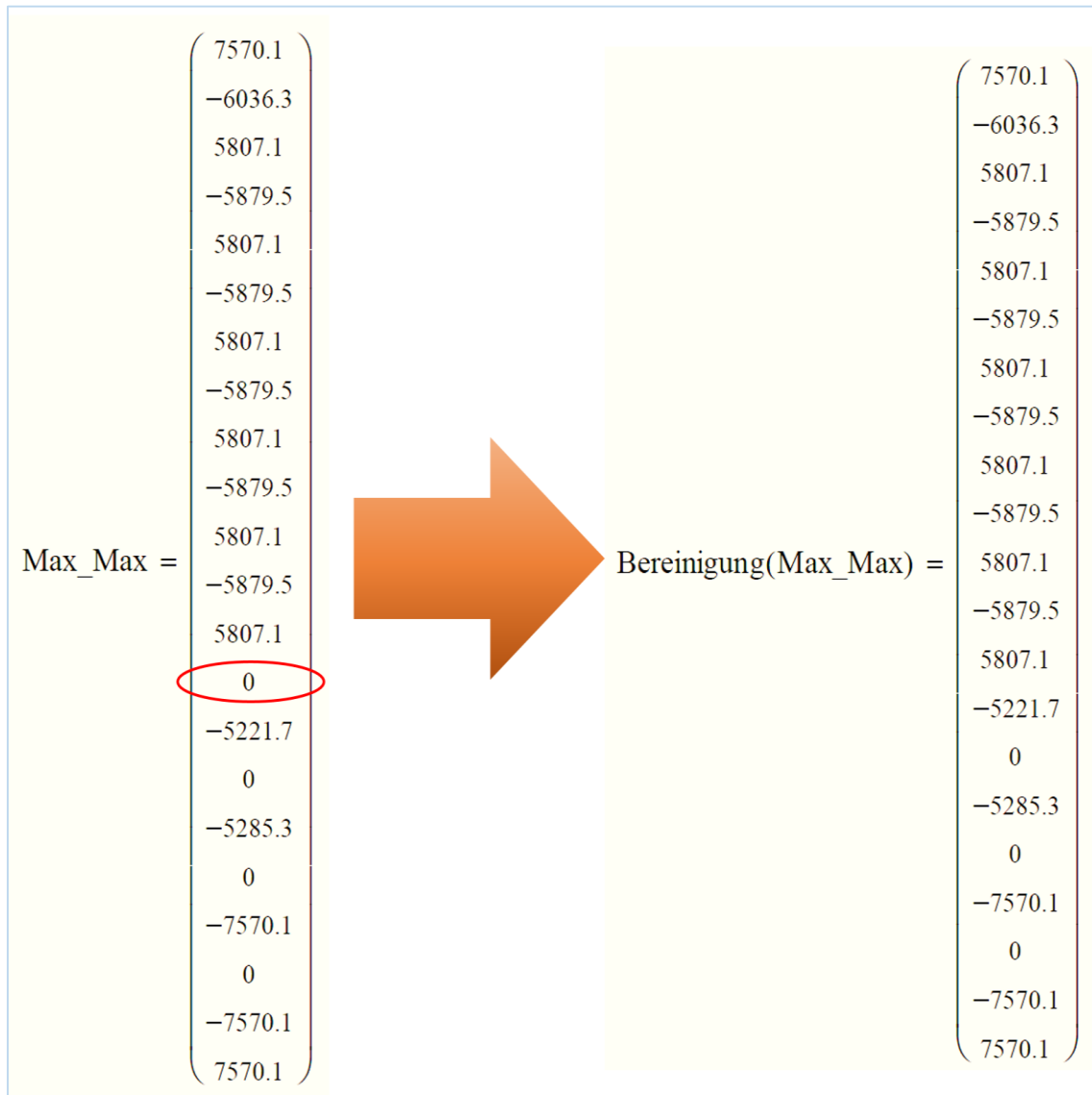


Abb. 3.8 Löschen der Belastungen, welche keine Umkehrpunkte sind

3.2.6. Bestimmung der VON_NACH-Matrix

Der wichtigste Schritt des Flussdiagramms ist die Erstellung der Von_Nach-Matrix mit dem Regenfluss-Zählungsverfahren, welches in Kapitel 2.3.4 beschrieben wurde. Es wird sowohl für die original bereinigte als auch für die verschobene bereinigte Kurve eine Von_Nach-Matrix erstellt, damit diese beiden Kurven miteinander verglichen werden können (Abb. 3.9 und Abb. 3.10).

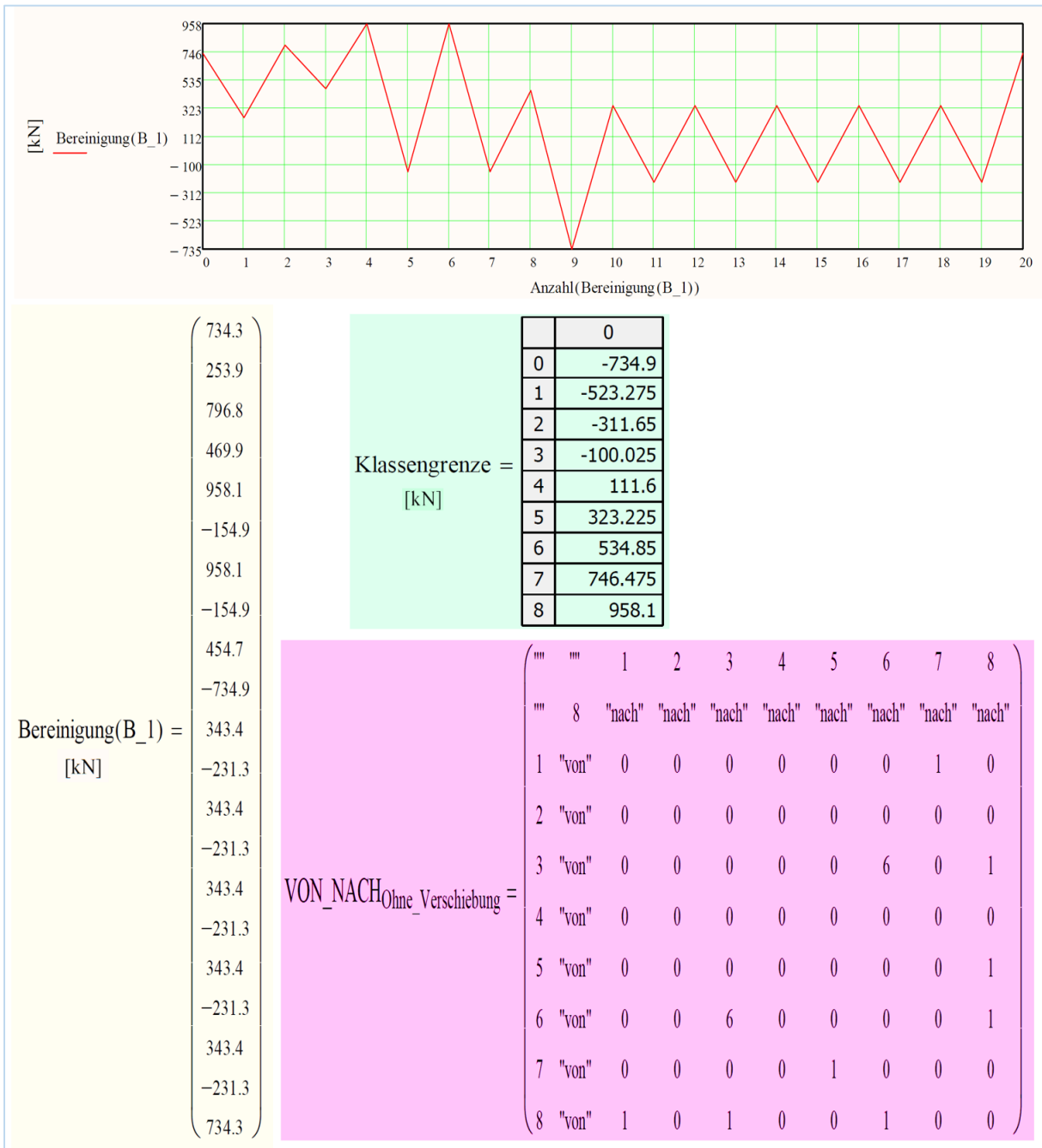


Abb. 3.9 Beispiel der Von_Nach-Matrix (pinke Tabelle) einer originalen bereinigten BZF (linke Tabelle) mit dargestellter Kurve und Klassengrenze (grüne Tabelle) im Mathcad-Programm



Abb. 3.10 Beispiel der Von_Nach-Matrix (pinke Tabelle) einer verschobenen bereinigten BZF (linke Tabelle) mit dargestellter Kurve und Klassengrenze (grüne Tabelle) im Mathcad-Programm

3.2.7. Bestimmung der Maximum_Minimum-Matrix

Aus der VON_NACH-Matrix wird die Maximum_Minimum-Matrix abgeleitet. In diesen Matrizen hat jeder Vollzyklus einen Beitrag 1 und jeder Halbzyklus (Residuum) einen Beitrag 0,5.

Zum Vergleich der Einwirkung der Residuen einer ausgewählten Kurve auf die Schädigung erfolgt die Berechnung für die originale Kurve sowohl mit als auch ohne Residuen (Abb. 3.11).

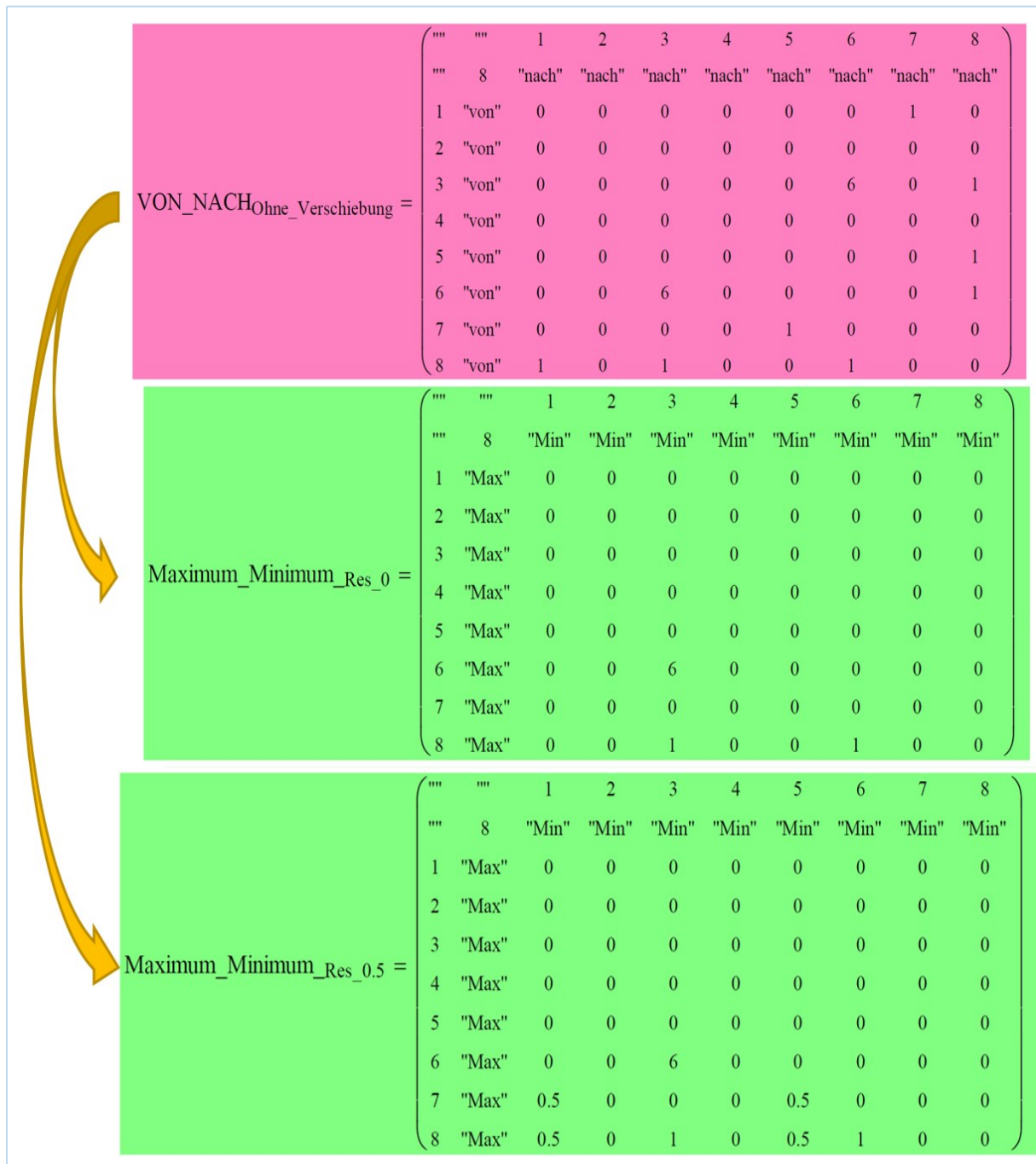



Abb. 3.11 Erstellung der Maximum_Minimum-Matrix (grüne Tabellen) für die originale bereinigte BZF im Mathcad-Programm

Die verschobene bereinigte Kurve (Max_Max) hat kein Residuum (Halbzyklus), daher sind alle Zyklen geschlossene Hysteresen (Abb. 3.12).

VON_NACH _{Max_Max} =	""	""	1	2	3	4	5	6	7	8
	""	8	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"
	1	"von"	0	0	0	0	0	0	0	1
	2	"von"	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	"von"	0	0	0	0	0	6	0	1
	4	"von"	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	"von"	0	0	0	0	0	0	1	0
	6	"von"	0	0	6	0	0	0	0	1
	7	"von"	0	0	0	0	1	0	0	0
	8	"von"	1	0	1	0	0	1	0	0



Maximum_Minimum_Max_Max =	""	""	1	2	3	4	5	6	7	8
	""	8	"Min"	"Min"	"Min"	"Min"	"Min"	"Min"	"Min"	"Min"
	1	"Max"	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	"Max"	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	"Max"	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	"Max"	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	"Max"	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	"Max"	0	0	6	0	0	0	0	0
	7	"Max"	0	0	0	0	1	0	0	0
	8	"Max"	1	0	1	0	0	1	0	0

Abb. 3.12 Erstellung der Maximum_Minimum-Matrix (grüne Tabelle) für die verschobene bereinigte BZF im Mathcad-Programm

3.2.8. Bestimmung der Schwingbreite_Mittelwert-Matrix

Zur Erstellung der Schwingbreite_Mittelwert-Matrix wird zuerst die Zeilen- und Spaltenzahl jedes Wertes in die Maximum_Minimum-Matrix nach der in Abb. 3.13 gezeigten Formeln konvertiert. Anschließend wird der bezogene Wert mit der neuen Zeilen- und Spaltenzahl ersetzt. Als Beispiel ist in Abb. 3.13 ein schematischer Erstellungsablauf dargestellt.

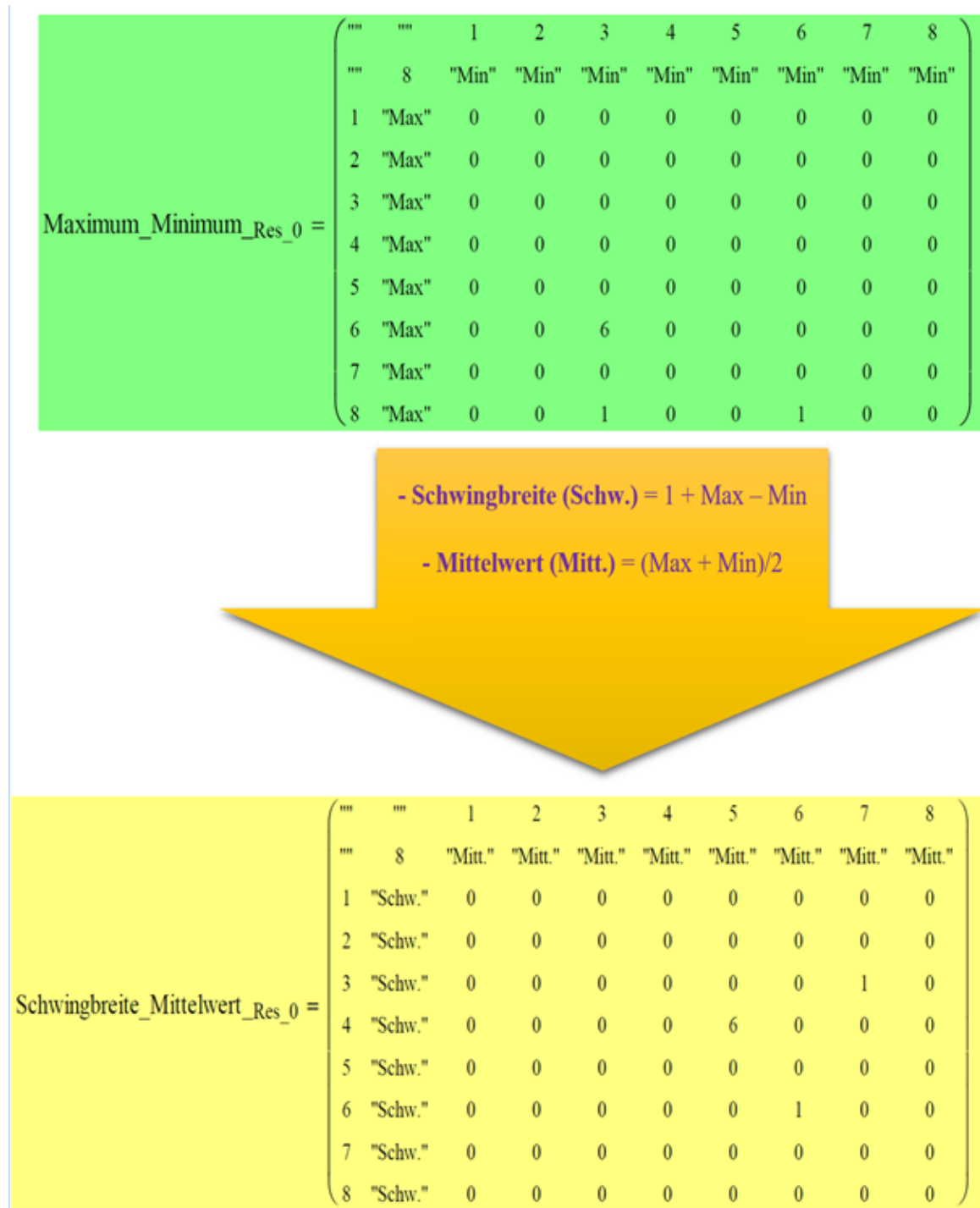


Abb. 3.13 Erstellung der Schwingbreite_Mittelwert-Matrix (gelbe Tabelle) ohne Residuum im Mathcad-Programm

3.2.9. Bestimmung der Schädigung

Für die einfache Vergleichbarkeit der einzelnen Untersuchungen wurde eine Schädigungsberechnung nach der elementaren Miner-Regel bzw. die lineare Schädigungsakkumulations-Hypothese nach Palmgren (1924) [18] und Miner (1945) [19], die im Kapitel 2.1.9 erwähnt wurde, durchgeführt. Obwohl die Mittelwerte für ein anderes Programm (IBF-Fatigue) bestimmt werden, wird die Teilschädigung und die Gesamtschädigung in diesem Mathcad-Programm ohne Berücksichtigung der Mittelwerte berechnet (Abb. 3.14).

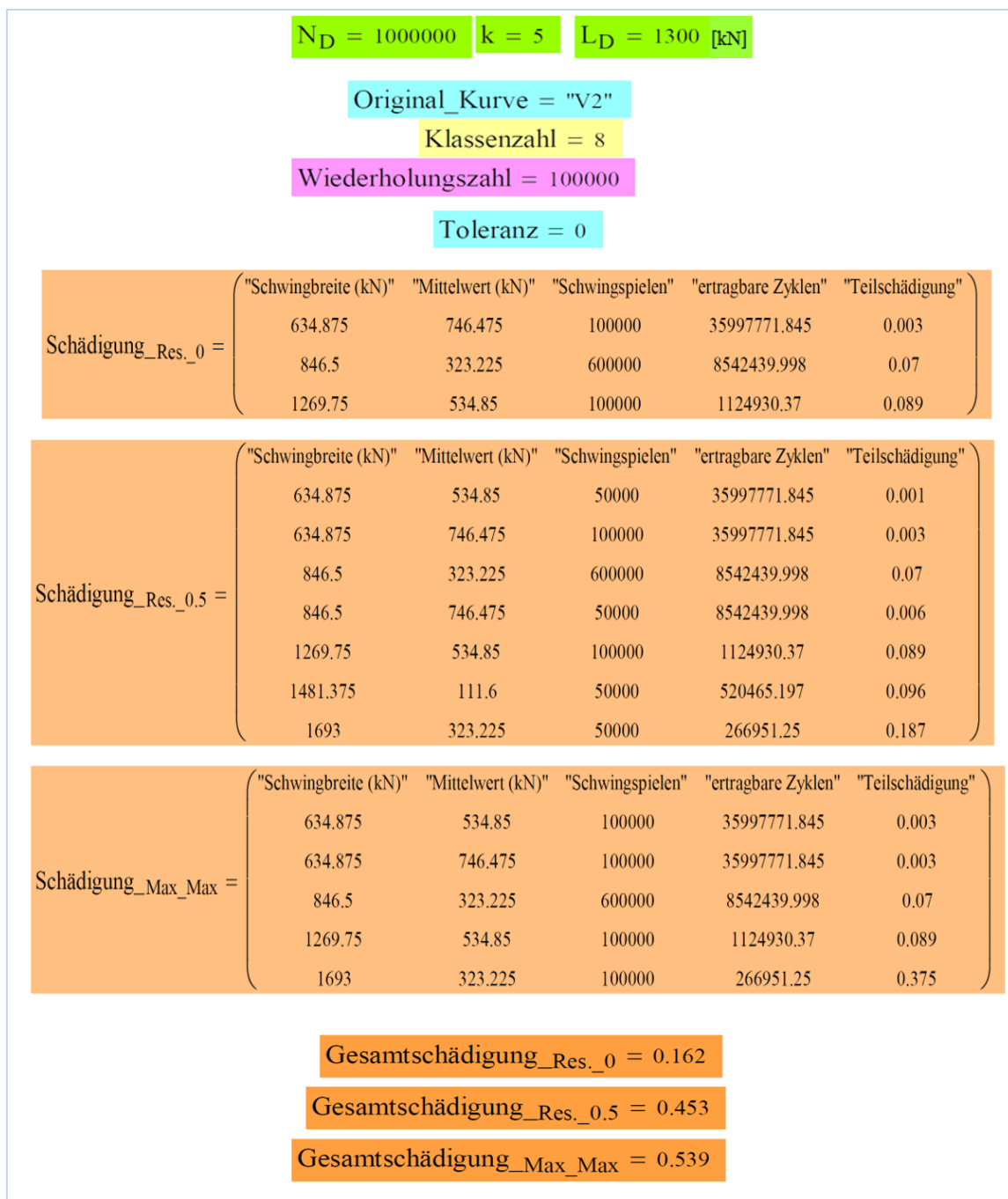


Abb. 3.14 Berechnung der Schädigungen ohne Berücksichtigung der Mittelwerte im Mathcad-Programm

4. Test der RFZ

4.1. Test der Belastungs-Zeit-Funktion

Der Test der Rainflowzählung wird gemäß dem folgenden Benchmark- Beispiel in Abb. 4.2 (Ohne Verschiebung - grüne Darstellung und Tabelle) und in Abb. 4.2 (mit Verschiebung - blaue Darstellung und Tabelle) durchgeführt.

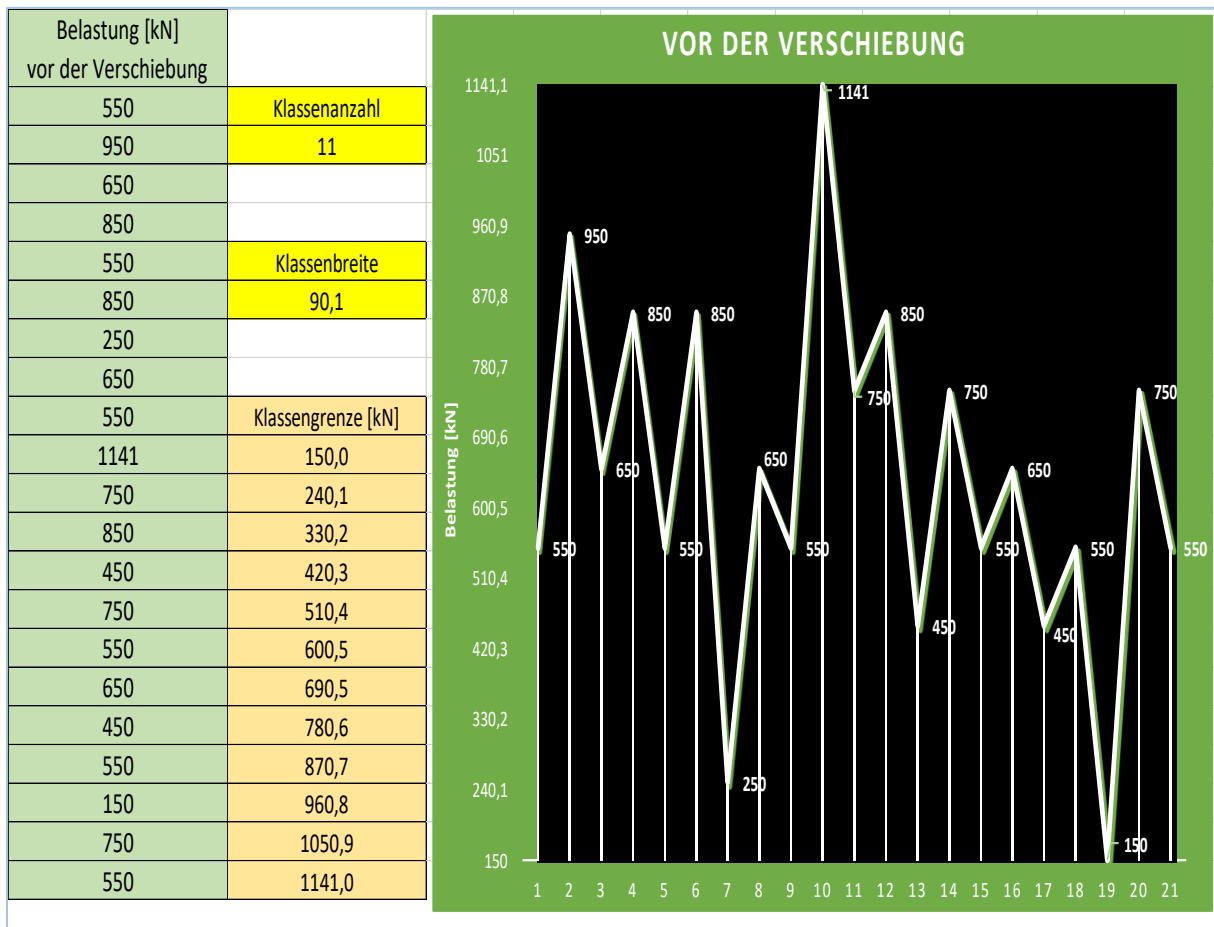


Abb. 4.1 Benchmark- Beispiel-Ohne Verschiebung

Diese Kurve in Abb. 4.1 besteht aus 21 Stützpunkten. Die Stützpunkten sind Maxima oder Minima und in diesem Fall gibt es keine zu kleinen und vernachlässigbare Schwingbreite. Die Klassenzahl wurde mit 11 ausgewählt, da die Klassenbreiten und Grenzen händisch berechnet wurden. Dadurch dass die Klassenbreite und Klassengrenze händisch berechnet wurde.

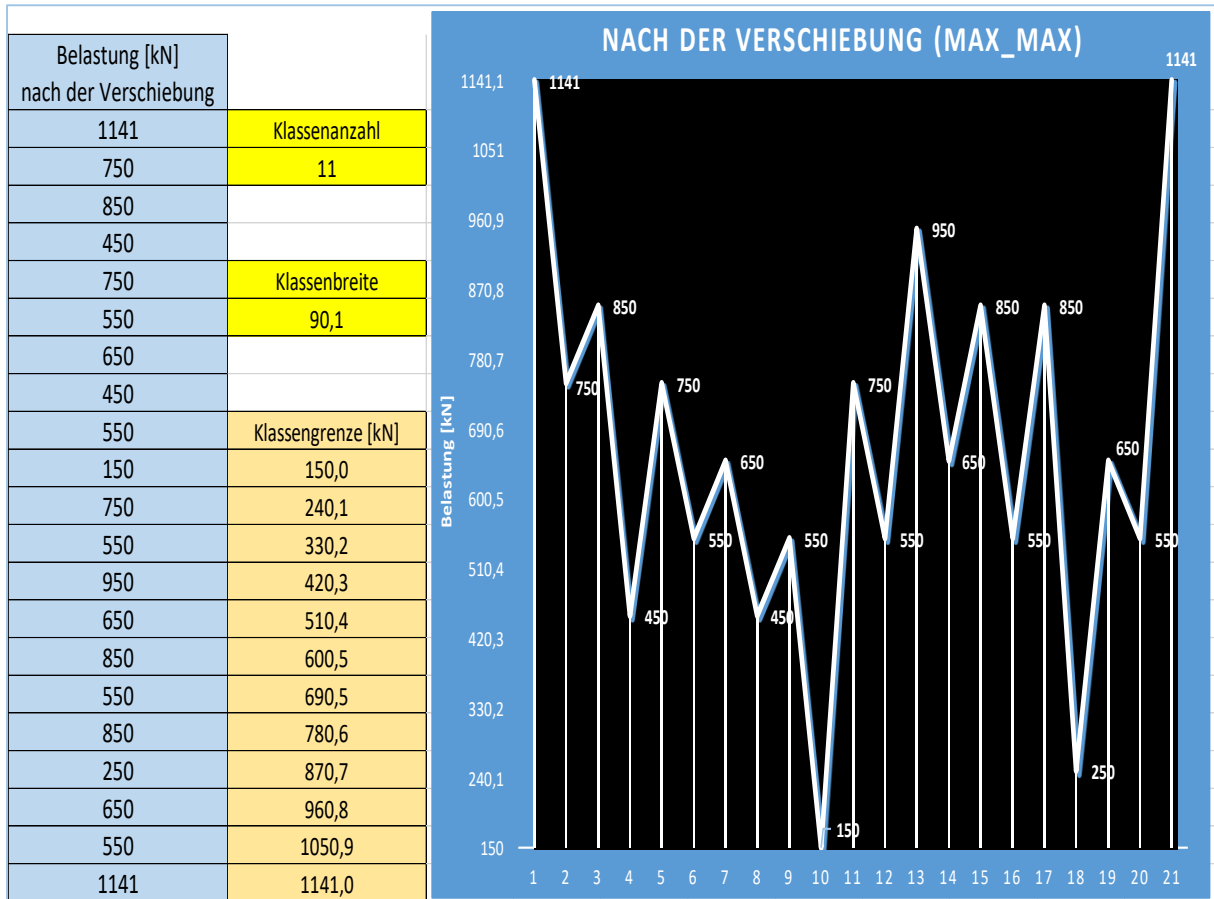


Abb. 4.2 Benchmark- Beispiel-mit Verschiebung

Die Kurve in Abb. 4.3 zeigt die Ergebnisse händischer Verschiebung von Kurve in Abb. 4.2 nach ASTM E1049-85. Die erste und letzte Stützpunkte haben den größten Wert und Klassenanzahl wurde ebenfalls mit 11 festgelegt. Die Klassenbreite und Grenze bleibt auch bei Verschiebung der Kurven gleich.

Zur Validierung der Software wurden absichtlich eine Stützpunkte (650) zwischen den Stützpunkten 20 (750) und 21 (550) in der vorherigen Kurve in Abb. 4.2 eingefügt (Lasten_{Eingabe} in Abb. 4.3), die nach der Bereinigung wieder gelöscht wurde (Bereinigung (B_1) in Abb. 4.3).

Die Max_Max- und Bereinigung(Max_Max)-Kurven haben gleiche Ergebnisse genauso wie händische Berechnung (Abb. 4.3).

Die händisch berechneten Werten der Klassenbreite, Klassengrenze und Klassenschwingbreite von Abb. 4.2 und Abb. 4.3 wurden mit den im Mathcad-Programm berechneten Werten in Abb. 4.3 gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt, dass die Berechnung im Mathcad-Programm richtig funktioniert.

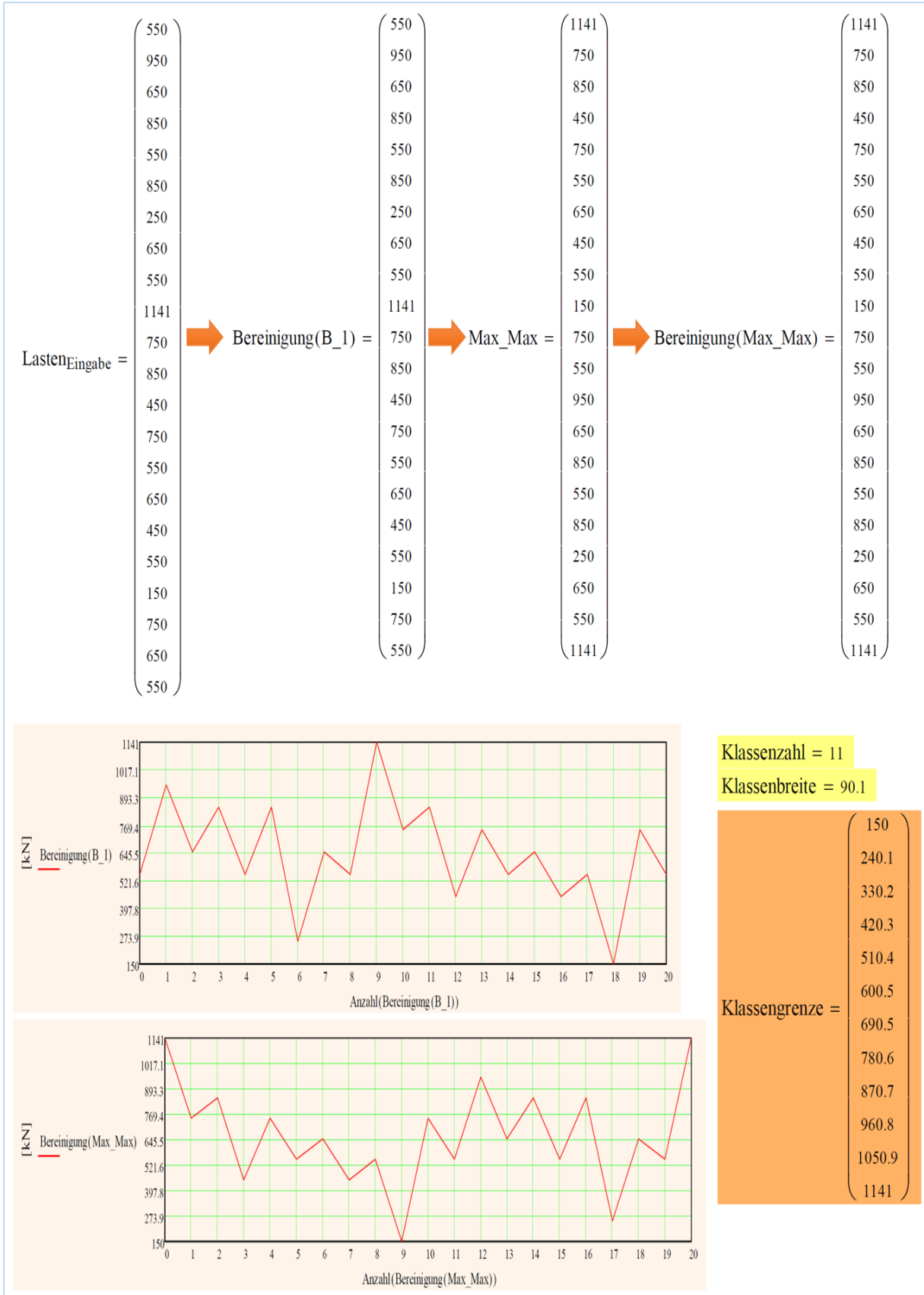


Abb. 4.3 BZFn (obere weiße Matrizen) mit Darstellungen und Klassendateien (untere farbige Matrizen) im Mathcad-Programm

4.2. Tests der Von_Nach-Matrix

Die händische Berechnung der Rainflowzählung mit einer Verschiebung (Max_Max), die in Abb. 4.5 dargestellt ist, zeigt, dass 3 Aufwärts- und 3 AbwärtsResiduen (weiße Zellen) gibt und die obere und untere Halbmatrix in der VON_NACH-Matrix asymmetrisch sind.

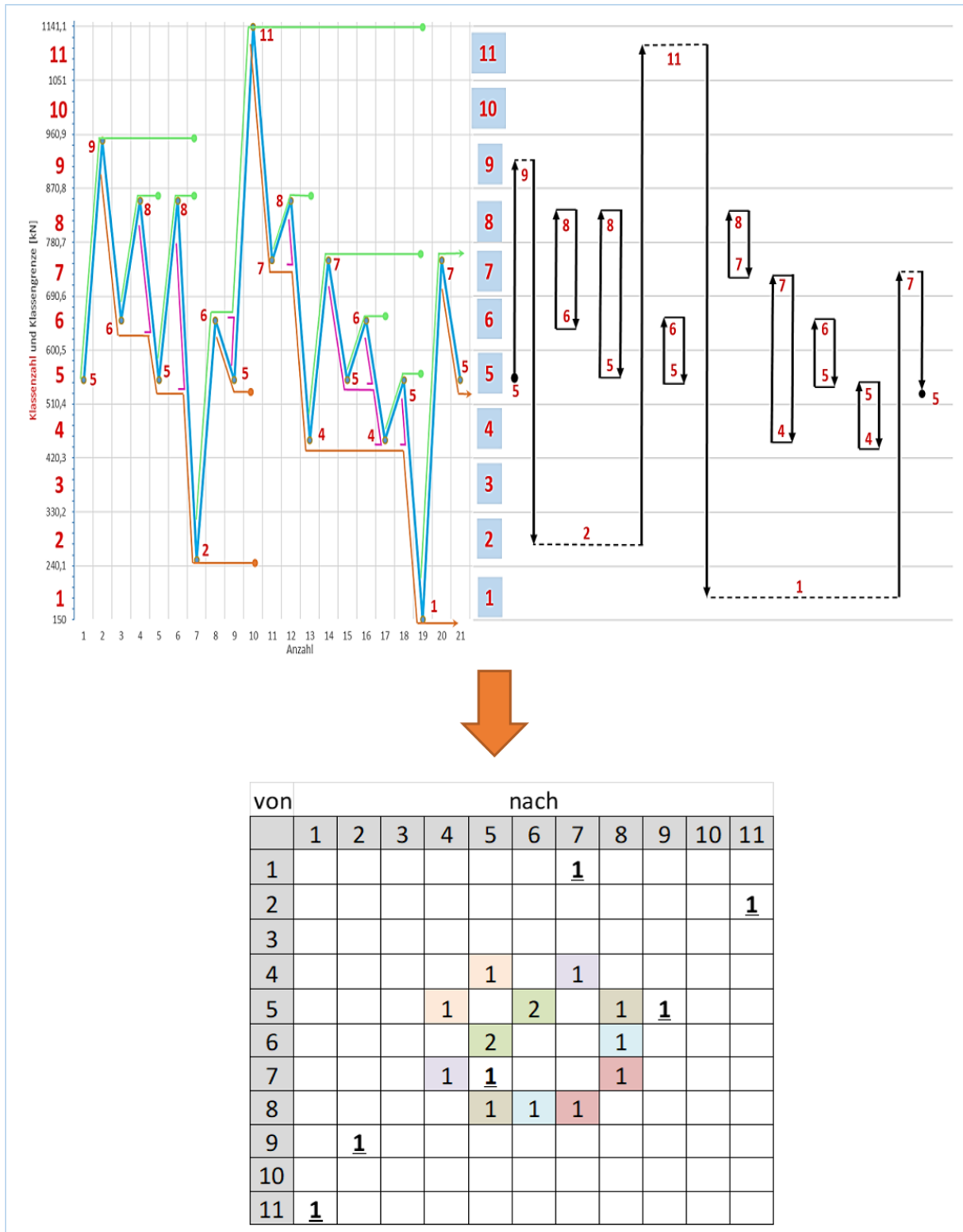


Abb. 4.4 Händische Berechnung der VON_NACH-Matrix des Beispiels ohne Verschiebung

In der händisch berechneten VON_NACH-Matrix werden Vollzyklen farbig und Halbzyklen weiß dargestellt.

Die händische Berechnung der Rainflowzählung mit einer Verschiebung (Max_Max), die in Abb. 4.6 dargestellt ist, zeigt, dass nach der Verschiebung kein Residuum gibt und die obere und untere Halbmatrix in der VON_NACH-Matrix symmetrisch sind.

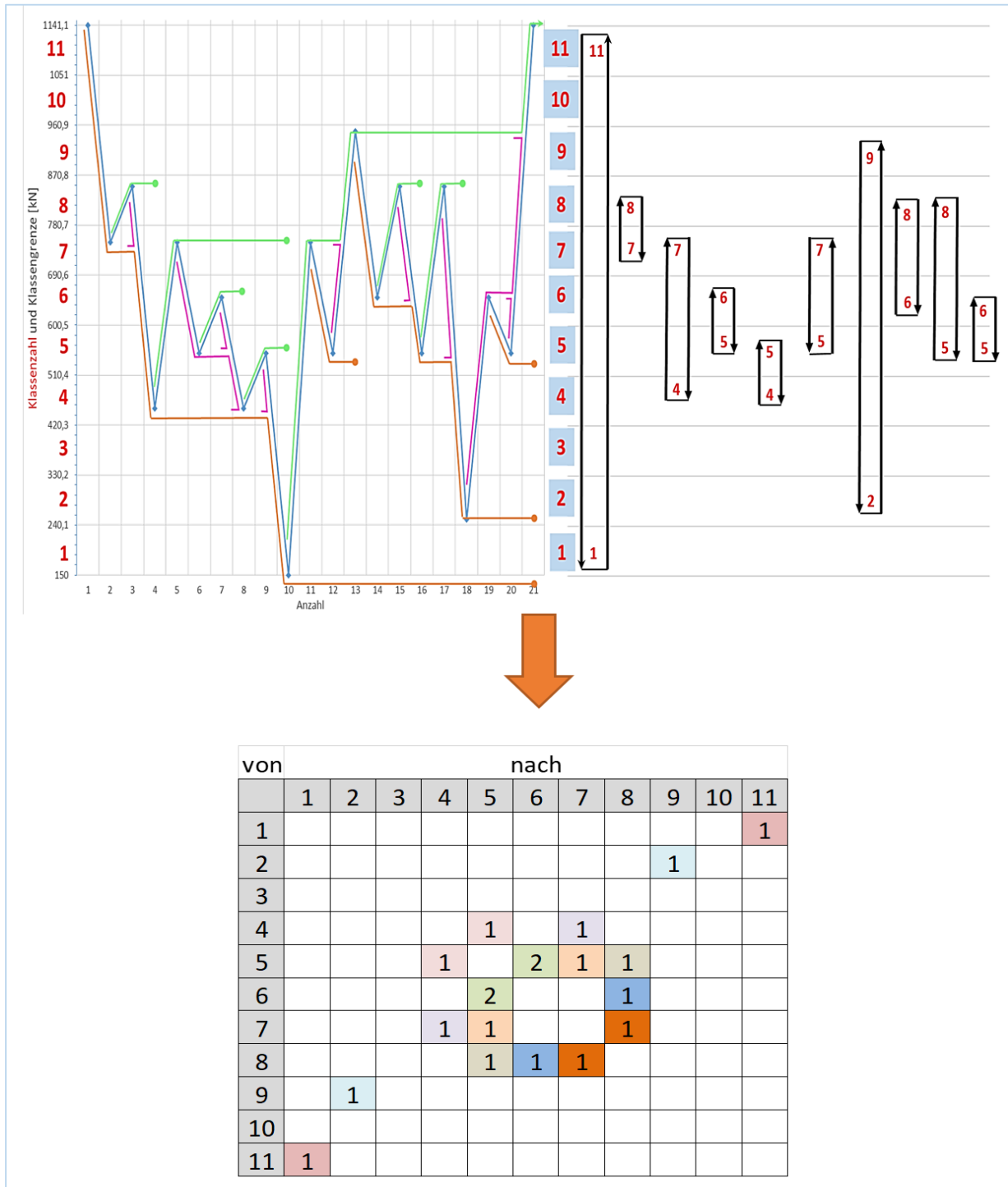


Abb. 4.5 Händische Berechnung der VON_NACH-Matrix des Beispiels mit Verschiebung (Max_Max)

Abb. 4.6 zeigt den Vergleich der Von_Nach-Matrix vom Mathcad-Programm (linke Matrix) mit der Von_Nach-Matrix der händischen Berechnung (rechte Matrix) vor der Verschiebung. Der Vergleich allen Zellen zeigt, dass die Berechnung im Mathcad-Programm richtig funktioniert.

VON_NACH _{ohne_Verschiebung} =												von nach												
""	""	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
""	11	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"												
1	"von"	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1							1				
2	"von"	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2											1
3	"von"	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3											
4	"von"	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	4				1		1					
5	"von"	0	0	0	1	0	2	0	1	1	0	0	5			1		2		1	1			
6	"von"	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	6				2				1			
7	"von"	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	7				1	1			1			
8	"von"	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	8				1	1	1					
9	"von"	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9		1									
10	"von"	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10											
11	"von"	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	1										

Abb. 4.6 Vergleich der Von_Nach-Matrix (ohne Verschiebung) des Mathcad-Programms (links) mit der händisch berechneten Matrix (rechts)

Abb. 4.7 zeigt den Vergleich der Von_Nach-Matrix vom Mathcad-Programm (linke Matrix) mit der Von_Nach-Matrix der händischen Berechnung (rechte Matrix) nach der Verschiebung. Der Vergleich allen Zellen zeigt, dass die Berechnung im Mathcad-Programm richtig funktioniert und auch kein Residuum gibt.

VON_NACH _{Max_Max} =												von nach												
""	""	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
""	11	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"	"nach"												
1	"von"	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1											1
2	"von"	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2									1		
3	"von"	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3											
4	"von"	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	4				1		1					
5	"von"	0	0	0	1	0	2	1	1	0	0	0	5				1		2	1	1			
6	"von"	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	6				2				1			
7	"von"	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	7				1	1			1			
8	"von"	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	8				1	1	1					
9	"von"	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9		1									
10	"von"	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10											
11	"von"	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	1										

Abb. 4.7 Vergleich der Von_Nach-Matrix (Max_Max) des Mathcad-Programms (links) mit der händisch berechneten Matrix (rechts)

4.3. Tests der Max_Min-Matrix

Abb. 4.9 und Abb. 4.10 zeigen den Vergleich der Max_Min-Matrix im Mathcad-Programm (grüne Matrix) mit der händisch berechneten Matrix.

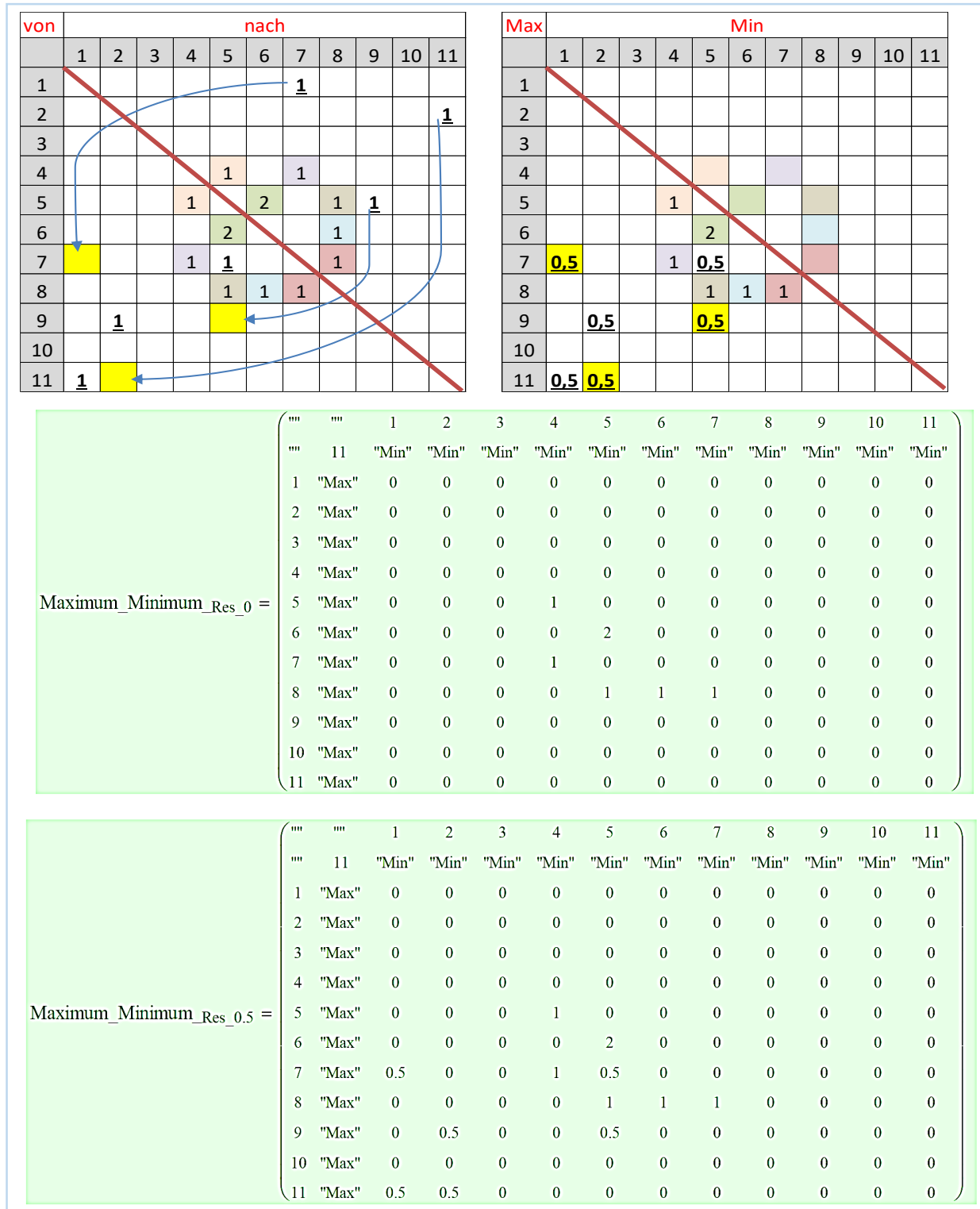


Abb. 4.8 Vergleich der Max_Min-Matrix (ohne Verschiebung) mit Residuen= 0 und 0,5 vom Mathcad-Programm (zwei untere Matrizen) mit der händisch berechneten Matrix (zwei obere Matrizen)



Abb. 4.9 Vergleich der Max_Min-Matrix (mit Verschiebung) des Mathcad-Programms (untere Matrix) mit der händisch berechneten Matrix (zwei obere Matrizen)

In Abb. 4.8 bekommen alle Halbzyklen in weißen Zellen der händisch berechneten VON_NACH-Matrix in der händisch berechneten Max_Min-Matrix eine Basis 0,5 und alle Vollzyklen eine Basis 1. Alle Residuen in oberen Halbmatrix der VON_NACH-Matrix wurden in symmetrische Zellen in der unteren Max_Min-Matrix (nach RFZ) verschoben.

In Abb. 4.9 ist zu erkennen, dass die Max_Max-Kurve kein Halbzyklus enthält, dadurch alle Zellen in händischer Berechnung farbig sind.

In beiden Fällen muss alle Zellen in der oberen Halbmatrix der Max_Min-Matrix leer bzw. null sein.

Die Ergebnisse aus dem Mathcad-Programm (grüne Matrize) weisen in beiden Fällen keine Abweichung zu der händischen Berechnung der Max_Min-Matrix (rechte obere Matrize) auf.

4.4. Test der Schwingbreite_Mittelwert-Matrix

Abb. 4.11 und Abb. 4.12 zeigen den Vergleich der Schwingbreite_Mittelwert-Matrix des Mathcad-Programms (gelbe Matrix) mit der händisch berechneten Matrix.

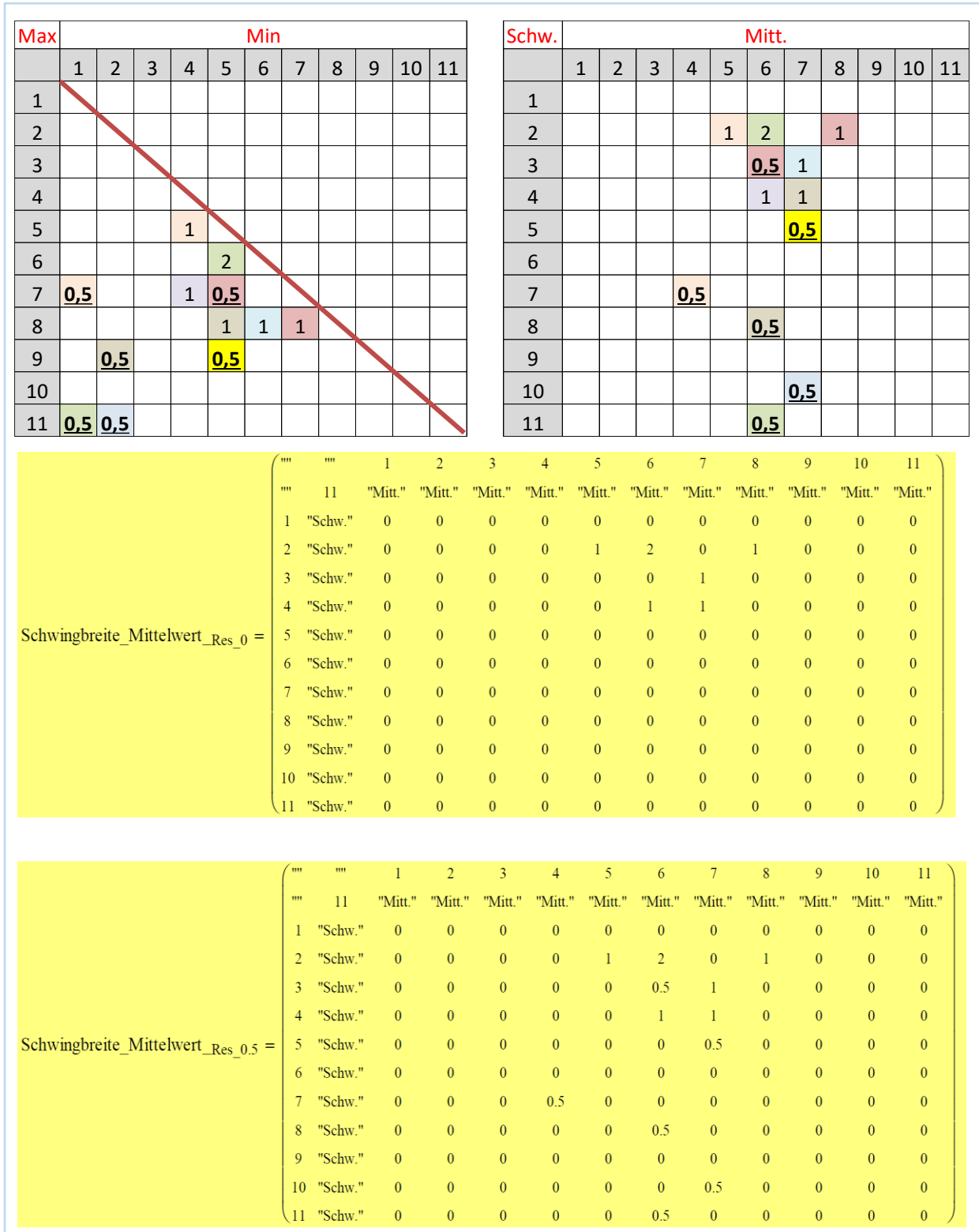


Abb. 4.10 Vergleich der Schwingbreite_Mittelwert-Matrix (Ohne Verschiebung) mit Residuen= 0 und 0,5 des Mathcad-Programms (zwei untere Matrizen) mit der händisch berechneten Matrix (zwei obere Matrizen)

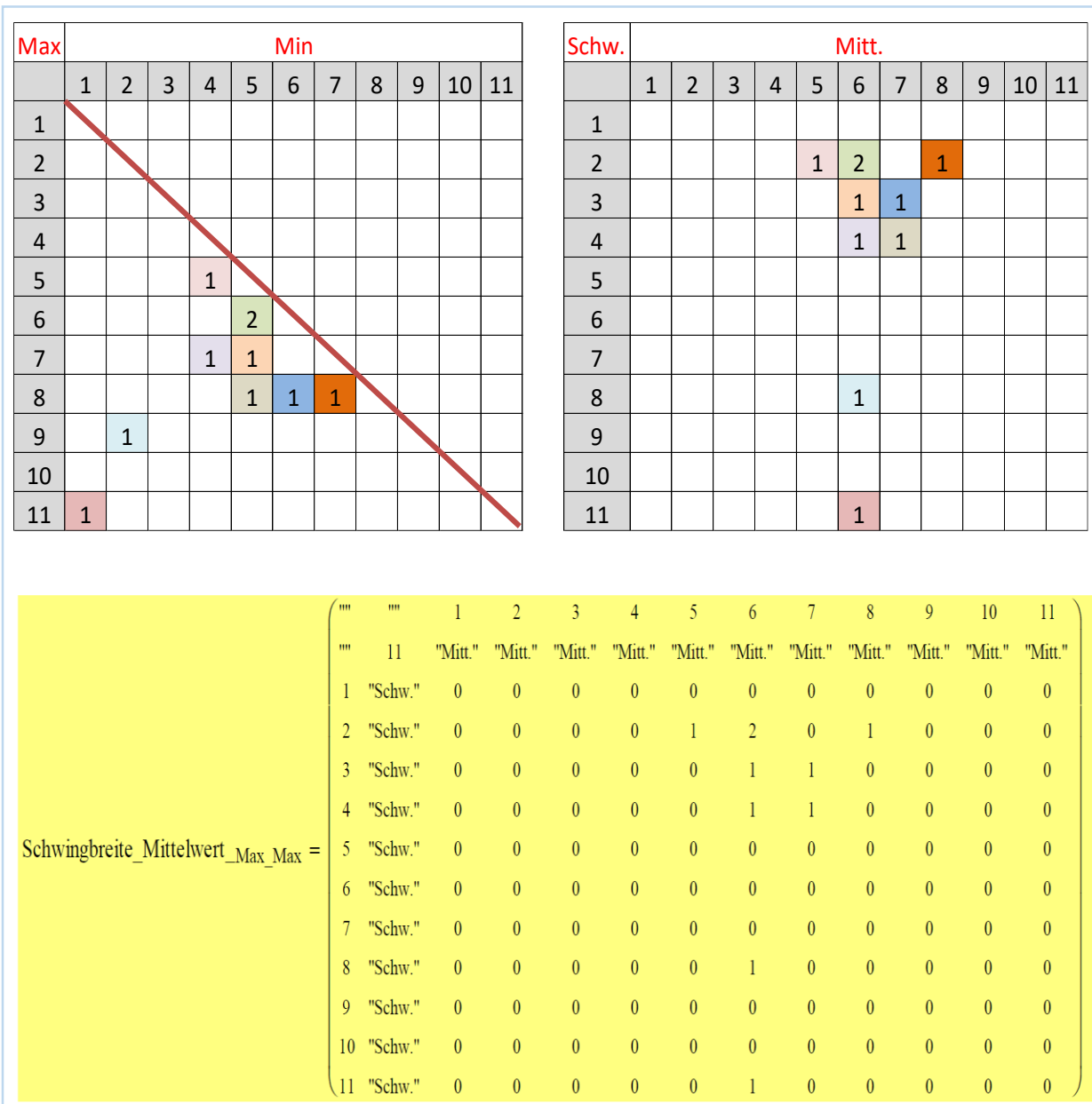


Abb. 4.11 Vergleich der Schwingbreite_Mittelwert-Matrix (mit Verschiebung Max_Max) des Mathcad-Programms (untere Matrix) mit der händisch berechneten Matrix (zwei obere Matrizen)

In Abb. 4.11 bekommen alle Halbzyklen in der händisch berechneten Max_Min-Matrix und Schwingbreite_Mittelwert-Matrix eine Basis 0,5 und alle Vollzyklen eine Basis 1.

In der händisch berechneten Max_Min-Matrix ist jede farbige Zelle eine Transformation (nach der RFZ) von der Max_Min-Zelle zur Schwingbreite_Mittelwert-Zelle. Schwingbreite_Mittelwert-Matrix ist immer eine Vollmatrize

In Abb. 4.12 ist zu erkennen, dass die Max_Max-Kurve kein Halbzyklus enthält, dadurch alle Zellen in händischer Berechnung farbig sind.

Die Ergebnisse aus dem Mathcad-Programm (gelbe Matrize) weisen in beiden Fällen keine Abweichung zu der händischen Berechnung der Schwingbreite_Mittelwert-Matrix (rechte obere Matrizen) auf.

4.5. Test der Schädigung

Tabelle 4.1 zeigt die händische Berechnung des tatsächlichen Wertes von Schwingbreiten und Mittelwerten jeder Klasse nach Klassenanzahl 11.

Klasse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Schwingbreite	90,1	180,2	270,3	360,4	450,5	540,5	630,6	720,7	810,8	900,9	991,0
Mittelwert	240,1	330,2	420,3	510,4	600,5	690,5	780,6	870,7	960,8	1050,9	1141,0

Tabelle 4.1 Klassenwerte nach Klasse 11

Schw.	Mitt.										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2					1	2		1			
3						0,5	1				
4						1	1				
5							0,5				
6											
7				0,5							
8						0,5					
9											
10								0,5			
11						0,5					

Schw.	Mitt.		Schwingspielen	Teilschädigung	
Klasse	Beitrag	Klasse			Beitrag
2	180,2	5	600,5	100000	0,0001
2	180,2	6	690,5	200000	0,0001
2	180,2	8	870,7	100000	0,0001
3	270,3	6	690,5	50000	0,0002
3	270,3	7	780,6	100000	0,0004
4	360,4	6	690,5	100000	0,0019
4	360,4	7	780,6	100000	0,0019
5	450,5	7	780,6	50000	0,0028
7	630,6	4	510,4	50000	0,0152
8	720,7	6	690,5	50000	0,0297
10	900,9	7	780,6	50000	0,0906
11	991,0	6	690,5	50000	0,1458
Gesamtschädigung mit Residuum 0,5					0,289
Gesamtschädigung mit Residuum 0					0,004

Schädigung_Res._0 =	"Schwingbreite (kN)"	"Mittelwert (kN)"	"Schwingspielen"	"Teilschädigung"
	180.1818	600.4546	100000	0.0001
	180.1818	690.5455	200000	0.0001
	180.1818	870.7273	100000	0.0001
	270.2727	780.6364	100000	0.0004
	360.3636	690.5455	100000	0.0019
	360.3636	780.6364	100000	0.0019

Gesamtschädigung_Res._0 = 0.004	Gesamtschädigung_Res._0.5 = 0.289
---------------------------------	-----------------------------------

Schädigung_Res._0.5 =	"Schwingbreite (kN)"	"Mittelwert (kN)"	"Schwingspielen"	"Teilschädigung"
	180.1818	600.4546	100000	0.0001
	180.1818	690.5455	200000	0.0001
	180.1818	870.7273	100000	0.0001
	270.2727	690.5455	50000	0.0002
	270.2727	780.6364	100000	0.0004
	360.3636	690.5455	100000	0.0019
	360.3636	780.6364	100000	0.0019
	450.4546	780.6364	50000	0.0028
	630.6364	510.3636	50000	0.0152
	720.7273	690.5455	50000	0.0297
	900.9091	780.6364	50000	0.0906
991	690.5455	50000	0.1458	

Abb. 4.12 Vergleich der Schädigungsberechnung ohne Berücksichtigung der Mittelwerte (ohne Verschiebung) mit Residuen= 0 und 0,5 des Mathcad-Programms (zwei untere Tabellen) mit der händisch berechneten Matrix (obere Matrize und Tabelle)

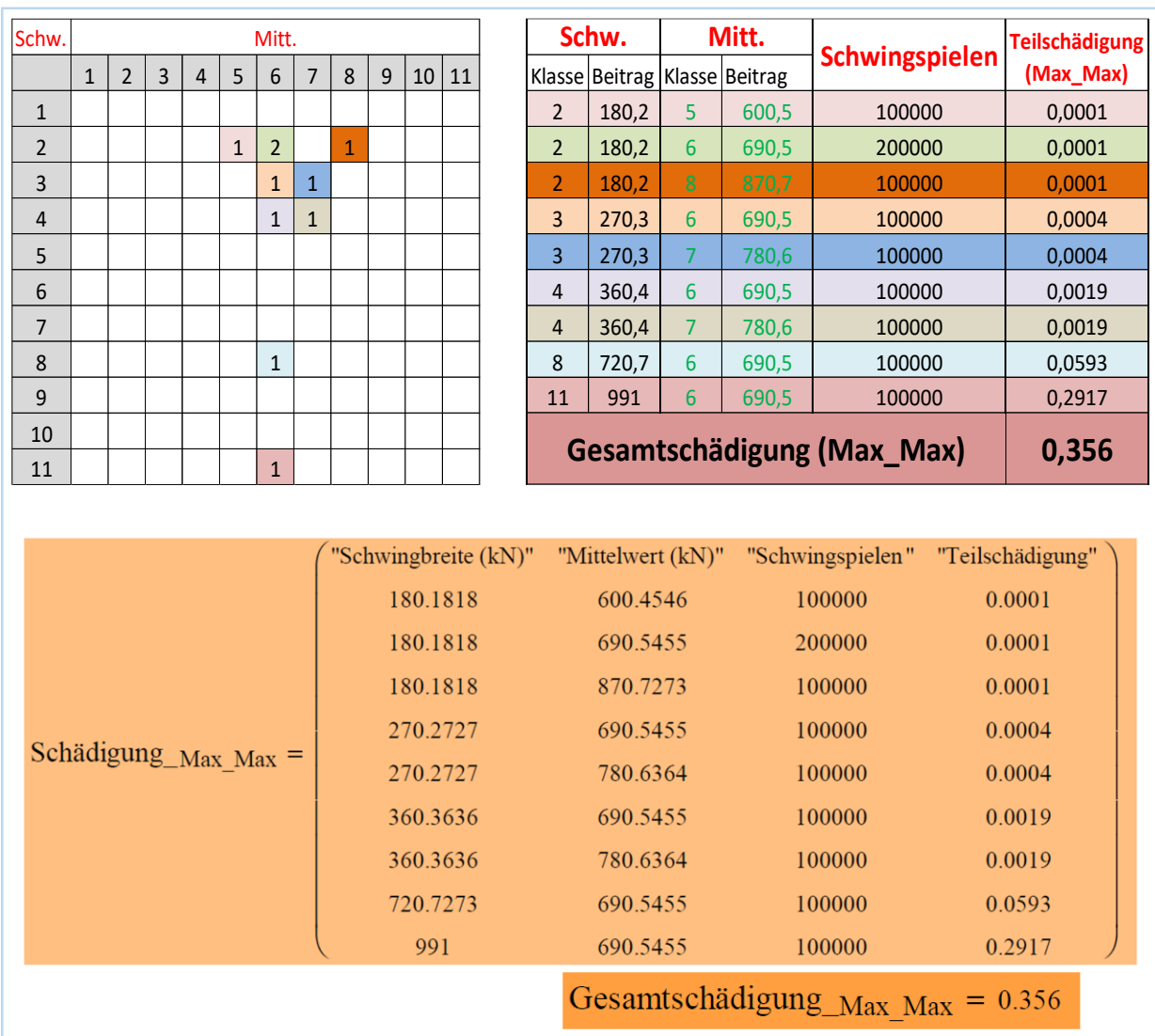


Abb. 4.13 Vergleich der Schädigungsberechnung ohne Berücksichtigung der Mittelwerte (mit Verschiebung Max_Max) des Mathcad-Programms (zwei untere Tabellen) mit der händisch berechneten Matrix (obere Matrize und Tabelle)

Abb. 4.12 und Abb. 4.13 zeigen den Vergleich der folgenden Parameter des Mathcad-Programms (orange Tabellen) mit der händischen Berechnung (obere Matrize und Tabelle):

- Die tatsächliche Schwingbreite und Mittelwerte jeder Zelle von Schwingbreite_Mittelwert-Matrix
- Die tatsächliche Schwingspiele entspricht derselben Zelle (Die Zellenwerte der Schwingbreite_Mittelwert-Matrix werden mit der Wiederholungszahl (in diesem Fall: 100000) multipliziert.)
- Teilschädigungen für gleiche Wöhlerkurve ohne Berücksichtigung der Mittelwerte
- Gesamtschädigung

Die Ergebnisse aus dem Mathcad-Programm (orange Tabellen) weisen in beiden Fällen keine Abweichung zu der händischen Berechnung der Parameter (rechte obere Tabelle) auf.

5. Untersuchung verschiedener Einflüsse auf Gesamtschädigung

5.1. Einfluss des Residuums

Der Einfluss der Residuen für die zyklische (wiederholte) Belastung (z. B. $N < 10^5$ nach der Bereinigung und Toleranz) hängt von der Größe und der Anzahl der Residuen ab. In den folgenden Abbildungen sind die drei Beispielkurven A (Abb. 5.1) B (Abb. 5.2) und C (Abb. 5.3) dargestellt. Je weiter sich die Spitzen (entweder Minimum oder Maximum) in der Mitte der Kurve befinden, desto größer ist die Residuenzahl und die Residuengröße.



Abb. 5.1 Beispiel A (lange BZF; 1200 Stützpunkte)

Beispiel A in Abb. 5.1 zeigt, dass der Anfang und das Ende der Kurve mit 1200 Stützpunkten nicht mit dem kleinsten bzw. größten Extermwert geschlossen wurde, weswegen diese Kurve Residuen hat, die die Schädigung beeinflussen kann.

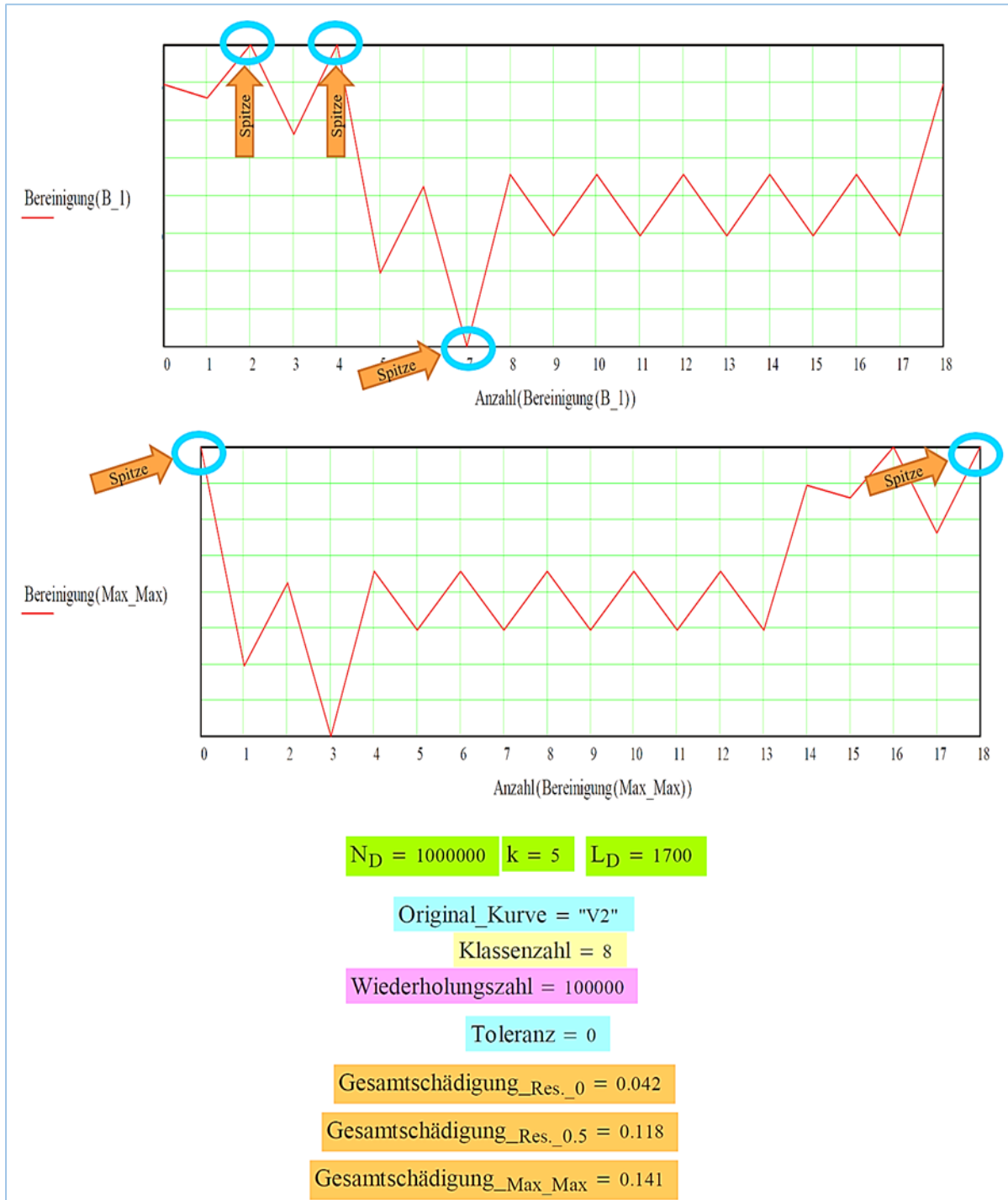


Abb. 5.2 Beispiel B (kurze BZF; 18 Stützpunkte)

Im Vergleich zur langen BZF wirkt sich die Position der Spitze (Einfluss der Residuen) in der kurzen BZF stärker auf die Gesamtschädigung aus (Beispiel B in Abb. 5.2 mit 18 Stützpunkten). Im Vergleich der Gesamtschädigung zwischen den Residuum 0,5 und 0 ergibt sich mehr als 50% Abweichung. Also sind bei zyklischen Kurven wie auch in der ASTM 1049-85 vorgegeben, die Residuen zu berücksichtigen.

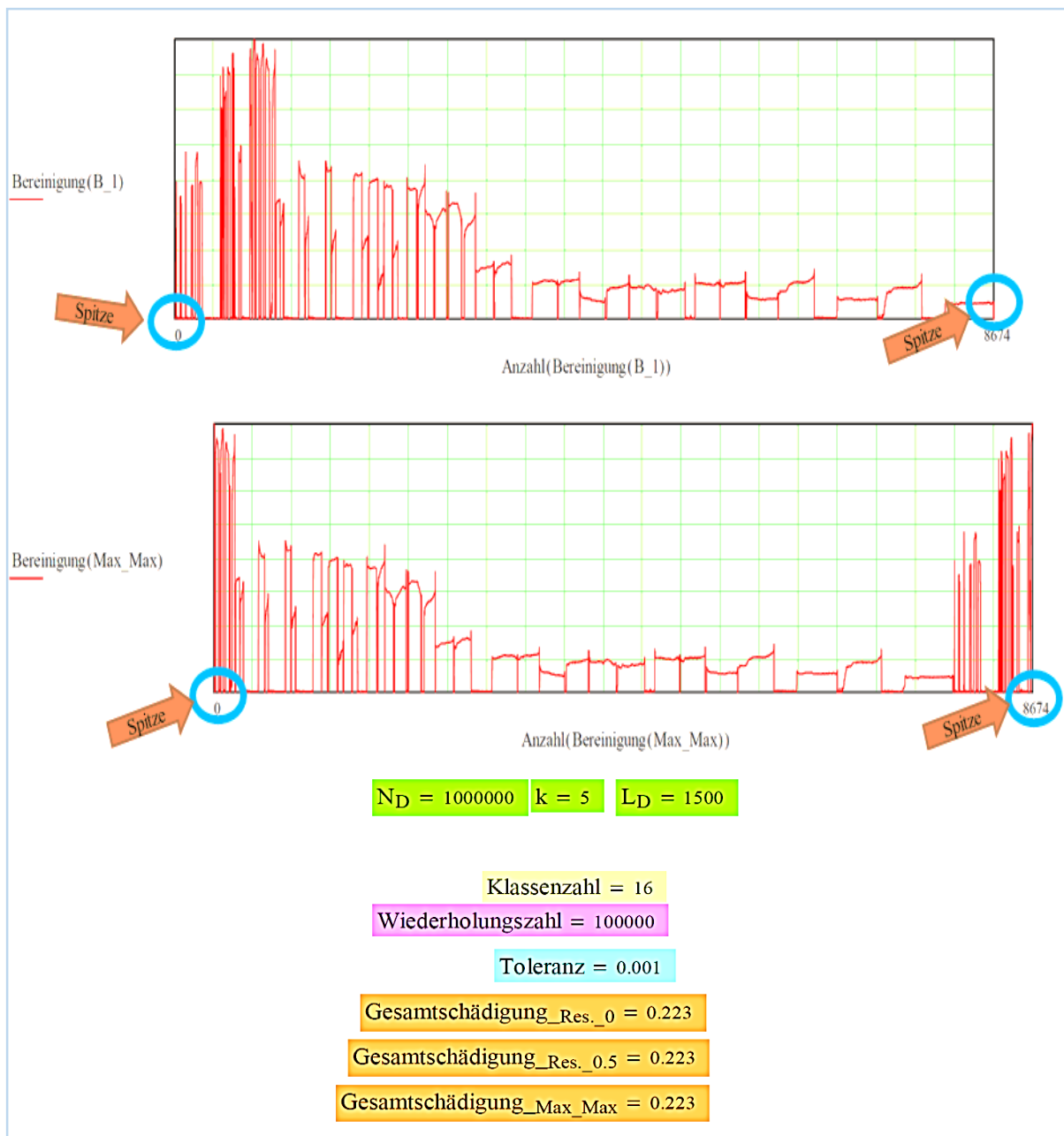


Abb. 5.3 Beispiel C (lange BZF; 8674 Stützpunkte)

Beispiel C in Abb. 5.3 zeigt, dass der Anfang und das Ende der Kurve mit dem kleinsten Minimalwert geschlossen wurde, weswegen diese Kurve kein Residuum hat.

Nach dem Vergleich der verschiedenen Kurven mit langen und kurzen BZF kann man folgende Schlussfolgerungen treffen:

- In allen Kurven, in denen wie Beispiel C kein Halbzyklus gefunden wurde, wird der Einfluss des Residuums bedeutungslos.
- Bei Messkurven mit sehr vielen Stützpunkten (z. B. $N > 10^5$ nach der Bereinigung und Toleranz), kann man das Residuum bei den Zählverfahren vernachlässigen [2]
- In anderen Fällen muss die Residuen berücksichtigt werden

5.2. Einfluss der Klassenanzahl

5.2.1. Stochastische Kurve

Die folgende BZF in Abb. 5.4 wurde aus 70 Belastungen automatisiert erstellt und ist in einem (weitestgehend) stochastischen Verlauf abgebildet.

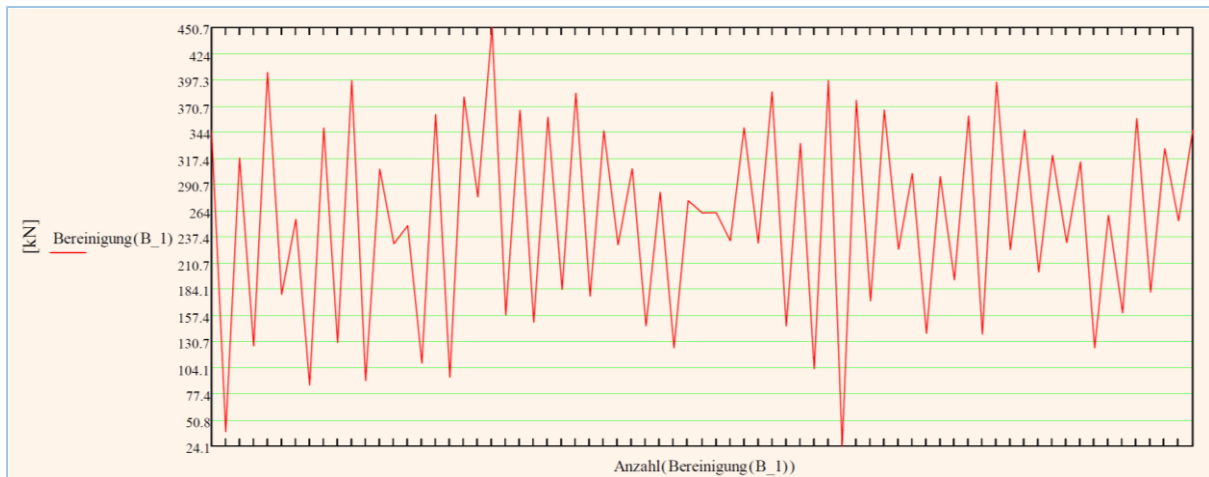


Abb. 5.4 Stochastische Kurve

Diese Kurve wurde mit 8, 16, 32, 64, 128, 256 und 512 Klassen mit $N_D = 1000000$, $k = 5$, $L_D = 400$ (kN) und Wiederholungszahl = 100000 analysiert (Abb. 5.5 und Abb. 5.6).

<p>Klassenzahl = 8</p> <p>Gesamtschädigung_Res_0 = 0.63</p> <p>Gesamtschädigung_Res_0.5 = 0.63</p> <p>Gesamtschädigung_Max_Max = 0.63</p>	<p>Klassenzahl = 16</p> <p>Gesamtschädigung_Res_0 = 0.39</p> <p>Gesamtschädigung_Res_0.5 = 0.46</p> <p>Gesamtschädigung_Max_Max = 0.47</p>	<p>Klassenzahl = 32</p> <p>Gesamtschädigung_Res_0 = 0.19</p> <p>Gesamtschädigung_Res_0.5 = 0.39</p> <p>Gesamtschädigung_Max_Max = 0.40</p>
<p>Klassenzahl = 64</p> <p>Gesamtschädigung_Res_0 = 0.17</p> <p>Gesamtschädigung_Res_0.5 = 0.36</p> <p>Gesamtschädigung_Max_Max = 0.38</p>	<p>Klassenzahl = 128</p> <p>Gesamtschädigung_Res_0 = 0.16</p> <p>Gesamtschädigung_Res_0.5 = 0.35</p> <p>Gesamtschädigung_Max_Max = 0.37</p>	<p>Klassenzahl = 256</p> <p>Gesamtschädigung_Res_0 = 0.15</p> <p>Gesamtschädigung_Res_0.5 = 0.34</p> <p>Gesamtschädigung_Max_Max = 0.36</p>
<p>Klassenzahl = 512</p> <p>Gesamtschädigung_Res_0 = 0.15</p> <p>Gesamtschädigung_Res_0.5 = 0.34</p> <p>Gesamtschädigung_Max_Max = 0.35</p>		

Abb. 5.5 Ergebnisse der stochastischen Kurve des Mathcad-Programms

Abb. 5.5 zeigt die Gesamtschädigung verschiedener Klassenzahlen, die mit dem Mathcad-Programm berechnet wurde.

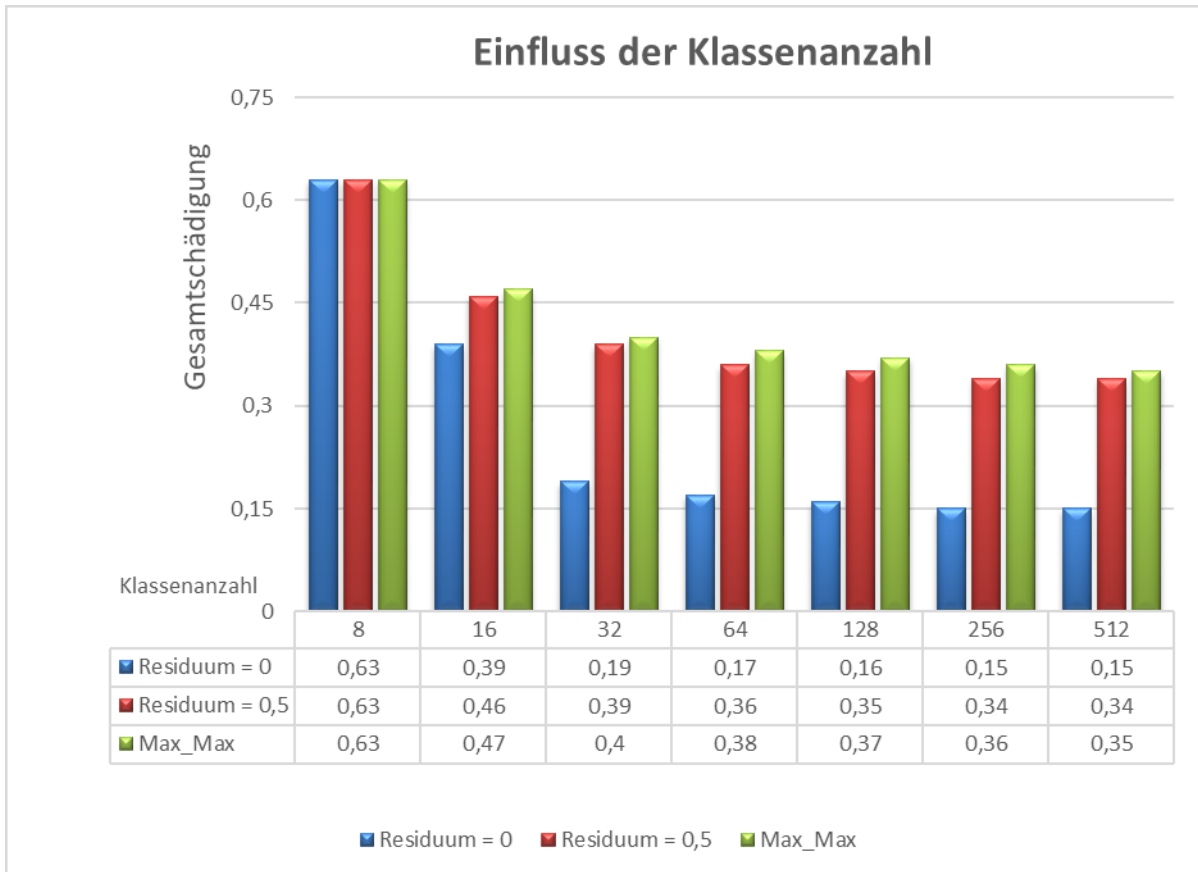


Abb. 5.6 Einfluss der Klassenanzahl der stochastischen Kurve auf die Gesamtschädigung

Die Daten in Abb. 5.5 wurde in Abb. 5.6 dargestellt.

Die Abb. 5.6 zeigt, dass die Klassen 8 und 16 eine sehr große Schädigungsabweichung im Gegensatz zu anderen Klassenanzahlen haben.

5.2.2. Kurve mit geringen Stützpunkten

Die folgende BZF in Abb. 5.7 besteht aus 21 Belastungen.

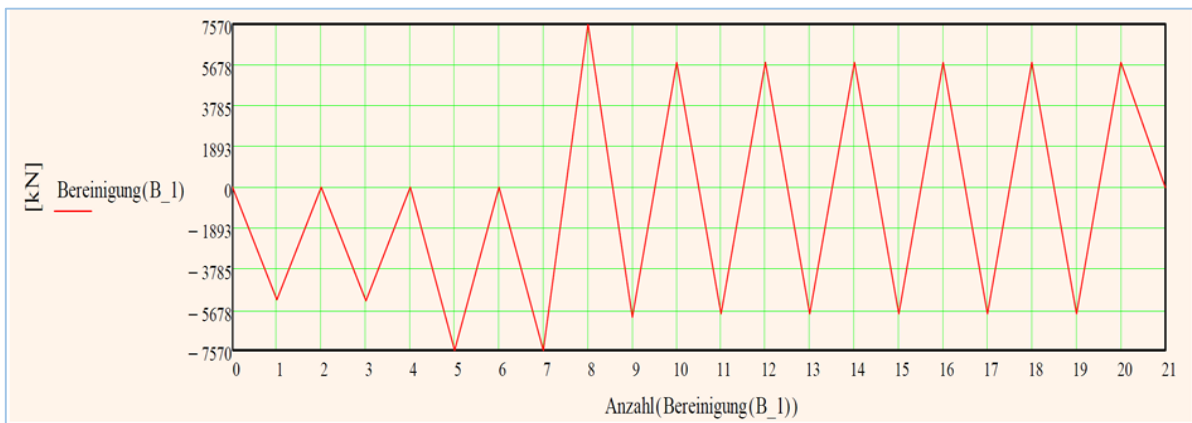


Abb. 5.7 Kurve mit geringen Stützpunkten

Diese Kurve wurde mit 8, 16, 32, 64, 128, 256 und 512 Klassen mit $N_D = 1000000$, $k = 5$, $L_D = 1700$ (kN) und Wiederholungszahl = 100000 analysiert und die Ergebnisse der Gesamtschädigung in Abb. 5.8 dargestellt.

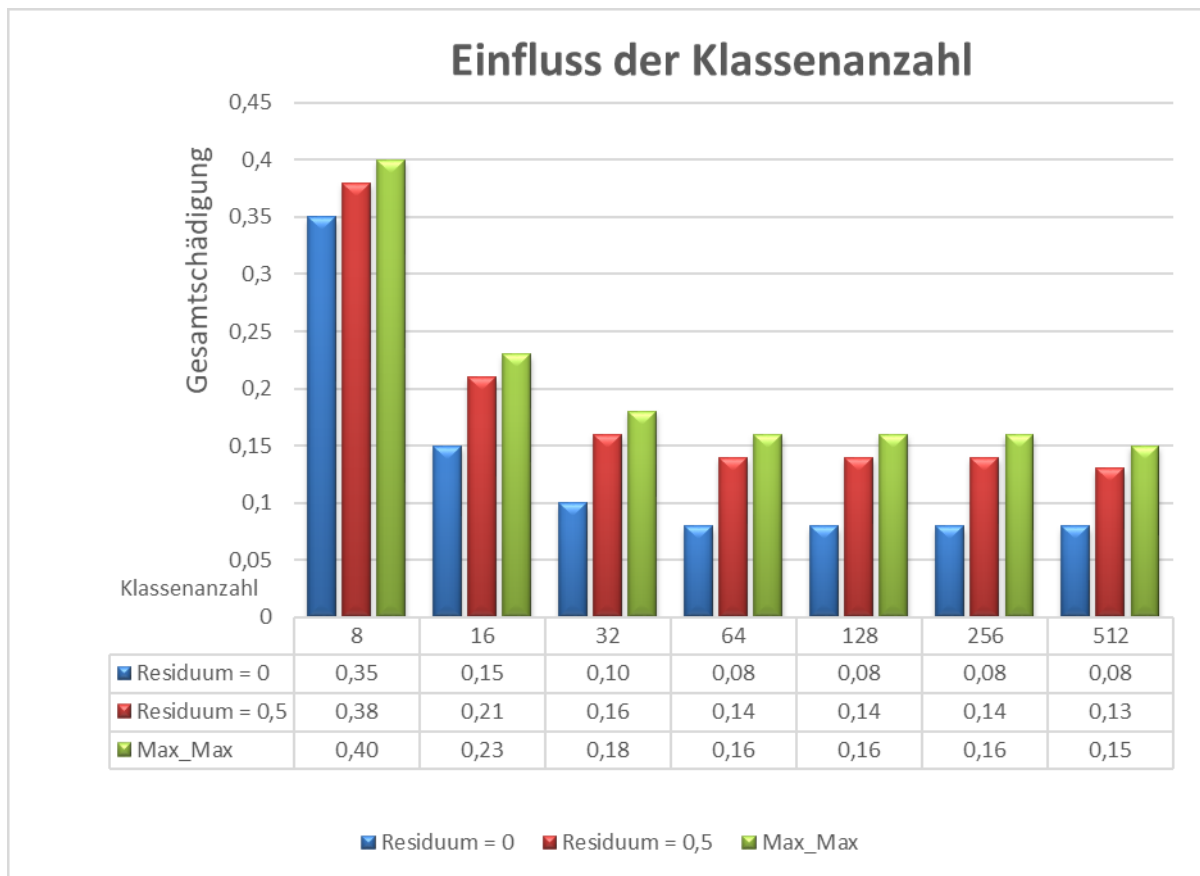


Abb. 5.8 Einfluss von Klassenanzahl der Kurve mit geringen Stützpunkten auf die Gesamtschädigung

Nach dem Vergleich der verschiedenen Klassen für dieses und viele weitere Beispiele mit langen und kurzen BZF kann man folgende Schlussfolgerungen treffen (Abb. 5.6 und Abb. 5.8) :

- Die Klassen 8 und 16 haben eine sehr große Schädigungsabweichung im Gegensatz zu anderen Klassenanzahlen, weswegen nicht mit 8 und 16 Klassen gearbeitet werden sollte
- Je höher die Klassenanzahl, desto kleiner wird die Klassenbreite und genauer wird die Schwingbreite. Dadurch wird der Schädigungswert ebenfalls kleiner und genauer
- Bei einer Klassenzahl von 64 bis 512 wird in den meisten Fällen die Gesamtschädigung bei jeder Klassengruppe um maximal 0,01 verringert. Obwohl in einigen Fällen mit 32 Klassen ebenfalls eine kleine Abweichung erreicht werden kann, ist die Berechnung mit 64 Klassen genauer
- Die Rechenzeit ist direkt von der Belastungsanzahl und der Klassenanzahl abhängig und steigt exponentiell an
- Je höher die Klassenanzahl desto genauer können die Residuen berechnet werden und desto größer wird deren Einfluss

5.3. Einfluss der Toleranz

Die Untersuchung der folgenden Beispiele in Kapitel 5.3.1 und 5.3.2 zeigt, dass mit einer Toleranz = 0,001 bzw. 0,1% ein zuverlässiger Wert zum Entfernen von Belastungen mit kleinen Schwingbreiten, welche kleiner als 0,001 mal der größten Schwingbreite sind, erreicht werden kann.

Toleranzen werden entweder für Messverläufe oder für zyklisch wiederholte Verläufe mit vielen Messpunkten benötigt, weil dadurch die Rechenzeit deutlich reduziert werden kann. Die Verwendung einer Toleranz kann allerdings in einigen besonderen Fällen bei zyklischen und kurzen BZFn mit sehr wenigen Messpunkten (z. B. $N < 100$ bzw. 1000) die Überprüfung und das Verständnis des Prozesses vereinfachen.

5.3.1. Beispiel eines Kraftverlaufs

Der Kraftverlauf in Abb. 5.9 enthält vor der darauffolgenden Bereinigung mit dem Mathcad-Programm etwa 285000 Stützpunkte. Dabei kann man viele Schwingungen mit sehr kleinen Bereichen erkennen, welche keinen besonderen Einfluss auf die Gesamtschädigung haben. Deswegen wird diese Kurve nach der Bereinigung mit den Toleranzen = 0.0, 0.001 und 0.01, mit $N_D = 1000000$, $k = 5$, $L_D = 1500$ (kN), einer Klassenanzahl = 64 und einer Wiederholungszahl = 100000 zur Untersuchung des Einflusses dieser Toleranzen analysiert.

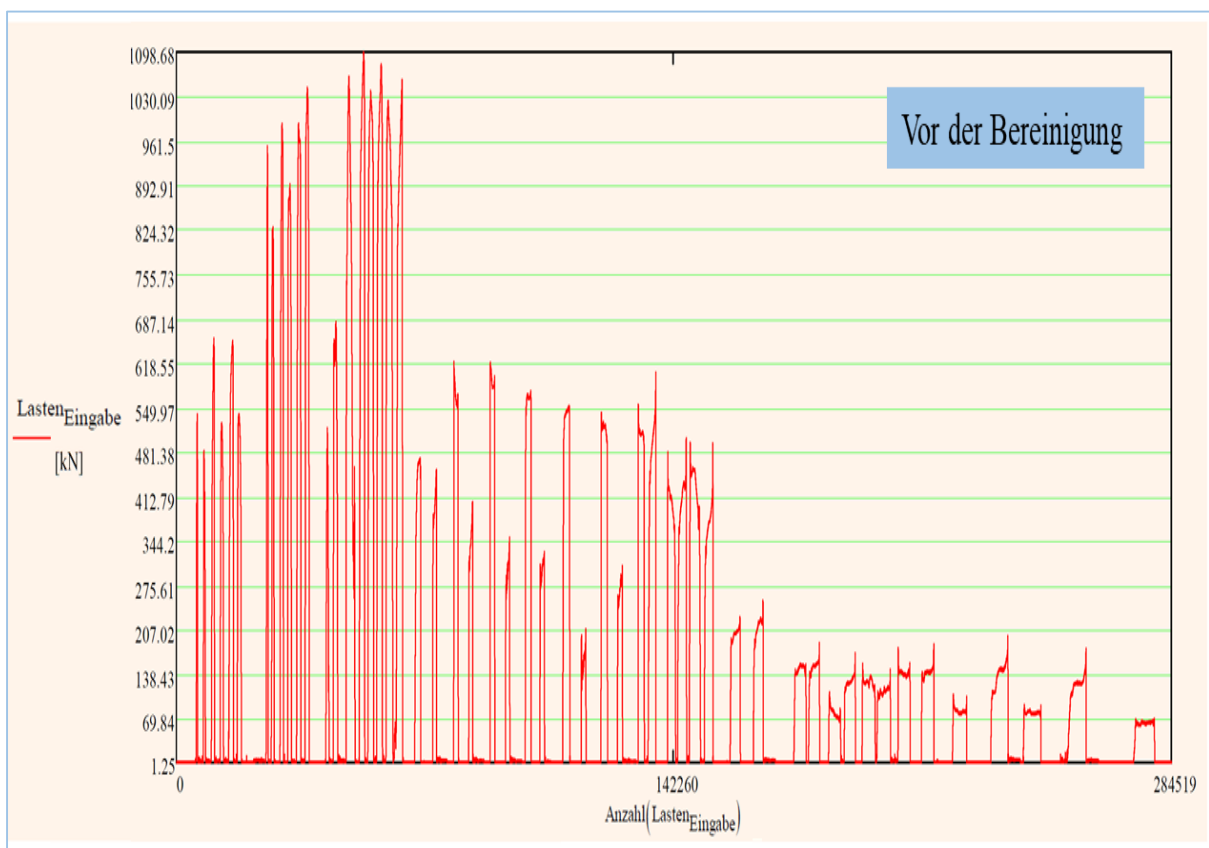


Abb. 5.9 Kraftverlauf vor der Bereinigung

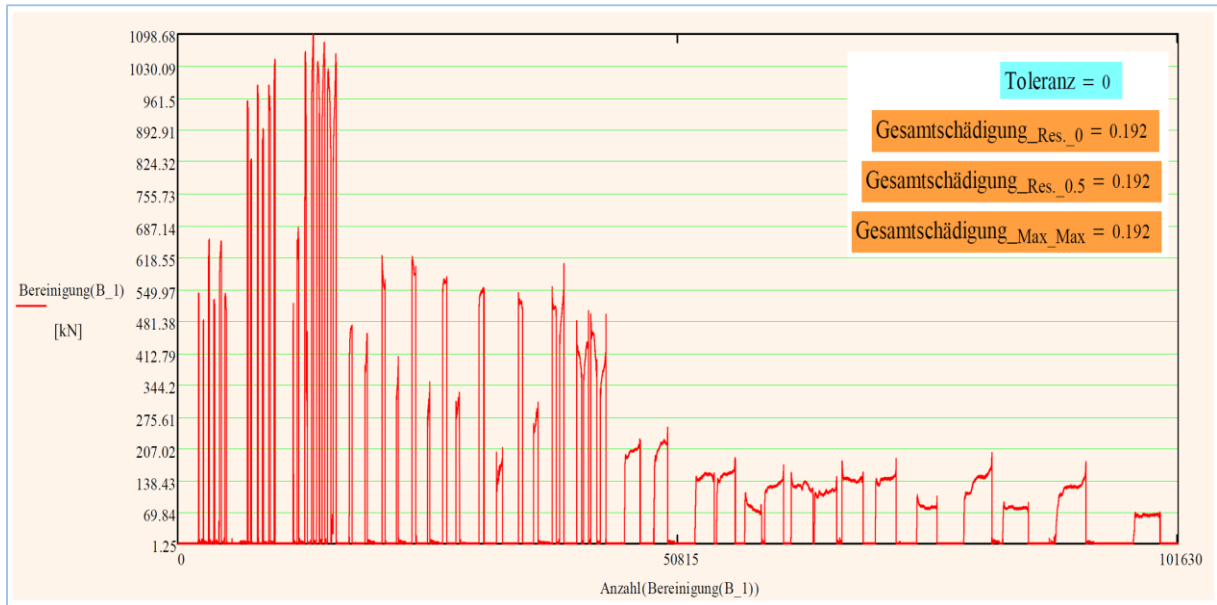


Abb. 5.10 Kraftverlauf nach der Bereinigung und Toleranz = 0,0

Der Kraftverlauf in Abb. 5.10 wird bei der Bereinigung ohne Toleranz auf 101630 Stützpunkten reduziert, da in diesem Fall viele gleiche Werte bzw. viele nicht Umkehrpunkte nebeneinander sind.

Obwohl es noch viele sehr kleine Schwingbreiten gibt, werden für einen Vergleich die Schädigungen berechnet.

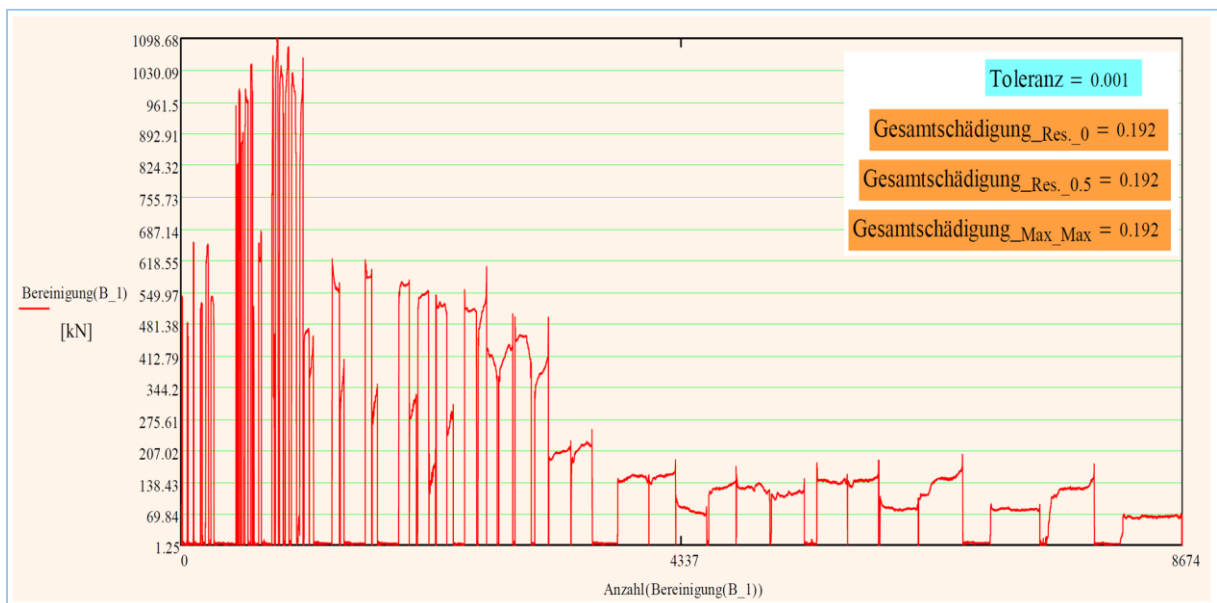


Abb. 5.11 Kraftverlauf nach der Bereinigung und Toleranz = 0,001

Der Kraftverlauf in Abb. 5.11 wird bei der Bereinigung mit Toleranz = 0,001 auf 8674 Stützpunkten reduziert.

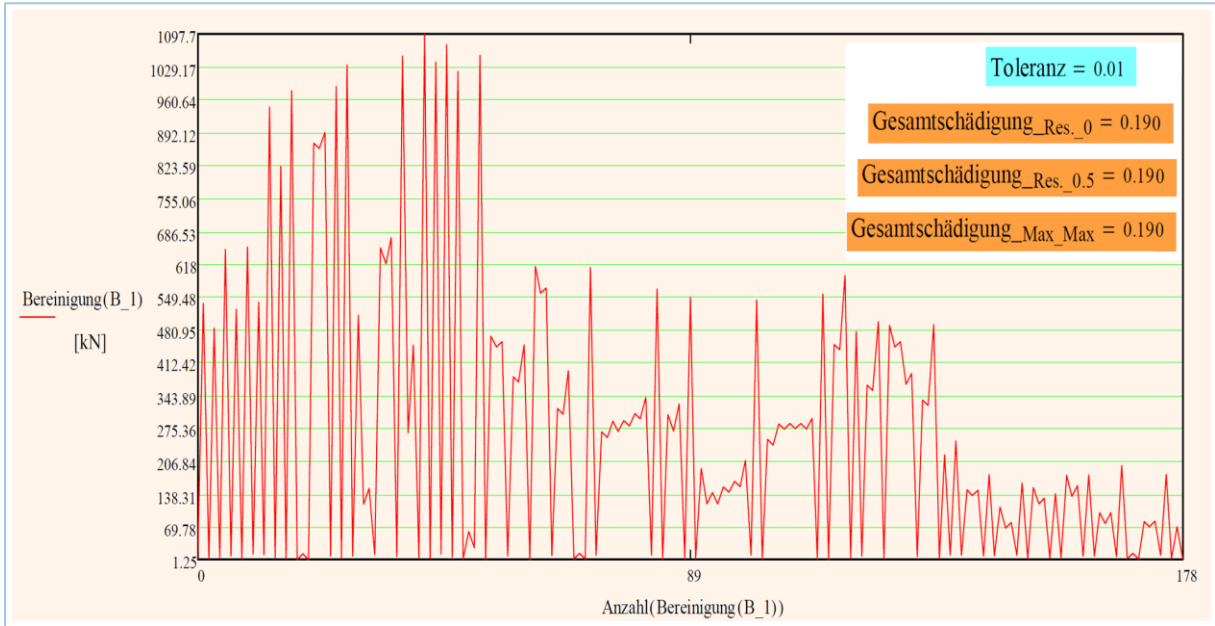


Abb. 5.12 Nach der Bereinigung und Toleranz = 0,01

Der Kraftverlauf in Abb. 5.12 wird bei der Bereinigung mit Toleranz = 0,01 auf 178 Stützpunkten reduziert.

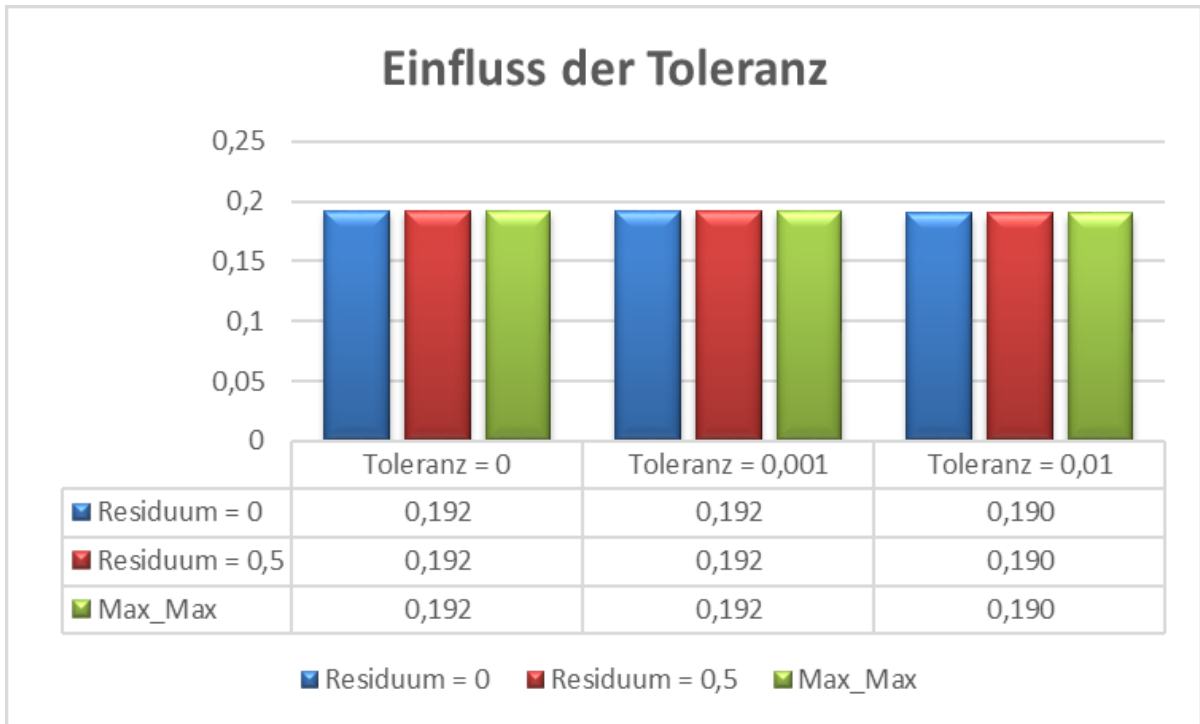


Abb. 5.13 Vergleich verschiedener Toleranzen für das Beispiel eines Kraftverlaufs

Bei dem Vergleich drei verschiedener Toleranzen in Abb. 5.13 ist zu erkennen, dass mit einer Toleranz = 0,001 die gleiche Schädigung berechnet werden kann, wie mit einer Toleranz = 0. Jedoch kann auch mit einer Toleranz = 0,01 eine vernachlässigbar kleine Abweichung erreicht werden.

5.3.2. Beispiel eines Momentenverlaufs

Der Momentenverlauf in Abb. 5.14 enthält vor der darauffolgenden Bereinigung mit dem Mathcad-Programm etwa 285000 Stützpunkte. Dabei kann man viele Schwingungen mit sehr kleinen Bereichen erkennen, welche keinen besonderen Einfluss auf die Gesamtschädigung haben. Deswegen wird diese Kurve nach der Bereinigung mit den Toleranzen = 0.0, 0.001 und 0.01, mit $N_D = 1000000$, $k = 5$, $L_D = 3700$ (kN.m), einer Klassenanzahl = 64 und einer Wiederholungszahl = 100000 zur Untersuchung des Einflusses dieser Toleranzen analysiert.

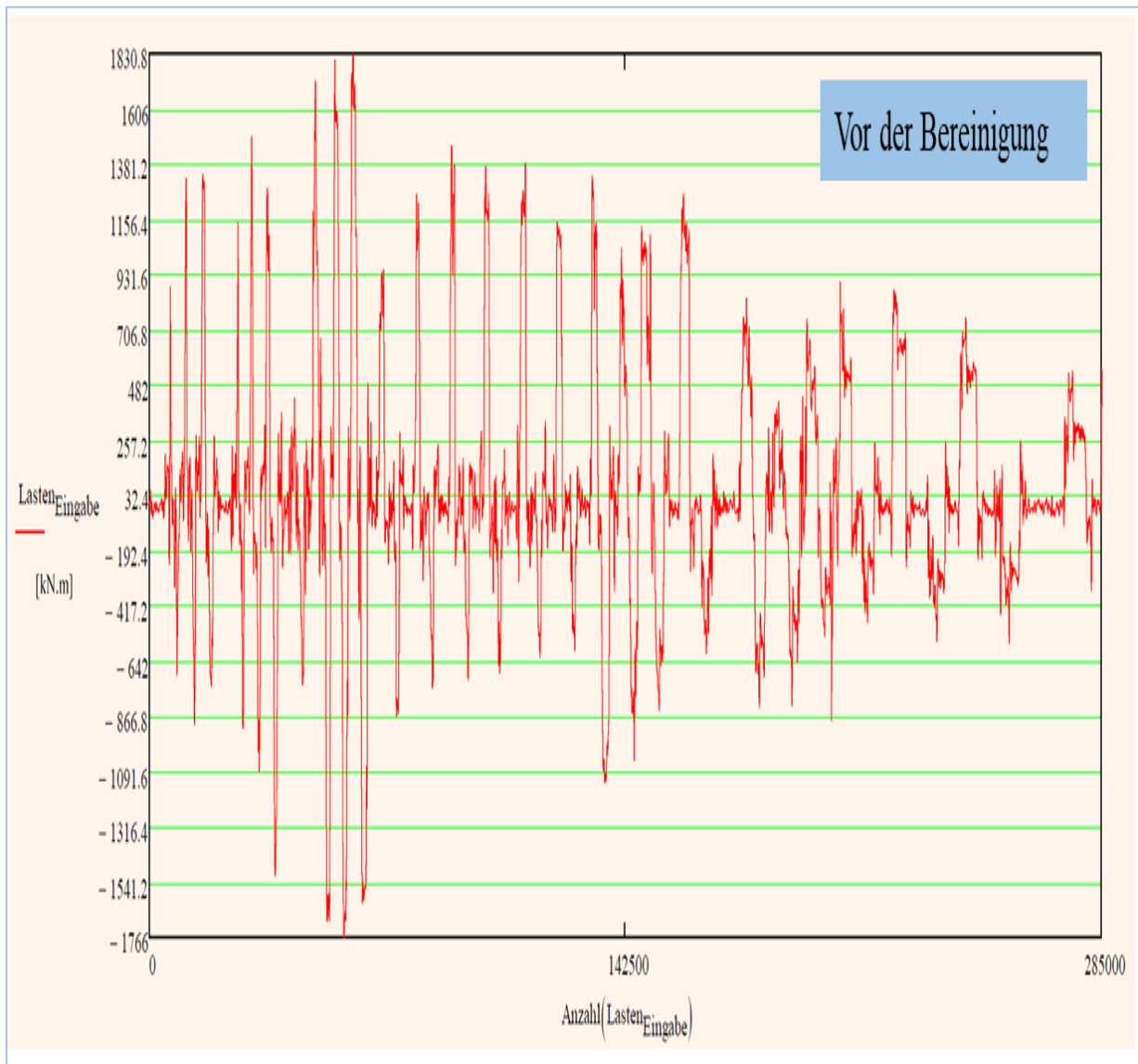


Abb. 5.14 Momentverlauf vor der Bereinigung

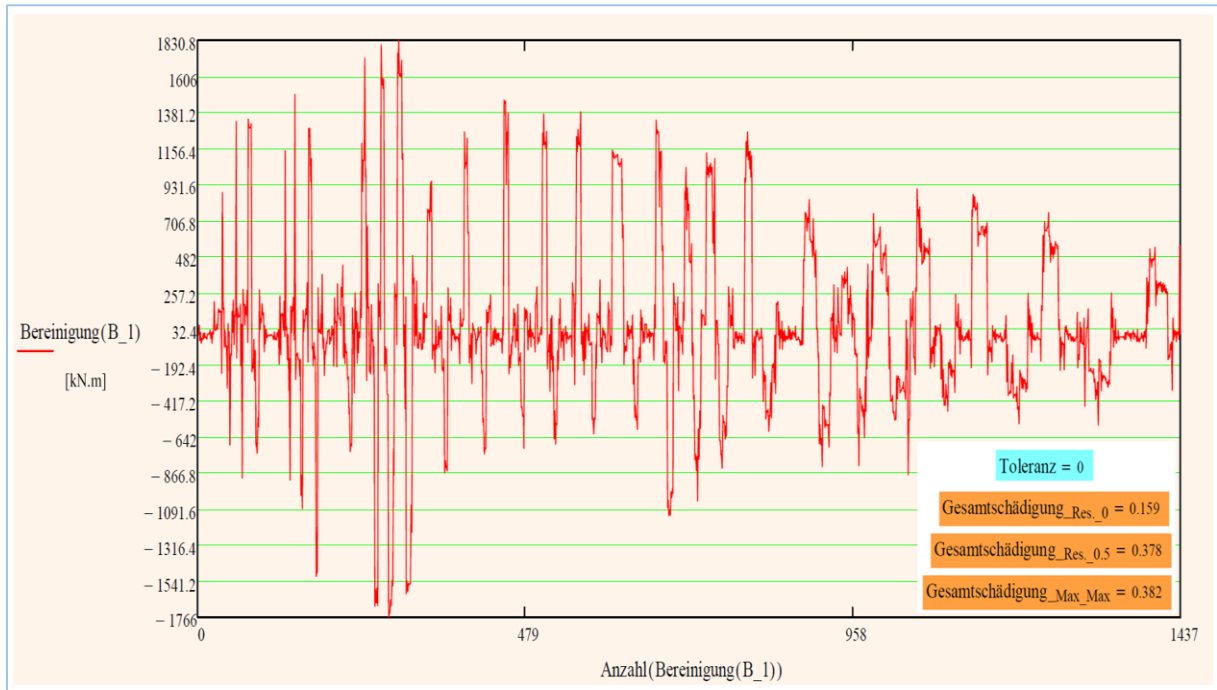


Abb. 5.15 Momentenverlauf nach der Bereinigung und Toleranz = 0,0

Der Momentenverlauf in Abb. 5.15 wird bei der Bereinigung ohne Toleranz auf 1437 Stützpunkten reduziert, da in diesem Fall viele gleiche Werte bzw. viele nicht Umkehrpunkte nebeneinander sind.

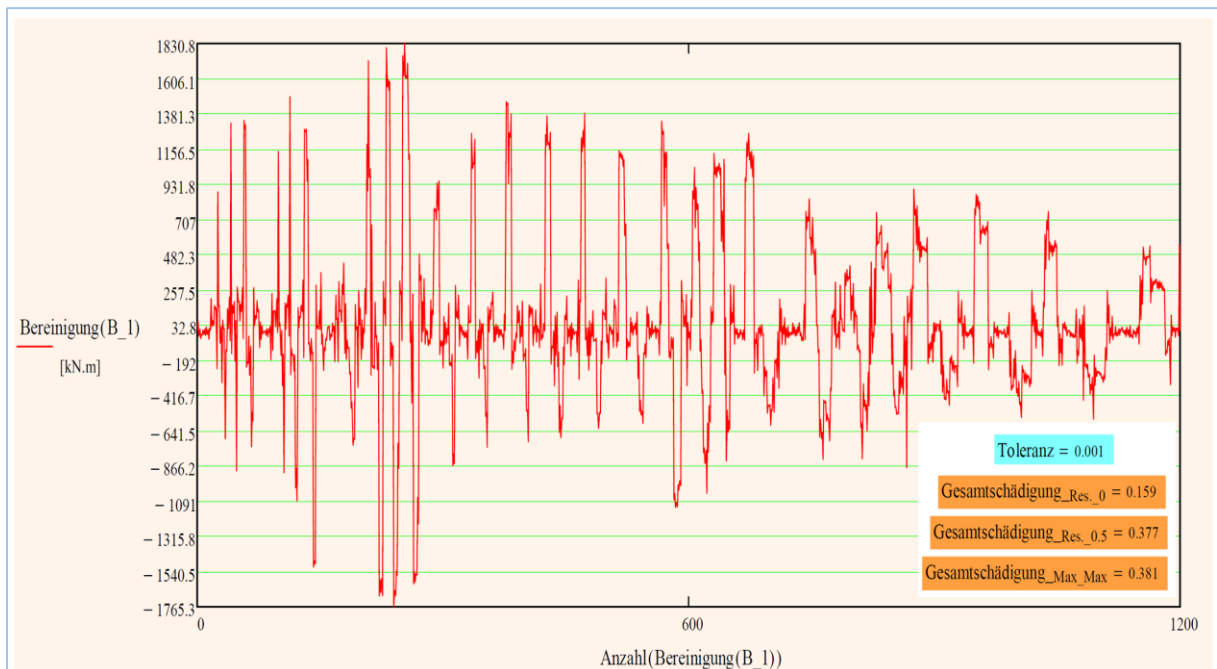


Abb. 5.16 Momentenverlauf nach der Bereinigung und Toleranz = 0,001

Der Momentenverlauf in Abb. 5.16 wird bei der Bereinigung mit Toleranz = 0,01 auf 1200 Stützpunkten reduziert.

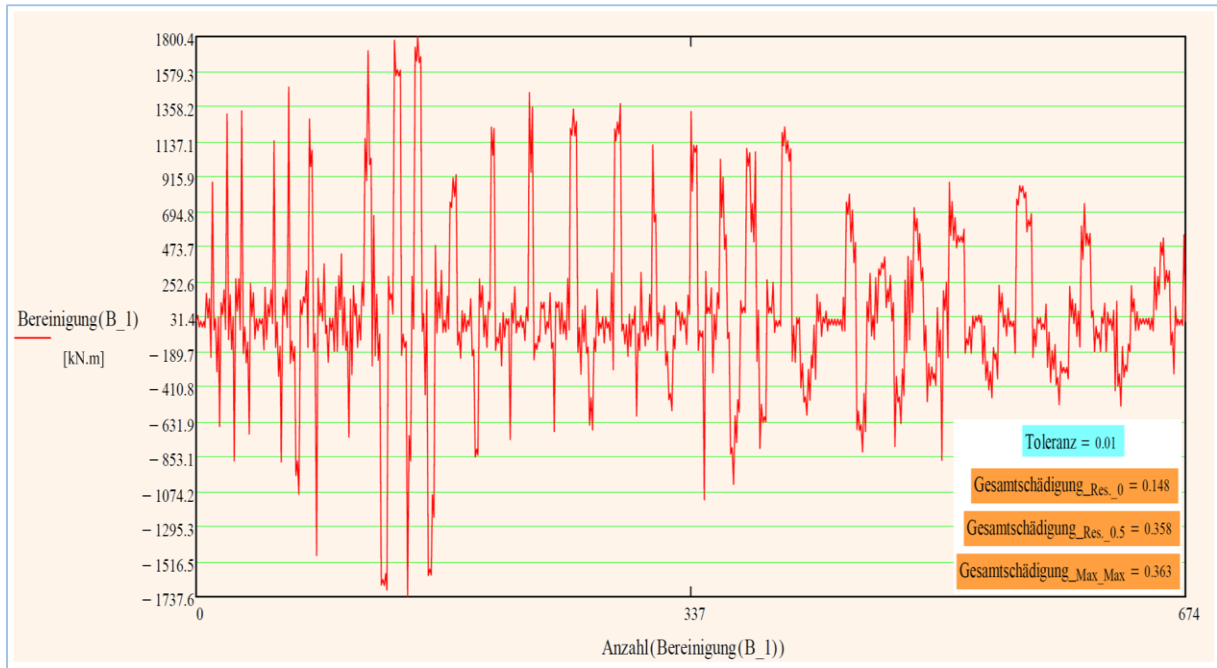


Abb. 5.17 Momentenverlauf nach der Bereinigung und Toleranz = 0,01

Der Momentenverlauf in Abb. 5.17 wird bei der Bereinigung mit Toleranz = 0,01 auf 674 Stützpunkten reduziert.

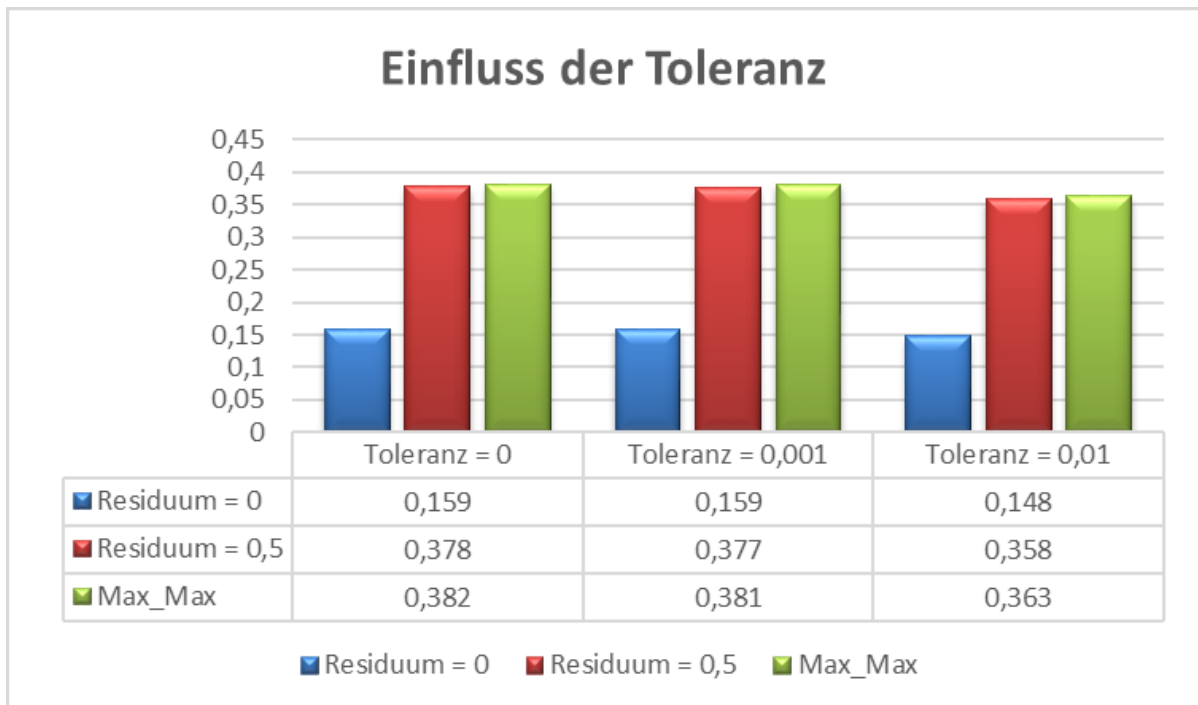


Abb. 5.18 Vergleich verschiedener Toleranzen für das Beispiel eines Momentenverlaufs

Bei dem Vergleich drei verschiedener Toleranzen in Abb. 5.18 ist zu erkennen, dass mit einer Toleranz = 0,001 und 0,01 eine vernachlässigbar kleine Abweichung erreicht werden kann.

5.4. Einfluss der Kurvenverschiebungen

5.4.1. Einfluss der Spiegelung

In Abb. 5.19 ist zu erkennen, dass die Spiegelung der Kurve keinen Einfluss auf die Schädigung hat.

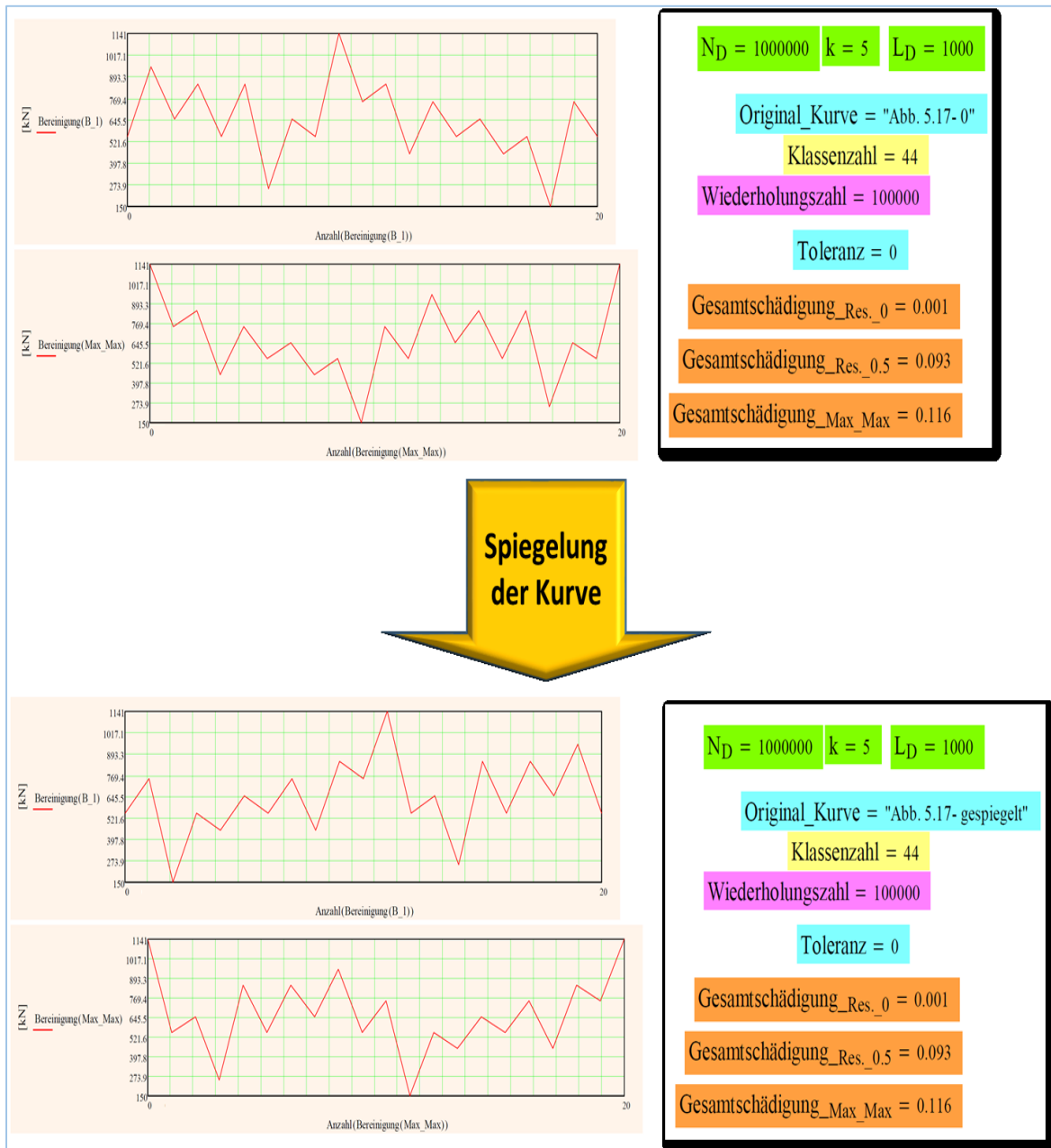


Abb. 5.19 Einfluss der Spiegelung einer BZF

Nach dem Vergleich der verschiedenen Kurven mit langen und kurzen BZF kann man folgende Schlussfolgerung treffen:

- die Spiegelung der Kurve kann nicht die Schädigung ändern

5.4.2. Einfluss der Duplizierung

Obwohl man mit der Duplizierung in Abb. 5.20 im Fall einer gleichen Wiederholungszahl die doppelte Schädigung und im Fall einer halben Wiederholungszahl die gleiche Schädigung erwarten würde, darf der Residuen-Einfluss auf die Duplizierung nicht vernachlässigt werden, da in der Realität keine Verdoppelung erreicht wird.

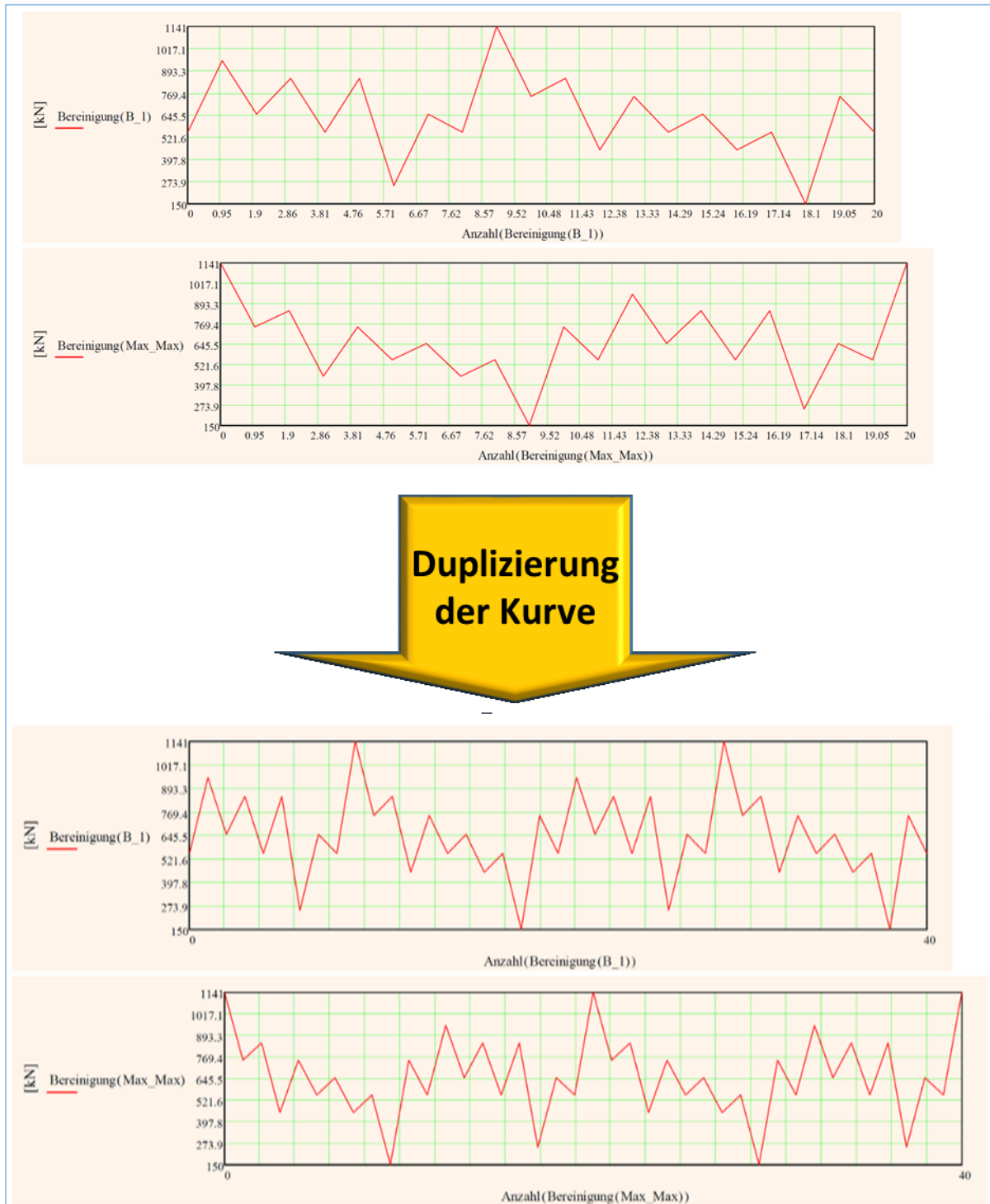


Abb. 5.20 Duplizierung einer kurzen BZF



Abb. 5.21 Einfluss der Duplizierung einer kurzen BZF

In Abb. 5.21 kann man erkennen, dass für die kurze wiederholte BZF bei einer Duplizierung nur die verschobene Max_Max-Kurve ein genaues Ergebnis liefern kann, weil die Residuen keinen Einfluss darauf haben.

Nach dem Vergleich der verschiedenen Kurven mit langen und kurzen BZF kann man folgende Schlussfolgerung treffen:

- Wegen dem Einfluss der Residuen auf die originale Kurve kann eine Duplizierung zu einer Änderung der Schädigung führen

5.4.3. Einfluss der Verschiebung von Stützpunkten

In Abb. 5.22 ist ein Beispiel einer Eingabe und Ausgabe der RFZ im Mathcad-Programm und die Verschiebungsrichtung der Stützpunkte dargestellt.



Abb. 5.22 Beispiel der Verschiebung von Stützpunkten

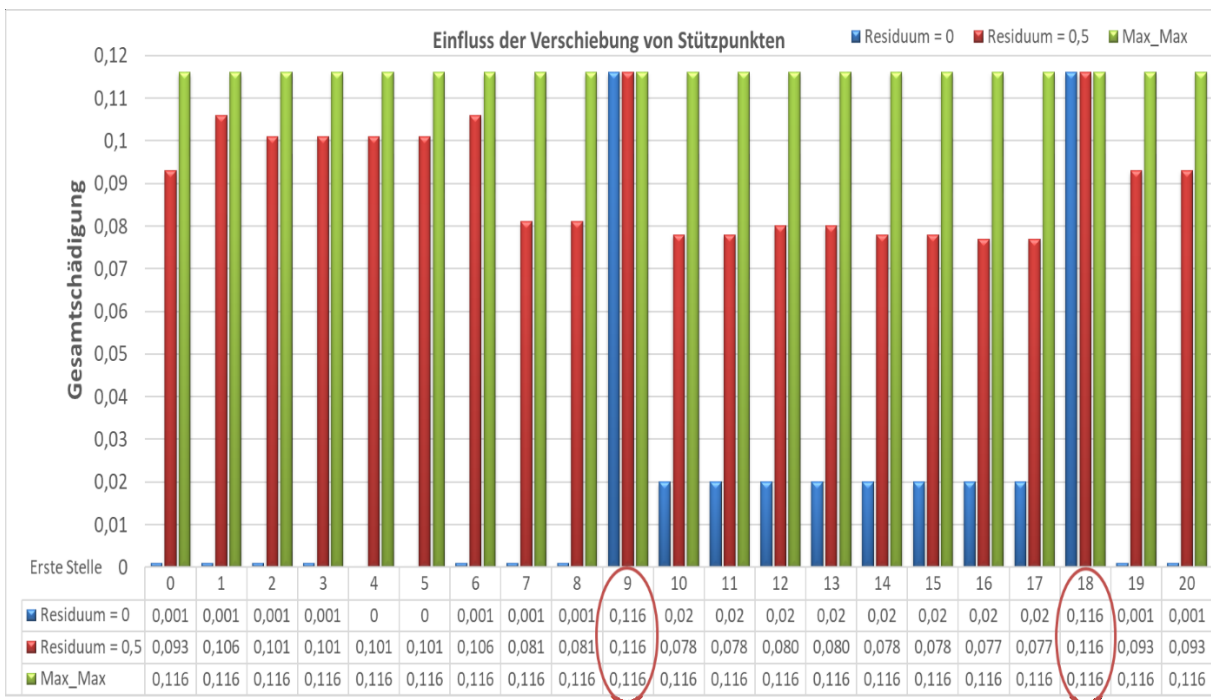


Abb. 5.23 Gesamtschädigung der verschobenen Kurven

Abb. 5.23 zeigt den Vergleich der Gesamtschädigungen von den verschobenen Kurven. Da an der Stelle 9 der größte Maximalwert und an der Stelle 18 der kleinste Minimalwert am Anfang und am Ende der Kurve auftreten, ist hier die Gesamtschädigung mit und ohne Residuum gleich groß. Somit liefern diese auch die zuverlässigsten Ergebnisse, da in diesen Fällen die Residuen keinen Einfluss auf die Schädigung haben. Deshalb ist bei zyklischen Kurven immer die Verschiebung der Kurve auf MAX_MAX bzw. MIN_MIN durchzuführen.

6. Erprobung der Lebensdauerberechnung

6.1. Beschreibung der Probe

Zur Lebensdauerberechnung wird eine geschweißte horizontale Konsole mit dem FE-Modell als Probe mit verschiedenen Arten von Schweißnähten und einem k-Wöhler-Exponenten für Schweißnähte von 3 ausgewählt (Abb. 6.1).

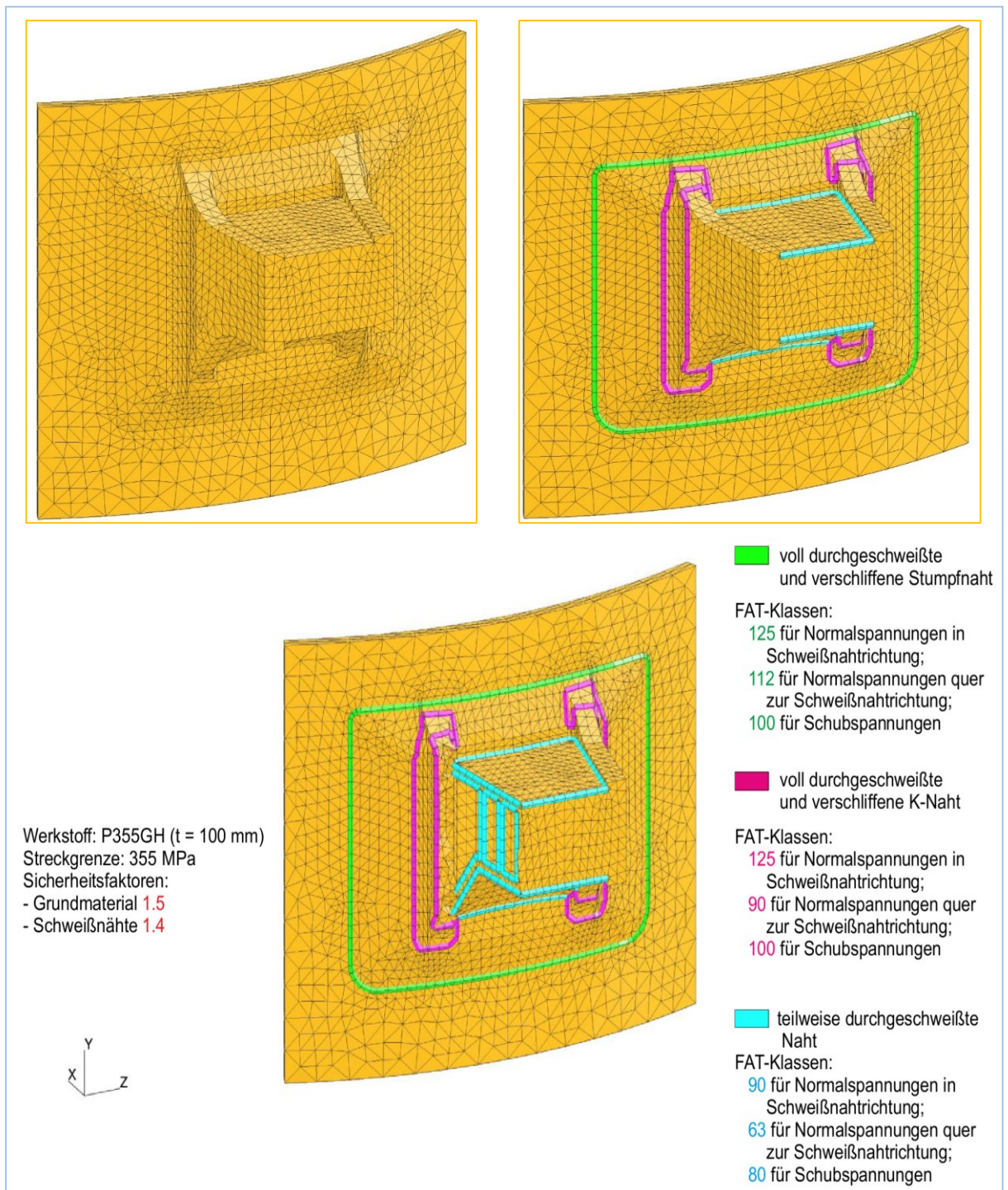


Abb. 6.1 FE-Modell einer horizontalen Konsole mit FAT-Klassen in isometrischer Ansicht

6.2. Beschreibung der Belastung

Die folgenden Belastungen in z-Richtung werden 100000-mal wiederholt, wie in Abb. 6.2 dargestellt ist. Die Belastungs-Zeit-Funktion wird definiert als Kurvenverlauf mal der Wiederholungszahl.

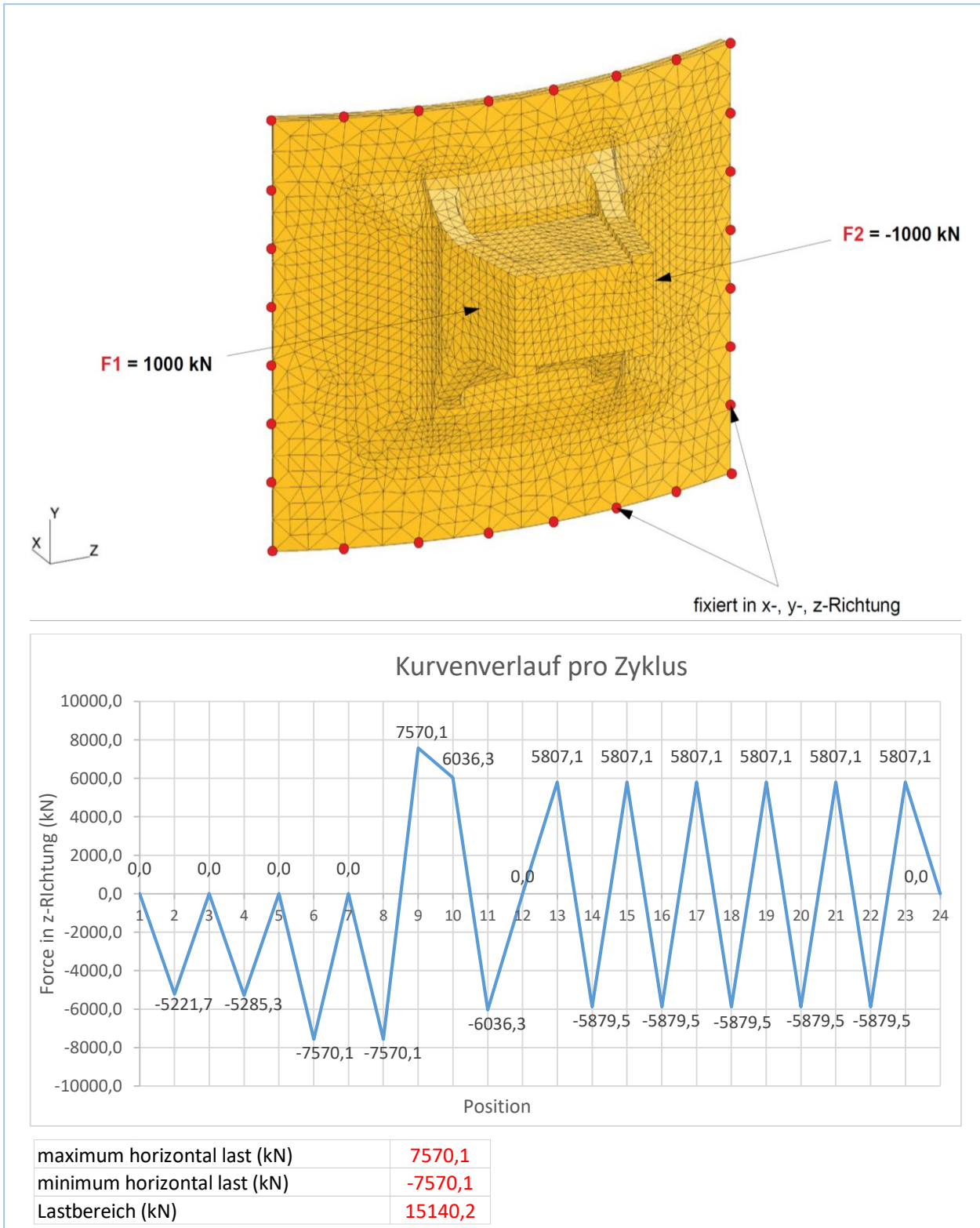


Abb. 6.2 BZF und Richtung der Belastungen an der Probe

6.3. Ermittlung des Lastspiels nach der RFZ

Zur Erprobung der Lebensdauerberechnung und des Lastspiels eines Beispiels mit IBF-Fatigue aus der Praxis, können zwei Verfahren für die Ermittlung herangezogen werden:

- Exakte Ermittlung des Lastspiels nach der RFZ
- Ermittlung der Lastklassen nach der RFZ mit Klasse 64

6.3.1. Exakte Ermittlung des Lastspiels nach der RFZ

Der Rainflow-Zählungsverlauf der untersuchten Kurve wird in Abb. 6.3 dargestellt.

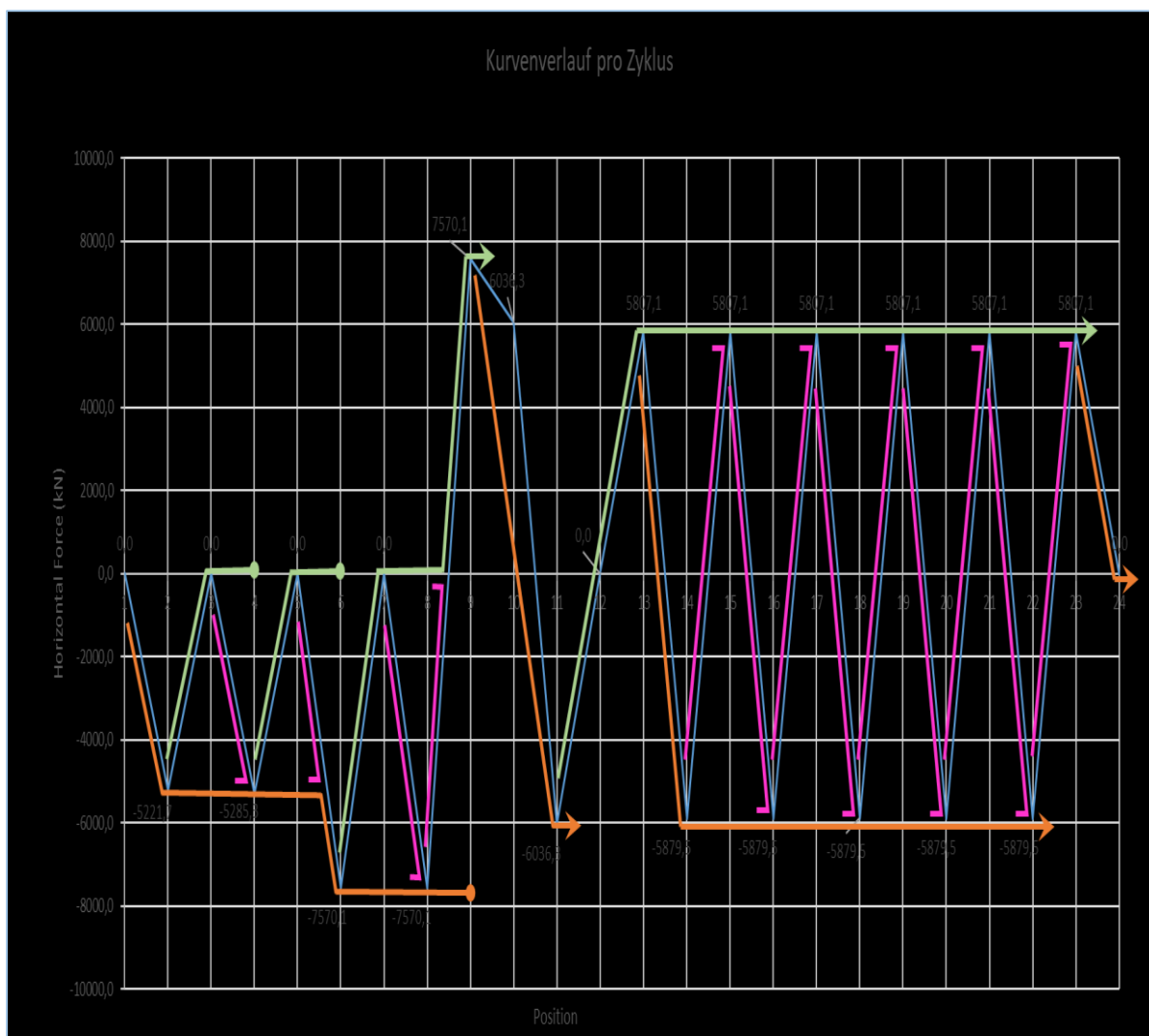


Abb. 6.3 Rainflowzählung der Kurve

Zur Erprobung mit IBF-Fatigue werden die Ergebnisse der exakten Lastspiele nach der RFZ in die Tabelle 6.1 eingetragen.

Exakte Ermittlung des Lastspiels (EXAKT)						
Nr.	Schwinspiel	Schleifen	Schwingbereite(kN)	Mittelwert (kN)	Oberwert (kN)	Unterwert (kN)
1	50000	1 - 6	7570,1	-3785,1	0	-7570,1
2	100000	2 - 3	5221,7	-2610,9	0	-5221,7
3	100000	4 - 5	5285,3	-2642,7	0	-5285,3
4	50000	6 - 9	15140,2	0,0	7570,1	-7570,1
5	100000	7 - 8	7570,1	-3785,1	0	-7570,1
6	50000	9 - 11	13606,0	766,9	7570,1	-6036,3
7	50000	11 - 13	11843,0	-114,6	5807,1	-6036,3
8	100000	13 - 15	11687,0	-36,2	5807,1	-5879,5
9	100000	15 - 17	11687,0	-36,2	5807,1	-5879,5
10	100000	17 - 19	11687,0	-36,2	5807,1	-5879,5
11	100000	19 - 21	11687,0	-36,2	5807,1	-5879,5
12	100000	21 - 23	11687,0	-36,2	5807,1	-5879,5
13	50000	23 - 24	5807,0	2935,1	5870,1	0

Tabelle 6.1 Exakte Ergebnisse der Rainflowzählung

6.3.2. Ermittlung der Lastklassen nach der RFZ mit Klasse 64

Die bereinigten und verschobenen Belastungen (kN) im Mathcad-Programm werden in Abb. 6.4 dargestellt.

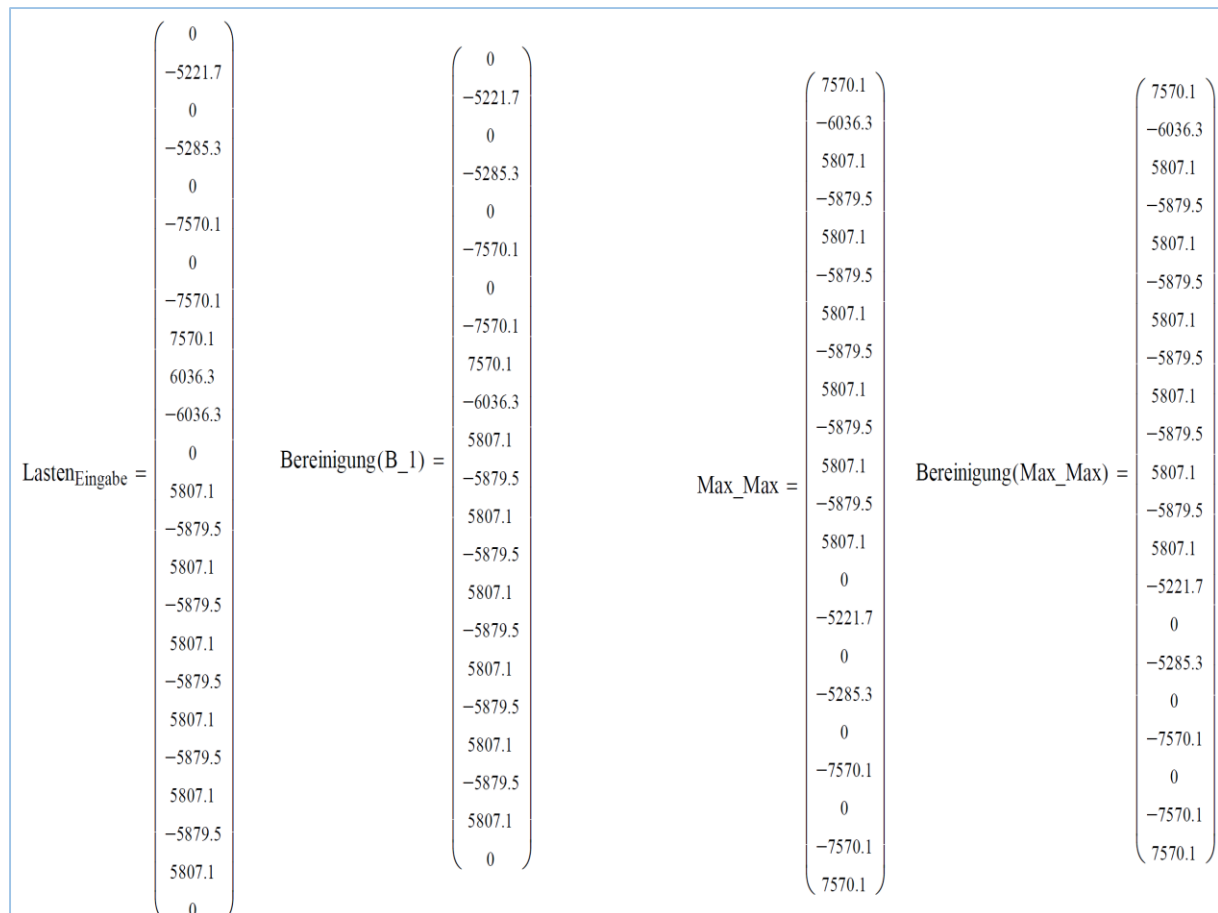


Abb. 6.4 Vorbereitung der Belastungen [kN] im Mathcad-Programm

Abb. 6.5 zeigt die bereinigte Kurve ohne einer Verschiebung im Mathcad-Programm.

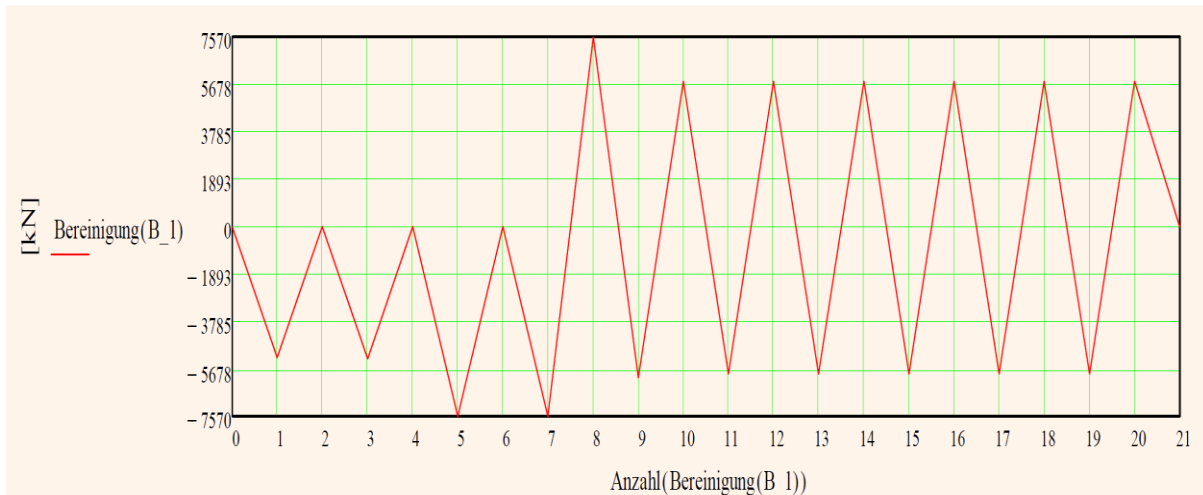


Abb. 6.5 Bereinigte Kurve ohne Verschiebung im Mathcad-Programm

In Abb. 6.6 ist die bereinigte Kurve mit einer Verschiebung (Max_Max) im Mathcad-Programm dargestellt.

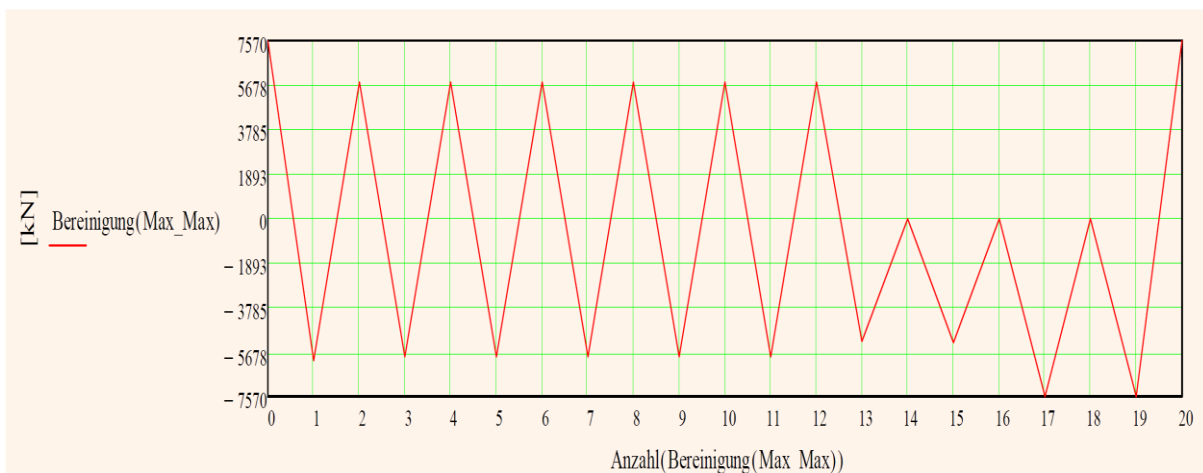


Abb. 6.6 Bereinigte Kurve mit Verschiebung (Max_Max) im Mathcad-Programm

Falls die Klassenanzahl = 64 als geeignete Klasse ausgewählt wird, wird die Klassenbreite wie folgt berechnet: $(7570,1 - (-7570,1))/64 = 236,57$ (kN) (immer unabhängig von der Verschiebung). Abb. 6.7 zeigt das Ergebnis der Klassenbreite bei Klassenanzahl = 64.

$$\text{Klassenbreite} = 236.57$$

Abb. 6.7 Klassenbreite für die Klassenanzahl = 64 im Mathcad-Programm

Die Schwingbreiten und Mittelwerte mit Klassenanzahl = 64 und Residuum = 0 werden für die gewählte Probe im Mathcad-Programm berechnet (Abb. 6.8).

"Schwingbreite (kN)"	"Mittelwert (kN)"	"Schwingspielen"
5441.009	-2602.222	200000
7570.1	-3548.484	100000
11828.281	236.566	500000

Abb. 6.8 Ergebnisse der RFZ für Residuum = 0 im Mathcad-Programm

Die Schwingbreiten und Mittelwerte mit Klassenanzahl = 64 und Residuum = 0,5 werden für die gewählte Probe im Mathcad-Programm berechnet (Abb. 6.9).

"Schwingbreite (kN)"	"Mittelwert (kN)"	"Schwingspielen"
5441.009	-2602.222	200000
6150.706	3075.353	50000
7570.1	-3548.484	150000
11828.281	236.566	500000
12064.847	0	50000
13720.806	946.263	50000
15140.2	236.566	50000

Abb. 6.9 Ergebnisse der RFZ für Residuum = 0,5 im Mathcad-Programm

Die Schwingbreiten und Mittelwerte mit Klassenanzahl = 64 und Verschiebung Max_Max werden für die gewählte Probe im Mathcad-Programm berechnet (Abb. 6.10).

"Schwingbreite (kN)"	"Mittelwert (kN)"	"Schwingspielen"
5441.009	-2602.222	200000
7570.1	-3548.484	100000
11828.281	236.566	500000
12064.847	0	100000
15140.2	236.566	100000

Abb. 6.10 Ergebnisse der RFZ für Verschiebung Max_Max im Mathcad-Programm

6.4. Lebensdauerberechnung mit IBF-Fatigue nach der FKM-Richtlinie

6.4.1. Softwarepaket IBFatigue

Das IBF-Fatigue ist ein selbst entwickelndes Programm von Ingenieurbüro Fiedler mit dem ein Festigkeitsnachweis nach geführt werden kann. Die ersten Versionen stammen vom Jahre 2001 und wurden ständig weiterentwickelt. Das IBF-Fatigue ist ein Programm für die Betrachtung der statische Festigkeit und der Ermüdungsfestigkeit (Betriebsfestigkeit) auf Basis von Normen und Richtlinien. Neben vielen anderen Normen ist auch die FKM-Richtlinie - 6. Auflage mit dem Transformationsverfahren implementiert. Das angeführte Beispiel wurde wie angeführt mit der FKM-Richtlinie berechnet. Die FKM-Richtlinie wurde anhand von MathCad- und FEMFAT- Vergleichsrechnungen verifiziert. Mit dem Programm IBF-Fatigue können die Festigkeiten von Schweißkonstruktion, von Schmiedebauteile und Gussteilen untersucht werden.

Das IBF-Fatigue weist folgenden Programmaufbau auf (Abb. 6.11). [56]

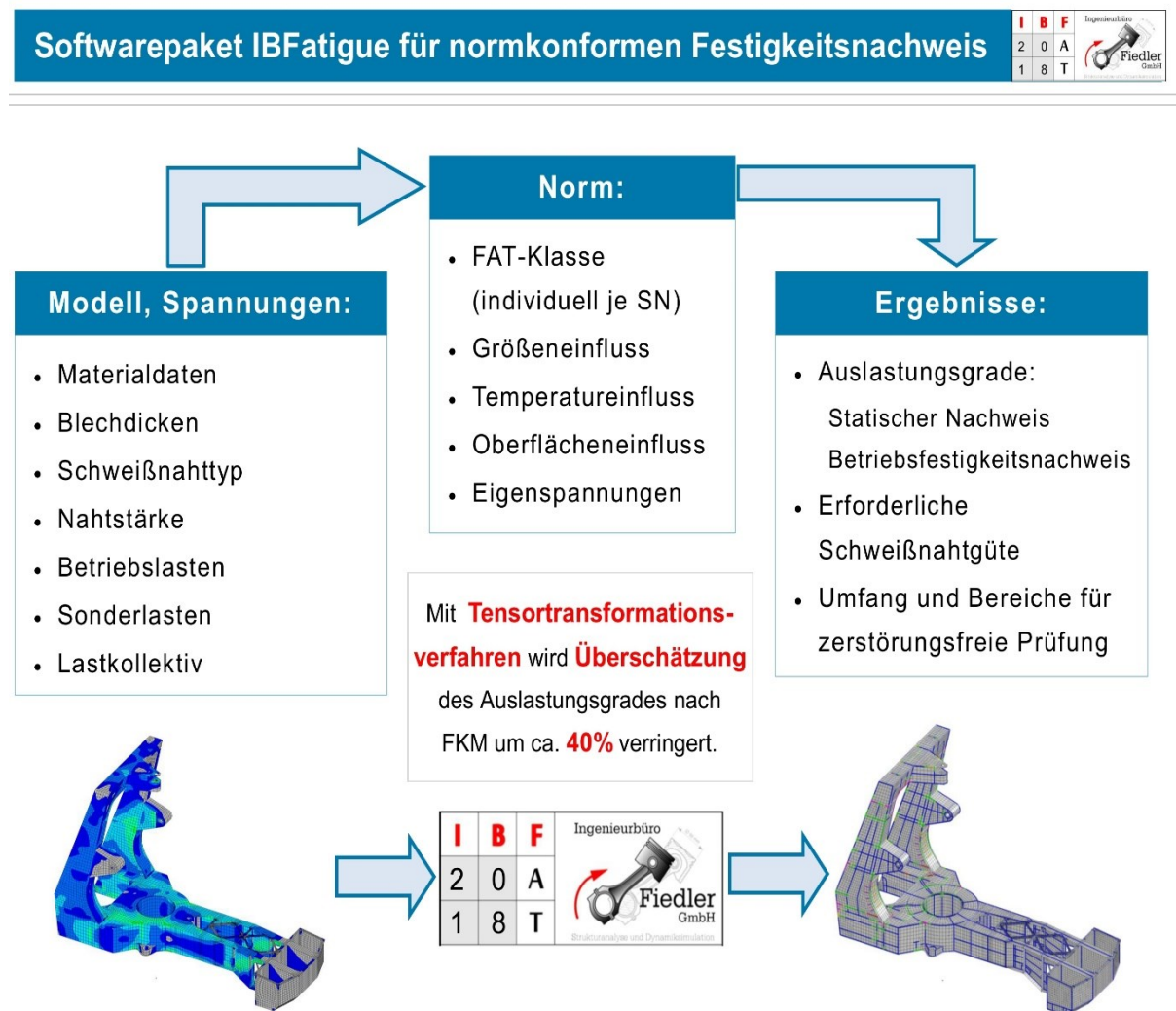


Abb. 6.11 Softwarepaket IBFatigue für normkonformen Festigkeitsnachweis [56]

6.4.2. Lebensdauerberechnung mit RFZ-Ergebnissen für exakte Lastspiele

Für die drei verschiedenen Arten von Schweißnähten wird der zyklische Auslastungsgrad der Betriebsfestigkeit nach der FKM-Richtlinie und die exakten Lastspiele in Abb. 6.12 dargestellt. Diese stellen eine gute Referenz für die Auswertung der Ergebnisse im Mathcad-Programm dar.

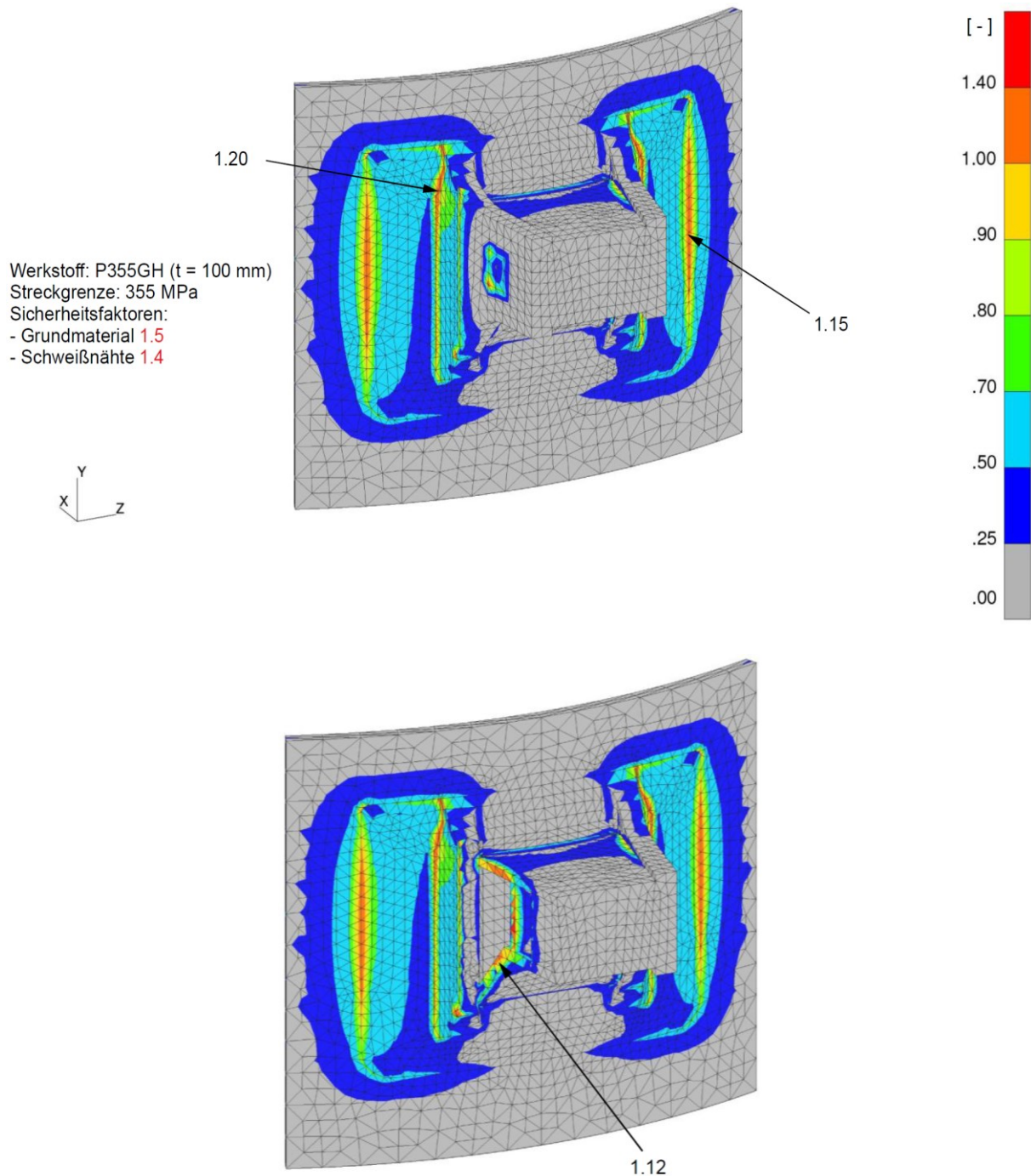


Abb. 6.12 Lebensdauerberechnung mit RFZ-Ergebnissen für exakte Lastspiele

6.4.3. Lebensdauerberechnung mit RFZ-Ergebnissen für Residuum 0,5

Für die 3 verschiedenen Arten von Schweißnähten wird der zyklische Auslastungsgrad der Betriebsfestigkeit nach der FKM-Richtlinie und das Residuum = 0,5 in Abb. 6.13 dargestellt.

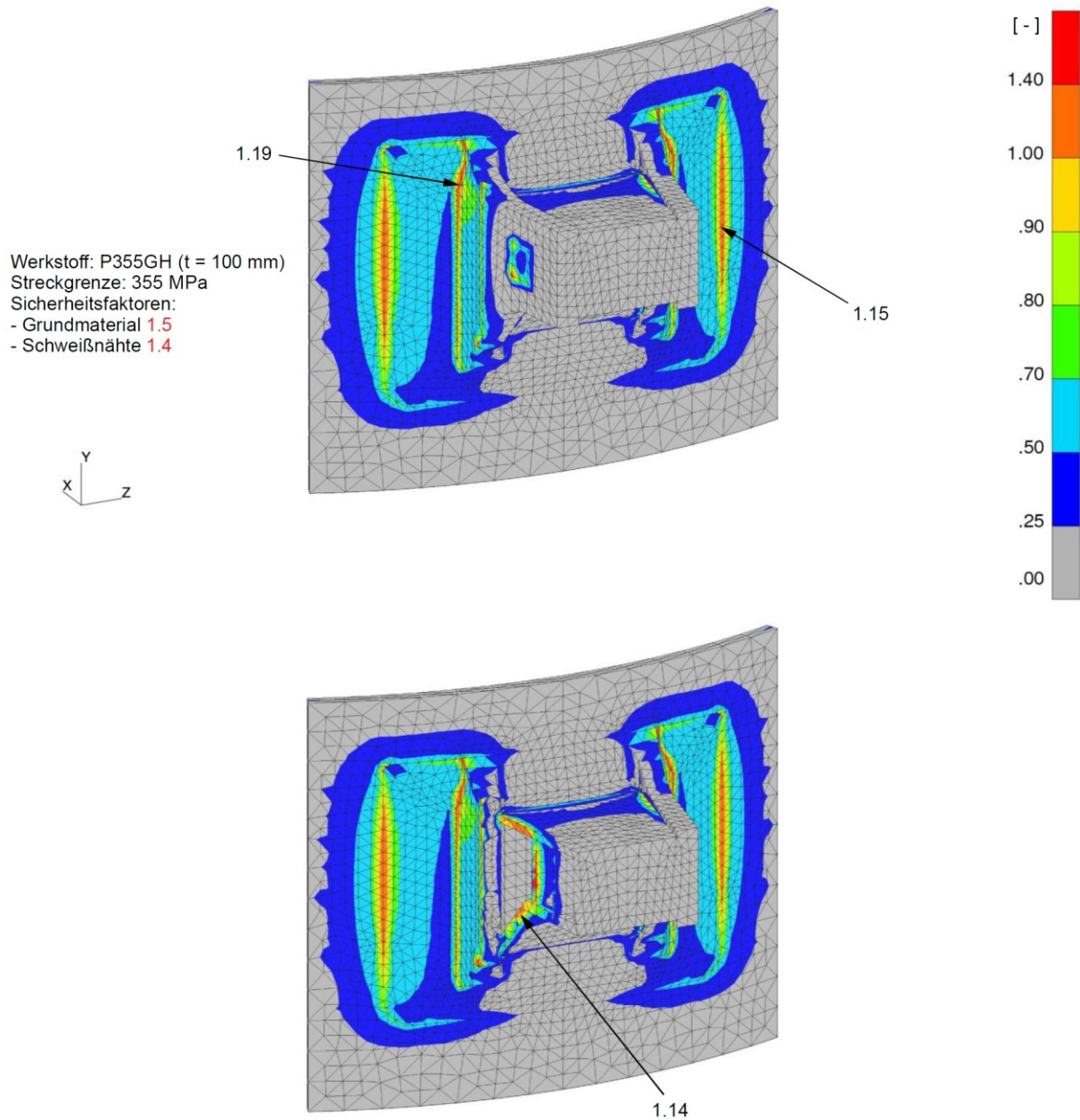


Abb. 6.13 Lebensdauerberechnung mit RFZ-Ergebnissen für Residuum 0,5

6.4.4. Lebensdauerberechnung mit RFZ-Ergebnissen für Verschiebung Max_Max

Für die drei verschiedenen Arten von Schweißnähten wird der zyklische Auslastungsgrad der Betriebsfestigkeit nach der FKM-Richtlinie und die Verschiebung Max_Max in Abb. 6.14 dargestellt.

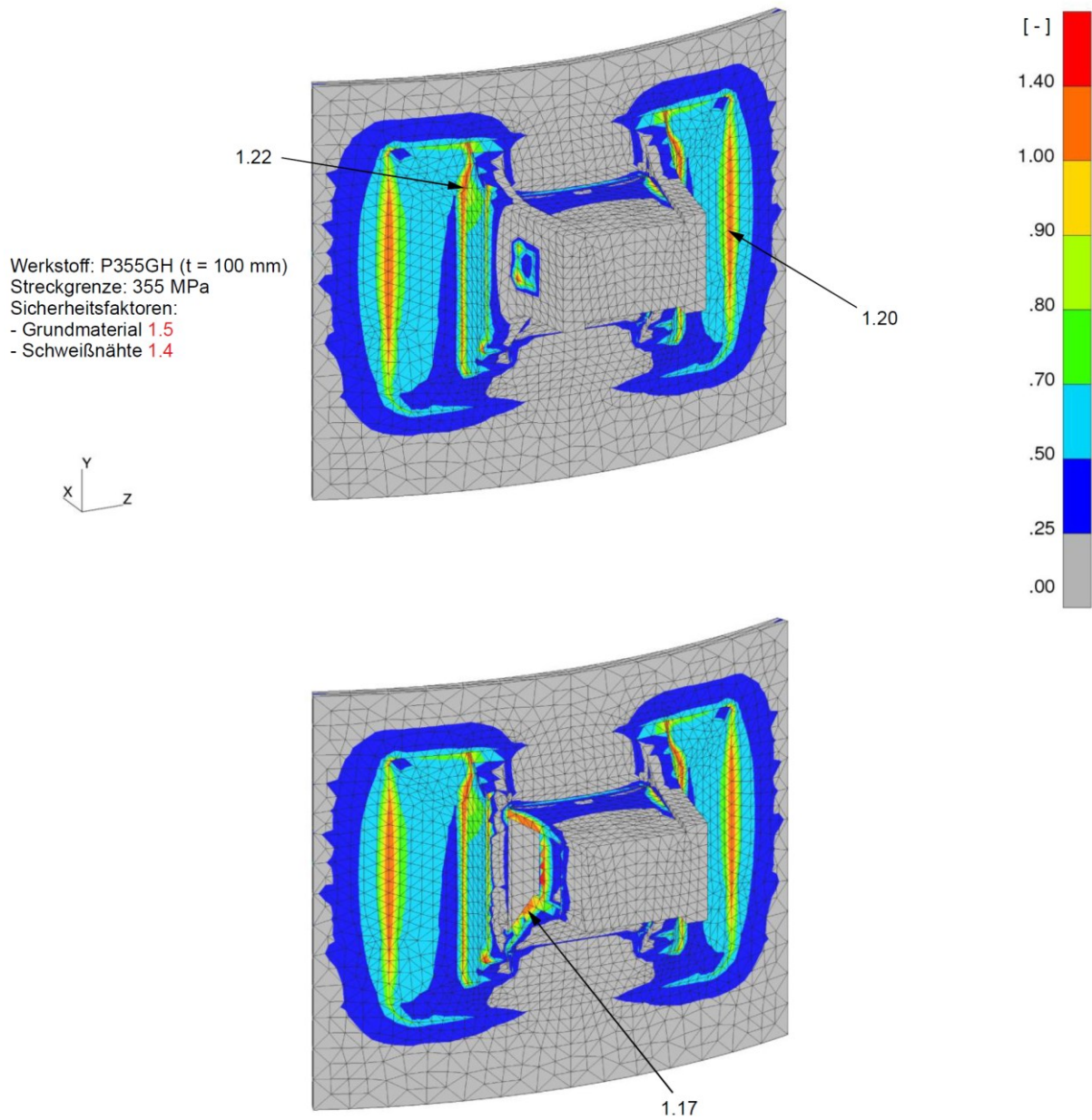


Abb. 6.14 Lebensdauerberechnung mit RFZ-Ergebnissen für Verschiebung Max_Max

6.4.5. Vergleich der Ergebnisse

Das Resultat gemäß der FKM-Richtlinie für eine Klassenanzahl = 64 zeigt, dass im Vergleich der exakten Belastungswerte mit den kollektiven Belastungswerten und einem Residuum = 0,5 eine Abweichung von weniger als 2% erreicht (Abb. 6.15). Bei der exakten Lösung wurde die Kurve nicht verschoben und somit ist diese nur mit Residuum = 0,5 direkt vergleichbar. Der Auslastungsgrad bei der MAX_MAX Verschiebung ist um 2 - bis 5% höher.

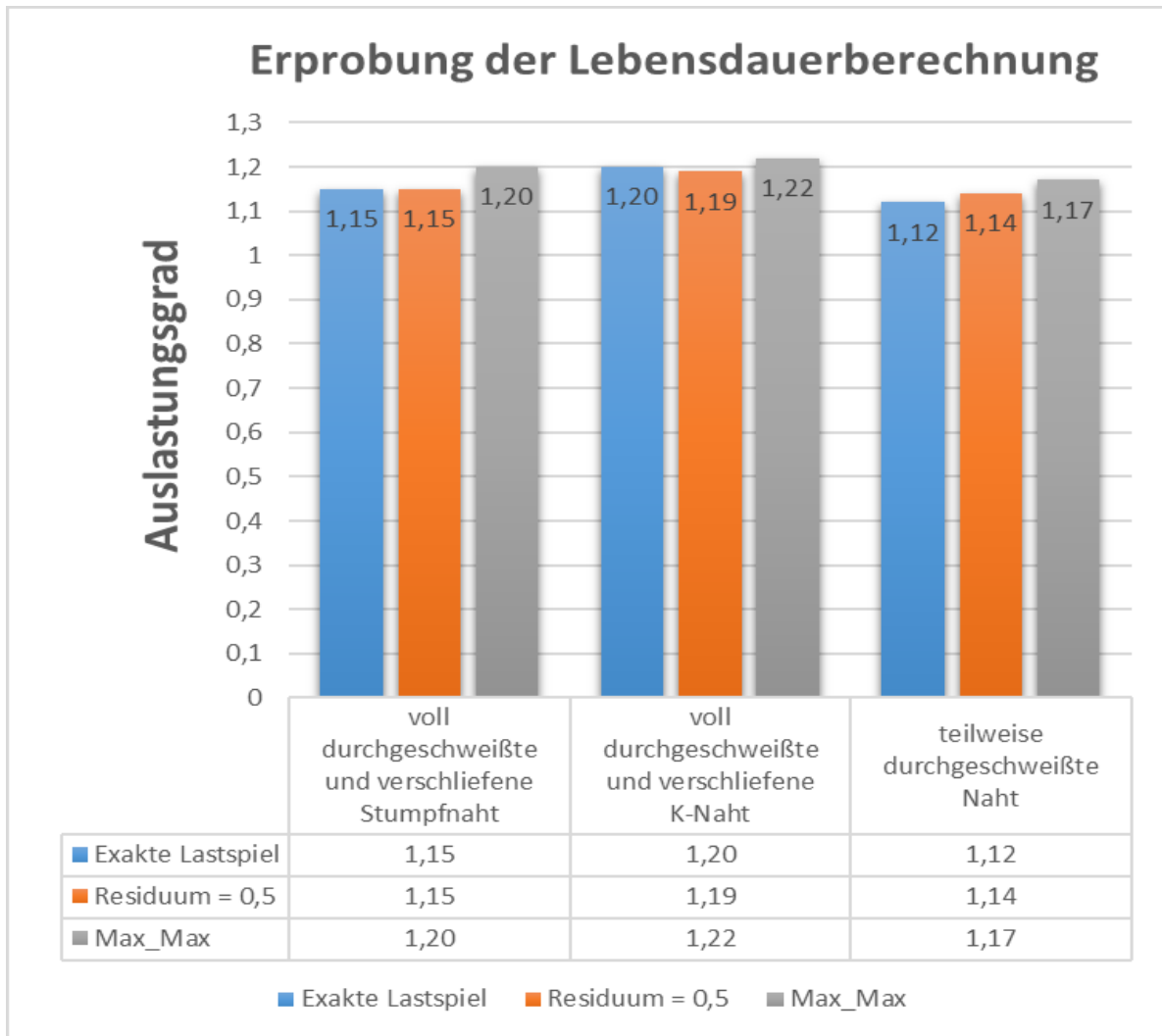


Abb. 6.15 Erprobung der Lebensdauerberechnung

7. Zusammenfassung und Ausblick

Eine der anzuwendenden Zählungsverfahren der Lastkollektive auf Bauteilkomponenten ist die Rainflow-Zählung (RFZ) nach ASTM E1049-85 (erneut genehmigt 2017) in der Betriebsfestigkeit. Mit dieser Norm ist es möglich, für die RFZ zyklischer (wiederholter) Kurven mit einer geringen Anzahl an Stützpunkten (z.B. $N < 100.000$ nach der Bereinigung und Toleranz) zwei Methoden zu verwenden. Es kann sowohl ein Residuum = 0,5 als auch eine verschobene Kurve Max_Max bzw. Min_Min verwendet werden. Für Messkurven mit einer großen Anzahl an Stützpunkten (z.B. $N > 100.000$ nach der Bereinigung und Toleranz) ist es jedoch nur möglich mit einem Residuum = 0,5 zu arbeiten.

Das Ziel dieser Arbeit war es, eine automatische und zuverlässige Rainflow-Zählung nach dem erwähnten Standard, mit dem Softwarepaket IBF-Fatigue vom Ingenieurbüro Fiedler GmbH, auf Basis von FE-Spannungsergebnissen für geschweißte und nicht geschweißte Stahlbaukomponenten zu ermöglichen. Die verschiedenen Zählverfahren werden im Kapitel Stand der Technik auf die Vorteile und Nachteile untersucht, um deren Anwendungsfähigkeit zur Ermittlung der Belastungsschwingbreiten, Mittelwerte sowie der Ober- und Unterbelastungen für die Zählung der BZFn zu bestimmen. Es kann darauf geschlossen werden, dass die RFZ alle Parameter ermitteln kann.

Für die Aufbereitung der ausgewählten Rainflow-Zählung (RFZ) in Form eines Mathcad-Files wurde sowohl ein Rechenablauf für zyklisch (wiederholte) Kurven mit einer geringen Anzahl an Stützpunkten (z.B. $N < 100.000$ nach der Bereinigung und Toleranz) mit Residuum = 0 und 0,5 als auch für die verschobene Kurve Max_Max erstellt. Zur Validierung der Funktion und der Ergebnisse im Mathcad-Programm wurde mit händisch geprüften Ergebnissen verglichen.

Analysierungen des Einflusses der Residuen zeigen, dass die Ergebnisse für zyklische (wiederholte) Kurven mit einer geringen Anzahl an Stützpunkten (z.B. $N < 100.000$ nach der Bereinigung und Toleranz) wesentlich von der Position des maximalen bzw. minimalen Spitzenwertes abhängen. Die Klasse 64 kann für beliebige BZFn mit großer Zuverlässigkeit verwendet werden. Auch die Klasse 32 kann unter Vorbehalt ebenfalls verwendet werden. Berechnungen, die auf der Klasse 256 oder auf höheren Klassen basieren, führen zu keinem signifikant genaueren Ergebnis als mit Klasse 64 bzw. 128, diese wären daher nur Zeitverschwendung. In den meisten Fällen führen Berechnungen mit Klassen 8 oder 16 zu großen Abweichungen und Fehlern (Klasse 8 bis zur zirka 50% und Klasse 16 bis zur zirka 25%) im Ergebnis.

Der Software wurde zur Reduzierung unnötiger kleiner Schwingbreiten eine optionale Funktion mit auswählbarer Toleranz hinzugefügt, die den Verarbeitungsprozess mit nur sehr kleinen Abweichungen beschleunigt. Die Untersuchung des Einflusses der Toleranz (mit einem Home-PC- CORE i7) von experimentellen Lastkollektiven mit der Klassenanzahl = 64 und Lastspielzahl im Bereich von 10^5 zeigen, dass der wesentlichste Unterschied der Gesamtschädigung zwischen einer Toleranz = 0 und Toleranz = 0,001 weniger ist als 1%. Trotz dessen wird die Toleranz = 0,001 mit einer Lastspielzahl im Bereich von 10^3 in 20 Minuten und die ohne Toleranz in zwei Stunden berechnet. Die Abweichung der Gesamtschädigung mit Toleranz = 0,01 und einer Lastspielzahl im Bereich von 10^2 beträgt etwa 5% weniger als die Gesamtschädigung ohne Toleranz und wird in 15 Minuten berechnet.

Die implementierte automatische Rainflowzählung von Lastkollektiven nach ASTM E1049-85 ermöglicht eine effiziente Beurteilung verschiedener Komponenten im Maschinen- und Anlagenbau.

Folgend sind die Ergebnisse der Untersuchungen, mit den günstigsten Parametern für die Lebensdauerberechnung, aufgelistet:

Für zyklische (wiederholte) Kurven mit einer geringen Anzahl an Lastspielen:

- Toleranz: 0
- Klassenanzahl: 64 (32)
- Methode: Verschobene Kurve (Max_Max) bzw. (Min_Min)

Für Messkurven oder zyklisch (wiederholte) Kurven mit einer großen Anzahl an Lastspielen:

- Toleranz: 0,001 und 0,01
- Klassenanzahl: 64 (128)
- Methode: Residuum 0,5

Im Mathcad-Programm wurden anhand von Testrechnungen der FKM-Richtlinie für Lastkollektive auf geschweißte und nicht geschweißte Stahlbaukomponenten einer exemplarischen Maschine mit verschiedenen FAT-Klassen die Rainflow-Ergebnisse der exakten Lastkollektive mit den Ergebnissen der klassifizierten Lastkollektive (Klasse 64), sowohl mit dem Residuum = 0,5 als auch mit der Verschiebung Max_Max, verglichen. Bei der Berechnung gibt es innerhalb einer FAT-Klasse zwischen dem exakten Lastspiel und dem Residuum = 0,5 aufgrund von Klassifizierungen der Lastkollektive eine Abweichung des Auslastungsgrades von 0% bis 2%. Mit Max_Max kann gegenüber dem exakten Lastspiel ein um bis zu 5% höherer Auslastungsgrad erreicht werden.

Zukünftig besteht insbesondere bei der automatisierten Lebensdauerbeurteilung der Maschinenbauteile bei Volumenelementen und bei der weiterführenden Implementierung der Beurteilung des lokalen Versagens auf elastische bzw. elasto-plastische Dehnungen durch dynamische Belastungen Entwicklungsbedarf. Abschließend sollte auch die Möglichkeit zur Verlaufsuntersuchung von zeitveränderlichen Belastungen, basierend auf hinreichenden rainflow-klassifizierten Lastkollektive bzw. neuen Belastungszählverfahren, untersucht werden.

8. Wesentliche Erkenntnisse für die praktische Anwendung der Rainflowzählung mit IBF-Fatigue

Aus den Ergebnissen der im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführten Vergleichsrechnungen und Parameterstudien lassen sich folgende Schlussfolgerungen für die praktische Anwendung der Rainflowzählung in IBF-Fatigue ableiten:

1. Das Verfahren darf nur auf Spannungsergebnisse angewandt werden, die auf Basis linear-elastischer Materialgesetze berechnet worden sind. Dies deshalb, weil das Prinzip der linearen Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner nur im elastischen Dehnungsbereich korrekt anwendbar ist.
2. Die Spannungs-Zeitfunktion muss immer mit dem absolut größten Spannungswert beginnen und mit diesem enden (1. und letzter Wert = Maximum). Dadurch ist sichergestellt, dass sich bei der Rainflowzählung keine Residuen, sondern ausschließlich geschlossene Spannungsschleifen ergeben.
3. Bei Spannungs-Zeitfunktionen mit einer großen Anzahl an Stützpunkten (10000 oder mehr) kann auf eine Transformation des Spannungsmaximums an die erste bzw. letzte Stelle verzichtet werden, jedoch müssen dann die nicht geschlossenen Schleifen als Residuum mitgezählt und, wie das im ASTM-Standard E1049-85 empfohlen ist, mit 0,5 bewertet werden. Je größer die Anzahl der Stützstellen in der Spannungs-Zeitfunktion ist, umso kleiner ist der Einfluss des Residuums auf die Gesamtschädigung.
4. Die Spannungs-Zeitfunktionen sollte nur relative Maxima und Minima enthalten. Zwischenpunkte beeinflussen das Ergebnis der Zählung nicht, sondern erhöhen lediglich die für die Zählung erforderliche Rechenzeit.
5. "Kleine" Schwingungen innerhalb der Spannungs-Zeitfunktion sollten herausgefiltert werden. Es empfiehlt sich, Schwingbreiten, die kleiner als 1% der Differenz zwischen den Extremwerten für die Spannung ($s_{max} - s_{min}$) sind, bei der Zählung unberücksichtigt zu lassen. Dies verkürzt die Rechenzeit mitunter erheblich, beeinflusst jedoch das Ergebnis praktisch nicht.
6. Die für die Rainflowzählung angesetzte Klassenzahl sollte nicht kleiner als 64 sein. Bei geringer Gesamtschädigung kann eine kleinere Klassenzahl verwendet werden, jedoch sind 32 Klassen als praktische Untergrenze anzusehen, da sonst die berechnete Gesamtschädigung zu stark vom realen Wert abweicht.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1 Ablaufschema zur Lebensdauerabschätzung [1].....	1
Abb. 1.2 Dauer- und betriebsfeste Bemessung von Bauteilen [2].....	2
Abb. 2.1 Beanspruchungskennwerte von der BZF [4]	3
Abb. 2.2 Trennung der Beanspruchungsfälle nach dem Mittelspannungszustand [4].....	4
Abb. 2.3 Smith-Diagramm [5]	5
Abb. 2.4 Haigh-Diagramm [5]	5
Abb. 2.5 Beispiel-BZF [2]	6
Abb. 2.6 Unterscheidung zwischen Grund- und Zusatzbeanspruchung bei der BZF, in Anlehnung an Buxbaum [6].....	6
Abb. 2.7 Unterscheidung zwischen deterministischer und stochastischer BZF, in Anlehnung an Buxbaum u. Svenson [7]	7
Abb. 2.8 Schmalbandige (a) und breitbandige (b) Schwingungserregung; nach Hesselmann [10].....	7
Abb. 2.9 Regelmäßigkeitsfaktor i_0 , beispielhaft für schmalbandige (a) und breitbandige (b) Schwingungserregung [10].....	8
Abb. 2.10 Klasseneinteilung für Zählungen [12]	9
Abb. 2.11 Rückstellbreite klassengrenzenorientiert [2].....	10
Abb. 2.12 Rückstellbreite extremwertorientiert [2]	10
Abb. 2.13 Amplitudenkollektiv mit seiner Treppenkurve [4]	11
Abb. 2.14 BZF Spitzenzählung [2].....	12
Abb. 2.15 Zählergebnis Spitzenzählung (nur Maxima) [2]	13
Abb. 2.16 BZF Klassengrenzenüberschreitungs-zählung [2]	14
Abb. 2.17 Zählergebnis der Klassengrenzenüberschreitungs-zählung [2]	15
Abb. 2.18 Zählergebnis der Bereichszählung [2].....	16
Abb. 2.19 BZF Bereichszählung [2]	16
Abb. 2.20 BZF Bereichspaar-zählung [2].....	17
Abb. 2.21 Zählergebnis der Bereichspaar-zählung [2].....	17
Abb. 2.22 BZF Bereichs- Mittelwert-Zählung [2]	18
Abb. 2.23 Zählergebnis der Bereichs-Mittelwert-Zählung [2].....	19
Abb. 2.24 BZF Übergangsmatrix [2]	20
Abb. 2.25 Zählergebnis der Übergangsmatrix [2]	20
Abb. 2.26 BZF Bereichspaar- Mittelwert-Zählung [2].....	21
Abb. 2.27 Zählergebnis der Bereichspaar-Mittelwert-Zählung, Matrix und Häufigkeitsverteilung [2]	22
Abb. 2.28 RFZ, Relation zwischen Dehnung- Zeit-Funktion; nach Steinhilber u. Schütz [39]	23
Abb. 2.29 Geschlossene Hysteresen für die Beispiel-BZF [44]	24
Abb. 2.30 BZF-Rainflow [36]	25

Abb. 2.31 Rainflow-Zählung, Regenwasserflüsse zwischen Ausgangs- und Endpunkt; nach Maddox [45].	26
Abb. 2.32 Logik des Vierpunktalgorithmus zur Erkennung geschlossener Hysteresen [2].....	27
Abb. 2.33 Zählergebnis Rainflow, drei verschiedene Matrizendarstellungen [2].....	28
Abb. 2.34 Halbmatrizen mit schematischer Darstellung [2] [12] [44]	28
Abb. 2.35 RFZ nach dem ASTM-Standard für die Beispiel-BZF [55].....	29
Abb. 2.36 Vereinfachte RFZ für eine wiederholte Zykluszahl nach ASTM für die Beispiel-BZF [55].	30
Abb. 3.1 BZF einer Walzstrecke.....	32
Abb. 3.2 Flussdiagramm des Programms.....	33
Abb. 3.3 Ausgewählte wiederholte Belastungen.....	34
Abb. 3.4 Löschen der Belastungen zwischen den Extremwerten im Mathcad-Programm.....	35
Abb. 3.5 Löschen der kleinen Schwingbreiten im Mathcad-Programm.....	36
Abb. 3.6 Formeln und Beispiel für die Klasseneigenschaften im Mathcad-Programm	37
Abb. 3.7 Verschiebung nach ASTM E1049 – 85 (2017) im Mathcad-Programm.....	38
Abb. 3.8 Löschen der Belastungen, welche keine Umkehrpunkte sind.....	39
Abb. 3.9 Beispiel der Von_Nach-Matrix (pinke Tabelle) einer originalen bereinigten BZF (linke Tabelle) mit dargestellter Kurve und Klassengrenze (grüne Tabelle) im Mathcad-Programm	40
Abb. 3.10 Beispiel der Von_Nach-Matrix (pinke Tabelle) einer verschobenen bereinigten BZF (linke Tabelle) mit dargestellter Kurve und Klassengrenze (grüne Tabelle) im Mathcad-Programm	41
Abb. 3.11 Erstellung der Maximum_Minimum-Matrix (grüne Tabellen) für die originale bereinigte BZF im Mathcad-Programm.....	42
Abb. 3.12 Erstellung der Maximum_Minimum-Matrix (grüne Tabelle) für die verschobene bereinigte BZF im Mathcad-Programm	43
Abb. 3.13 Erstellung der Schwingbreite_Mittelwert-Matrix (gelbe Tabelle) ohne Residuum im Mathcad- Programm	44
Abb. 3.14 Berechnung der Schädigungen ohne Berücksichtigung der Mittelwerte im Mathcad-Programm	45
Abb. 4.1 Benchmark- Beispiel-Ohne Verschiebung.....	46
Abb. 4.2 Benchmark- Beispiel-mit Verschiebung.....	47
Abb. 4.3 BZFn (obere weiße Matrizen) mit Darstellungen und Klassendateien (untere farbige Matrizen) im Mathcad-Programm	48
Abb. 4.4 Händische Berechnung der VON_NACH-Matrix des Beispiels ohne Verschiebung	49
Abb. 4.5 Händische Berechnung der VON_NACH-Matrix des Beispiels mit Verschiebung (Max_Max)..	50
Abb. 4.6 Vergleich der Von_Nach-Matrix (ohne Verschiebung) des Mathcad-Programms (links) mit der händisch berechneten Matrix (rechts)	51
Abb. 4.7 Vergleich der Von_Nach-Matrix (Max_Max) des Mathcad-Programms (links) mit der händisch berechneten Matrix (rechts).....	51

Abb. 4.8 Vergleich der Max_Min-Matrix (ohne Verschiebung) mit Residuen= 0 und 0,5 vom Mathcad- Programm (zwei untere Matrizen) mit der händisch berechneten Matrix (zwei obere Matrizen)	52
Abb. 4.9 Vergleich der Max_Min-Matrix (mit Verschiebung) des Mathcad-Programms (untere Matrix) mit der händisch berechneten Matrix (zwei obere Matrizen)	53
Abb. 4.10 Vergleich der Schwingbreite_Mittelwert-Matrix (Ohne Verschiebung) mit Residuen= 0 und 0,5 des Mathcad-Programms (zwei untere Matrizen) mit der händisch berechneten Matrix (zwei obere Matrizen)	54
Abb. 4.11 Vergleich der Schwingbreite_Mittelwert-Matrix (mit Verschiebung Max_Max) des Mathcad- Programms (untere Matrix) mit der händisch berechneten Matrix (zwei obere Matrizen)	55
Abb. 4.12 Vergleich der Schädigungsberechnung ohne Berücksichtigung der Mittelwerte (ohne Verschiebung) mit Residuen= 0 und 0,5 des Mathcad-Programms (zwei untere Tabellen) mit der händisch berechneten Matrix (obere Matrize und Tabelle)	56
Abb. 4.13 Vergleich der Schädigungsberechnung ohne Berücksichtigung der Mittelwerte (mit Verschiebung Max_Max) des Mathcad-Programms (zwei untere Tabellen) mit der händisch berechneten Matrix (obere Matrize und Tabelle)	57
Abb. 5.1 Beispiel A (lange BZF; 1200 Stützpunkte).....	58
Abb. 5.2 Beispiel B (kurze BZF; 18 Stützpunkte).....	59
Abb. 5.3 Beispiel C (lange BZF; 8674 Stützpunkte)	60
Abb. 5.4 Stochastische Kurve	61
Abb. 5.5 Ergebnisse der stochastischen Kurve des Mathcad-Programms.....	61
Abb. 5.6 Einfluss der Klassenanzahl der stochastischen Kurve auf die Gesamtschädigung	62
Abb. 5.7 Kurve mit geringen Stützpunkten	62
Abb. 5.8 Einfluss von Klassenanzahl der Kurve mit geringen Stützpunkten auf die Gesamtschädigung	63
Abb. 5.9 Kraftverlauf vor der Bereinigung.....	64
Abb. 5.10 Kraftverlauf nach der Bereinigung und Toleranz = 0,0	65
Abb. 5.11 Kraftverlauf nach der Bereinigung und Toleranz = 0,001	65
Abb. 5.12 Nach der Bereinigung und Toleranz = 0,01	66
Abb. 5.13 Vergleich verschiedener Toleranzen für das Beispiel eines Kraftverlaufs	66
Abb. 5.14 Momentverlauf vor der Bereinigung	67
Abb. 5.15 Momentenverlauf nach der Bereinigung und Toleranz = 0,0	68
Abb. 5.16 Momentenverlauf nach der Bereinigung und Toleranz = 0,001	68
Abb. 5.17 Momentenverlauf nach der Bereinigung und Toleranz = 0,01	69
Abb. 5.18 Vergleich verschiedener Toleranzen für das Beispiel eines Momentenverlaufs	69
Abb. 5.19 Einfluss der Spiegelung einer BZF	70
Abb. 5.20 Duplizierung einer kurzen BZF	71
Abb. 5.21 Einfluss der Duplizierung einer kurzen BZF	72
Abb. 5.22 Beispiel der Verschiebung von Stützpunkten	73

Abb. 5.23 Gesamtschädigung der verschobenen Kurven	73
Abb. 6.1 FE-Modell einer horizontalen Konsole mit FAT-Klassen in isometrischer Ansicht	74
Abb. 6.2 BZF und Richtung der Belastungen an der Probe	75
Abb. 6.3 Rainflowzählung der Kurve	76
Abb. 6.4 Vorbereitung der Belastungen [kN] im Mathcad-Programm	77
Abb. 6.5 Bereinigte Kurve ohne Verschiebung im Mathcad-Programm	78
Abb. 6.6 Bereinigte Kurve mit Verschiebung (Max_Max) im Mathcad-Programm.....	78
Abb. 6.7 Klassenbreite für die Klassenanzahl = 64 im Mathcad-Programm	78
Abb. 6.8 Ergebnisse der RFZ für Residuum = 0 im Mathcad-Programm	79
Abb. 6.9 Ergebnisse der RFZ für Residuum = 0,5 im Mathcad-Programm	79
Abb. 6.10 Ergebnisse der RFZ für Verschiebung Max_Max im Mathcad-Programm	79
Abb. 6.11 Softwarepaket IBFatigue für normkonformen Festigkeitsnachweis [56]	80
Abb. 6.12 Lebensdauerberechnung mit RFZ-Ergebnissen für exakte Lastspiele	81
Abb. 6.13 Lebensdauerberechnung mit RFZ-Ergebnissen für Residuum 0,5	82
Abb. 6.14 Lebensdauerberechnung mit RFZ-Ergebnissen für Verschiebung Max_Max	83
Abb. 6.15 Erprobung der Lebensdauerberechnung.....	84

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Vergleich verschiedener Zählmethoden	31
Tabelle 4.1 Klassenwerte nach Klasse 11	56
Tabelle 6.1 Exakte Ergebnisse der Rainflowzählung.....	77

Literaturverzeichnis

- [1] Eichlseder, Wilfried, „Gefügeeinfluss auf die lokale Schwingfestigkeit verschiedener Gusswerkstoffe und Vorhersage mittels Erstarrungssimulation,“ *Gießerei Rundschau*, 2011.
- [2] M. Köhler, S. Jenne, K. Pötter und H.Zenner, Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit, Springer, 2012.
- [3] B. Kinast, „Auswertung von Beanspruchung- Zeit- Verläufen mit ein- und zweiparametrischen Verfahren,“ Bachelorarbeit, Montanuniversität, Department Product Engineering, Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau, Leoben, Dez. 2018.
- [4] D.Radaj und M. Vormwald, Ermüdungsfestigkeit: Grundlagen für Ingenieure, Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. 09.
- [5] Manuela Sander, Sicherheit und Betriebsfestigkeit von Maschinen und Anlagen,, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [6] O. Buxbaum, Betriebsfestigkeit, Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 1999.
- [7] O. Buxbaum und O. Svenson, Zur Beschreibung von Betriebsbeanspruchungen mit Hilfe, Automobiltechn. Z. 75, 1973.
- [8] E. Haibach und U. Wendt, „Berechnung des Unregelmäßigkeitsfaktors N_0/N_1 für einen,“ Bericht TB137, Fraunhofer-Institut f. Betriebsfestigkeit, Darmstadt, 1977.
- [9] J. Schijve, „Fatigue of Structures and Materials,“ Kluwer Acad, Dordrecht, 2001.
- [10] N. Hesselmann, „Digitale Signalverarbeitung, rechnergestützte Erfassung, Analyse und Weiterverarbeitung analoger Signale,“ Vogel-Verlag, Würzburg, 1983.
- [11] J. Schijve, „The analysis of random load-time histories with relation to fatigue tests and life calculations,“ Pergamon Press, Oxford, 1963.
- [12] H. Gudehus und H. Zenner, „Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung,“ Stahleisen Verlag, Düsseldorf, 2000.
- [13] J. Liu und H. Zenner, Berechnung der Dauerfestigkeit bei mehrachsiger Beanspruchung, Z Mat-wiss u Werkstofftech, 1993.
- [14] Y.L. Lee, J. Pan, E.B. Hathaway und M.E. Barkey, Fatigue testing and analysis, Elsevier, 2005.
- [15] C.R. Rice, fatigue design handbook, 3rd Ed AE-22, Warrendale: SAE , 1997.
- [16] Y. Murakami, The rainflow method in fatigue, Butterworth Heinemann, 1992.
- [17] W. Schütz, The significance of service load data for fatigue life analysis, ICAF Doc, 1992.
- [18] A. Palmgren, Die Lebensdauer von Kugellagern, VDI-Z 58, 1924.
- [19] M.A. Miner, Cumulative damage in fatigue, J.Appl.Mech. 12, 1945.
- [20] K.G. Eulitz und K.L. Kotte, Betriebsfestigkeit, Dresden: TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen, AG Fernstudium, Ausgabe 2006 und 2008 (2006).
- [21] W. Lipp und O. Svenson, Beitrag zur vereinfachten Wiedergabe von Beanspruchungen mit veränderlichen Mittelwerten im Schwingfestigkeitsversuch, LBF-Bericht, 1967.
- [22] B.J. Lambie, The strain range counter, Vickers Armstrongs Ltd VTO/M/416, 1955.
- [23] E. Haibach, Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, Berlin: Springer, 2006.
- [24] W. Fischer, H.D. Eisbrecher, W. Laumann und W.Kuitsch, Ermittlung und Auswertung von Lastkollektiven, FVA-Bericht Heft 83, 1980.
- [25] A. Teichmann, Grundsätzliches zum Betriebsfestigkeitsversuch, Jahrbuch der Deutschen Luftfahrtforschung.
- [26] B. Hayes, First links in the Markov chain, American Scientist. 101 (2): 92–96. doi:10.1511/2013.101.92, 2013.
- [27] W. Aicher, Markov-Analyse und -Synthese einer Betriebsbelastung, Interner Bericht ISD TU Stuttgart, 1973.

- [28] R. Fischer, Generierung von stationären Gauß'schen Zufallsprozessen mit vorgegebenen statistischen Kennwerten, LBF-Bericht, 1974.
- [29] W. Krüger und J. Petersen, Rekonstruktion von stochastischen Beanspruchungszeitverläufen aus extrapolierten Rainflow-Matrizen, Berlin: VDI-Bericht 552: 319 ff., 9. GESA-Symposium, 1985.
- [30] W. Krüger, M. Scheutzow, A. Beste und J. Petersen, Markov- und Rainflow-Rekonstruktionen stochastischer Beanspruchungszeitfunktionen, Düsseldorf: VDI Fortschrittsberichte Reihe 18 Nr. 22, 1985.
- [31] U.H. Clormann und T. Seeger, Rainflow-HCM: Ein Hysteresis-Schleifen-Zählalgorithmus auf werkstoffmechanischer Grundlage, FF-22, Fachgebiet Werkstoffmechanik, TH Darmstadt, 1985.
- [32] de J.B. Jonge, The analysis of load time histories by means of counting methods, NLR MP 82039 U, ICAF Doc. 1309, 1982.
- [33] de J.B. Jonge, NLR Report. TR 69063 69063 U, 1969.
- [34] de J.B. Jonge, NLR Report. TR 70010, 1970.
- [35] van G.M Dijk, Statistical load data processing. In: Advanced approaches to fatigue evaluation, NASA SP 309, 565–598, 1972.
- [36] M. Matsuishi und T. Endo, Fatigue of metals subjected to varying stress, Fukuoka, Japan: Jap Soc Mech Engin, 1968.
- [37] TGL 33787 Schwingfestigkeit, Regellose Zeitfunktionen; Statistische Auswertung, 1977.
- [38] T. Seeger, Grundlagen für Betriebsfestigkeitsnachweise, Köln: Stahlbau Handbuch Teil B, Stahlbau-Verlagsgesellschaft, 1996.
- [39] H. Steinhilber und D. Schütz, Moderne Meß- und Auswertemethoden für Betriebsbelastungen In: Betriebsfestigkeit: Lastannahmen – Lebensdauernachweis – Erfahrung in der Praxis, Berlin: DVM-Bericht 114, Anlageheft, S. 5–18. DVM, 1988.
- [40] H. Neuber, Kerbspannungslehre. 4. Auflage., Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2001.
- [41] C. Amzallag, JP. Gerey, J.I. Robert und J. Bahuaud, Standardization of the rainflow counting method fo fatigue analysis, Int. J. Fatigue. 16, 287–293, 1994.
- [42] J.W. Bergmann, Interner Bericht B – TF – V 23/ Rainflow-Synthese, IABG, Ottobrunn, 1985.
- [43] S.D. Downing und D.F. Socie, Simple rainflow counting algorithms, Int. J. Fatigue 4(1), 31–40, 1982.
- [44] Forschungsvereinigung Antriebstechnik, Zählverfahren zur Bildung von Kollektiven und Matrizen aus Zeitfunktionen, Frankfurt/M: FVA-Richtlinie, 2010.
- [45] S.J. Maddox, Fatigue Strength of Welded Structures, Cambridge: Abington Publ., 1991.
- [46] I. Rychlik, A new definition of the rainflow cycle counting method, Int. J. Fatigue. 9(2), 119–121 (1987).
- [47] H. Nowack, D. Hanschmann und A. Conle, Die Rainflow-Zählmethode, ein neueres Auswerteverfahren für Betriebsbeanspruchungen, Köln: IB 354–76/3 des Inst f Werkstoff-Forschung der DFVLR , 1976.
- [48] W. Dressler, W. Krüger und A. Beste, Rainflow – das Werkzeug für den Lebensdauernachweis von Fahrzeugen, DVM-Bericht, Tagung AK Betriebsfestigkeit, 1993.
- [49] DVM-Bericht, Tagung AK Betriebsfestigkeit, 1969.
- [50] M.E. Dowling, Fatigue failure predictions for complicated stress-strain-histories, J. of Mats. 7 (JMLSA). 7, 71–87, 1972.
- [51] B.H.E. Perrett, An evaluation of a method of reconstituting fatigue loading from rainflow counting. New materials and fatigue resistant aircraft design, Warley: Proc of the 14th ICAF Symposium, 1987.
- [52] J.M. Potter und R.T. Watanabe, Development of fatigue loading spectra, ASTM STP 1006, 1989.
- [53] K.H. Böhme, Auswertung von regellosen Zeitfunktionen nach geschlossenen Hystereseschleifen („Rain-Flow“) mittels Prozessrechners, IfL-Mitt. 21(1), 9–14, 1982.

- [54] P. Heuler und T. Seeger, Zählprogramm für Lastfolgen nach der Rainflow-Methode, Bereich FF-7, Fachgebiet Werkstoffmechanik TH Darmstadt, 1984.
- [55] „ASTM Standard practices for cycle counting in fatigue analysis. ASTM Standard E 1049–85,“ 2017.