

Bachelorarbeit

Einfluss der lokalen Schweißnahtgeometrie auf die Rissinitiierung an Stumpfstößen

(engl.: Influence of the local weld geometry on fatigue crack initiation in butt-welded joints)

Bearbeiter:	Alex Mirzada
Matrikelnummer:	21158474
Studiengang:	Allgemeine Ingenieurwissenschaften
Erstprüfer:	Prof. D.Sc. S. Ehlers
Zweitprüfer:	M.Sc. Moritz Braun
Betreuer:	M.Sc. Moritz Braun

Hamburg, 05.04.2021

**Aufgabenstellung der Bachelorarbeit von
Herrn Alex Mirzada, Matr.-Nr. 21158474**

Thema:

**Einfluss der lokalen Schweißnahtgeometrie auf die Rissinitiierung an Stumpfstößen
(engl.: Influence of the local weld geometry on fatigue crack initiation in butt-welded
joints)**

It is a well-known fact that weld geometry influences fatigue resistance of welded connection, weld toe shape being of particular importance. Geometrical features of a weld can be generally described by size of weld toe undercut, radius and angle, as well as weld face elevation and width.

Industry standards regulate size of some of the features and by this defining quality class of the weld and binding that quality to fatigue performance. Usually, measurements of weld features are performed manually by means of templates. The method is not very efficient and obviously subject to individual inspector's judgment. Offshore wind industry is more and more looking into 3D scanning as an inspection method which bears potential for automation and offers high repeatability. Scanned surfaces of welds can be then subject to geometric evaluation with regard to size of their features more reliably. Hence, this project deals with the correlation of local weld geometries and fatigue crack initiation locations. The following tasks shall be fulfilled:

- 1) Determination of the local weld geometries of an exemplary butt-welded joint by means of mean value, tangential, and curvature method
- 2) Comparison of measurement results for the three different weld geometry measurement methods and determination of suitable distribution functions for various weld geometry parameters
- 3) Assessment of data convergence with chosen sampling rate
- 4) Comparison between estimated and actual crack initiation locations of the assessed butt-welded joint
- 5) Correlation between local weld geometries parameters and crack initiation locations

Literature studies of specific topics relevant to the thesis work shall be included.

The work scope may prove to be larger than initially anticipated. Subject to approval from the supervisors, topics may be deleted from the list above or reduced in extent.

In the thesis the candidate shall present his personal contribution to the resolution of problems within the scope of the thesis work.

Theories and conclusions should be based on mathematical derivations and/or logic reasoning identifying the various steps in the deduction. The candidate should utilise the existing possibilities for obtaining relevant literature.

Thesis format

The thesis should be organised in a rational manner to give a clear exposition of results, assessments, and conclusions. The text should be brief and to the point, with a clear language and the objective to be published in a conference article and/or scientific journal. It is thus desirable that the thesis is written in English. Telegraphic language should be avoided.

The thesis shall contain the following elements: An executive summary, list of symbols and acronyms, followed by the main body of the thesis consisting of a brief background introduction, a state of the art defining the knowledge gaps defining the scope or work and limitations, the actual contribution chapters, conclusions with recommendations for further work, references and (optional) appendices. All figures, tables and equations shall be numerated.

The supervisors require that the candidate, in an early stage of the work, presents a written plan for the completion of the work. The plan may include a budget for the use of computer and laboratory resources if applicable, which will be charged to the department. Overruns shall be reported to the supervisors.

The original contribution of the candidate and material taken from other sources shall be clearly defined following basic academic principles and an acknowledged referencing system, which includes the name of the referred authors followed by the publication year in the text. The subsequent reference list can thus be alphabetical.

The report shall be submitted in two copies:

- Signed by the candidate
- The text defining the scope included
- In bound volume(s)

Drawings and/or computer prints, which cannot be bound should be organised in a separate folder.

The report shall also be submitted in PDF along with essential input files for computer analysis, spread sheets, MATLAB files etc. in digital format.

Ownership

According to the current rules, the candidate has the ownership of the thesis. Any use of the thesis has to be approved by TUHH M-10 and Vattenfall AB. TUHH M-10 has the right to use the thesis as if a TUHH M-10 employee carried out the work, if nothing else has been agreed in advance.

Ausgabe der Aufgabenstellung am: 01. Februar 2021

Abgabe der Arbeit bis: 13. April 2021

Betreuer der Arbeit: Prof. D.Sc. (Tech.) Sören Ehlers
MSc. Moritz Braun

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass die vorliegende Bachelorarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst wurde und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt worden sind.

Wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Diese Bachelorarbeit wurde bisher keinem anderen Prüfungsamt in gleicher oder vergleichbarer Form vorgelegt oder veröffentlicht.

Hamburg, 11.04.2021

Alex Mirzada

Gewährung von Nutzungsrechten

Ich, Alex Mirzada, habe an der TUHH im Institut für Konstruktion und Festigkeit von Schiffen (M-10) unter Betreuung von Prof. D.Sc. (Tech.) S. Ehlers und M.Sc. Moritz Braun eine Abschlussarbeit zum Thema Einfluss der lokalen Schweißnahtgeometrie auf die Rissinitiierung an Stumpfstoßen angefertigt.

Hiermit räume ich der TUHH, meinen Betreuern und den Mitgliedern der TUHH unentgeltlich das nichtausschließliche Recht ein, die Inhalte meiner Abschlussarbeit ganz oder in Teilen für Zwecke der Forschung und Lehre zu veröffentlichen, zu vervielfältigen, zu verbreiten, zu bearbeiten und öffentlich wiederzugeben. Eine darüber hinaus gehende Nutzung ist nicht gestattet.

Hamburg, 11.04.2021

Alex Mirzada

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einführung	1
2	State of Art	4
2.1	Einflussfaktoren auf die Lebensdauer	4
2.2	Messverfahren	5
2.3	Ziele der Arbeit	7
3	Messdatenerzeugung.....	8
3.1	Probenvorbereitung und Input Dateien	9
3.1.1	Probenbearbeitung	9
3.1.2	Laserscan und Erzeugung der Daten	9
3.2	Probe.....	12
3.3	Eingabeparameter	13
3.3.1	Verwendete allgemeine Eingabeparameter	13
3.3.2	Stumpfstoßspezifische Eingabeparameter	14
4	Statistische Methoden.....	18
4.1	Dichte- und Verteilungsfunktionen	19
4.1.1	Normalverteilung	20
4.1.2	Logarithmische Normalverteilung.....	22
4.2	Boxplots	24
4.3	Histogramm	25
4.4	Konvergenz	25
4.4.1	Lilliefors-Test	26
4.5	Bruchfläche	27
5	Ergebnisse und Auswertung.....	30
5.1	Vergleich der Messwerte aus Mittelwertverfahren, Tangenten- und Curvature-Methode	30
5.2	Überblick der Wertebereiche mit Boxplots.....	32
5.2.1	Boxplots aus Standard- und Tangenten-Methode.....	32
5.2.2	Boxplots aus Curvature-Methode	33
5.3	Konvergenzkriterium: Annäherung an Erwartungswert	36
5.4	Lilliefors-Testergebnisse	39
5.5	Empirische Verteilung der Messdaten	44

5.5.1	Globaler Winkel	44
5.5.2	Flankenwinkel.....	44
5.5.3	Lokaler Winkel	45
5.5.4	Nahtübergangsradius	45
5.5.5	Undercut	46
5.6	Rissstellen	49
6	Diskussion	56
7	Fazit	59
8	Literatur	61
9	Anhang.....	63
1.	Zusammenfassung der Abbildungen	63
2.	Zusammenfassung der Tabellen	79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Optische Messsysteme zur Messung der lokalen Schweißgeometrie [1]	13
Tabelle 2: Voreingestellte allgemeine Eingabeparameter 1	14
Tabelle 3: Voreingestellte allgemeine Eingabeparameter 2	14
Tabelle 4: Voreingestellte allgemeine Eingabeparameter 3	14
Tabelle 5: Voreingestellte spezifische Eingabeparameter 1	15
Tabelle 6: Voreingestellte spezifische Eingabeparameter 2	15
Tabelle 7: Eingabeparameter Probengeometrie BW Teil 1 [6]	16
Tabelle 8: Eingabeparameter Probengeometrie BW Teil 2 [6]	17
Tabelle 9: Hypothesentestergebnisse für Parameter: Linker Radius	41
Tabelle 10: Hypothesentestergebnisse für Parameter: Linker globaler Winkel	41
Tabelle 11: Hypothesentestergebnisse für Parameter: Linker lokaler Winkel	42
Tabelle 12: Hypothesentestergebnisse für Parameter: Linker Undercut mit Signifikanzniveau von 5%	42
Tabelle 13: Hypothesentestergebnisse für Parameter: Linker Undercut mit Signifikanzniveau von 1%	43
Tabelle 14: Teststatistik (kstat) und Kritischer Wert (critval) der Anpassungstests für linke Undercuts mit der Standard-Methode.....	43
Tabelle 15: Lage- und Streuungsparameter der gefitteten Normal- und Lognormalverteilungen an die empirischen Verteilungen der lokalen Geometrieparameter für Tangenten- und Curvature-Methode und einer Schnittanzahl von n = 400.....	51
Tabelle 16: Geometrieparameterwerte der ausgewählten Rissstellen	54
Tabelle 17: Maximal-, Minimal-, Mittelwerte, 25 %, 50 %, 75 %-Quartile zur Untersuchung der Rissstellen der rechten Geometrieparameter der Probe S500_16_16_Bottom aus Tangenten-Methode und n = 400	55
Tabelle 18: Hypothesentestergebnisse für Parameter: Rechter Radius	79
Tabelle 19: Hypothesentestergebnisse für Parameter: Rechter globaler Winkel	79
Tabelle 20: Hypothesentestergebnisse für Parameter: Rechter lokaler Winkel.....	80
Tabelle 21: Hypothesentestergebnisse für Parameter: Rechter Undercut.....	80
Tabelle 22: Lilliefors-Testergebnisse für ein Signifikanzniveau von 10%: Rechter lokaler Winkel	81
Tabelle 23: Lilliefors-Testergebnisse für ein Signifikanzniveau von 10%: Linker Undercut	81
Tabelle 24: Hypothesentestergebnisse für Parameter: Rechter Radius	82
Tabelle 25: Hypothesentestergebnisse für Parameter: Rechter globaler Winkel	82

Tabelle 26: Hypothesentestergebnisse für Parameter: Rechter lokaler Winkel.....	83
Tabelle 27: Hypothesentestergebnisse für Parameter: Rechter Undercut.....	83
Tabelle 28: Lilliefors-Testergebnisse für ein Signifikanzniveau von 10%: Rechter lokaler Winkel	84
Tabelle 29: Lilliefors-Testergebnisse für ein Signifikanzniveau von 10%: Linker Undercut	84

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lokale Geometrieparameter eines Stumpfstoßes (Querschnittsdarstellung) [7]..3	
Abbildung 2: (a) Darstellung einer Vielzahl von Radien am Nahtübergang abhängig von der gewählten Skala, (b) theoretischer Einfluss der Dichte der Scanpunkte auf den erhaltenen Nahtübergangsradius [5]	5
Abbildung 3: Stumpfstoß Querschnitt [14]	8
Abbildung 4: Abstand beim senkrechten Scannen, (b) Position des Laserscanners bei Stumpfstoßen	9
Abbildung 5: Beispiel für Schnitte über der Probenlänge der Probe S500_16_16_Bottom....	11
Abbildung 6: Beispiel für Messung der lokalen Geometrieparameter an einem Schnitt	11
Abbildung 7: Bruchbild der Probe S500_16_16_Bottom nach Ermüdungsversuch	12
Abbildung 8: Nahtanstieg Messverfahren [6]	15
Abbildung 9: Curvature-Methode [7]	16
Abbildung 10: Boxplot Beispiel [23]	24
Abbildung 11: Rissstellen Markierungen.....	29
Abbildung 12: S500 16 16 Gescannte Länge (rot) und Probenlänge (schwarz)	29
Abbildung 13: Vergleich der rechten lokalen Geometrieparameter Messwerte aus Mittelwert- und Tangentenverfahren.....	31
Abbildung 14: Vergleich der rechten lokalen Geometrieparameter Messwerte aus Curvature- und Tangentenverfahren.....	32
Abbildung 15: Boxplots der linken Geometrieparameter, ausgewertet mit dem Mittelwertverfahren (Standard-Methode)	34
Abbildung 16: Boxplots der rechten Geometrieparameter, ausgewertet mit dem Mittelwertverfahren (Standard-Methode)	35
Abbildung 17: Plots der arithmetischen Mittelwertverläufe und relative Abweichungen der linken Geometrieparameter für Normal-, Lognormalverteilung (Standard-Methode)...	38
Abbildung 18: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Linker globaler Winkel	48
Abbildung 19: Vergleich vom linken globalen Winkel zu Flankenwinkel.....	49
Abbildung 20: Markierung der ausgewählten Rissstellen über die Messdaten der rechten Geometrieparameter entlang der Naht für eine Schnittanzahl $n = 400$	52
Abbildung 21: Markierung der Rissstellen in den empirischen Verteilungsfunktionen der Geometrieparameter aus der Tangenten-Methode mit der Schnittanzahl $n = 400$	53
Abbildung 22: Vergleich der linken lokalen Geometrieparameter Messwerte aus Mittelwert- und Tangentenverfahren.....	63

Abbildung 23:Vergleich der linken lokalen Geometrieparameter Messwerte aus Curvature- und Tangentenverfahren.....	63
Abbildung 24:Boxplots der linken Geometrieparameter, ausgewertet mit der Curvature-Methode	64
Abbildung 25: Boxplots der linken Geometrieparameter, ausgewertet mit der Curvature-Methode	64
Abbildung 26: Boxplots der linken Geometrieparameter, ausgewertet mit dem Tangentenverfahren.....	65
Abbildung 27: Boxplots der rechten Geometrieparameter, ausgewertet mit dem Tangentenverfahren.....	65
Abbildung 28: Plots der arithmetischen Mittelwertverläufe und relative Abweichungen der rechten Geometrieparameter für Normal-, Lognormalverteilung (Standard-Methode)	66
Abbildung 29: Plots der arithmetischen Mittelwertverläufe und relative Abweichungen der linken Geometrieparameter für Normal-, Lognormalverteilung (Curvature-Methode) .	67
Abbildung 30:Plots der arithmetischen Mittelwertverläufe und relative Abweichungen der rechten Geometrieparameter für Normal-, Lognormalverteilung (Curvature-Methode)	68
Abbildung 31:Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Linker lokaler Winkel	69
Abbildung 32:Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Linker Radius.....	69
Abbildung 33: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Linker Undercut	70
Abbildung 34: Emp. Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Rechter globaler Winkel	70
Abbildung 35: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Rechter Radius	71
Abbildung 36: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Rechter Undercut.....	71
Abbildung 37: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Rechter lokaler Winkel.....	72
Abbildung 38: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Rechter globaler Winkel [Curvature-Methode].....	72
Abbildung 39: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Rechter lokaler Winkel [Curvature-Methode].....	73
Abbildung 40: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Rechter Radius [Curvature-Methode]	73

Abbildung 41: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Rechter Undercut [Curvature-Methode].....	74
Abbildung 42: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Linker globaler Winkel [Curvature-Methode]	74
Abbildung 43: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Linker lokaler Winkel [Curvature-Methode].....	75
Abbildung 44: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Linker Radius [Curvature-Methode]	75
Abbildung 45: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Linker Undercut [Curvature-Methode].....	76
Abbildung 46: Vergleich vom rechten globalen Winkel zu Flankenwinkel	76
Abbildung 47: Vergleich vom globalen Winkel zu Flankenwinkel [Curvature-Methode]	77
Abbildung 48: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Weibull- und Extremwertverteilung: Undercuts [Curvature-Methode]	78
Abbildung 49: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Weibull- und Extremwertverteilung: Undercuts	78

Formelverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
R	Nahtübergangsradius	mm
α_{global}	Globaler Winkel	°
α_{local}	Lokaler Winkel	°
d	Undercut-Tiefe	mm
H_w	Nahtüberhöhung	mm
W	Nahtbreite	mm
e	Kantenversatz	mm
n	Schnittanzahl	
n_{max}	Maximale Schnittanzahl	
X	Zufallsvariable	
x	Realisation einer Zufallsvariable	
a	Untere Grenze eines bestimmten Intervalls	
b	Obere Grenze eines bestimmten Intervalls	
E	Erwartungswert	
μ	Erwartungswert	
V	Varianz	
σ^2	Varianz	
F(x)	Verteilungsfunktion	
f(x)	Dichtefunktion	
P	Wahrscheinlichkeit	
σ	Standardabweichung	
\bar{x}	Arithmetischer Mittelwert	
N	Gesamtzahl der Beobachtungen	
V_{Normal}	Variationskoeffizient einer Normalverteilung	
$V_{\text{Lognormal}}$	Variationskoeffizient einer Lognormalverteilung	

α	Signifikanzniveau	
critval	Kritischer Wert (Anpassungstest)	
kstat	Teststatistik	
S_i	Messwert am Schnitt i aus Standard-Methode	
T_i	Messwert am Schnitt i aus Tangenten-Methode	
zpos	Position eines Schnitts	mm
i	Laufender Index für Schnitte	
rel. Abweichung _{i}	Relative Abweichung des Messwerts an dem Schnitt i zwischen Standard- und Tangenten-Methode	
Δx_i	Differenz zwischen arithmetischem Mittelwert des Schnitts i und Erwartungswert	
$\hat{F}(x)$	empirische Verteilungsfunktion	
$G(x)$	theoretische Verteilungsfunktion mit geschätzten Parametern aus empirischen Daten	

Abkürzungsverzeichnis

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
IQR	Interquartilabstand
ISO	International Standards Organization
K-S-Test	Kolmogoroff-Smirnoff-Test
Lilliefors-Test	Lilliefors-Modifikation des Kolmogoroff-Smirnoff -Tests
LSP	Laser Scanning Profiling
MATLAB	Matrix Laboratory
NaN	Not a number
SCF	Spannungskonzentrationsfaktor
SLP	Structured Light Projektion

1 Einleitung

1.1 Einführung

Schweißverbindungen sind auslegungskritische Komponenten in Konstruktionen, da die Ermüdungsfestigkeit der Schweißverbindung geringer als die des Grundwerkstoffs der Konstruktion ist. Oftmals ist die Schweißverbindung daher Ausgangspunkt des Versagens bei kritischen Belastungsfällen. Laut Schubnell et al. [1] kommt es hauptsächlich an der Oberfläche des Übergang zwischen Grundwerkstoff und Zusatzwerkstoff, dem sogenannten Nahtübergang, zum Versagen. Einer der wichtigsten Faktoren, welcher Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit der Schweißverbindung hat, ist der Spannungszustand am Nahtübergang. Dieser wird durch Unregelmäßigkeiten wie zum Beispiel Schweißgutüberlauf und Hinterschnitt (Undercut) beeinflusst. Des Weiteren haben die lokalen Geometrieparameter signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit der Schweißnaht. Hierbei sind die einflussreichsten lokalen Geometrieparameter der Nahtübergangsradius, Flankenwinkel und Hinterschnitt, wie von Schork et al. [2] festgestellt wurden. Der lokale Spannungszustand am Nahtübergang wird mit dem Spannungskonzentrationsfaktor beschrieben [1].

Mit dem internationalen anerkannten Standard ISO 5817:2014-06 [3] werden Schweißnähte anhand von Grenzwerten für eine Reihe von Unregelmäßigkeiten bewertet und in Qualitätsgruppen (D, C und B) kategorisiert. Je nach Anforderung an die Schweißverbindungen müssen diese einer Qualitätsgruppe gehören. Im Standard ISO 5817:2014-06 [3] wurde ursprünglich bei der Festsetzung der Unregelmäßigkeiten und ihre Grenzen die Ermüdungsfestigkeit nicht mitbetrachtet. Durch analoge Messgeräte werden die Unregelmäßigkeiten einer Schweißverbindung von Prüfern im Qualitätssicherungsprozess gemessen. Überschreitet einer der katalogisierten Unregelmäßigkeiten den Grenzwert für eine Qualitätsgruppe, erfüllt die Schweißnaht nicht den Anforderungen für diese Qualitätsgruppe. Schork et al. [2] haben Interaktionen zwischen den lokalen Geometrieparametern festgestellt, die durch dieses Vorgehen nicht berücksichtigt werden. Laut Schork et al. [2] hat beispielsweise die Variation des Nahtübergangsradius geringen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit, wenn ein großer Undercut vorhanden ist. Außerdem wird der Nahtübergangsradius im Standard ISO 5817:2014-06 [3] nicht aufgeführt, unter anderem wegen dessen Fehlenden allgemein anerkannten Definition. Es wird an einer Weiterentwicklung des Standards ISO 5817:2014-06 [3] gearbeitet, um Kriterien einzuführen, die eine direkte Korrelation mit der Ermüdungsfestigkeit der Schweißnaht haben [4, 3].

Die Ergebnisse der analogen Messung der Unregelmäßigkeiten ist subjektiv und vom Anwender abhängig. Für eine objektive Messung der Schweißnahtgeometrie haben sich optische

Messsysteme etabliert. Hierdurch können Geometrieparameter einer Schweißnaht über einen großen Bereich mit relativ wenig Aufwand analysiert werden [1].

Obwohl Wissenschaftler eine Vielzahl von Nahtübergangsradien- und Flankenwinkel-Messdaten aus optischen Messsystemen bestimmt haben, wurden die Einflüsse der Auflösung und Genauigkeit der optischen Messsysteme auf die Geometrieparameter nicht berücksichtigt. Wie zuvor erwähnt, gibt es kein einheitliches anerkanntes Verfahren zur Bestimmung des Nahtübergangsradius und Flankenwinkels mit optischen Messsystemen. Sodass ein direkter Vergleich der Forschungsergebnisse aus unterschiedlichen optischen Messsystemen nicht möglich ist [1, 5].

Im Zuge der Kooperation mit Vattenfall bezüglich Windkraftanlagen wird im Institut für Konstruktion und Festigkeit von Schiffen (M-10) der Technischen Universität Hamburg an einem automatisierten, objektiven Verfahren zur Messung und Bewertung von Stumpfstoß Schweißverbindungen geforscht. Die Türme von Windkraftanlagen werden mit Stumpfstoß Schweißverbindungen verbunden und müssen hohen Anforderungen entsprechen. Somit auch eine hohe Qualität aufweisen. Das Erreichen einer hohen Schweißqualität ist mit hohen Kosten verbunden und es ist im wirtschaftlichen Interesse diese zu verringern. Durch die Forschung unter anderem der Korrelation zwischen den lokalen Geometrieparametern und der Ermüdungsfestigkeit der Schweißverbindung soll bei gleichbleibender hoher Schweißqualität Schweißmaterial-Einsparung möglich sein. Zusätzlich soll der Vorgang der Messung und Bewertung der Schweißnähte automatisiert werden.

Das Institut für Konstruktion und Festigkeit von Schiffen (M-10) hat im Zuge ihrer Forschung neben den Einflüssen von Auflösung und Genauigkeit von unterschiedlichen optischen Messsystemen auf die Messung der lokalen Geometrieparameter, verschiedene Algorithmen zur Auswertung der Daten aus den optischen Messsystemen untersucht, siehe Schubnell et al. [1]. Die Algorithmen dienen zur Bestimmung der lokalen Geometrieparameter und sollen Methoden zur Bestimmung der Nahtübergangsradien und Flankenwinkel sein. Die Algorithmen werden im Folgenden als Messmethoden bezeichnet. In dieser Arbeit wurden die Messmethoden Mittelwertverfahren, Tangenten-Methode und die Curvature-Methode an einer Probe angewendet. Dabei werden die Einflüsse der Messmethoden auf die Messergebnisse der lokalen Geometrieparameter miteinander verglichen und quantifiziert. Hierzu werden die Messergebnisse mit deskriptiven und explorativen statistischen Mitteln ausgewertet. Zur praktischen Anwendung der Messmethoden ist es notwendig eine Schnittanzahl zu bestimmen, über die die lokale Geometrie der Schweißnähte ausreichend gut beschrieben werden. Hierdurch kann Aufwand in Form von Laufzeit bei der Anwendung der Messmethoden gespart werden und es können effizient Aussagen über die Größen der lokalen Geometrieparameter entlang der Nahtlänge getroffen werden. Dazu ist die Feststellung der Konvergenz der lokalen Geometrieparameter gegen eine Wahrscheinlichkeitsverteilung erforderlich. Dementsprechend werden die lokalen Geometrieparameter auf Konvergenz geprüft, um eine Schnittanzahl für die Anwendung der Messmethoden vorzuschlagen. Des Weiteren wird der Zusammenhang zwischen Rissinitiierung und lokale Geometrieparameter einer Stumpfstoß Probe, die einen Ermüdungsbruch durch einen Schwingfestigkeitsversuch mit konstanter Lastamplitude erlitten hat, untersucht. Die untersuchten lokalen Geometrieparameter sind Nahtübergangsradius R , globaler Winkel α_{global} , lokaler Winkel α_{local} und Undercut d . Diese werden in Abbildung 1 für

einen Stumpfstoß dargestellt [1]. In Abbildung 1 werden des Weiteren Nahtüberhöhung H_w , Nahtbreite W und Kantenversatz e abgebildet. Die Curvature-Methode ist von Schubnell et al. [1] beschrieben worden. Eine Beschreibung des Mittelwertverfahrens und der Tangenten-Methode ist in der Anleitung von Renken [6] für die Nutzung von WeldScan zu finden. Die in dieser Arbeit untersuchten Messmethoden sind in dem Programm WeldScan eingebaut, siehe Renken [6] für eine detaillierte Beschreibung von WeldScan.

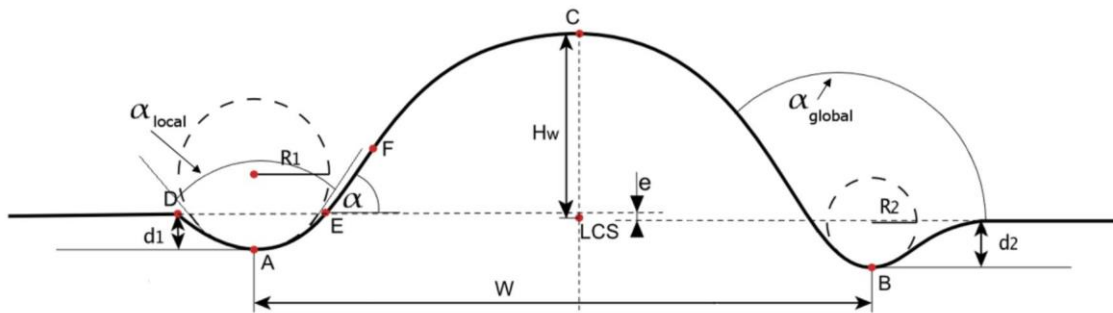


Abbildung 1: Lokale Geometrieparameter eines Stumpfstoßes (Querschnittsdarstellung) [7]

2 State of Art

2.1 Einflussfaktoren auf die Lebensdauer

Die Lebensdauer einer Schweißnaht wird primär von dem lokalen Spannungszustand in der Nähe des Nahtübergangs neben anderen Faktoren, wie Schweißqualität, Eigenspannungen, Materialdefekten und anderen, welche von Basoum, Jonsson [8] und Zerbst et al. [9] erwähnt werden, beeinflusst. Ermüdungsversagen in Schweißverbindungen entstehen in der Regel an den Nahtübergängen der Schweißnähte durch spannungssteigernde Effekte der lokalen Geometrie-Unregelmäßigkeiten entlang der Schweißnaht. Diese führen zu plastischen Verformungen an den Nahtübergängen, die in Korrelation mit Rissinitiierung stehen und in der Folge zum endgültigen Versagen der Schweißnaht führen. Der Spannungszustand ist für die Lebensdauereinschätzung der Schweißnaht essenziell, jedoch nicht der einzige Faktor, welcher Einfluss darauf hat. In Allgemeinen wird der Spannungskonzentrationsfaktor (eng.: stress concentration factor), abgekürzt mit SCF, als Maß zur Beschreibung der Spannungserhöhung des lokalen Spannungszustands an der Schweißnaht genutzt [10, 11].

Wie Hou [10] aus seinen Untersuchungen festgestellt hat, ist neben dem SCF, der Risszusammenschluss von mehreren unabhängigen Rissen ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf den Ermüdungsbruch. Dabei haben die Positionen der Rissinitiierungen signifikanten Einfluss auf den Risszusammenschluss. Befinden sich die Rissinitiierungen dicht beieinander, neigen diese eher einem Zusammenschluss als voneinander entfernte Rissinitiierungsstellen. Des Weiteren erklärt Hou [10], um die Risszusammenschlüsse zu prognostizieren vor oder ohne einen Ermüdungsversuch, ist es notwendig die Rissinitiierungsstellen zu bestimmen. Dafür müssen die Geometrien der Nahtübergänge und ihre Positionen entlang der Schweißnaht bekannt sein. Somit haben die lokalen Geometrieparameter eine Korrelation mit dem SCF und den Rissinitiierungen [10].

Die einflussreichsten lokalen Geometrieparameter auf die Ermüdungsfestigkeit der Schweißnaht sind Nahtübergangsradius, Flankenwinkel, Hinterschnitt (engl.: undercut), die zu den sekundären Kerben (engl.: secondary notches) gehören [5, 1].

2.2 Messverfahren

Die Geometrie der Schweißnaht kann anhand von destruktiven und zerstörungsfreien Methoden ermittelt werden. Der Vorteil von nicht destruktiven Methoden ist der Erhalt der Schweißverbindung für weitere Untersuchungen. Zu den nicht destruktiven Messmethoden gehören unter anderem verschiedene optische Messverfahren. Hierbei werden die Messtechniken „Structured Light Projektion“ (SLP) und „Laser Scanning Profiling“ (LSP) üblicherweise verwendet. Der Vorteil dieser Messsysteme ist eine schnelle, objektive Messung von großen Bereichen mit wenig Aufwand. Diese Messsysteme wurden für die Geometrieanalyse von Schweißnähten erfolgreich untersucht und angewendet, jedoch ohne Informationen zu deren Messgenauigkeit oder Auflösung anzugeben. Problematisch für den Vergleich von Untersuchungsergebnissen der lokalen Geometrieparameter Nahtübergangsradius und Flankenwinkel, welches auch als globaler Winkel bestimmt werden kann, sind fehlende allgemein anerkannte Verfahren bei der Anwendung von optischen Messsystemen, sowie keine standardisierte Definition zur Bestimmung beider Parameter. Sodass ein direkter Vergleich der Geometrieparameter und Forschungsergebnisse gewonnen aus unterschiedlichen Messsystemen, die sich durch ihre Messgenauigkeit und Auflösung unterscheiden und verschiedenen Algorithmen nicht möglich ist. Der Nahtübergang einer Schweißnaht besteht im Grunde aus zahlreichen Radien bedingt durch die Oberflächenrauheit und ist abhängig von der gewählten Skala. Abbildung 2 (a) stellt die Radien am Nahtübergang dar, wobei die kleinen Radien zur Oberflächenrauheit gehören. Abbildung 2 (b) zeigt den Einfluss der Auflösung beim Scannen des Nahtübergangs auf den Nahtübergangsradius auf, hierbei ist mit Auflösung die Dichte der Scanpunkte gemeint [5, 1].

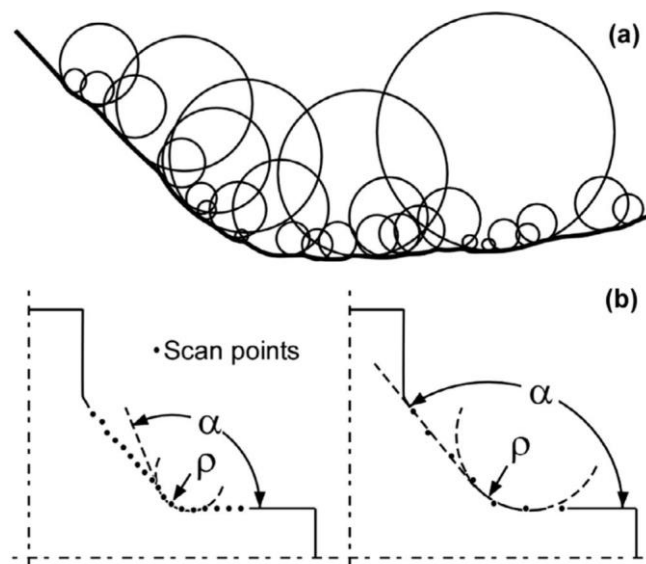


Abbildung 2: (a) Darstellung einer Vielzahl von Radien am Nahtübergang abhängig von der gewählten Skala, (b) theoretischer Einfluss der Dichte der Scanpunkte auf den erhaltenen Nahtübergangsradius

[5]

In der Studie von Schubnell et al. [1] wurden die lokalen Nahtübergangsradius und Flankenwinkel mit fünf verschiedenen Algorithmen und vier unterschiedlichen optischen Messsystemen an acht verschiedenen Schweißtypen bestimmt und miteinander verglichen. Das Ziel war den Effekt der Messgenauigkeit und Auflösung der optischen Messsystemen und den Einfluss der unterschiedlichen Messmethoden zu untersuchen und zu quantifizieren. Die von Schubnell et al. [1] verwendeten optischen Messsystemen sind in Tabelle 1 zusammen mit den zugehörigen Auflösungen und Messgenauigkeiten aufgelistet. Die unterschiedlichen Daten aus der Analyse der Nahtübergänge gewonnen aus den vier optischen Messsystemen wurden nicht einheitlich mit den Messmethoden zur Ermittlung des Nahtübergangsradius und Flankenwinkels ausgewertet. Zusätzlich wurden unterschiedliche Schnittabstände zur Messung der Geometrieparameter der Schweißtypen verwendet und die empirischen Daten wurden anhand von angepassten Normalverteilungen mit den dazugehörigen Parametern, Mittelwert und Standardabweichung, verglichen. Sodass ein direkter Vergleich der Einflüsse aus den Messmethoden auf die gemessenen Geometrieparameter nicht möglich ist. Für einen direkten Vergleich ist die Verwendung von einheitlichen optischen Messsystemen und Schnittabständen erforderlich. Schubnell et al. [1] haben die gewonnenen Daten aus den in Tabelle 1 aufgelisteten optischen Messsystemen zur Bestimmung und dem Vergleich der Parameter Nahtübergangsradius und Flankenwinkel mit der Curvature-Methode ausgewertet. Der Vergleich zwischen den Messsystemen ausgewertet mit der Curvature-Methode zeigte eine größere Streuung der Nahtübergangsradien als die der Flankenwinkel. Zudem wurde die Neigung zu kleinen Messergebnissen für Daten, erhoben aus dem optischen Messsystem mit der höchsten Auflösung, festgestellt. Es wurden Unterschiede zwischen 88 % und 106 % für die Mittelwerte der Radien, gewonnen aus der Curvature-Methode und den unterschiedlichen optischen Messsystemen, beobachtet. Für die Flankenwinkel wurde eine geringere Streuung beobachtet, diese Abweichungen betragen bis zu 6 % für einen Schweißtyp [1].

2.3 Ziele der Arbeit

Im Zuge dieser Arbeit werden die empirischen Daten, gewonnen aus einem optischen Messsystem (S3) und ausgewertet mit den Messmethoden Mittelwertverfahren, Tangenten- und Curvature-Methode, quantifiziert, verglichen und statistisch untersucht. Der direkte Vergleich der Ergebnisse wird ermöglicht durch einheitliche Schnittabstände für alle Messmethoden und wie erwähnt durch die Nutzung eines einheitlichen optischen Messsystems. Die lokale Geometrie des Schweißtyps Stumpfstoß wird mit dem optischen Messsystem analysiert und mit den Messmethoden ausgewertet. Neben den Parametern Nahtübergangsradius werden die Parameter globale Winkel, Undercut und lokale Winkel mit den Messmethoden bestimmt. Die Ergebnisse der Parameter aus den verschiedenen Messmethoden werden miteinander verglichen. Das Ziel ist die Unterschiede der einzelnen Messmethoden zu quantifizieren, die Verteilungen der erhaltenen empirischen Daten neben dem Folgen einer Normalverteilung auch auf eine Lognormalverteilung zu prüfen und mit den aus der Literatur erwähnten Verteilungen der untersuchten lokalen Geometrieparameter zu vergleichen. Zusätzlich soll untersucht werden, ob die empirischen Daten konvergieren, sodass eine Stichprobengröße in Form einer Schnittanzahl, welche später im Detail beschrieben wird, für die praktische Anwendung der Messmethoden empfohlen werden kann. Zudem wird der Zusammenhang der untersuchten lokalen Geometrieparameter aus der Tangenten-Methode auf die Rissinitiierung an einer Probe untersucht.

3 Messdatenerzeugung

Dieser Abschnitt basiert auf den Versuchsdurchführungen und wissenschaftlichen Arbeiten aus [6, 7, 12, 13].

Mithilfe des Programmpakets namens WeldScan werden lokale Nahtübergangparameter für verschiedene Schweißnahttypen aus Punktwolken bestimmt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde nur die Schweißnahtart Stumpfstoß ausgewertet. Die Geometrie eines Stumpfstoßes ist in Abbildung 3 zu sehen.

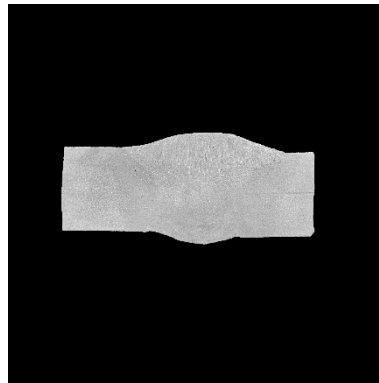


Abbildung 3: Stumpfstoß Querschnitt [14]

Das Programm ist vollständig in MATLAB geschrieben. Es werden die folgenden MATLAB-Toolboxen für das Nutzen von WeldScan und die weitere Auswertung der Messdaten benötigt:

- Curve Fitting Toolbox
- Image Processing Toolbox
- Signal Processing Toolbox
- Computer vision Toolbox

Zusätzlich zu den Toolboxen ist das Programm Excel von Microsoft zu empfehlen, um Fehlermeldungen vorzubeugen, da WeldScan die gemessenen Parameter in eine Exceltabelle absichert.

Bevor WeldScan ausgeführt werden kann, müssen Input-Dateien, die sogenannte Punktwolke, erzeugt werden. Die Erzeugung der Inputdaten und Probenvorbereitung wird kurz vorgestellt, für eine ausführlichere Beschreibung, siehe Renken [6].

3.1 Probenvorbereitung und Input Dateien

Für die Erzeugung der Input-Dateien ist ein Laserscan der zu untersuchenden Probe erforderlich. Eine Vorbereitung der Probe vor dem Einscannen ist notwendig, um Messfehler zu vermeiden [6].

3.1.1 Probenbearbeitung

Zuerst ist die Entfernung grober Verschmutzungen, die durch den Schweißvorgang auftreten, erforderlich. Für komplett ausgeschliffene Schweißnähte und Grundwerkstoffe ist aufgrund des Fräsvorgangs das Entfernen grober Verschmutzung meistens nicht erforderlich. Zur Vermeidung einer Beschädigung der Oberflächenqualität sollte eine Drahtbürste an geschliffenen Oberflächen nicht verwendet werden. Um Messfehler durch Schweißspritzer zu verhindern, müssen diese entfernt werden. Nach der Reinigung wird eine kontrastarme Oberfläche auf die Probenoberfläche durch Auftragen eines Entwicklers für Farbeindringprüfungen erzeugt. Es ist auf eine korrekte Schichtdicke zu achten, um fehlerhafte Ergebnisse zu vermeiden [6].

3.1.2 Laserscan und Erzeugung der Daten

Der Laserscanner erzeugt gute Scanergebnisse bei einem Abstand von ca. 75 mm von der Probe, siehe Abbildung 4 (a). Mit dem Scan werden Querschnitte erstellt, die zu einer Punktwolke zusammengefasst werden. Der Laser scannt Stumpfstöße, während es längs, wie in Abbildung 4 (b), zur Schweißnaht fährt. Die Probennaht muss senkrecht gescannt werden. Dabei muss die Naht eben liegen und sollten nicht schräg sein [6].

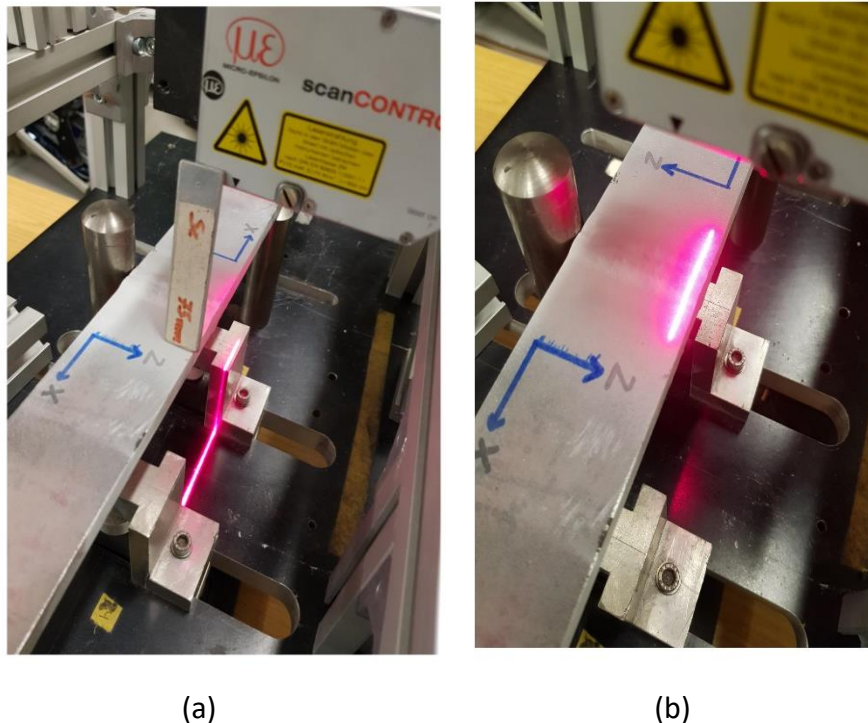


Abbildung 4: Abstand beim senkrechten Scannen, (b) Position des Laserscanners bei Stumpfstößen

Die durch den Laserscan erhaltene Punktwolke einer Probe muss für die Auswertung mit WeldScan in ein ASCII Format überführt werden. Die Vorgehensweise ist von Renken [6] beschrieben. Die im ASCII Format enthaltenen Punktwolken werden über eine .asc-Datei in

WeldScan importiert, damit das Programm gleichmäßig verteilte Schnitte über die Nahtlänge generieren kann. Vor der Schnittgenerierung müssen dem Programm der Speicherort der .asc-Dateien, ein Speicherort für die neugenerierten Schnitte, sowie ein weiteres für das Abspeichern der Messergebnisse übermittelt werden, siehe Renken [6].

An den Positionen der Schnitte werden dann für beide Seiten der Naht die folgenden Geometrieparameter (Abbildung 1) gemessen:

- Nahtübergangsradien
- Flankenwinkel als globaler Winkel
- lokale Winkel
- Undercut
- Nahtüberhöhung
- Nahtbreite
- Kantenversatz

Zur lokalen Geometrie der Stumpfstoßnaht, die in dieser Arbeit untersucht werden, gehören Nahtübergangsradius, Flankenwinkel, lokaler Winkel und Undercut. Die anderen Parameter wurden im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht untersucht. In Abbildung 5 sind beispielhaft die generierten Schnitte als schwarze Linien dargestellt. Die Schnitte sind an einen Stumpfstoß generiert worden. In Abbildung 6 ist ein Beispiel für einen Schnitt, an dem die lokalen Geometrieparameter beider Nahtseiten ausgemessen wurden, dargestellt. Die linken und rechten Nahtseitenparameter werden im weiteren Verlauf als linke und rechte Parameter bezeichnet werden.

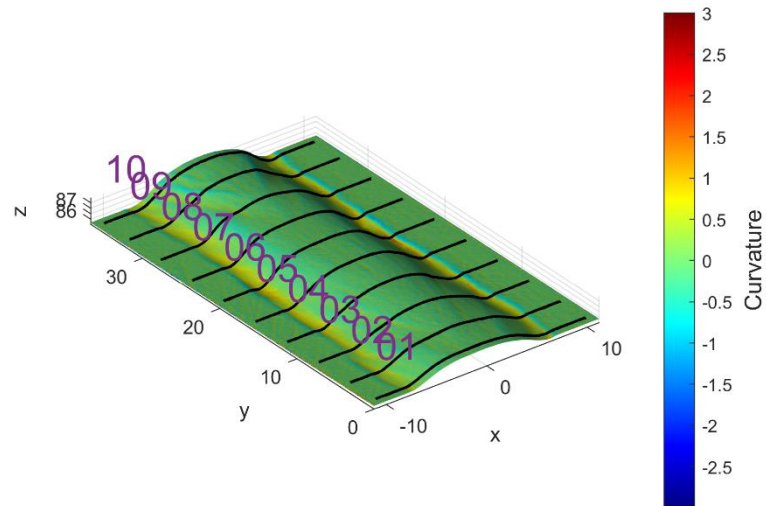


Abbildung 5: Beispiel für Schnitte über der Probenlänge der Probe S500_16_16_Bottom

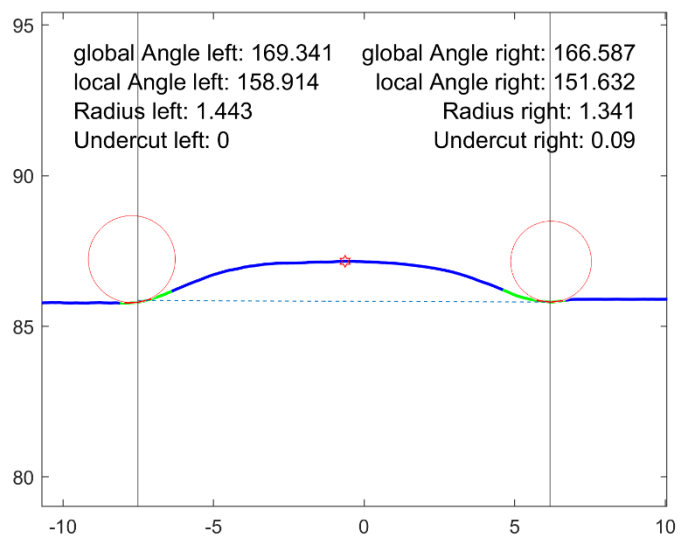


Abbildung 6: Beispiel für Messung der lokalen Geometrieparameter an einem Schnitt

3.2 Probe

Die in dieser Arbeit verwendeten Punktwolken entstanden durch das Einscannen von Stumpfstoßen. Die mit dem Fülldrahtschweißverfahren (eng. flux corded arc welding) verschweißten Stahlbleche aus dem Baustahl S500 hatten eine Länge von 1 m und wurden auf Probenlängen von ca. 40 - 50 cm gekürzt. Baustähle gehören zu den meisten verarbeiteten Stählen. Zur Messung der Proben wurde das Lasermessverfahren S3 aus Tabelle 1 verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit wurde nur die untere Schweißnahtseite der Probe S500 16 16, auch als S500 16 16 Bottom bezeichnet, untersucht. Hierbei steht die erste Ziffer „16“, nach der Stahlbezeichnung „S500“, für die Blechnummer und die zweite Ziffer „16“ für die Schnittnummer. Die Schnittnummer entstand bei der Nummerierung der angesägten Blechabschnitte. Die Nummerierung ist der Reihe nach geschehen. Ist in der Auswertung die Rede von empirischen Daten oder Messdaten, bezieht sich das auf die gemessenen lokalen Geometrieparameter der Probe S500 16 16 Bottom. Es wurden die Messdaten der beiden Schweißnahtseiten untersucht. Dabei ist die rechte Seite der Schweißnaht die Bruchseite nach einem Schwingfestigkeitsversuch mit konstanter Lastamplitude, siehe Abbildung 7 [12, 13].

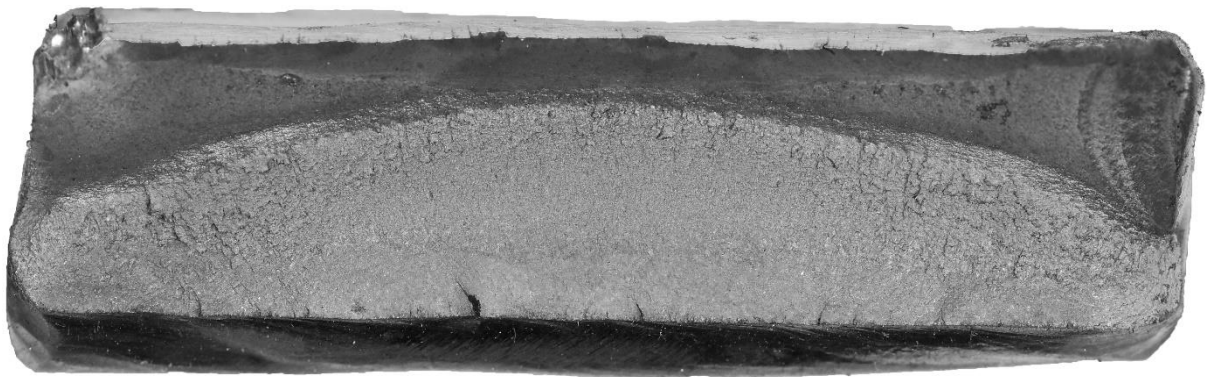


Abbildung 7: Bruchbild der Probe S500_16_16_Bottom nach Ermüdungsversuch

Tabelle 1: Optische Messsysteme zur Messung der lokalen Schweißgeometrie [1]

No.	Type	Manufacturer	Method	Vertical accuracy [mm]	Lateral resolution
S1	Metris Modelmaker Z35	FARO	LSP	0.037	0.025 mm/pts
S2	ATOS 12 M MV120	GOM	SLP	0.005	0.027/pts
S3	LLT 2800–25	Microepsilon	LSP	0.010	1024 pts/profile
S4	Quantum Laser ScanArm	FARO	LSP	0.035	640 pts./profile

3.3 Eingabeparameter

Weldscan ist in zwei Bereiche unterteilt, einen allgemeinen Dateneingabebereich und einen probengeometriespezifischen Dateneingabebereich. Im allgemeinen Eingabebereich werden Parameter für jede Probengeometrie eingestellt. Für Definitionen und Funktionen der allgemeinen Eingabeparameter siehe Renken [6].

Die unterschiedlichen auswertbaren Geometrien sind wie folgt bezeichnet:

- A: Kehlnähte im Schweißzustand
- B: Voll ausgeschliffene Kehlnähte
- BW: Stumpfstöße
- D: Gekerbte Grundwerkstoffproben

Es werden nur die stumpfstoßspezifischen Eingabeparameter in Tabelle 7 und Tabelle 8 vorgestellt, da die anderen Geometrien für diese Untersuchung nicht notwendig sind. Zur Auswertung von Stumpfstößen ist der allgemeine Parameterwert von *Geometry* auf *BW* zu setzen. Für Stumpfstöße ist eine Qualitätsbewertung nach ISO 5817:2014-06 [3] möglich, sowie die Auswertung von gehämmerten Nähten. Eine detaillierte Beschreibung der Eingabeparameter und deren Zweck ist in der Anleitung von Renken [6] enthalten [6].

3.3.1 Verwendete allgemeine Eingabeparameter

Die allgemeinen Eingabeparameter sind wie voreingestellt übernommen worden, siehe Tabelle 2, Tabelle 3 und Tabelle 4. Dabei sind die Eingabeparameter *folder*, *TargetFolder*, *SpecFolder*, *ResultFolder*, *ResultFolderName* individuell je nach Anwender von WeldScan als Zielpfade der jeweiligen Dateien zu wählen. Einzig die allgemeinen Eingabeparameter *SliceGen* und *n* wurden verändert. *SliceGen* wird bei Bedarf für die Generierung von Schnitten auf *SliceGen* = 1 gestellt. Sind die Schnitte einmal erstellt worden, muss man diese nicht noch einmal erstellen, sodass *SliceGen* = 0 gesetzt werden kann. Hierdurch wird beim Ausführen des Programmes weniger Rechenzeit benötigt. Die Punktwolken der Unterseite (Bottom) der Probe S500 B 16 16 wurden im Zuge dieser Arbeit mit $n = \{10, 50, 100, 150, 200, 300, 400\}$ Schnitten untersucht.

Tabelle 2: Voreingestellte allgemeine Eingabeparameter 1

Eingabeparameter	SliceSize	alpha1	alpha2	alpha3	s1	s2
Wert	200	0	0	0	10	10

Tabelle 3: Voreingestellte allgemeine Eingabeparameter 2

Eingabeparameter	vflip	endSlice	alpha1S	alpha2S	alpha3S	MinDis
Wert	0	0.2	0	0	0	0.5

Tabelle 4: Voreingestellte allgemeine Eingabeparameter 3

Eingabeparameter	S1	S2	MarkSiz	Color	DisMaxPos	DisMaxNeg
Wert	0	0	20	1	3	-3

3.3.2 Stumpfstoßspezifische Eingabeparameter

Die meisten spezifischen Eingabeparameter sind aus den Voreinstellungen des Programms übernommen worden, siehe Tabelle 5 und Tabelle 6. Abhängig von der Nahtbreite ist es notwendig die Parameter *MinWB*, die minimale zulässige Nahtbreite, und *MaxWB*, die maximale zulässige Nahtbreite, für jede Probe individuell anzupassen. Ansonsten kann es zu Messfehlern kommen, da das Programm die Mitte der Naht nicht bestimmen kann. Für die Unterseite der Probe S500 B 16 16 wurden die Parameter *MinWB*=8 und *MaxWB*=16 bestimmt. Diese Bestimmung erfolgte nach erstmaligem Schätzen und Korrigieren anhand der erzeugten Schnittbilder für die Schnittanzahl $n = 10$, siehe Abbildung 6. Es stehen im Programm drei unterschiedliche Auswertungsmethoden zur Auswahl, die mit *standard*, *tangente* und *curvature* bezeichnet sind und mit dem Setzen des Eingabeparameters *method* ausgewählt werden. Setzt man *method* gleich 0 wird das Mittelwertverfahren ausgeführt, für 1 das Tangentenverfahren und für 2 die Curvature-Methode. Mittelwertverfahren und Tangentenverfahren unterscheiden sich durch unterschiedliche Bestimmungsmethoden des Nahtanstiegs [6].

Beim Mittelwertverfahren wird der Nahtanstieg anhand von zwei gefitteten Geraden in einem auswählbaren Bereich bestimmt und beim Tangentenverfahren wird der Nahtanstieg durch Kreistangenten am Krümmungskreis, mit dem der Nahtübergangsradius gebildet wird, erzeugt. Die Tangenten werden an den letzten Berührungspunkten des Krümmungsradius mit den Geraden angelegt, siehe Abbildung 8. Eine detaillierte Beschreibung ist in der Anleitung von Renken [6] für Mittelwertverfahren und Tangentenverfahren zu finden. Die Curvature-Methode wird in [7, 15] beschrieben. Die Curvature-Methode wurde von Jung [15] implementiert. Anders als bei den anderen zwei Methoden wird bei der Curvature-Methode die Steigung der gefitteten Splines analysiert und der Punkt mit der höchsten Steigung im Suchbereich

wird als Nahtübergang festgelegt. Der Radius an dieser Stelle ist definiert als Kehrwert der Steigung. Alle benachbarten Punkte, deren Normalvektoren die Schnittfläche schneiden (Abbildung 9) gehören zum Nahtübergangsradius. Die letzten noch zum Nahtübergangsradius gehörigen Punkte definieren den Flankenwinkel [15, 6, 7].

Tabelle 5: Voreingestellte spezifische Eingabeparameter 1

Eingabeparameter	sR	ISOeval	CritDistance	MaxR	MaxAngle	MaxNumIt	StepIt
Wert	0.07	0	0.1	5	175	3	0.015

Tabelle 6: Voreingestellte spezifische Eingabeparameter 2

Eingabeparameter	eval_weld	reval_angle	sL	t
Wert	0.7	0.02	0.07	10

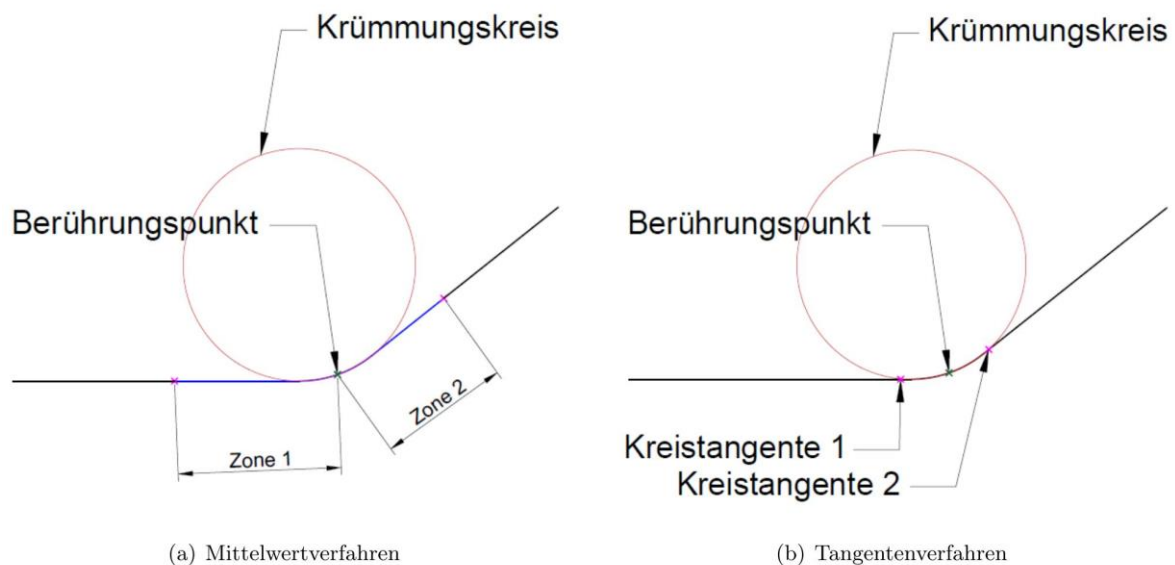


Abbildung 8: Nahtanstieg Messverfahren [6]

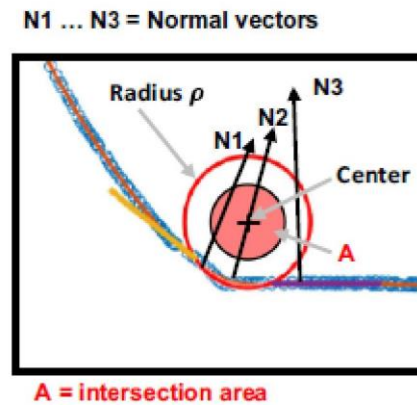


Abbildung 9: Curvature-Methode [7]

Tabelle 7: Eingabeparameter Probengeometrie BW Teil 1 [6]

Parameter	Einheit	Beschreibung	Bemerkung	Empfehlung
<i>method</i>	-	Auswertungsmethode des Nahtüberganges.	0: Mittelwertverfahren, 1: Tangentenverfahren, 2: Curvature method	
<i>eval_weld</i>	-	Wie viel Prozent der Nahtüberhöhung soll entfernt werden.	Prozentuale Angaben, daher nur Werte von 0 bis 1 zulässig.	0,8 (reduzieren bei starkem Kantenversatz)
<i>sL</i>	-	Anzahl an Datenpunkten für die Referenzlinie auf der linken Seite.	Referenzlinie wird vom ersten Eintrag bis zu diesem Wert gefittet.	10
<i>sR</i>	-	Anzahl an Datenpunkten für die Referenzlinie auf der rechten Seite.	Referenzlinie wird vom letzten Eintrag bis zu diesem Wert gefittet.	10

Tabelle 8: Eingabeparameter Probengeometrie BW Teil 2 [6]

<i>ISOeval</i>	-	ISO 5817 Qualitätsbewertung ein- (1) oder ausschalten (0).		
<i>t</i>	mm	Blechdicke für die ISO 5817 Auswertung.		
<i>HFMI</i>	-	Auswertung von gehämmerten Stumpfnähten ein- (1) oder ausschalten (0).		
<i>rsearch</i>	-	Suchradius indem die Einbrandkerbe und die HFMI Kerbe gesucht wird.	Nur ganzzahlige Werte zulässig, da es sich um Datenpunkte handelt.	20
<i>MaxR</i>	mm	Maximal zulässiger Radius	Größere Radien werden als fehlerhafte Messung identifiziert.	4 bis 6
<i>MaxAngle</i>	°	Maximal zulässiger Winkel	Größere Winkel werden als fehlerhafte Messung identifiziert	165 bis 175
<i>CritDistance</i>	mm	Wie weit dürfen Datenpunkte im gefitteten Kreis liegen.	Zum Identifizieren einer fehlerhaften Bestimmung des Kreises.	0.1
<i>MinWB</i>	mm	Minimal zulässige Nahtbreite.	Zum Identifizieren einer fehlerhaften Messung.	Nahtabhängig
<i>MaxWB</i>	mm	Maximal zulässige Nahtbreite.	Zum Identifizieren einer fehlerhaften Messung.	Nahtabhängig

4 Statistische Methoden

In diesem Abschnitt werden die in dieser Arbeit verwendeten explorativen und deskriptiven statistischen Verfahren eingeführt.

Die lokale Geometrie am Nahtübergang einer Schweißverbindung variiert längs über die Nahtlänge. Eine Verteilung der empirischen Daten stellt die Häufigkeit der auftretenden Werte dar. Aus diesen Daten ist eine Untersuchung nur begrenzt möglich, sodass nur wenige Aussagen über die Daten getroffen werden können wie z.B. Mittel-, Maximal-, Minimalwert, Median, Quartile. Eine statistische Auswertung hingegen ermöglicht es, Aussagen über die Stichprobengröße hinaus über die Grundgesamtheit zu treffen. Eine Methode der statistischen Auswertung ist das Nutzen von Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Die erhobenen empirischen Messdaten in dieser Arbeit sind stetig, aus diesem Grund können nur stetige Wahrscheinlichkeitsverteilungen zur Auswertung angewendet werden. Diese stetigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen werden durch ihre spezifischen Dichtefunktionen und Verteilungsfunktionen beschrieben. Der Vorteil einer theoretischen Verteilung, beispielsweise eine Normalverteilung, gegenüber der empirischen Verteilung ist die Möglichkeit, anhand von der Dichtefunktion bzw. Verteilungsfunktion, die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Realisation einer Zufallsvariable X in einem bestimmten Intervall zu bestimmen. Zusätzlich können aus einer Wahrscheinlichkeitsverteilung Parameter zur statistischen Analyse bestimmt werden, wie z.B. Erwartungswert $E(X)$, Varianz $V(X)$, Modalwert oder Standardabweichung neben den bekannten Parameter, die weiter oben genannt wurden. Sind die empirischen Daten bekannt, kann eine theoretischen Wahrscheinlichkeitsverteilung an den Daten angepasst werden. In dieser Arbeit kommen Normalverteilungen, logarithmische Normalverteilung, auch als Lognormalverteilung bezeichnet, Weibullverteilung und Extremwertverteilung vor, wobei die Normal- und Lognormalverteilung hauptsächlich untersucht wurden. Hier soll erwähnt werden, dass es eine Vielzahl von anderen stetigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen gibt. Laut Schork et al. [5] ist bekannt, dass der Nahtübergangsradius und Flankenwinkel von Stumpfstoßen oftmals Lognormalverteilungen bzw. Normalverteilungen folgen, siehe auch Renken et al. [16]. In diesem Abschnitt wird überprüft, ob die gemessenen empirischen Daten der lokalen Geometrie-parameter, der Probe S500_16_16, mit dem Programm *WeldScan* und den damit verbundenen Messverfahren aus Abschnitt 2.3.2 den laut Schork et al. [5] entsprechenden Verteilungen übereinstimmen. Außerdem wird untersucht, ob und welchen Wahrscheinlichkeitsverteilungen die empirischen Parameterdaten Undercut und lokale Winkel folgen [17–20].

4.1 Dichte- und Verteilungsfunktionen

Die Dichtefunktion $f(x)$ und Verteilungsfunktion $F(x)$ sind abhängig von wahrscheinlichkeitsspezifischen Parametern. Die Dichtefunktion $f(x)$ beschreibt die Dichte für das Auftreten einer Realisation x der Zufallsvariable X in einem bestimmten Intervall $[a, b]$. Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit für die Realisation der Zufallsvariable in diesem Intervall wird die Dichtefunktion über das bestimmte Intervall $[a, b]$ integriert. In dieser Arbeit wurden Dichtefunktionen und Verteilungsfunktionen mit dem Programm MATLAB erzeugt und graphisch dargestellt, hierzu wurden von MATLAB-Tools zur Verfügung gestellt. Mithilfe der graphischen Darstellung der Dichte- und Verteilungsfunktionen und der empirischen Verteilungsfunktion ist eine visuelle Auswertung der empirischen Messdaten der lokalen Geometrieparameter möglich. Ein grundlegendes mathematisches Verständnis der genannten Funktionen wird für die Anwendung benötigt. Aus diesem Grund werden einige mathematischen Eigenschaften der Dichte- und Verteilungsfunktion eingeführt [17, 21].

Folgende mathematische Eigenschaften hat die Dichtefunktion:

Die Dichte nimmt nur positive Werte an.

$$f(x) \geq 0 \text{ für alle } x \in \mathbb{R} \quad (1)$$

Die Integration über das Intervall $[-\infty, \infty]$ ergibt 1, also ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass sich eine Realisation x der Zufallsvariable X in diesem Intervall befindet, 100%.

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (2)$$

Die Verteilungsfunktion ist definiert als die Integration der Dichtfunktion über dem Intervall $[-\infty, x]$ und ergibt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass sich die Realisation x der Zufallsvariable X zwischen x und minus unendlich befindet.

$$F(X) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \text{ für } x \in \mathbb{R} \quad (3)$$

Möchte man also die Wahrscheinlichkeit in einem Intervall von $[a, b]$ bestimmen, kann man diese durch die Differenz der Werte der Verteilungsfunktion an den Stellen a und b erhalten.

$$P(a \leq x \leq b) = F(b) - F(a) = \int_a^b f(x) dx \quad (4)$$

Die Verteilungsfunktion der Zufallsvariable X ist für einen beliebigen Wert x , die Wahrscheinlichkeit für den Fall, dass dieser mit einer Beobachtung kleiner gleich x auftritt.

$$F(x) = P(X \leq x) \quad (5)$$

Der entgegengesetzte Fall lässt sich durch die Gegenwahrscheinlichkeit berechnen.

$$P(X > x) = 1 - F(x) \quad (6)$$

Aufgrund der Eigenschaft in Formel (4) und Formel (5) ist eine Berechnung nicht erforderlich und die Werte der Wahrscheinlichkeiten können abgelesen werden.

Der Erwartungswert ist definiert durch die Formel (7) für stetige Zufallsgröße X mit der Dichte $f(x)$. Es bestimmt den Wert, der im Durchschnitt zu erwarten wäre, wenn die Wiederholung des Zufallsvorgangs der Zufallsvariable X gegen unendlich laufen würde [19, 22].

$$E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x) dx = \mu \quad (7)$$

Die Streuung der Realisationen einer Zufallsvariable X um den Erwartungswert $E(X)$ wird mit der Varianz $V(X)$, siehe Formel (8), und der Standardabweichung σ beschrieben. Dabei ergibt sich die Standardabweichung σ aus der Wurzel der Varianz $V(X)$, siehe Formel (9) Die Varianz $V(X)$ wird auch als σ^2 symbolisiert [22].

$$\sigma^2 = V(X) = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 \cdot f(x) dx > 0 \quad (8)$$

$$\sigma = \sqrt{V(x)} = \sqrt{\sigma^2} \quad (9)$$

4.1.1 Normalverteilung

Im Folgenden werden kurz die Normalverteilung und Lognormalverteilung vorgestellt. Eine detaillierte Definition haben Sachs und Hedderich [17] festgehalten.

Die graphische Darstellung der Dichtefunktion einer Normalverteilung ist symmetrisch und glockenförmig. Die Dichtefunktion der Normalverteilung wird mit dem Parametern

Erwartungswert μ und Standardabweichung σ beschrieben und lässt sich durch die Formel (10) berechnen.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-0,5 \cdot \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (10)$$

Der Erwartungswert $E(X)$ einer Normalverteilung entspricht dem arithmetischen Mittelwert, dem Median und dem Modus der Zufallsvariable X . Der arithmetische Mittelwert ist die Summe aller beobachteten Werte durch die Anzahl der beobachteten Werte. Der Median ist definiert als der Wert der Normalverteilung von dem sich links und rechts davon gleich viele Werte befinden, sodass es ein Maß für das Zentrum der beobachteten Werte ist. Der Wert mit der höchsten Häufigkeit in einer Normalverteilung wird als Modus bezeichnet.

Arithmetischer Mittelwert:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i \quad (11)$$

$x_i = i - \text{ter Beobachteter Wert}$

$N = \text{Gesamtzahl der Beobachtungen}$

Erwartungswert einer Normalverteilung:

$$E(X) = \mu = \bar{x} \quad (12)$$

Varianz einer Normalverteilung

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (13)$$

Der Variationskoeffizient ist ein relatives Streuungsmaß, das unabhängig von der Maßeinheit der beobachteten Ergebnisse ist. Das bietet die Möglichkeit, die Streuung mehrerer empirischer Daten zu vergleichen.

Variationskoeffizient einer Normalverteilung:

$$V_{\text{Normal}} = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (14)$$

4.1.2 Logarithmische Normalverteilung

Die Lognormalverteilung wird bei asymmetrischen, rechtsschiefen Verteilungen, die eine Normalverteilung nicht ausreichend repräsentieren kann, angewendet. Eine Verteilung ist rechtsschief, wenn die Steigung links vom absoluten Maximum größer ist als die Steigung rechts davon. Laut Scheid [21] gelten die folgenden Größenverhältnisse: Erwartungswert > Median > Modalwert. Wie Scheid [21] beschreibt, folgt die Zufallsvariable X einer Lognormalverteilung, wenn der natürliche Logarithmus der Zufallsvariable X normalverteilt ist. Dieser Zusammenhang wird zur Auswertung der empirischen Daten genutzt, um die empirischen Daten auf Konvergenz zu prüfen. Zudem müssen die beobachteten Werte einer Zufallsvariable X größer null sein. Die empirischen Undercut-Daten enthalten Null-Werte. Bei der Anpassung einer Lognormalverteilung an empirischen Undercut-Daten wurden die Null-Werte aus diesem Grund entfernt [21, 17].

Dichtefunktion der Lognormalverteilung:

$$y(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}x} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (15)$$

Die Parameter μ und σ einer Lognormalverteilung unterscheiden sich von denen der Normalverteilung und werden mit den folgenden Formeln bestimmt.

Erwartungswert einer Lognormalverteilung

$$E(X) = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (16)$$

Varianz einer Lognormalverteilung:

$$V(X) = \exp(2\mu + \sigma^2) \cdot (\exp(\sigma^2) - 1) \quad (17)$$

Laut Scheid [21] werden die Parameter μ und σ mit den Formeln (18) und (19) geschätzt.

$$\mu \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln x_i \quad (18)$$

$$\sigma \approx \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\ln x_i - \mu)^2} \quad (19)$$

Variationskoeffizient einer Lognormalverteilung:

$$V_{\text{Lognormal}} = \sqrt{e^{\sigma^2} - 1} \quad (20)$$

Der Modalwert einer Lognormalverteilung bestimmt die Stelle des Maximums, der Dichtefunktion.

Modalwert einer Lognormalverteilung [21]:

$$\text{Mod} = e^{(\mu - \sigma^2)} \quad (21)$$

4.2 Boxplots

Um einen ersten Überblick über die aus der Probe S500 B 16 16 gewonnenen empirischen Messdaten zu erhalten, wurden Boxplots mit MATLAB für die lokalen Geometrieparameter beider Nahtseiten erstellt. Die empirischen Daten der lokalen Geometrieparameter wurden wie in Abschnitt 2 beschrieben erzeugt. Ein Boxplot ist eine graphische Darstellungsmöglichkeit der Daten. Es wird ein rechteckiger Kasten, auch Box genannt, dargestellt. Die obere Grenze markiert die Werte, bei denen 75 % der Daten kleiner oder gleich diesem Wert sind, dieser wird als das dritte Quartil bezeichnet. Das erste Quartil ist der Wert bei dem 25 % der Daten kleiner oder gleich diesem Wert sind, welcher von der unteren Grenze der Box gekennzeichnet wird. Dieser Bereich wird als Interquartilabstand, abgekürzt mit IQR bezeichnet und enthält die mittleren 50% der empirischen Daten. Zusätzlich wird der Median mit einem Balken in der Box dargestellt. Die Whisker eines Boxplots markieren die maximalen Grenzen der Daten, diese können sich von den Grenzen der Box in einem Abstand vom bis zum 1,5-Fachen des IQR befinden. Alle Werte, die sich darüber oder darunter befinden, sind Ausreißer. Befinden sich keine Ausreißer in den Daten, wird der Maximalwert bzw. Minimalwert durch die Whisker gekennzeichnet. Der Vorteil von Boxplots ist der anschauliche Überblick über die Streuung der Daten. Sind beispielsweise die Daten asymmetrisch, können die Whisker unterschiedlich lang sein und der Median befindet sich nicht in der Mitte der Box. Ein solcher Boxplot ist in Abbildung 10 dargestellt [20, 23, 24].

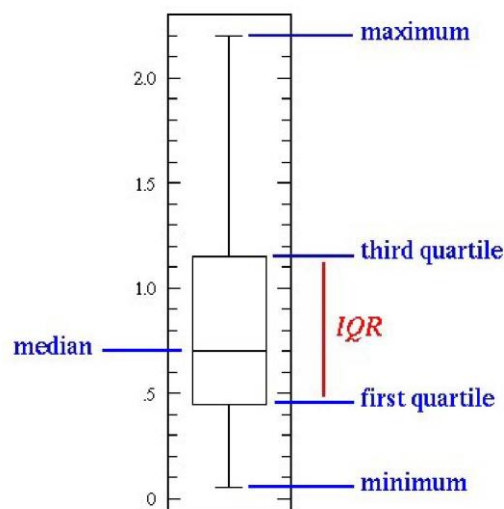


Abbildung 10: Boxplot Beispiel [23]

4.3 Histogramm

Eine weitere graphische Veranschaulichungsmöglichkeit sind Histogramme. Diese stellen die Häufigkeitsverteilung der empirischen Daten dar. In dieser Arbeit werden Histogramme für das Fitten der Normalverteilungen und Lognormalverteilungen an die empirischen Messdaten der lokalen Geometrieparameter genutzt. Zusätzlich dient es einem ersten visuellen Vergleich der gefitteten Verteilungen hinsichtlich ihrer Übereinstimmung mit den Verteilungen der empirischen Messdaten.

4.4 Konvergenz

Das Messen der lokalen Geometrieparameter einer Schweißnaht erfolgt durch Schnittgenerierung über die Nahtlänge einer Probe und anschließendem Anwenden der Messverfahren, wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben. Theoretisch müsste für die Messung aller lokalen Geometrieparameter an jedem Punkt über die Nahtlänge der Abstand zwischen den Schnitten infinitesimal klein sein, also müssten unendlich viele Schnitte generiert werden. Praktisch ist das unmöglich und je mehr Schnitte generiert werden, desto größer wird die Laufzeit. Das kann bei einer großen Menge an Proben zu einem immensen Aufwand führen. Um das Ziel einer effizienteren Messung zu erreichen, gilt es zu prüfen, ob die Messdaten ab einer bestimmten Schnittanzahl konvergieren. Sodass die Messdaten ab der konvergierenden Schnittanzahl repräsentativ für alle möglichen Schnittanzahlen darüber hinaus sind.

Die von Heller [25] übernommene folgende Bedingung zur Konvergenz der Messdaten, bei ausreichend großer Schnittanzahl n sind zu überprüfen.

1. Arithmetischer Mittelwert $\bar{x} \approx$ Erwartungswert $E(X)$
2. relative Häufigkeit des Eintretens eines Ereignisses \approx Wahrscheinlichkeit des Ereignisses
3. empirische Verteilung \approx theoretische Verteilung

Bei einer Schnittanzahl n gegen unendlich läuft der arithmetische Mittelwert \bar{x} der empirischen Daten gegen den Erwartungswert der empirischen Messdaten. Der Erwartungswert von empirischen Verteilungen ist unbekannt. Zur Überprüfung der ersten Bedingung muss eine Annahme getroffen werden. Es wird folgende Annahme für den Erwartungswert getroffen:

Der Erwartungswert $E(X)$ der empirischen Messdaten wird gleich dem arithmetischen Mittelwert \bar{x} der maximalen untersuchten Schnittanzahl gesetzt. Die maximale untersuchte Schnittanzahl ist $n_{\max} = 400$. Je nach gemessenem lokalen Geometrieparameter und ausgewähltem Messverfahren nimmt der Erwartungswert $E(X)$ unterschiedliche Werte an.

Eine relative Abweichung des arithmetischen Mittelwerts \bar{x}_i vom Erwartungswert $E(X)$ in Höhe von maximal 1% wird als Konvergenzkriterium angenommen, siehe (22) und (23). Dabei ist $i = \{10, 50, 100, 150, 200, 300, \dots\}$ ein laufender Index, der die Schnittzahlen repräsentiert, bis auf n_{\max} , da der arithmetische Mittelwert bei der maximalen Schnittanzahl, wie erwähnt, als Erwartungswert angenommen wird.

Die oben aufgeführte zweite Bedingung wurde in dieser Arbeit nicht untersucht, da die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses für stetige empirische Messdaten unbekannt ist.

Unter dem dritten Punkt ist zu verstehen: Geht die Schnittanzahl n gegen unendlich, läuft die empirische Verteilung gegen eine theoretische Verteilung. Diese Bedingung wurde mit der Lilliefors-Modifikation des Kolmogoroff-Smirnoff-Tests überprüft.

Relative Abweichung:

$$\frac{\Delta x_i}{E(X)} = \frac{|\bar{x}_i - E(X)|}{E(X)} \quad (22)$$

Konvergenzkriterium:

$$\frac{\Delta x_i}{E(X)} = \frac{|\bar{x}_i - E(X)|}{E(X)} \leq 0,01 \quad (23)$$

Mit:

\bar{x}_i : Arithmetischer Mittelwert von Messdaten einer Schnittanzahl i

$E(X)$: Erwartungswert einer Wahrscheinlichkeitsverteilung

4.4.1 Lilliefors-Test

Der Einstichprobentest Kolmogoroff-Smirnoff-Test oder K-S-Test ist ein Anpassungstest. Der K-S-Test überprüft, ob für eine empirische Verteilungsfunktion eine ausgewählte theoretische Verteilungsfunktion mit bekannten Parametern geeignet ist. Hierzu werden folgende Hypothesen überprüft, die von den Sachs und Hedderich [17] übernommen wurden:

$H(0)$ =Nullhypothese=empirische Daten folgen ausgewählte theoretische Verteilung

$H(1)$ = empirische Daten folgen ausgewählte theoretische Verteilung nicht

Der K-S-Test bestimmt die Teststatistik anhand eines zu wählenden Signifikanzniveaus α . Die Teststatistik wird als die maximale Differenz zwischen empirischer Verteilungsfunktion und gewählter theoretischer Verteilungsfunktion definiert, siehe Formel (24). Die Definition wurde aus [26] übernommen. Der K-S-Test kann nur für stetige Verteilungsfunktionen verwendet werden, wie Sachs und Hedderich [17] beschreiben. Die Lilliefors-Modifikation des K-S-Tests, auch Lilliefors-Test genannt, ist ein zweiseitiger Anpassungstest und überprüft die gleichen Hypothesen wie der K-S-Test, jedoch für ausgewählte theoretische Verteilungen. Deren Parameter, Erwartungswert und Varianz nicht bekannt sind. Diese Parameter werden aus den empirischen Daten geschätzt. Verglichen zum K-S-Test ist der Lilliefors-Test für unspezifische theoretische Verteilungen exakter bei der Bestimmung des kritischen Wertes $critval$. Ist die durch den Lilliefors-Test bestimmte Teststatistik $kstat$ größer als der vom Signifikanzniveau α abhängige kritische Wert $critval$, wird die Nullhypothese verworfen. Standardmäßig wird das Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$ gewählt. Der p-Wert ist ein weiterer Lilliefors-Test-Parameter, mit dem die Nullhypothese bewertet werden kann. Für eine genau Definition des p-Wertes, siehe [26].

Ist der p-Wert kleiner als das Signifikanzniveau α , wird die Nullhypothese verworfen. Im Gegensatz dazu kann die Nullhypothese nicht verworfen werden, wenn der p-Wert größer als das Signifikanzniveau α ist [17, 26, 18].

Formel für die Teststatistik aus [26]:

$$k_{\text{stat}}=D^* = \max_x |\hat{F}(x) - G(x)| \quad (24)$$

Mit:

$\hat{F}(x)$: empirische Verteilungsfunktion

$G(x)$: theoretische Verteilungsfunktion mit geschätzten Parametern aus empirischen Daten

4.5 Bruchfläche

Die Proben, die in diesem Abschnitt beschrieben werden, stammen aus den Untersuchungen von Braun et al. [12, 13].

An Proben, aus denen sich die empirischen Daten ergaben, wurden nach der Ausmessung der Schweißnähte einem Schwingfestigkeitsversuch mit konstanter Lastamplitude bis zum Ermüdungsbruch durchgeführt. Anschließend wurden die Bruchbilder erzeugt. Im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit war es nur möglich die Probe S500 1616 zu untersuchen. Andere Proben müssen in anderen wissenschaftlichen Arbeiten untersucht werden. Der Ermüdungsbruch ist auf der rechten Seite der Probe (Abbildung 7) aufgetreten. Betrachtet man den Querschnitt der Probe, ist der Ermüdungsbruch von der unteren rechten Nahtseite ausgegangen. Deshalb wurde das Bruchbild als „S500_16_16_Bottom“ bezeichnet. Die empirischen Messdaten dieser Arbeit sind ausschließlich von der Unterseite der Probe, somit wird unter anderem die lokale Geometrie der Bruchseite untersucht [12, 13].

Wie Zerbst et al. [9] beschreiben, wird Rissinitiierung als der Bereich, wo Risse erstmalig durch irreversible plastische Verformung entstehen, definiert. Wird die Grenzspannung zur Rissausbreitung überschritten, wachsen diese Risse an, bis es zum endgültigen Ermüdungsbruch kommt. Hierbei spielt der Zusammenschluss mehrerer kleiner Risse zu einem ermüdungsbruchrelevanten Riss eine große Rolle. Vor der Rissinitiierung existieren Mikrorisse („microcracks“) im Material, die sich ausbreiten, bis sie zu kurzen Rissen („short cracks“) und später zu langen Rissen („long cracks“) anwachsen, ausgehend von der Überschreitung der Grenzspannung zur Rissausbreitung. Der Einfluss der lokalen Geometrie auf den Spannungskonzentrationsfaktor ist bekannt. Aus diesem Grund wird die Probenbruchseite auf einen Zusammenhang zwischen Rissinitiierungsstellen und lokalen Geometrieparametern untersucht [9].

Das folgende Vorgehen ist angewandt worden:

Das Bruchbild „S500_16_16_Bottom“ wurde auf Risse untersucht und Markierungen wurden an erkennbaren Rissstellen gesetzt. Es wurden 23 Rissstellen markiert. Laut Radaj und Vormwald [27] sind Indikatoren für Risse, Schatten (Verbindungsstufen) auf dem Bruchbild, die das Zusammenwachsen von zwei Rissen andeuten, somit befindet sich rechts und links neben dem länglichen Schatten jeweils ein Riss. Zusätzlich sind helle, halbkreisförmige Umrisse um einen Punkt mögliche Anzeichen für einen Riss. Rissstellen wurden mit violetten Punkten in der Abbildung 11 gekennzeichnet. Die Schatten wurden mit roten Punkten markiert [27].

Zur Bestimmung der Risspositionen an der tatsächlichen Probe ist zuerst der Maßstab errechnet worden. Hierzu wurde die bekannte Probenlänge und die mit dem Bildbearbeitungsprogramm GIMP 2.10.22 gemessene Abbildungslänge in die Formel (25) eingesetzt. Die Ränder der Proben werden vom Laserscanner vernachlässigt, das könnte eine mögliche Fehlerquelle bei der Positionsbestimmung der Risse sein. Somit wurde die Schweißnaht der Probe nur über eine Länge von 36,72 mm gemessen. Ausgehend von der Mitte wurden die Ränder des Scans in das Bruchbild übertragen, siehe Abbildung 12. Entsprechend den Messdaten entspricht die Bezeichnung „rechtes Ende“ die $z_{pos} = 0 \text{ mm}$ und „linkes Ende“ die $z_{pos} = 36,72 \text{ mm}$. Anschließend wurden die Risse in diesem Bereich markiert und die Abstände zur $z_{pos} = 0 \text{ mm}$ gemessen. Die gemessenen Abstände aus dem Bruchbild wurden mithilfe des Maßstabs anschließend in die tatsächliche Probenposition umgewandelt. Nun konnten die tatsächliche Rissstellen in MATLAB ausgewertet werden.

Formel zur Bestimmung des Maßstabs:

$$\text{Maßstab} = \frac{\text{Probenlänge}}{\text{Abbildungslänge}} \quad (25)$$

Mit:

Abbildungslänge = 310,72 mm

Probenlänge = 42,8 mm

Eine genaue Bestimmung der lokalen Geometrieparameter der aus der Datei „S500_16_16_Bottom.asc“ ausgewerteten Punktwolken der gekennzeichneten Rissstellen ist nicht möglich, da sich ein Riss zwischen zwei Schnitten befinden kann. Um diese Toleranz zu verkleinern wurde die maximale Schnittanzahl $n_{\max} = 400$ für die Bestimmung der Rissgeometrieparameter genutzt. Die Schnitte über die Nahtlänge befinden sich in einem Abstand von 0,08 mm. Befindet sich ein Riss zwischen zwei Schnitten, wurde der Schnitt mit einem Abstand von $\leq 0,04 \text{ mm}$ von der tatsächlichen Rissstelle für die Bestimmung der lokalen Geometrieparameter gewählt. Sollte eine tatsächliche Rissstelle genau in der Mitte zwischen zwei Schnitten liegen, werden die lokalen Geometrieparameter beider Schnitte gewählt.

Im nächsten Schritt wurden die lokalen Geometrieparameter über die Probenlänge geplottet und die ausgewählten Rissparameter gekennzeichnet, siehe Abbildung 20.

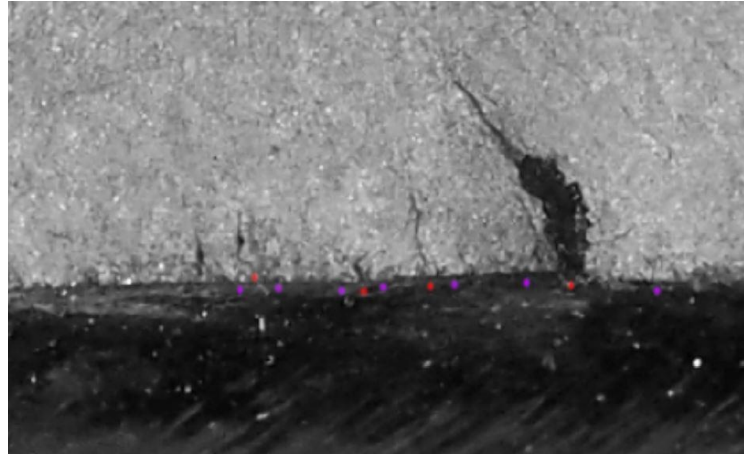


Abbildung 11: Risstellen Markierungen

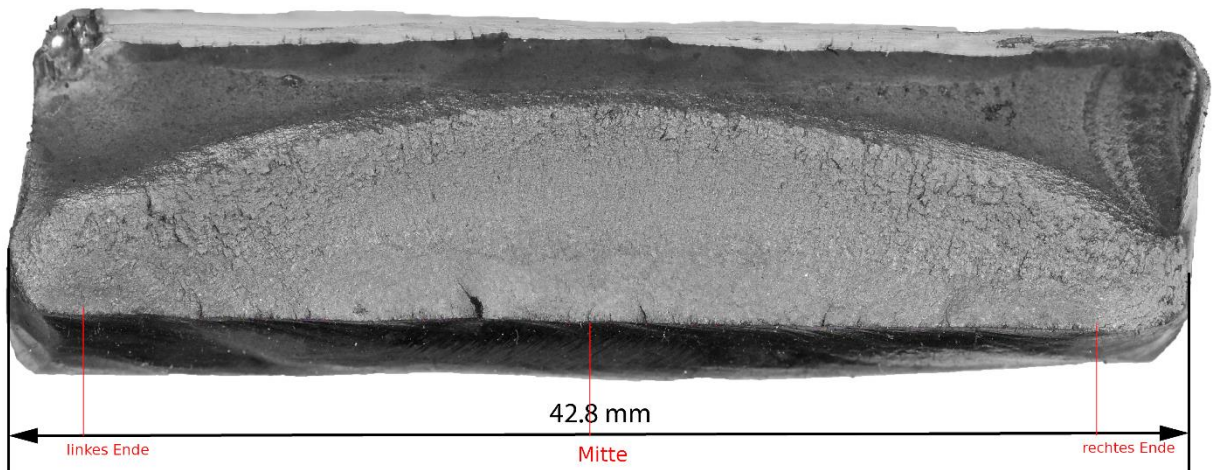


Abbildung 12: S500 16 16 Gescannte Länge (rot) und Probenlänge (schwarz)

5 Ergebnisse und Auswertung

5.1 Vergleich der Messwerte aus Mittelwertverfahren, Tangenten- und Curvature-Methode

Das Mittelwertverfahren, die Tangenten- und Curvature-Methode sind, wie zuvor erwähnt, zur Auswertung der Punktwolken verwendet worden, um die lokalen Geometrieparameter zu bestimmen. Im Folgenden werden die einzelnen Verfahren miteinander verglichen und es wird untersucht, ob diese verschiedene Werte für die lokalen Geometrieparameter an den generierten Schnitten liefern. Hierzu wurde die maximale Schnittanzahl n_{\max} verwendet, sodass Rückschlüsse auf Schnittanzahlen unter n_{\max} getroffen werden können. Zuerst wurden die empirischen Messdaten der einzelnen lokalen Geometrieparameter für die rechte und linke Seite der Probennaht mit den drei verschiedenen Methoden erzeugt. Anschließend wurde die relative Abweichung des Mittelwertverfahrens, welches im Folgenden auch als Standard-Methode bezeichnet wird, zur Tangenten-Methode bestimmt, siehe Formel (26). Die relative Abweichung der Messwerte über alle Schnitte bei einer Schnittanzahl von $n = 400$ von Standard- zur Tangenten-Methode ist in Abbildung 13 als Plot dargestellt. Die relativen Abweichungen der Parametermesswerte an jedem Schnitt betragen 0 %. Es gibt somit keinen Unterschied zwischen der Auswertung der Punktwolken mit der Standard- oder Tangenten-Methode für die rechten lokalen Geometrieparameter. Dasselbe Verfahren für den Vergleich der ausgewerteten Messwerte mit der Standard- und Tangenten-Methode wurde auch für die linken lokalen Geometrieparameter angewendet, siehe Abbildung 22. Für die Messwerte der linken Parameter zeigt der Vergleich auch keine relativen Abweichungen an den jeweiligen Schnitten an. Im Plot der beiden Parameter rechter und linker Undercut sind Lücken vorhanden. Die Lücken entstanden an Undercut-Messwerten von 0 mm. Da der Bruch $\frac{0 \text{ mm}}{0 \text{ mm}}$ nicht berechnet werden kann, gibt MATLAB an diesen Schnitten als Ergebnis „not a number“ (NaN) aus. Hierdurch entstehen die Lücken im Plot. Aus diesen Ergebnissen kann man für diese untersuchte Probe keinen Unterschied zwischen den Messwerten aus Mittelwertverfahren oder Tangenten-Methode feststellen. Die erzeugten Messdaten aus Mittelwertverfahren und Tangentenverfahren sind somit gleich. Aus diesem Grund werden im weiteren Verlauf der Arbeit die Messdaten aus der Standard-Methode und Tangenten-Methode nicht unterschieden. Die relativen Abweichungen der Messwerte von der Curvature-Methode zu denen der Tangenten-Methode sind in den Abbildung 14 und Abbildung 23 dargestellt. Abgesehen von den Undercuts weichen die Messresultate der Curvature-Methode von denen der Tangenten-Methode ab. Es gibt keinen erheblichen Unterschied der relativen Abweichungen von den rechten zu den linken Messdaten. Die Abweichungen der

jeweiligen linken und rechten Parameter liegen mit geringer Toleranz im gleichen Bereich, wobei die rechten Parameter geringere relative Abweichungen zu den Messdaten aus der Tangenten-Methode aufweisen. Das könnte auf eine weichere und regelmäßigere linke Geometrie deuten und somit einer besseren Bestimmung der rechten lokalen Geometrieparameter mit der Curvaturmethode als die linken lokalen Geometrieparameter. Gerade die relative Abweichung der Radien von bis zu 80 % könnte ein Indiz für eine ungenaue Bestimmung des Nahtübergangs sein und somit die Messung sehr großer Radien erklären.

Relative Abweichung des Messwerts zwischen Standard- und Tangenten-Methode an dem Schnitt i :

$$\text{rel. Abweichung}_i = \left| \frac{S_i - T_i}{T_i} \right| \quad (26)$$

Mit

$i = \{1, 2, \dots, n_{\max}\}$ = Laufender Index für Schnitt

$n_{\max} = 400$ = Maximale Schnittanzahl

S_i = Messwert am Schnitt i aus Standard-Methode

T_i = Messwert am Schnitt i aus Tangenten-Methode

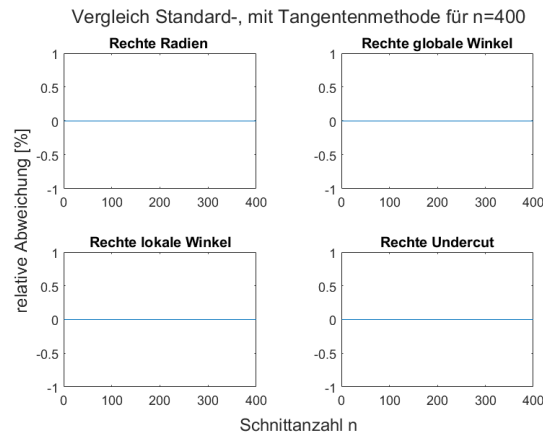


Abbildung 13: Vergleich der rechten lokalen Geometrieparameter Messwerte aus Mittelwert- und Tangentenverfahren

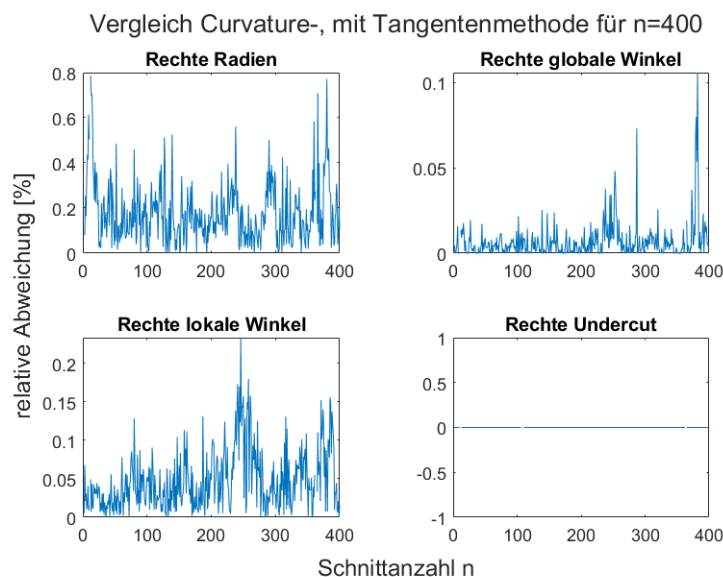


Abbildung 14: Vergleich der rechten lokalen Geometrieparameter Messwerte aus Curvature- und Tangentenverfahren

5.2 Überblick der Wertebereiche mit Boxplots

Wie in Abschnitt 3 erwähnt, erfordert die Erzeugung von Schnitten und ihre Auswertung für viele Proben einen erheblichen Aufwand. Um diesen Prozess effizient zu gestalten, ist es notwendig zu überprüfen, ab welcher Schnittanzahl die Messdaten konvergieren. Einen ersten visuellen Überblick sollen die Boxplots der lokalen Geometrien liefern. Hierzu wurden die Boxplots aller lokalen Geometrieparameter mit den drei Messverfahren für die Schnittanzahlen $n = \{10, 50, 100, 150, 200, 300, 400\}$ erzeugt. Zudem wurde der Wertebereich der rechten und linken Parameter miteinander verglichen, genauso wie die Ergebnisse der unterschiedlichen Messmethoden. In Abbildung 15 und Abbildung 16 sind die Boxplots der lokalen Geometrieparameter, die mit der Standard-Methode erzeugt wurden, zu sehen. Im Anhang sind Boxplots der mit den anderen Methoden erzeugten empirischen Messdaten zu finden.

5.2.1 Boxplots aus Standard- und Tangenten-Methode

Im Allgemeinen zeigt sich bei den Messwerten aus der Standard-Methode eine Annäherung an einen bestimmten Wertebereich der jeweiligen Parameter. Der Wertebereich wird durch die Whisker und Quartile eingegrenzt. Dieses Verhalten ist bei den linken Parametern ab einer Schnittanzahl n von 100 zu erkennen, außer bei den linken lokalen Winkel, dort wird es ab einer Schnittanzahl n von 150 beobachtet. Bei den rechten Parametern ist dieses Verhalten ab $n = 100$ zu sehen.

Trotz der Annäherung an bestimmte Wertebereiche für Schnittanzahlen ab 100 bzw. 150 werden nur bei den linken lokalen Winkeln, bei Schnittanzahlen von $n = 300$ und $n = 400$

identische Boxplots beobachtet. Die Mediane und Whisker ändern sich entweder nicht oder minimal bei steigender Schnittanzahl, im Gegensatz dazu werden mehr Ausreißer gemessen. Aufgrund der minimalen Änderungen des Interquartilabstands und der Whisker deutet die visuelle Auswertung der Boxplots auf die Konvergenz der Daten ab einer Schnittanzahl von 150. Mithilfe der Konvergenzbedingungen ist die Gültigkeit dieser visuell erbrachten Ergebnisses zu prüfen.

5.2.2 Boxplots aus Curvature-Methode

Die Verteilung der Messdaten der einzelnen Geometrieparameter, erzeugt durch die Curvature-Methode, nähert sich ab einer Schnittanzahl $n = 100$ einem bestimmten Wertebereich an. Deutlich wird das durch die Mediane und Whisker, bei welchen wie bei der Standard-Methode keine oder minimale Änderungen auftreten. Die rechten Messwerte, gemessen mit der Curvature Methode, enthalten mehr Ausreißer als die linken Messwerte. Vernachlässigt man die Ausreißer, befinden sich bei der Curvature-Methode die Messwerte der linken Parameter, abgesehen vom Flankenwinkel, in einem höheren Wertebereich als die rechten Parametermesswerte.

Besonders auffällig bei der Curvature-Methode sind die Messwerte der Radien verglichen zu der Standard-Methode. Es werden größere Werte für die linken und rechten Radien gemessen und die Messwerte verteilen sich auf einen größeren Wertebereich. Beide Messmethode zeigen kleinere Wertebereiche für die rechten Radien als für die linken Radien. Das gilt auch für die lokalen Winkel. Zusätzlich bestimmt die Curvature-Methode für die rechten Radien mehr Ausreißer nach oben als die Standard-Methode.

Für beide Messmethoden gilt folgendes:

Die Messwerte der linken Radien und linken Undercuts haben eine größere Streuung als die rechten Radien und rechten Undercuts. Auffällig sind bei den linken Undercut-Messwerten die Ausreißer mit Werten von bis zu 0,7 mm. Verglichen dazu befindet sich der maximale Wert vom rechten Undercut unter 0,3 mm. Des Weiteren liegen die Messwerte der linken Radien und linken Undercuts in einem höheren Wertebereich als die rechten Radien und rechten Undercuts. Außerdem werden größere Werte für die rechten Flankenwinkel und mehr Ausreißer bei den rechten lokalen Winkeln gemessen. Diese Messwerte stimmen mit den kritischen Werten der Geometrieparameter aus der Literatur, bezogen auf den negativen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit einer Schweißnaht, überein, siehe Schork et al. [2]. Auf der Bruchseite der Probe werden somit kleinere Radien, größere Flankenwinkel und schmalere Undercuts gemessen, verglichen zu der linken Schweißnahtseite. Diese Parameterkombinationen haben, wie Schork et al. [2] erwähnt, einen verringernden Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit einer Schweißnaht und somit auf ihre Lebensdauer. Die Verteilungen der linken Undercut-Messwerte befinden sich in einem größeren Wertebereich und sollten laut Schork et al. [2] der einflussreichste lokale Geometrieparameter auf die Ermüdungsfestigkeit der Schweißnaht sein. So ein Ergebnis wäre auf der Bruchseite, also der rechten Seite zu erwarten. Ein möglicher Grund, warum der Ermüdungsbruch nicht an der

linken Nahtseite entstanden ist, könnte an den größeren linken lokalen Winkeln liegen, die den Einfluss der Undercuts verringern [2].

Die visuell erkennbare größere Streuung der linken Radien und linken Undercut-Messwerte verglichen zu den rechten Radien und rechten Undercuts stellen eine unregelmäßigeren Nahtübergang entlang der linken Schweißnaht als auf der rechten Schweißnaht dar. Das bestärkt die Vermutung aus Abschnitt 5.1, warum die relative Abweichung der linken Curvature-Messdaten größer ist als bei den rechten Curvature-Messdaten, zu denen der Tangenten-Methode sind. Diese Beobachtung könnte in einer anderen wissenschaftlichen Arbeit detaillierter untersucht werden.

Bei beiden Messverfahren ist visuell eine Konvergenz ab einer Schnittanzahl von 100 zu erkennen. Werden die Ausreißer jedoch mitbetrachtet, ist die Konvergenz ab einer Schnittanzahl von 200 zu erkennen. Da die Ausreißer kritische Geometriewerte widerspiegeln könnten, sind diese für die Bewertung der Schweißnaht relevant. Bei beiden Messmethode steigt die Ausreißeranzahl mit steigender Schnittanzahl. Wie erwähnt, wird diese Beobachtung anhand der Konvergenzkriterien im folgenden Verlauf der Arbeit untersucht.

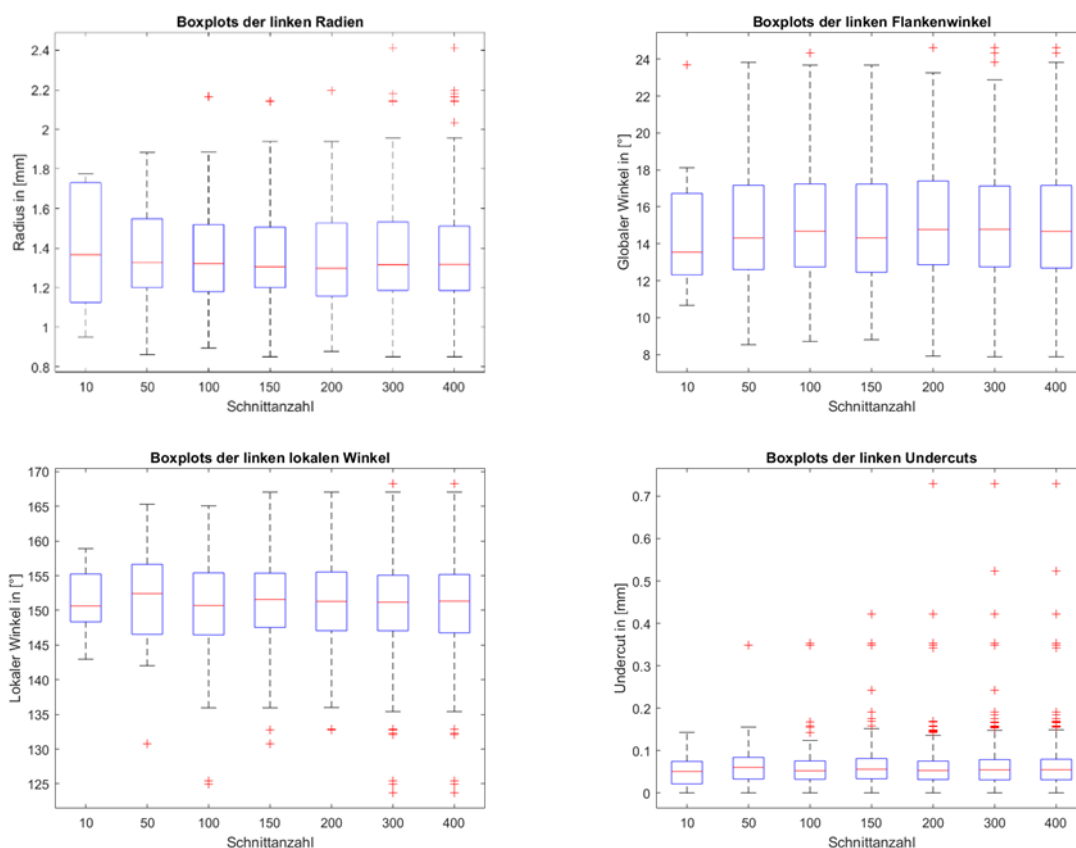


Abbildung 15: Boxplots der linken Geometrieparameter, ausgewertet mit dem Mittelwertverfahren (Standard-Methode)

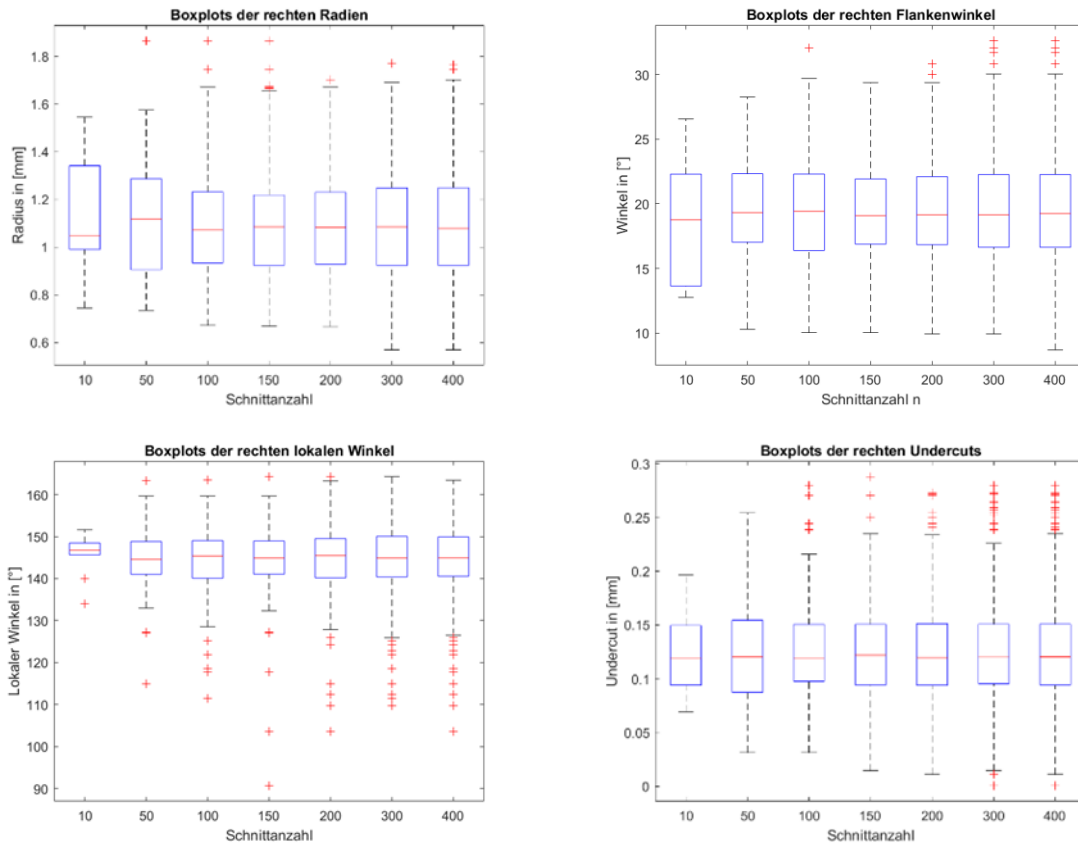


Abbildung 16: Boxplots der rechten Geometrieparameter, ausgewertet mit dem Mittelwertverfahren (Standard-Methode)

5.3 Konvergenzkriterium: Annäherung an Erwartungswert

Die angedeutete Konvergenz aus den Untersuchungen der Boxplots werden in diesem Abschnitt mit den Konvergenzbedingungen aus Abschnitt 4.4 geprüft. Der arithmetische Mittelwert läuft bei Konvergenz der Messdaten gegen den Erwartungswert einer Verteilung für große Stichprobengrößen, siehe Heller [25]. Die empirischen Messdaten der lokalen Geometrieparameter werden auf das Konvergieren gegen eine Normal- und Lognormalverteilung untersucht. Hierzu wird der Erwartungswert als der arithmetische Mittelwert der empirischen Messdaten bei $n_{\max} = 400$ für das Konvergieren gegen eine Normalverteilung gewählt, siehe die Formel (12) und Abschnitt 4.1.1. Zur Untersuchung auf Konvergenz der empirischen Messdaten gegen eine Lognormalverteilung wird folgende Eigenschaft, die Scheid [21] beschreibt, genutzt:

Die Zufallsvariable X folgt einer Lognormalverteilung, wenn der natürliche Logarithmus der Zufallsvariable X normalverteilt ist.

Aus diesem Grund kann dasselbe Vorgehen wie bei der Untersuchung auf das Konvergieren gegen die Normalverteilung genutzt werden. Der Erwartungswert wird als der arithmetische Mittelwert des natürlichen Logarithmus der empirischen Daten für $n_{\max} = 400$ gewählt, siehe die Formeln (27) und (28). Als Konvergenzkriterium wird eine relative Abweichung der arithmetischen Mittelwerte zum Erwartungswert von 1% als Grenze angenommen, siehe Formel (23). Die relative Abweichung wurde mit Formel (22) bestimmt. In Abbildung 17 sind die arithmetischen Mittelwertverläufe und die relativen Abweichungen für die linken Messdaten mit der Standard-Methode dargestellt. Im Anhang befinden sich die Plots der arithmetischen Mittelwertverläufe und relativen Abweichungen für die rechten Messdaten aus der Standard-Methode, genauso wie für die linken und rechten Messdaten aus der Curvature-Methode, siehe Abbildung 28, Abbildung 29, Abbildung 30.

Plots, die das Prüfen auf Konvergieren gegen eine Lognormalverteilung darstellen, sind mit (Log) gekennzeichnet.

Die Ergebnisse zeigen für beide Methoden und alle Geometrieparameter das Erfüllen des Konvergenzkriteriums aus Formel (23) ab einer Schnittanzahl von $n = 100$. Dieses Ergebnis war, wie aus dem beobachteten Verhalten der Mediane aus den Boxplots, zu erwarten, da die wenigen Ausreißer, verglichen mit den Gesamtmessdaten, wenig Einfluss auf den arithmetischen Mittelwert haben. Die relative Abweichung ist bei einer Annahme von Konvergenz gegen eine Lognormalverteilung für die lokalen Winkel und Flankenwinkel deutlich geringer als bei einer Annahme von Konvergenz gegen eine Normalverteilung. Auffällig ist die Ähnlichkeit der arithmetischen Mittelwertverläufe und der Verläufe der relativen Abweichungen für alle Geometrieparameter außer denen der Undercuts. Diese Erkenntnisse gelten für die Standard-, Tangenten- und Curvature-Methode.

Arithmetischer Mittelwert des natürlichen Logarithmus der empirischen Daten für Schnittanzahlen $i = \{10, 50, 100, 150, 200, 300, 400\}$:

$$\overline{x}_{\log} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (27)$$

Angenommener Erwartungswert für eine Lognormalverteilung der empirischen Daten mit $n_{\max} = 400$:

$$E(X)_{\log\max} = \overline{x}_{\log\max} = \frac{1}{n_{\max}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{\max}} \ln(x_i) \quad (28)$$

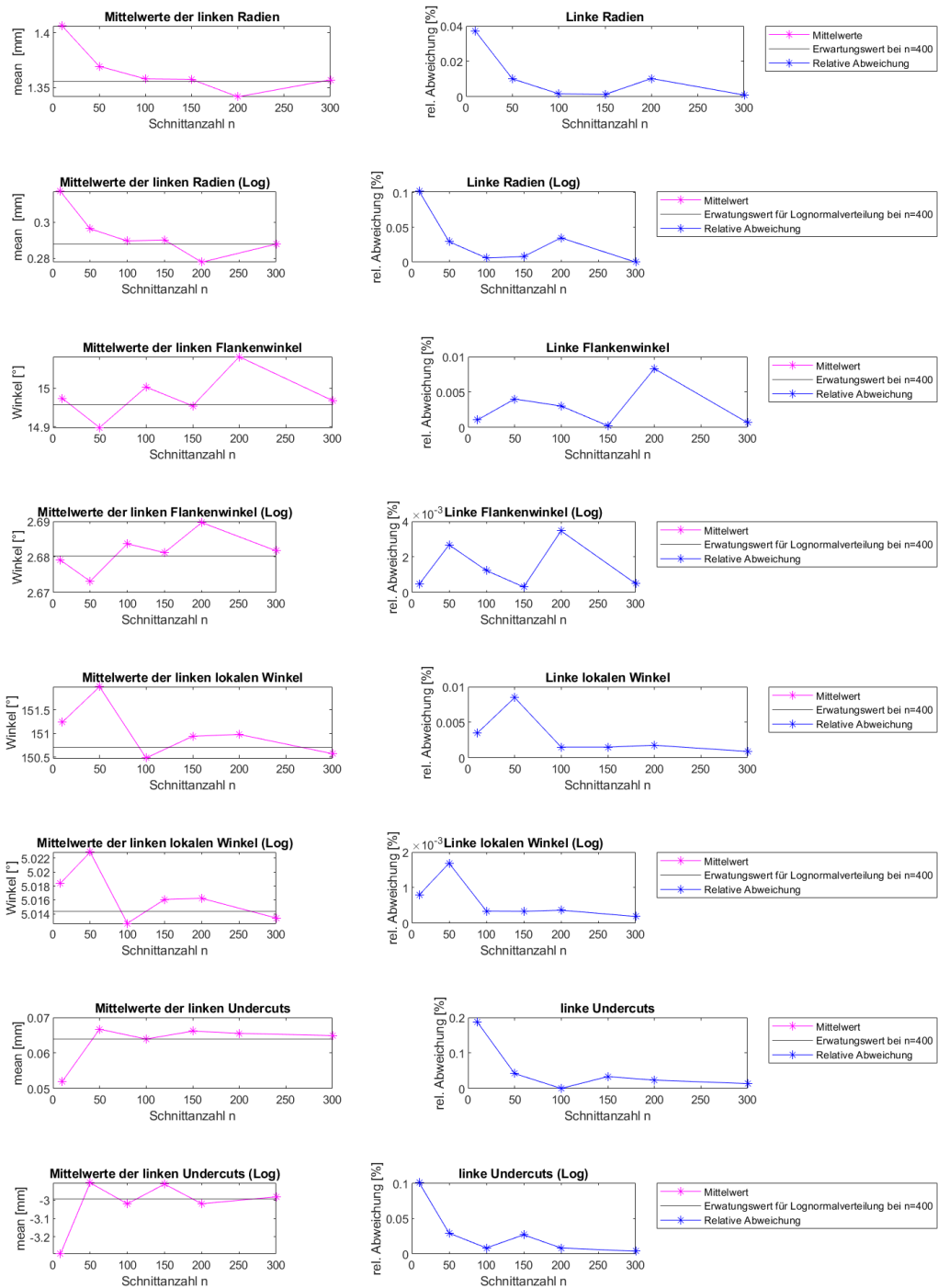


Abbildung 17: Plots der arithmetischen Mittelwertverläufe und relative Abweichungen der linken Geometrieparameter für Normal-, Lognormalverteilung (Standard-Methode)

5.4 Lilliefors-Testergebnisse

Die Ergebnisse der Lilliefors-Tests für das Überprüfen auf das Folgen einer Normal-, Lognormal-, Extremwert- und Weibullverteilung der empirischen Messdaten mit einem Signifikanzniveau von 5% befinden sich in den in diesem Abschnitt enthaltenen Tabellen sowie im Anhang. Auf die Testergebnisse zu den Extremwert- und Weibullverteilungen wird nicht weiter eingegangen. Der Anpassungstest wurde für alle Schnittanzahlen, alle Messverfahren und jeden lokalen Geometrieparameter durchgeführt. Für die Messdaten der linken Radien wird die Nullhypothese für das Folgen einer Lognormalverteilung aus Abschnitt 4.4.1 nicht verworfen. Somit kann von einer Lognormalverteilung der empirischen Messdaten der linken Radien ausgegangen werden. Für die rechten Radien gilt dasselbe, wobei bei der Curvature-Methode und der Schnittanzahl von $n = 400$ der Test abgelehnt wurde. Das ist ein unerwartetes Ergebnis, da die Boxplots und das erste Konvergenzkriterium auf Konvergenz gedeutet haben und alle Testergebnisse unter der Schnittanzahl $n = 400$ auf das Folgen gegen eine Lognormalverteilung gedeutet haben.

Wie aus Schork et al. [5] bekannte Folgen einer Normal- oder Lognormalverteilung der lokalen Geometrieparametermessdaten wird in den Testergebnissen nur von den Messdaten der Radien widergespiegelt. Abhängig davon, welches Messverfahren genutzt wurde, ob Standard-, Tangenten- oder Curvature-Methode, können unterschiedliche Ergebnisse zu den Verteilungen der Parameter globaler Winkel und lokaler Winkel beobachtet werden. Wurde die Standard- und Tangenten-Methode für die Messung der rechten globalen Winkel angewendet, konnten die Normal- und Lognormalverteilungen nicht verworfen werden. Bei der Anwendung der Curvature-Methode wurden die Nullhypothesen für beide Verteilungen ab der Schnittanzahl $n = 200$ verworfen. Im Gegensatz dazu wurden für die Messdaten der linken globalen Winkel, ausgewertet mit der Curvature-Methode, die Nullhypothesen der Normal- und Lognormalverteilung nicht verworfen, jedoch werden diese bei der Standard- und Tangenten-Methode für Schnittanzahlen $n = 150$ und 400 verworfen.

Für die gemessenen lokalen Winkel und Undercuts kann keine Verteilung zugeordnet werden. Die Nullhypothesen der Tests für die rechten lokalen und linken Undercuts werden mit wenigen Ausnahmen vollständig verworfen. Ab den Schnittanzahlen von $n = 200$ bzw. $n = 300$ wurden die Nullhypothesen der Tests für die Parameter rechter Undercut und linker lokaler Winkel vollständig verworfen.

Das Messen von mehr Ausreißern bei höheren Schnittanzahlen könnte im Zusammenhang mit dem Verwerfen der Nullhypothesen bei hohen Schnittanzahlen stehen, da der Lilliefors-Test die Teststatistik mit dem kritischen Wert bei einem bestimmten Signifikanzniveau vergleicht und anhand dessen die Nullhypothese verwirft oder nicht verworfen kann. Dabei ist die Teststatistik der maximale Differenzwert zwischen empirischer Verteilung und einer theoretischen Verteilung, siehe Formel (24). Das würde die Testergebnisse der Geometrieparameter rechter lokaler Winkel und linker Undercut nicht erklären, da die Nullhypothesen auch bei niedrigen Schnittanzahlen verworfen wurden [26].

Das Signifikanzniveau, auch Irrtumswahrscheinlichkeit genannt, beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der die Nullhypothese fälschlicherweise verworfen werden kann. Das wird auch

als Fehler erster Art bezeichnet, siehe Sachs und Hedderich [17] für eine genaue Definition. Um diese Wahrscheinlichkeit zu verringern, wurde der Lilliefors-Test mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 1\%$ für den linken Undercut durchgeführt. Hierdurch wird der Ablehnungsbereich der Nullhypothese verringert, also der kritische Wert, ab dem die Nullhypothese verworfen wird, erhöht. Die Verringerung des Ablehnungsbereiches hat zu keiner Veränderung an den Lilliefors- Testergebnissen geführt, siehe Tabelle 12 und Tabelle 13. Somit wurde der Fehler 1. Art als Fehlerquelle ausgeschlossen [17].

Die Lilliefors-Testergebnisse ergeben nicht das erwartete Verteilungsverhalten der lokalen Geometrieparameter, welches von Schork et al. [5] beschrieben wurden, wieder. In Tabelle 14 sind die kritischen Werte $critval$ und Teststatistiken $kstat$ der Lilliefors-Testergebnisse für die linken Undercut-Daten mit den Signifikanzniveaus $\alpha = 5\%$ und 1% aufgelistet. Bei steigender Schnittanzahl ab $n = 50$ für den Lilliefors-Test einer Normalverteilung und ab $n = 100$ für den Lilliefors-Test einer Lognormalverteilung ist die Teststatistik größer als der kritische Wert.

Tabelle 9: Hypothesentestergebnisse für Parameter: Linker Radius

		Auswertungsmethode											
		Standard				Tangente				Curvature			
Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$	Schnittanzahl	Normal h	Lognormal h	extremwert	weibull h	Normal h	Lognormal h	extremwert	weibull h	Normal h	Lognormal h	extremwert	weibull h
	n=10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	n=50	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
	n=100	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
	n=150	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1
	n=200	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1
	n=300	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1
	n=400	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1

Tabelle 10: Hypothesentestergebnisse für Parameter: Linker globaler Winkel

		Auswertungsmethode											
		Standard				Tangente				Curvature			
Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$	Schnittanzahl	Normal h	Lognormal h	extremwert	weibull h	Normal h	Lognormal h	extremwert	weibull h	Normal h	Lognormal h	extremwert	weibull h
	n=10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	n=50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	n=100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	n=150	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
	n=200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	n=300	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1
	n=400	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1

Tabelle 13: Hypothesentestergebnisse für Parameter: Linker Undercut mit Signifikanzniveau von 1%

Hypothesentest: Lilliefors Test für Probe S500_B_16_16_Bottom_linker_undercut		Auswertungsmethode	
Signifikanzniveau $\alpha = 1\%$		Standard	
Schnittanzahl	Normal h	Lognormal h	
n=10	0	0	0
n=50	1	0	0
n=100	1	1	1
n=150	1	1	1
n=200	1	1	1
n=300	1	1	1
n=400	1	1	1

Tabelle 14: Teststatistik (kstat) und Kritischer Wert (critval) der Anpassungstests für linke Undercuts mit der Standard-Methode
 Teststatistik (kstat) und Kritischer Wert (critval) der Anpassungstests für linke Undercuts mit der Standardmethode

Schnittanzahl n	Test auf Normalverteilung		Test auf Lognormalverteilung	
	Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$ kstat	Signifikanzniveau $\alpha = 1\%$ kstat	Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$ critval	Signifikanzniveau $\alpha = 1\%$ kstat
10	0,2759	0,1919	0,3127	0,1919
50	0,1272	0,176	0,1489	0,176
100	0,0928	0,2068	0,1049	0,2068
150	0,0762	0,1864	0,0894	0,1864
200	0,0647	0,2198	0,076	0,2198
300	0,0536	0,2036	0,062	0,2036
400	0,047	0,1814	0,0502	0,1814

5.5 Empirische Verteilung der Messdaten

Zur visuellen Untersuchung der empirischen Messdatenverteilung der einzelnen Geometrieparameter wurde das Verhalten bei steigender Schnittanzahl mit an den empirischen Messdaten angepassten Normal- und Lognormalverteilungen verglichen. Die Dichtefunktionen der Normal- und Lognormalverteilungen wurden mithilfe von MATLAB für jede Schnittanzahl über Histogramme der empirischen Messdaten gefittet. Anschließend wurden die Verteilungsfunktionen der erzeugten Normal- und Lognormalverteilungen zusammen mit den empirischen Verteilungen in einem Plot geplottet. Hierbei wird die empirische Verteilungsfunktion als die kumulierte relative Häufigkeit dargestellt, wie Sachs und Hedderich [17] beschreiben. Es wurden folgende Ergebnisse festgestellt.

5.5.1 Globaler Winkel

Für die Parameter globaler Winkel und lokaler Winkel, unabhängig davon, welche Nahtseite untersucht wurde, wurden vernachlässigbare Unterschiede zwischen der erzeugten Normal- und Lognormalverteilung festgestellt. Der Vergleich vom arithmetischen Mittelwert der Normalverteilung und dem Modalwert der Lognormalverteilung und der Vergleich der Variationskoeffizienten beider Verteilungen, welche die Streuung darstellen, haben zu diesem Ergebnis geführt, siehe Tabelle 15. Zusätzlich ist diese Erkenntnis aus den Plots der jeweiligen Verteilungsfunktionen visuell zu beobachten. Das gilt für alle Messmethoden. Die empirischen Verteilungsfunktionen der linken und rechten globalen Winkelmessdaten nähern sich mit steigender Schnittanzahl den Normal- und Lognormalverteilungen an, wobei die empirischen Verteilungen der linken globalen Winkel aus der Curvature-Methode den theoretischen Verteilungen, visuell betrachtet, besser folgt als denen aus der Tangenten-Methode. Diese Beobachtung wird durch das Lilliefors-Testergebnis für die Schnittanzahl $n = 400$ aus Tabelle 10 bestätigt. Die Nullhypothese wurde für den linken globalen Winkel aus der Tangenten-Methode für die Schnittanzahl $n = 400$ verworfen. Die empirische Verteilungsfunktionen des rechten globalen Winkeln aus der Tangenten-Methode folgen die Normal- und Lognormalverteilungen, siehe Tabelle 19. Die aus der Curvature-Methode entstandenen empirischen Verteilungsfunktionen des rechten globalen Winkels, haben ab einer Schnittanzahl von 100 eine visuelle Differenz zu den Normal- und Lognormalverteilung, siehe Abbildung 38. Zusammen mit den Ergebnissen des Lilliefors-Tests wird der rechte globale Winkel ab einer Schnittanzahl von $n = 200$ mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % nicht von einer Normal- oder Lognormalverteilung repräsentiert.

5.5.2 Flankenwinkel

Aufgrund der anderen Beschreibungsart des Nahtübergangs mit dem Flankenwinkel wurde beispielhaft für die Schnittanzahl $n = 400$ der globale Winkel in den Flankenwinkel umgerechnet und die empirische Verteilungsfunktion mit den gefitteten Normal- und Lognormalverteilungsfunktionen visuell verglichen, siehe Abbildung 19, Abbildung 46, und Abbildung 47. Anders als beim globalen Winkel ist ein Unterschied zwischen der Normal- und Lognormalverteilung zu erkennen. Des Weiteren repräsentiert die Normalverteilung die Messdaten der linken Flankenwinkel aus der Curvature-Methode und die Messdaten der rechten Flankenwinkel

aus der Tangenten-Methode besser als die Lognormalverteilung. Für die Messdaten der rechten Flankenwinkel aus der Curvature-Methode und der Messdaten der linken Flankenwinkel aus der Tangenten-Methode gilt das Gegenteil. Die Relevanz dieses Unterschieds könnte in einer anderen wissenschaftlichen Arbeit untersucht werden und wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt.

5.5.3 Lokaler Winkel

Verglichen mit den globalen Winkeln werden die Nullhypothesen für die lokalen Winkel aus jeder Messmethode ab einer Schnittanzahl von 300 vollständig verworfen. Dieses Ergebnis spiegelt sich im Vergleich der empirischen und theoretischen Verteilungsfunktionen wider, siehe Abbildung 31, Abbildung 37, Abbildung 39 und Abbildung 43. Für die empirischen Verteilungsfunktionen der linken lokalen Winkel aus der Tangenten-Methode ist eine Annäherung an die theoretischen Verteilungsfunktionen zu beobachten, bei der Curvature-Methode ist dies nicht der Fall, vergleiche Abbildung 31 und Abbildung 43. Für den rechten lokalen Winkel ist eine Annäherung an die theoretischen Verteilungen unabhängig von der Messmethode zu beobachten, siehe Abbildung 37 und Abbildung 39.

Trotz der Annäherung fallen Abweichungen der empirischen Verteilungsfunktionen der lokalen Winkel von den Normal- und Lognormalverteilungsfunktionen im Bereich unterhalb der 50 % Werte der Wahrscheinlichkeiten auf, siehe Abbildung 31, Abbildung 37, Abbildung 39 und Abbildung 43.

5.5.4 Nahtübergangsradius

Die Nahtübergangsradien folgen, wie Schork et al. [5] beschreiben, einer Lognormalverteilung, wobei bei visueller Betrachtung die empirischen Verteilungen aus der Tangenten-Methode die geringere Differenz zu den Lognormalverteilungen aufweist, siehe Abbildung 32, Abbildung 35, Abbildung 40 und Abbildung 44.

5.5.5 Undercut

Die in Abschnitt 4.4.1 getroffene Vermutung eines Zusammenhangs zwischen Ausreißern und dem Verwerfen der Nullhypothesen für den Parameter Undercut, wird durch die Plots in Abbildung 33 und Abbildung 36 bestärkt. Der Vergleich der Histogramme mit Lognormal gefitteten Dichtefunktionen für den linken und rechten Undercut verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Ausreißern und der Differenz zwischen der empirischen Verteilungsfunktion und der gefitteten Lognormalverteilungsfunktion. Die gefittete Lognormaldichtefunktion aus Abbildung 33 betrachtet Ausreißer mit Werten von über 0,6 mm. Im Gegensatz dazu sind die betrachteten Ausreißer beim Fitten der Lognormalverteilung an die empirischen Messdaten des rechten Undercuts unter 0,6 mm. Hierdurch ergibt sich für den linken Undercut über alle Schnittanzahlen eine visuell größere Differenz zwischen Lognormalverteilungsfunktion und empirischer Verteilung ab einer Wahrscheinlichkeit von circa 60 %, siehe Abbildung 33 und 35. Da die Werte der Undercuts nicht kleiner null sein können und es nach unten keine Ausreißer gibt, folgt der untere Bereich der empirischen Verteilungen die Lognormalverteilung bis zu einer Wahrscheinlichkeit von 60 %, außer für den rechten Undercut ab einer Schnittanzahl von $n = 200$, siehe Abbildung 33 und Abbildung 36.

Der Variationskoeffizient zeigt eine durchschnittliche Streuung von 111 % bei der Auswertung mit der Tangenten-Methode für den linken Undercut. Der Vergleich zwischen den empirischen Daten des rechten Undercuts und linken Undercuts zeigt einen deutlich geringeren Variationskoeffizienten, also geringere durchschnittliche Streuung, für den rechten Undercut bei einer Schnittanzahl von $n = 400$, siehe Tabelle 15. Die 25 %- und 75 %-Quartile der linken Undercut-Boxplots aus Abbildung 15 und der rechten Undercuts aus Abbildung 16 zeigen eine Verteilung der Messdaten in einem geringeren Wertebereich des linken Undercuts als des rechten Undercuts. Das 75 %-Quartil des linken Undercuts befindet sich unter 0,2 mm. Verglichen dazu befindet sich das 75 %-Quartil des rechten Undercuts im Bereich zwischen 0,25 mm und 0,2 mm, ein höherer Variationskoeffizient wäre daher für den rechten Undercut zu erwarten. Der Variationskoeffizient ist mit 1,11 für den linken Undercut deutlich größer als der des rechten Undercuts, welches 0,54 beträgt, vergleiche auch Tabelle 15. Dieses lässt auf einen relevanten Einfluss der Ausreißer auf den Variationskoeffizienten schließen.

Das Verhalten der gefitteten Lognormalverteilungsfunktion für den rechten Undercut ab einer Schnittanzahl von $n = 200$ stimmt nicht mit dem generellen Verhalten, des linken Undercuts, einer Annäherung bei steigender Schnittanzahl überein. Für die Schnittanzahlen $n = 10$ und 100 liegt die Lognormalverteilungsfunktion dicht an der empirischen Verteilungsfunktion und entfernt sich ab der Schnittanzahl von $n = 200$ von der empirischen Verteilungsfunktion. In der Folge wird die empirische Verteilungsfunktion des rechten Undercuts ab der Schnittanzahl $n = 200$ von der Normalverteilungsfunktion besser repräsentiert als von der Lognormalverteilungsfunktion.

In Abbildung 48 und Abbildung 49 wurden Extremwertverteilungen und Weibullverteilungen an die empirischen Messdaten der Undercuts gefittet. Die visuelle Betrachtung der

Extremwertverteilungsfunktion für den linken Undercut zeigt eine Differenz zur empirischen Verteilungsfunktion ab einer Wahrscheinlichkeit von ungefähr 60 % bei einer Schnittanzahl $n = 400$, wie die Lognormalverteilungsfunktion aus Abbildung 33. Für den rechten Undercut ist bei visueller Betrachtung eine dichtere Annäherung der empirischen Verteilungsfunktion an die Extremwertverteilungsfunktion verglichen zu der Lognormalverteilungsfunktion aus Abbildung 36 und Abbildung 41 zu beobachten.

Die Untersuchung aus diesem Abschnitt ergaben für die Radien das erwartete Verteilungen, wie von Schork et al. [5] festgestellt, unabhängig von der Messmethode.

Für die globalen Winkel ist visuell die Konvergenz gegen eine Normalverteilung und Lognormalverteilung zu erkennen. Dies wurde beobachtet, trotz des Verwerfens der theoretischen Verteilungen durch den Lilliefors-Test für den rechten globalen Winkel ab einer Schnittanzahl von $n = 200$.

Die Untersuchung der lokalen Winkel zeigt eine visuelle Konvergenz der empirischen Verteilung gegen eine Normalverteilung und Lognormalverteilung, außer die rechten lokalen Messdaten aus der Curvature-Methode.

Der Unterschied zwischen den gefitteten Normal- und Lognormalverteilung der globalen und lokalen Winkel sind bei Betrachtung der Lageparameter, arithmetischer Mittelwert und Modalwert, und dem Streuungsmaß, Variationskoeffizient, vernachlässigbar klein, siehe Tabelle 15.

Die Verteilung der Undercuts wird von der Streuung der Messdaten und den Ausreißern beeinflusst, sodass ab einer Wahrscheinlichkeit von ungefähr 60 % die Lognormalverteilungsfunktion die empirische Verteilung nicht repräsentiert. Für rechte Undercut-Messwerte aus der Schnittanzahl $n = 400$ und ergibt die visuelle Betrachtung eine bessere Anpassung einer Extremwertverteilung an die empirische Verteilungsfunktion als die Lognormalverteilung.

Im Allgemeinen ergeben die empirischen Verteilungen der rechten globalen Winkel und Radien sowie der linken lokalen Winkel aus der Standard- Tangenten-Methode beim visuellen Vergleich zu der Curvature-Methode eine bessere Annäherung an die dementsprechenden theoretischen Verteilungen. Beim selben Vergleich nähern sich die empirischen Verteilungen aus der Curvature-Methode für die linken globalen Winkel besser an die theoretischen Verteilungen an als die anderen Methoden. Eine Unterscheidung zwischen den drei Messmethoden konnte für die Parameter Undercut und rechter lokaler Winkel nicht festgestellt werden.

Eine weitere Erkenntnis ist die Erfüllung des dritten Konvergenzkriteriums, siehe Abschnitt 4.4, bis zu einer Schnittanzahl von $n = 100$ für alle Parameter bis auf die rechten lokalen Winkel und die Undercuts.

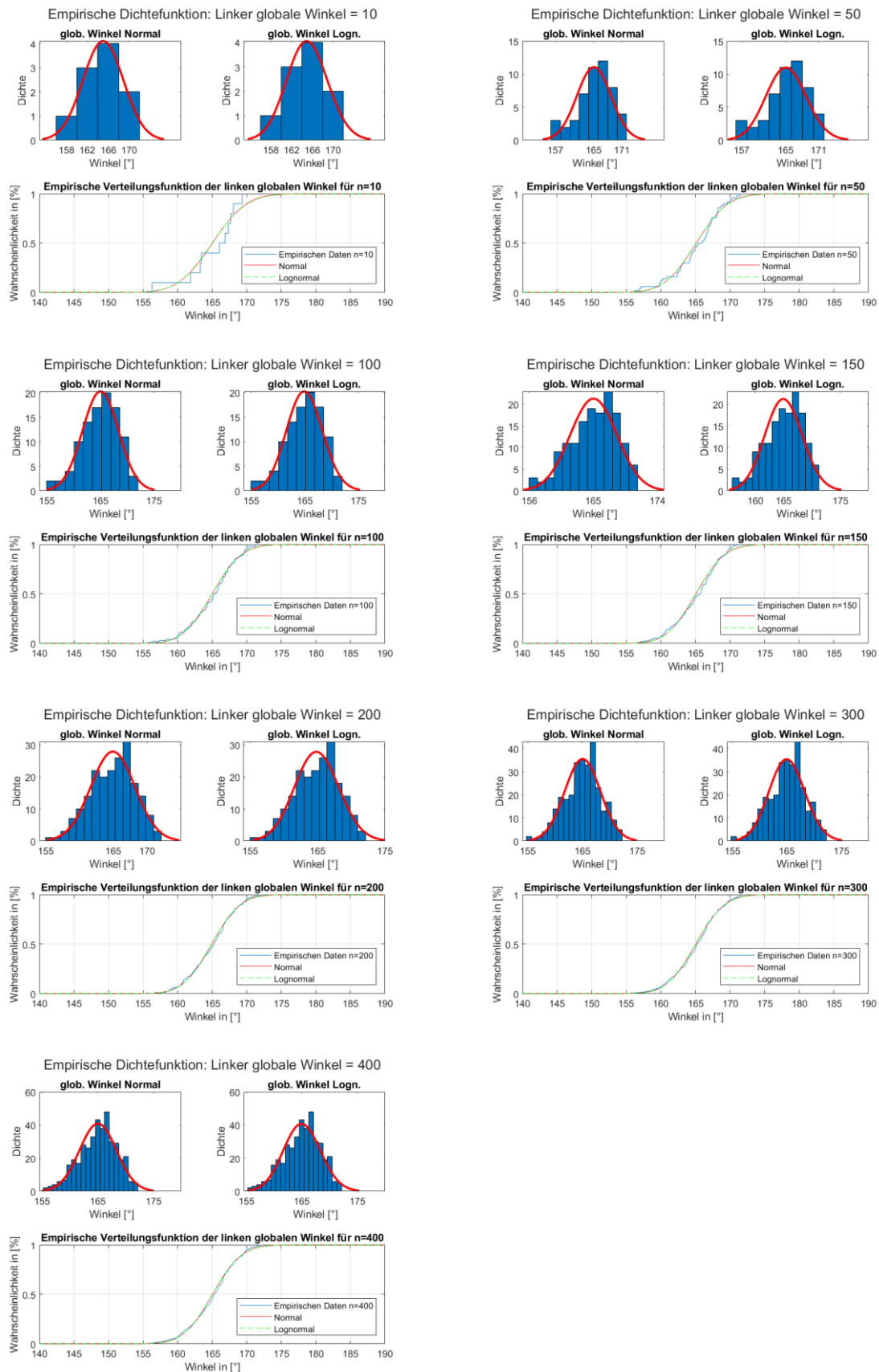


Abbildung 18: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Linker globaler Winkel

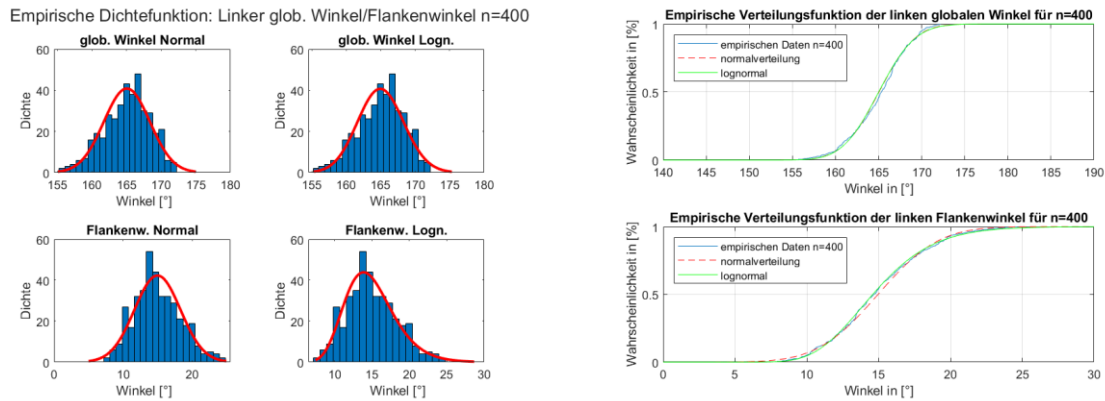


Abbildung 19: Vergleich vom linken globalen Winkel zu Flankenwinkel

5.6 Rissstellen

Das in Abschnitt 3.5 beschriebene Verfahren zur Untersuchung der Rissstellen wurde verwendet und die Ergebnisse werden in diesem Abschnitt vorgestellt. Zusätzlich wurden für die Auswertung aus den Messdaten Werte bestimmt, die in Tabelle 17 aufgelistet sind. Aus der Abbildung 20, welche die ausgewählten Rissstellen an den jeweiligen Messwertverläufen der Geometrieparameter über die Probenlänge mit einer Schnittanzahl von $n = 400$ darstellt, ist kein Zusammenhang zwischen Rissstellen und lokalen Geometrieparametern festzustellen.

Die Abbildung 21 verdeutlicht die Verteilung der Rissstellen anhand der empirischen Verteilungsfunktion der einzelnen Geometrieparameter. Die Rissstellen befinden sich größtenteils im mittleren Bereich der empirischen Verteilungsfunktion der rechten Radien, rechten Flankenwinkel und rechten lokalen Winkel. Die Werte der Undercuts an den Rissstellen sind über den gesamten Wertebereich verteilt. Abgesehen von dem Ergebnis der Flankenwinkel sind für die Werte der Geometrieparameter an den Rissstellen andere Wertebereiche erwartet worden. Im Allgemeinen ist ein verringernder Einfluss durch Nahtübergangsradien unter 1 mm, mit steigendem Flankenwinkel bis zu 20-30 Grad und schmalen, tiefen Undercuts auf die Ermüdungsfestigkeit der Schweißnaht bekannt, wie die Untersuchungen von Schork et al. [2] gezeigt haben. Wobei die meisten Rissstellen an schmalen und tiefen Undercuts entstehen, wie von Zerbst et al. [9] erwähnt wurde. Somit wären große Werte für die Undercuts und kleine Werte für die lokalen Winkel an den Rissstellen erwartet worden. Des Weiteren beschrieben Schork et al. [2] eine Abhängigkeit der Effekte der Nahtübergangsradien und Flankenwinkel, auf die Ermüdungsfestigkeit der Schweißnaht, vom Undercut.

Bei einem kaum vorhandenen Undercut, Schork et al. [2] haben eine „secondary notch“ mit einer Tiefe von $5 \mu\text{m}$ gewählt, haben Radien unter 1 mm schädlichen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit. Außerdem ist der Effekt der Flankenwinkel auf die Ermüdungsfestigkeit größer für kleinen Radien. Ist ein Undercut vorhanden, ist dieser der Hauptfaktor, welcher die Ermüdungsfestigkeit beeinflusst. Also hat die Variation des Nahtübergangsradius nur geringen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit, wie von Schork et al. [2] beschrieben.

Diese Erkenntnisse werden aus den Messwerten der Rissstellen nicht deutlich, siehe Tabelle 16. Die Messwerte der Undercuts sind über einen großen Wertebereich verstreut, wie auch in Abbildung 21 zu erkennen ist. Auch die lokalen Winkel befinden sich nicht in einem kleinen Bereich, sodass schmale Undercuts in der Mehrheit der Rissstellen ausgeschlossen werden können. Auffällig sind jedoch die bestimmten Wertebereiche, in denen sich die Radien und Flankenwinkel befinden. Die Radien der Rissstellen befinden sich im Bereich von 0,7804 mm bis 1,3615 mm. Zusätzlich befinden sich die Flankenwinkel im Wertebereich von 16,26 Grad bis 26,27 Grad. Somit haben die Radien und Flankenwinkel Werte, welche schädlichen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit der Schweißnaht haben.

Einen Überblick, in welchem Bereich sich die Rissstellenwerte verglichen zu allen Messwerten befinden, soll die Tabelle 17 liefern. Die 25 %- und 75 %-Quartile der Rissstellenwerte für die Radien und Flankenwinkel befinden sich innerhalb der 25 %- und 75 %-Quartile aller Radien und Flankenwinkel bei einer Schnittanzahl $n = 400$.

Der Mittelwert der lokalen Winkel an den Rissstellen befindet sich mit 140,69 Grad um das 25 %-Quartil der Messwerte über die Nahtlänge, auch die 25 %- und 75 %-Quartile der Rissstellen unterschreiten die 25 %- und 75 % Quartile der Messwerte über die Nahtlänge. Somit tendieren die Werte der lokalen Winkel an den Rissstellen nach unten verglichen zu den Messwerten über die gemessene Nahtlänge. Der Vergleich mit dem Minimalwert der lokalen Winkel zeigt relativ dazu große Werte für die lokalen Winkel an den Rissstellen, vergleiche Tabelle 16. Betrachtet man dieselben Parameter aus dem Vergleich der lokalen Winkel für die Undercuts, ist für die Undercuts eine Tendenz zu größeren Werten zu erkennen. Es ist jedoch zu hinterfragen, ob bei einem Mittelwert von 0,1469 mm für die Undercuts an den Rissstellen von einem großen Undercut ausgegangen werden kann. Aufgrund der oben genannten Daten kann auf einen geringen Einfluss der Undercuts und lokalen Winkel auf die Rissstellen der untersuchten Probe geschlossen werden, sodass die Nahtübergangsradien und Flankenwinkel an den Rissstellen den größeren Effekt auf die Rissentstehung haben. Diese Erkenntnisse sind nur für in dieser Arbeit untersuchten Probe S500_16_16_Bottom gültig.

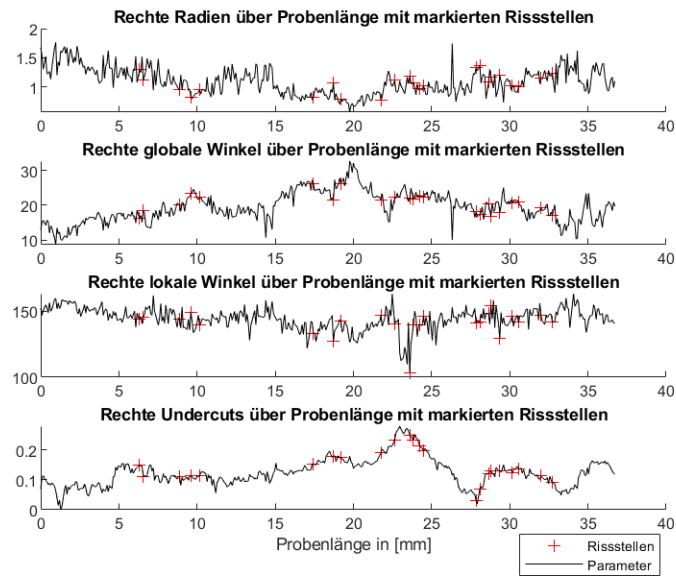


Abbildung 20: Markierung der ausgewählten Rissstellen über die Messdaten der rechten Geometrieparameter entlang der Naht für eine Schnittanzahl $n=400$

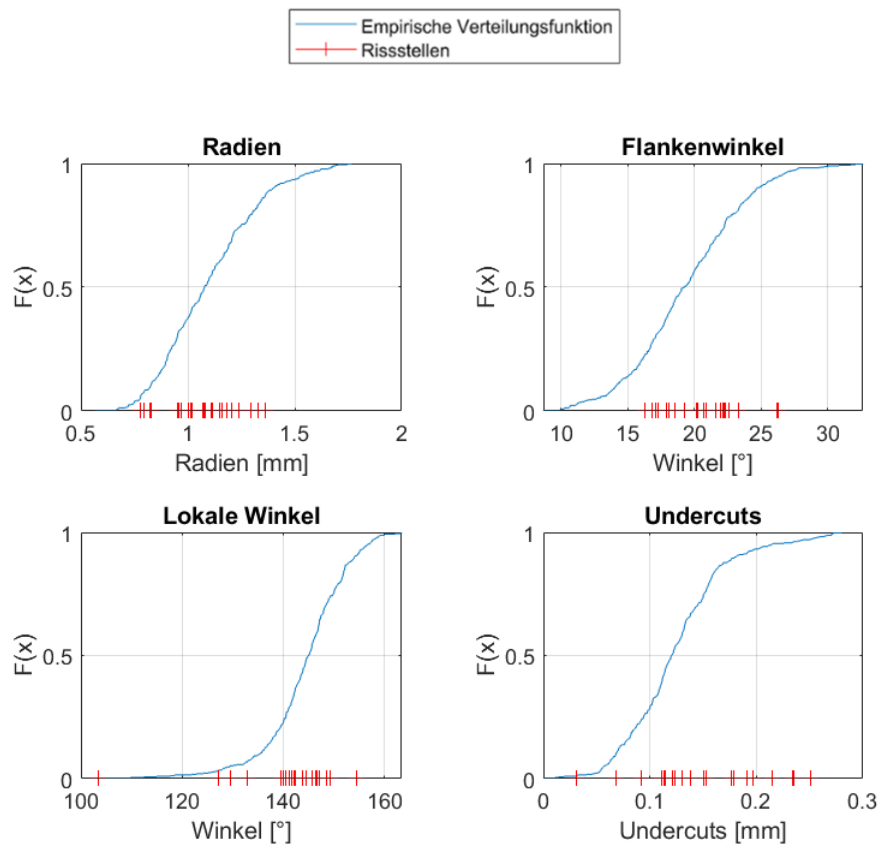


Abbildung 21: Markierung der Rissstellen in den empirischen Verteilungsfunktionen der Geometrie-
parameter aus der Tangenten-Methode mit der Schnittanzahl $n = 400$

Tabelle 16: Geometrieparameterwerte der ausgewählten Rissstellen

	RechteUndercuts	RechteRadien	RechteFlankenwinkel	RechtelokaleWinkel	RissstellenPosition
1	0.0314	1.3305	18.0830	141.3062	27.8400
2	0.0678	1.3615	17.3187	142.1024	28.0800
3	0.0918	1.2386	17.1134	142.1280	32.7200
4	0.1108	0.9568	20.1411	144.4302	8.8800
5	0.1116	1.1113	18.5135	145.6716	6.5600
6	0.1128	1.1489	19.2878	146.7105	32.0000
7	0.1130	0.8262	23.3397	149.3448	9.6000
8	0.1141	0.9510	22.2620	139.4560	10.1600
9	0.1217	1.0787	20.2588	148.5196	28.6400
10	0.1238	1.0133	20.7027	146.4299	30.1600
11	0.1301	1.1628	16.8790	154.5860	28.8000
12	0.1307	1.2040	17.9435	129.4813	29.3600
13	0.1384	1.0019	20.8717	141.6361	30.5600
14	0.1505	1.2927	16.2660	143.8050	6.3200
15	0.1529	0.8226	26.2748	132.9730	17.4400
16	0.1764	0.7947	26.2265	142.3680	19.2000
17	0.1790	1.0687	21.5815	127.1590	18.7200
18	0.1911	0.7804	21.5688	147.1861	21.7600
19	0.1967	1.0173	22.2943	146.5421	24.4800
20	0.2145	0.9717	22.6090	140.0846	24.2400
21	0.2336	1.1126	22.1764	140.5546	22.6400
22	0.2347	1.0738	21.6311	139.9839	23.8400
23	0.2505	1.1829	21.9939	103.5154	23.6000

Tabelle 17: Maximal-, Minimal-, Mittelwerte, 25 %, 50 %, 75 %-Quartile zur Untersuchung der Rissstellen der rechten Geometrieparameter der Probe S500_16_16_Bottom aus Tangenten-Methode und n = 400

Parameter:	Werte aus empirischen Messdaten über die rechte Nahtlänge		Werte der ausgewählten Rissstellen					
	Maximalwert	Minimalwert	Maximalwert	Minimalwert	Mittelwert	25%-Quartil	50%-Quartil	75%-Quartil
Radius in [mm]	1,7641	0,5677	0,9222	1,0785	1,248	0,9605	1,0738	1,1779
P aus Lognormalverteilungsfunktion in [%]						29		66,6
Flankenwinkel in [°]	32,62	8,69	16,63	19,23	22,27	18,19	20,87	22,24
P aus Lognormalverteilungsfunktion in [%]						42,66		76,03
Globaler Winkel in [°]	171,3	147,37				153,72	159,33	
Lokaler Winkel in [°]	163,41	103,51	140,54	144,94	149,92	103,51	140	142,12
P aus Lognormalverteilungsfunktion in [%]						30,92		60,64
Undercut in [mm]	0,28	0,00032	0,094	0,1204	0,1507	0,0314	0,1129	0,1881
P aus Normalverteilungsfunktion in [%]						0,4016		0,9096

P: Wahrscheinlichkeit aus gefitteter theoretischer Verteilungsfunktion für die 25%-, und 75% Quartilwerte

6 Diskussion

Die Auswertung der erhaltenen lokalen Geometriedaten aus dem optischen Messsystem S3 aus Tabelle 1, welches vom Typ Laser Scanning Profiling ist, mit den Messmethoden Mittelwertverfahren und Tangenten-Methode liefern identische Messwerte für alle untersuchten Geometrieparameter über alle Schnittzahlen hinweg. Da es zwei unterschiedliche Messmethoden zur Bestimmung der Nahtübergangsradien und globalen Winkel sind, ist dieses Ergebnis unerwartet und deutet auf eine Fehlerquelle hin. Die Implementierung beider Methoden in WeldScan sollte auf Fehler untersucht werden. Aufgrund der identischen Ergebnisse beider Methoden konnte nicht festgestellt werden, in welcher Methode sich die Fehlerquelle befindet. Die Methoden wurden somit in dieser Arbeit nicht voneinander unterschieden.

Beachte im Folgenden ist mit der relativen Abweichung die relative Abweichung der Messwerte aus der Curvature-Methode verglichen zu denen aus der Tangenten-Methode bei einer Schnittanzahl von $n = 400$ gemeint. Die Auswertung der lokalen Geometriedaten mit der Curvature-Methode liefern, verglichen zu denen der Tangenten-Methode, unterschiedliche Ergebnisse. Diese sind abhängig davon, ob die rechte oder linke Nahtseite der Probe betrachtet wurde. Die relative Abweichung der linken Nahtübergangsradien sind deutlich größer als die der rechten Nahtübergangsradien. Es wurde eine relative Abweichung von bis zu 90 % bei den linken Nahtübergangsradien, mit einer durchschnittlichen relativen Abweichung von 25 % bei einer Schnittanzahl von $n = 400$ bestimmt. Die maximale beobachtete relative Abweichung der rechten Nahtübergangsradien beträgt 79 % und die durchschnittliche relative Abweichung beträgt 18 %. Die globalen Winkel haben ähnliche durchschnittliche relative Abweichungen, mit 1,4 % für die linken globalen Winkel und 0,7 % für die rechten globalen Winkel. Trotz des minimalen Unterschiedes ist die relative Abweichung der linken globalen Winkel größer als die der rechten globalen Winkel. Im Gegensatz dazu gibt es keinen Unterschied der durchschnittlichen relativen Abweichungen der lokalen Winkel. Diese betragen für beide Seiten 5 % und die Undercut-Messwerte aus der Curvature-Methode unterscheiden sich nicht von den der Tangenten-Methode. Der Vergleich zwischen Tangenten- und Curvature-Methode stellt den Einfluss auf die absoluten Messwerte der lokalen Geometrieparameter besonders dem Nahtübergangsradien dar. Bei der Auswertung mit der Curvature-Methode werden größere Nahtübergangsradien als mit den anderen Methoden gemessen. Der Unterschied zwischen den relativen Abweichungen der rechten und linken Radien könnte an einem schärferen Nahtübergang am rechten Nahtübergang als auf der linken Seite liegen, sodass die Curvature-Methode den Nahtübergang besser erkennt. Dieser Unterschied könnte in einer anderen wissenschaftlichen Arbeit erforscht werden.

Die Konvergenzuntersuchung hat nur für die Radien zu einem eindeutigen Ergebnis geführt, diese folgen einer Lognormalverteilung unabhängig von den Messmethoden und der ausgewerteten Nahtseite. Die empirischen Verteilungen der linken globalen Winkel ausgewertet mit der Curvature-Methode und der rechten globalen Winkel ausgewertet mit der Tangenten-Methode konvergieren gegen Normal- und Lognormalverteilungen. Trotz der verworfenen Testergebnisse aus den Lilliefors-Tests sind die linken globalen Winkel aus der Tangenten-Methode und die rechten globalen Winkel aus der Curvature-Methode den Normal- und Lognormalverteilungen visuell betrachtet ähnlich. Sodass von einer Repräsentation der globalen Winkel der untersuchten Probe durch Normal- und Lognormalverteilungen ausgegangen werden kann. Eine Konvergenz gegen eine theoretische Verteilung der lokalen Winkel wurde nicht festgestellt, da die Lilliefors-Testergebnisse ab einer Schnittanzahl von $n = 200$ die Nullthesen der theoretischen Verteilungen vollständig verworfen haben. Grund hierfür ist die Abweichung im mittleren Bereich der Daten der empirischen Verteilungen der linken lokalen Winkel aus der Tangenten-Methode von den Normal-, Lognormalverteilungen (Abbildung 32). Das gilt auch für die Abweichung der unteren Hälfte der empirischen Verteilungen der rechten lokalen Winkel aus allen Messmethoden von den Normal- und Lognormalverteilungen, vergleiche Abbildung 37 und Abbildung 39. Wie in Abschnitt 5.5.5 erwähnt, erhöht sich die Abweichung der empirischen Verteilung der Undercuts von den Lognormalverteilungen im oberen Wertebereich bei steigender Schnittanzahl, da mehr Ausreißer gemessen werden. Die Ausreißer haben Einfluss auf das Streuungsmaß, den Variationskoeffizienten, siehe Tabelle 15. Der Vergleich der Boxplots und Verteilungsfunktionen der Undercuts zeigt eine Korrelation zwischen Streuung und Abweichung der empirischen Verteilungen der Undercuts von den Lognormalverteilungen im oberen Wertebereich. Dabei ist die Abweichung der empirischen Verteilungen der rechten Undercuts, welche die kleinere Streuung besitzen, von den Lognormalverteilungen geringer als die der linken Undercuts.

Aus der Untersuchung der lokalen Geometrieparameter für eine Schnittanzahl von $n = 400$ und der Auswertung mit der Tangenten-Methode an den ausgewählten Rissstellen der Probe S500 16 16 Bottom, konnten für die Parameter Nahtübergangsradius und Flankenwinkel ähnliche Messwerte, wie von Schork et al. [2] bestimmt wurden, festgestellt werden, die schädlichen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit der Schweißnaht haben. Es wurden kleine Nahtübergangsradien zwischen 1,36 mm und 0,78 mm und großen Flankenwinkel zwischen 26,2 Grad und 16,2 Grad gemessen. Diese Werte befinden sich in den von Schork et al. [2] festgestellten Wertebereiche, die verringernden Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit von Schweißnähten haben. Der mittlere Wertebereich, die 25 %- und 75 %-Quartile, der Nahtübergangsradien und Flankenwinkel an den Rissstellen befinden sich im mittleren Wertebereich der Gesamtmessungen der Nahtübergangsradien und Flankenwinkel, siehe Tabelle 17. Mit Gesamtmessungen sind die Messungen bei einer Schnittanzahl von $n = 400$ über die Nahtlänge gemeint. Die Undercut-Messwerte an den Rissstellen verteilen sich über den ganzen Wertebereich der Gesamtmessdaten (Abbildung 21). Der Vergleich der 25 %- und 75 %-Quartile der Undercut-Messwerte an den Rissstellen mit denen der Gesamtmessdaten zeigt eine leichte Tendenz der Undercut-Werte an den Rissstellen zu großen Undercuts. Derselbe Vergleich für die lokalen Winkel deutet auf eine leichte Tendenz zu schmalen Undercuts, also kleinen lokalen Winkel. Nach den Ergebnissen von Schork et al. [2] wären an den Rissstellen zumeist große

und schmale Undercuts erwartet worden, also große Undercuts und kleine Werte für die lokalen Winkel. Das wird aus den gewonnenen Messdaten an den Rissstellen nicht beobachtet. Die Einflussfaktoren auf die Rissinitiierung in dieser Probe sind somit die Nahtübergangsradien und Flankenwinkel. Zusätzlich wurden bei Betrachtung aller untersuchten lokalen Geometrieparameter nur vereinzelt Ausreißer an den Rissstellen gemessen. Ausreißer haben bezogen auf die Probe S500 16 16 Bottom also geringen Einfluss auf die Rissinitiierung.

Aufgrund des geringen Einflusses von Ausreißern auf die Rissinitiierung und den Ergebnissen der Konvergenzuntersuchung wird eine Schnittanzahl von $n = 100$ für die Bestimmung der lokalen Geometrieparameter vorgeschlagen. Obwohl nach den Konvergenzbedingungen nur bei den Nahtübergangsradien und rechten globalen Winkel Konvergenz festgestellt wurden. Bei einer Schnittanzahl von $n = 100$ werden die meisten Hypothesentests nicht verworfen, außer bei den linken Undercuts und rechten lokalen Winkel. Zudem werden weniger Ausreißer als bei höheren Schnittanzahlen gemessen, sodass die Abweichung der empirischen Verteilung der Undercuts relativ gering ist. Durch den möglichen geringen Einfluss von Ausreißern auf die Rissinitiierung, können diese in der Messung vernachlässigt werden. Die Auswertung der Daten an den Rissstellen wurde mit der Tangenten-Methode durchgeführt, eine Auswertung mit der Curvature-Methode sollte in einer anderen Arbeit untersucht werden. Dieser Vorschlag bezieht sich auf den in dieser Arbeit gewonnenen Untersuchungen. Es sollten mehr Proben auf Konvergenz untersucht werden, um aussagekräftige Ergebnisse diesbezüglich zu liefern. Die Untersuchung einer Probe ist hierfür unzureichend.

7 Fazit

Es wurden die Einflüsse der drei Messmethoden auf die lokalen Geometriedaten, gemessen mit einem einheitlichen optischen Messsystem, quantifiziert. Folgende Erkenntnisse wurden festgestellt.

Das Mittelwertverfahren und die Tangentenmethode haben identische Messergebnisse geliefert und müssen auf Fehlerquellen untersucht werden.

Die Curvature-Methode bestimmt größere Nahtübergangsradien und Flankenwinkel verglichen zu den anderen Methoden.

Nahtübergangsradien konvergieren gegen eine Lognormalverteilung, unabhängig von der Messmethode.

Ein geringer Einfluss der Messmethoden auf die Annäherung der empirischen Verteilungen gegen die theoretischen Verteilungen wurde festgestellt, wobei größtenteils die empirischen Verteilungen der lokalen Geometrieparameter aus der Tangenten-Methode, visuell betrachtet, die geringsten Abweichungen von den theoretischen Verteilungen hatten.

Der Unterschied zwischen den angepassten Normal- und Lognormalverteilungen an die empirischen Verteilungen der Parameter lokaler Winkel und globaler Winkel sind vernachlässigbar klein.

Durch die Umrechnung der globalen Winkel in Flankenwinkel unterscheiden sich die gefitteten Normal- und Lognormalverteilungen voneinander. Dieser Effekt wurde bei einer Schnittanzahl von $n = 400$ beobachtet. Für den Flankenwinkel konnte visuell keine eindeutige theoretische Verteilung zugeordnet werden, da diese abhängig von der Messmethode war. Diese Beobachtung könnte in einer anderen Arbeit untersucht werden.

Eine Konvergenz durch das Erfüllen der Konvergenzbedingungen und -kriterien für die Parameter globaler Winkel, lokaler Winkel und Undercut konnte nicht festgestellt werden. Eine Annäherung der empirischen Verteilungen der Parameter globaler Winkel und lokaler Winkel, bei steigender Schnittanzahl, an Normal- und Lognormalverteilungen konnte visuell beobachtet werden.

Mit steigender Schnittanzahl werden mehr Ausreißer gemessen, unabhängig von den Messmethoden.

Ausreißer haben Einfluss auf die Annäherung der empirischen Verteilung der Undercuts gegen eine Lognormalverteilung.

Eine Schnittanzahl von $n = 100$ wird für die Anwendung der Messmethoden vorgeschlagen, welches anhand von der Untersuchung anderer Proben auf ihre Eignung überprüft werden sollte.

Die Untersuchung der Rissstellen zeigte eine Verteilung der Undercut-Messwerte an den Rissstellen über den gesamten Wertebereich der Undercut-Messwerte. Die zumeist erwarteten großen und schmalen Undercuts an den Rissstellen sind nicht festgestellt worden. Die Nahtübergangsradien und Flankenwinkel an den Rissstellen befanden sich in den bekannten Wertebereichen, welche verringernden Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit der Schweißnaht haben.

Die meisten Messwerte der lokalen Geometrieparameter, Nahtübergangsradien, Flankenwinkel und lokale Winkel, an den Rissstellen haben sich in und um den mittleren Wertebereich der Gesamtmessdaten konzentriert, sodass nur vereinzelt Ausreißer der lokalen Winkel an den Rissstellen gemessen wurden. Infolge der beobachteten Messungen an den Rissstellen hatten Ausreißer der Parameter Nahtübergangsradien, Flankenwinkel und lokale Winkel geringen bis keinen Einfluss auf die Rissinitiierungen.

8 Literatur

- [1] Schubnell, J.; Jung, M.; Le, C.H. et al.: Influence of the optical measurement technique and evaluation approach on the determination of local weld geometry parameters for different weld types. *Welding in the World*, Vol. 64 (2020), Iss. 2, pp. 301-316. <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00830-0>
- [2] Schork, B.; Zerbst, U.; Kiyak, Y. et al.: Effect of the parameters of weld toe geometry on the FAT class as obtained by means of fracture mechanics-based simulations. *Welding in the World*, Vol. 64 (2020), Iss. 6, pp. 925-936. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00874-7>
- [3] DIN EN ISO 5817:2014-06 Schweißen – Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) – Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten. Ausgabe 2014.
- [4] Hobbacher, A.; Kassner, M.: On Relation Between Fatigue Properties Of Welded Joints, Quality Criteria and Groups in Iso 5817. *Welding in the World*, Vol. 56 (2012), 11-12, pp. 153-169. <https://doi.org/10.1007/BF03321405>
- [5] Schork, B.; Kucharczyk, P.; Madiá, M. et al.: The effect of the local and global weld geometry as well as material defects on crack initiation and fatigue strength. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 198 (2018), pp. 103-122. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.07.001>
- [6] Renken, F.: Anleitung WeldScan. Hamburg, Technische Universität Hamburg, 2020.
- [7] Schmitz, L.: Tool for extraction of butt weld face geometry properties from 3D scanning. Hamburg, Technische Universität Hamburg, Bachelor thesis, 2020.
- [8] Barsoum, Z.; Jonsson, B.: Influence of weld quality on the fatigue strength in seam welds. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 18 (2011), Iss. 3, pp. 971-979. <https://doi.org/10.1016/j.eng-failanal.2010.12.001>
- [9] Zerbst, U.; Madiá, M.; Vormwald, M. et al.: Fatigue strength and fracture mechanics – A general perspective. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 198 (2018), pp. 2-23. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.04.030>
- [10] HOU, C.: Fatigue analysis of welded joints with the aid of real three-dimensional weld toe geometry. *International Journal of Fatigue*, Vol. 29 (2007), Iss. 4, pp. 772-785. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.06.007>
- [11] Oswald, M.; Neuhäusler, J.; Rother, K.: Determination of notch factors for welded butt joints based on numerical analysis and metamodeling. *Welding in the World*, Vol. 64 (2020), Iss. 12, pp. 2053-2074. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00982-4>
- [12] Braun, M.; Kahl, A.; Willems, T. et al.: Guidance for Material Selection Based on Static and Dynamic Mechanical Properties at Sub-Zero Temperatures. *In: Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 143 (2021), Iss. 4, pp. 1-45. <https://doi.org/10.1115/1.4049252>
- [13] Braun, M.; Milaković, A.-S.; Ehlers, S. et al.: Sub-Zero Temperature Fatigue Strength of Butt-Welded Normal and High-Strength Steel Joints for Ships and Offshore Structures in Arctic Regions. *In: ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Fort Lauderdale, FL, USA (2020). <https://doi.org/10.1115/OMAE2020-18892>

-
- [14] Braun, M., Milaković, A.-S., Ehlers, S: Fatigue Assessment of Welded Joints at Sub-Zero Temperatures by means of Stress Averaging Approach. *In: International Conference on Ships and Offshore Structures ICSOS 2020* (2020). <https://doi.org/10.1080/17445302.2021.1906194>
- [15] M. Jung: Entwicklung und Implementierung eines Algorithmus zur Approximation und Bewertung von Kerbfaktoren an Kehlnähten auf Basis berührungsloser 3D-Vermessung. Karlsruhe, Karlsruhe Institute of Technology, Masterarbeit, 2018.
- [16] F. Renken, R.U.F. von Bock und Polach, J. Schubnell, M. Jung, M. Oswald, K. Rother, S. Ehlers, M. Braun: An algorithm for statistical evaluation of weld toe geometries using laser triangulation. *In: International Journal of Fatigue* (submitted for publication (2021)).
- [17] *Sachs, L.; Hedderich, J.: Angewandte Statistik.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg [New York], 2006.
- [18] *Eckstein, P.: Angewandte Statistik mit SPSS.* Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2016.
- [19] *Alsmeyer, G.: Kapitel IV Regulär stetige Zufallsexperimente und geometrische Wahrscheinlichkeiten,* https://www.uni-muenster.de/Stochastik/lehre/SS10/WT_SS10/SkriptStochastik/Stoch04.pdf [Zugriff am: 10.03.2021].
- [20] *Hain, J.: Verteilungsanalyse,* https://www.uni-wuerzburg.de/fileadmin/10040800/user_upload/hain/SPSS/Verteilungsanalyse.pdf [Zugriff am: 10.03.2021].
- [21] *Scheid, S.: Die verallgemeinerte Lognormalverteilung.* Dortmund, Universität Dortmund, Diplomarbeit, 2001.
- [22] *Kosfeld, R.: 5.4 Verteilungsfunktion,* https://www.uni-kassel.de/fb07/fileadmin/datas/fb07/5-Institute/IVWL/Kosfeld/lehre/statistikII/StatII_Kap5b_.pdf [Zugriff am: 10.03.2021].
- [23] o. V.: Box Plot: Display of Distribution, 2006, <http://www.physics.csbsju.edu/stats/box2.html> [Accessed: 10.03.2021].
- [24] o. V.: Visualize summary statistics with box plot - MATLAB boxplot - MathWorks Deutschland, 2021, https://de.mathworks.com/help/stats/boxplot.html#mw_dc07acfe-6b0a-4d0a-94e0-1e9e0718439f [Accessed: 10.03.2021].
- [25] Heller W.-D., Senska H., Siebensschuh C.: Kapitel XIV - Konvergenz und Grenzwertsätze - Wahrscheinlichkeitstheorie, <https://statistik.econ.kit.edu/download/Wahrscheinlichkeitstheorie14.pdf> [Zugriff am: 11.03.2021].
- [26] o. V.: Lilliefors test - MATLAB lillietest - MathWorks Deutschland, 2021, <https://de.mathworks.com/help/stats/lillietest.html#btodir4> [Accessed: 11.03.2021].
- [27] *Radaj, D.; Vormwald, M.: Ermüdungsfestigkeit – Grundlagen für Ingenieure.* Springer, Berlin, 2007.

9 Anhang

1. Zusammenfassung der Abbildungen

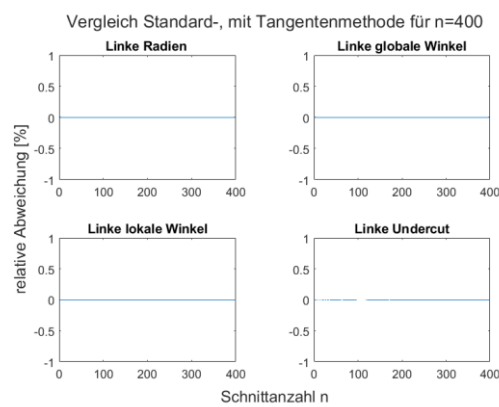


Abbildung 22: Vergleich der linken lokalen Geometrieparameter Messwerte aus Mittelwert- und Tangentenverfahren

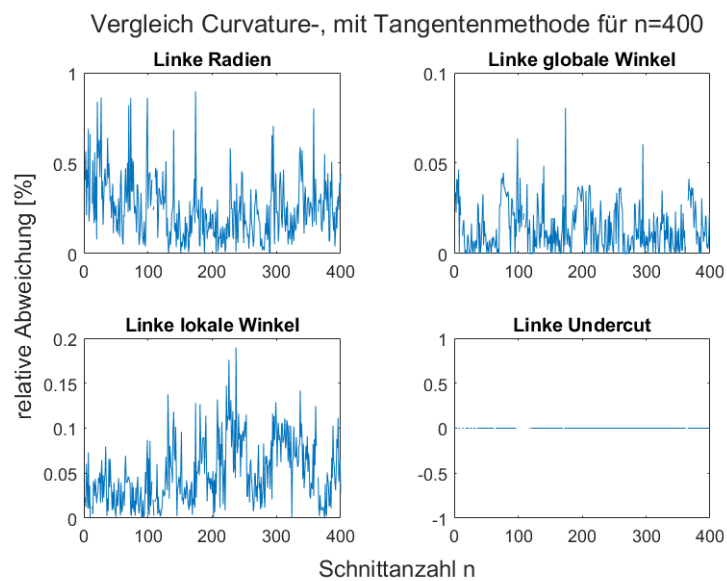


Abbildung 23: Vergleich der linken lokalen Geometrieparameter Messwerte aus Curvature- und Tangentenverfahren

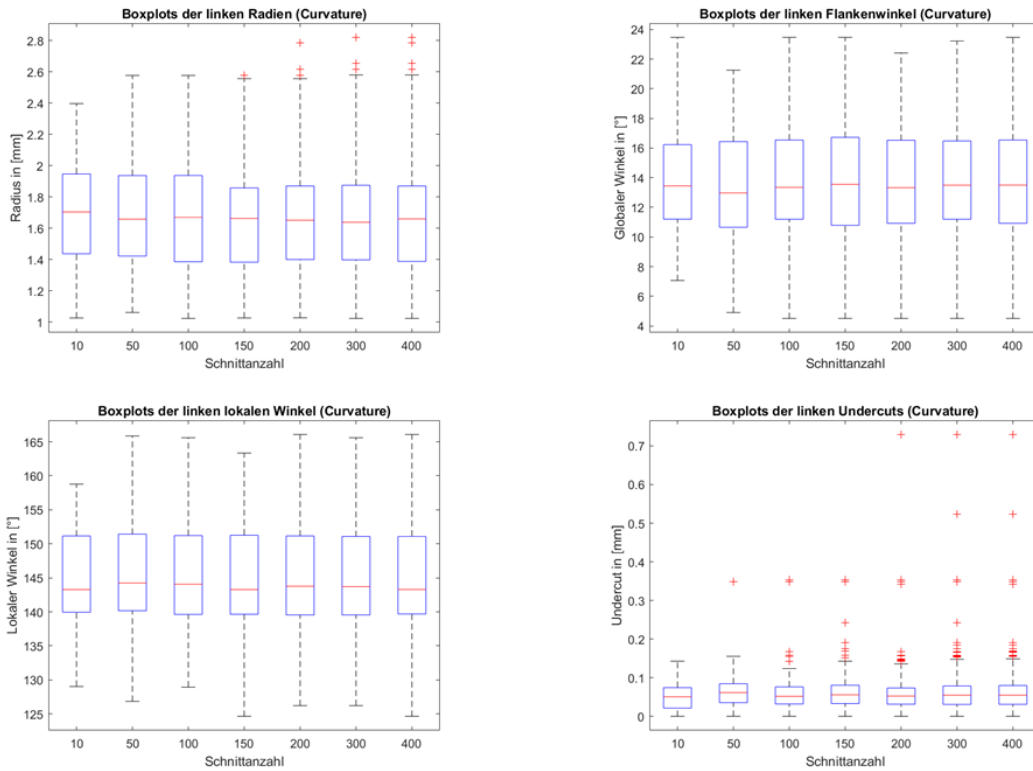


Abbildung 24: Boxplots der linken Geometrieparameter, ausgewertet mit der Curvature-Methode

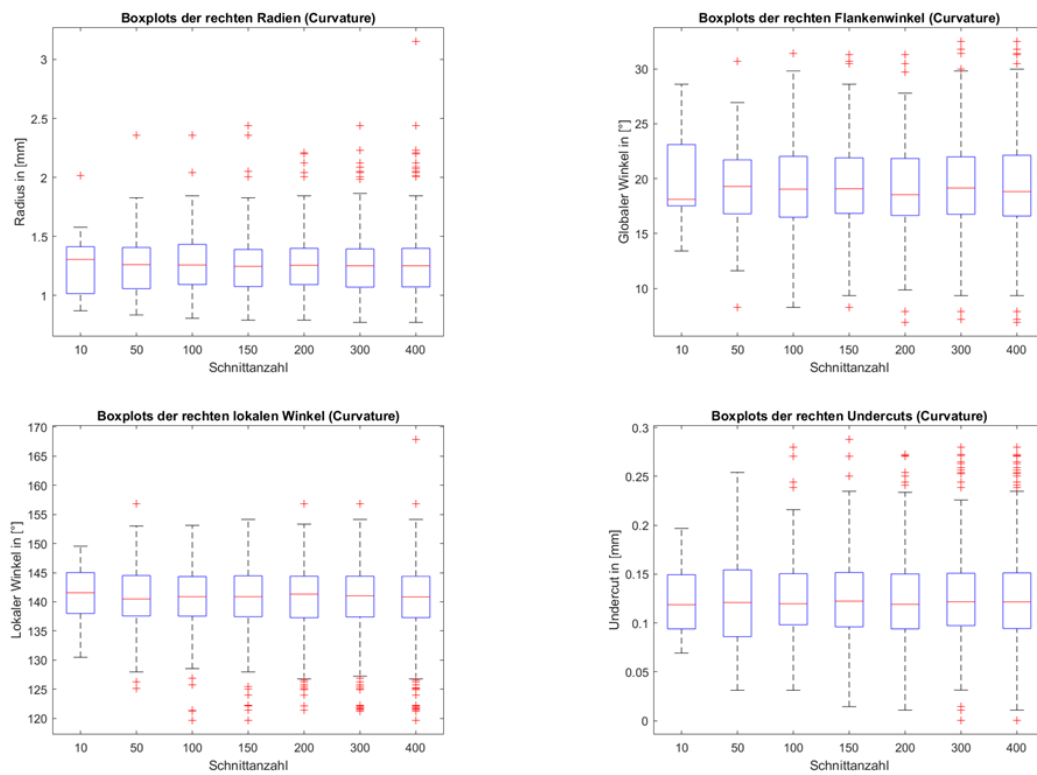


Abbildung 25: Boxplots der rechten Geometrieparameter, ausgewertet mit der Curvature-Methode

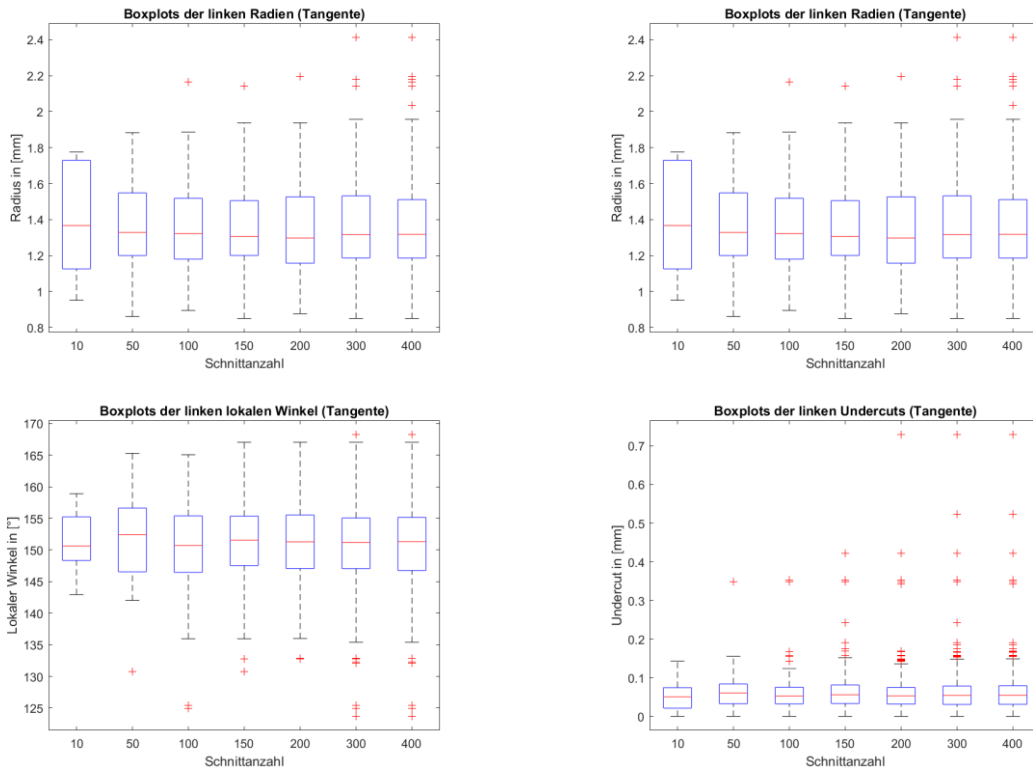


Abbildung 26: Boxplots der linken Geometrieparameter, ausgewertet mit dem Tangentenverfahren

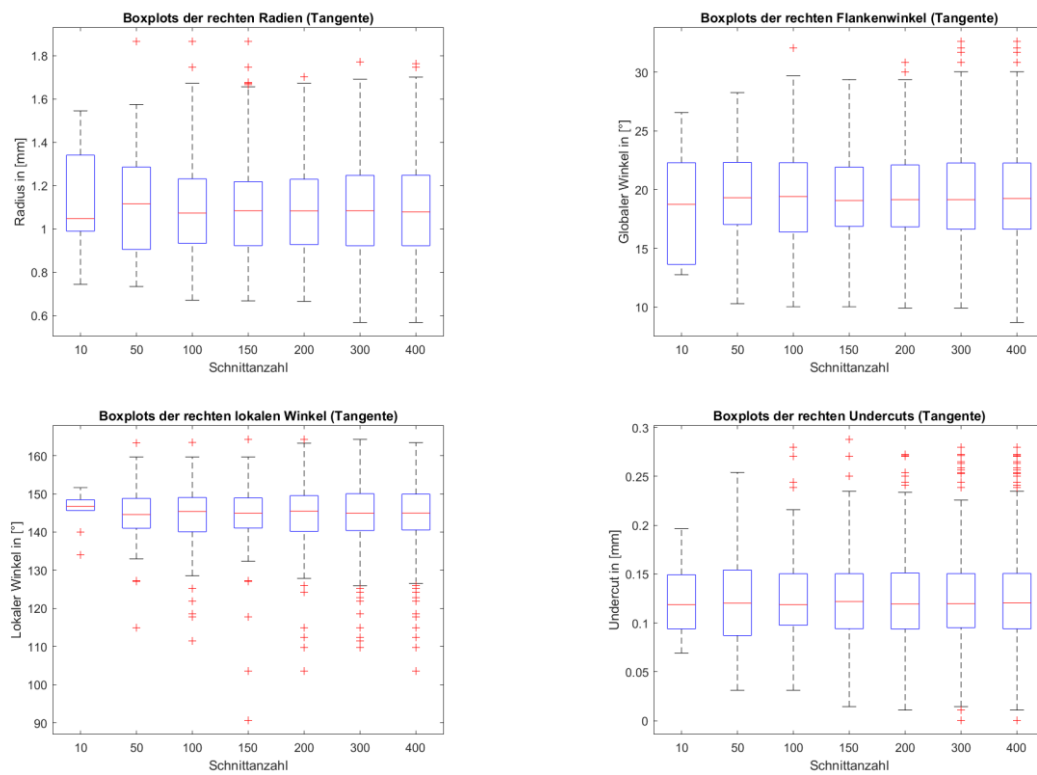


Abbildung 27: Boxplots der rechten Geometrieparameter, ausgewertet mit dem Tangentenverfahren

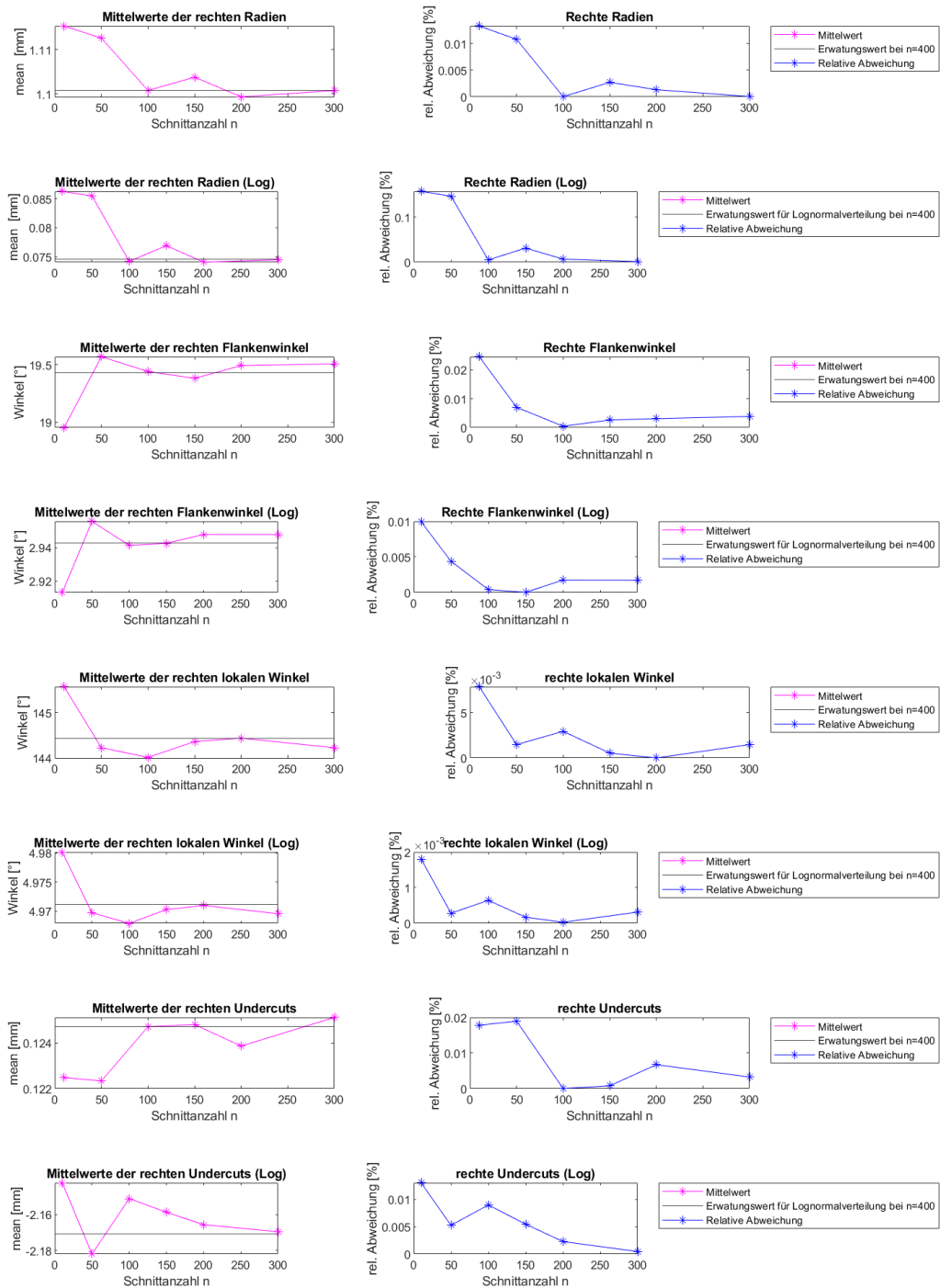


Abbildung 28: Plots der arithmetischen Mittelwertverläufe und relative Abweichungen der rechten Geometrieparameter für Normal-, Lognormalverteilung (Standard-Methode)

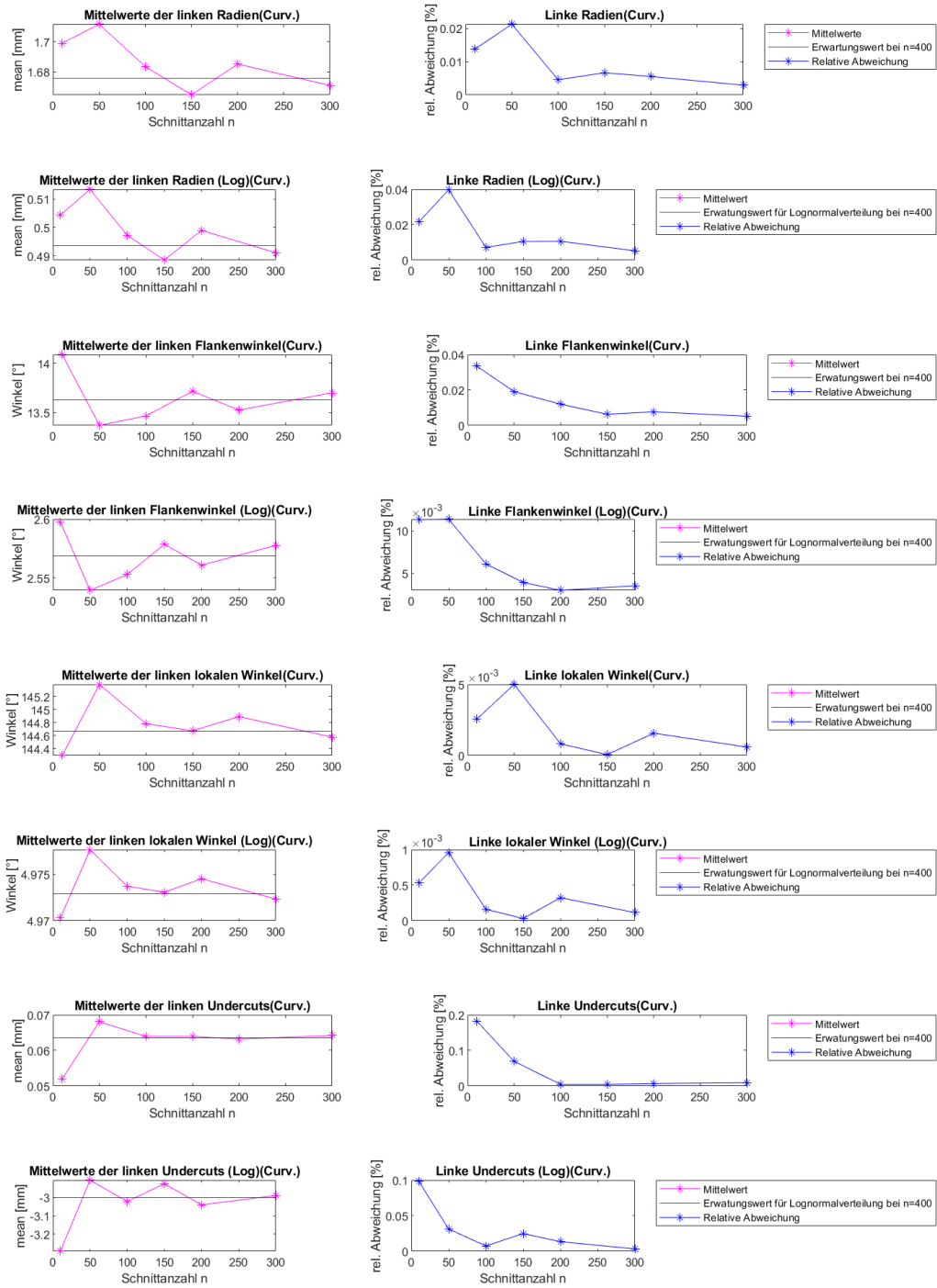


Abbildung 29: Plots der arithmetischen Mittelwertverläufe und relative Abweichungen der linken Geometrieparameter für Normal-, Lognormalverteilung (Curvature-Methode)

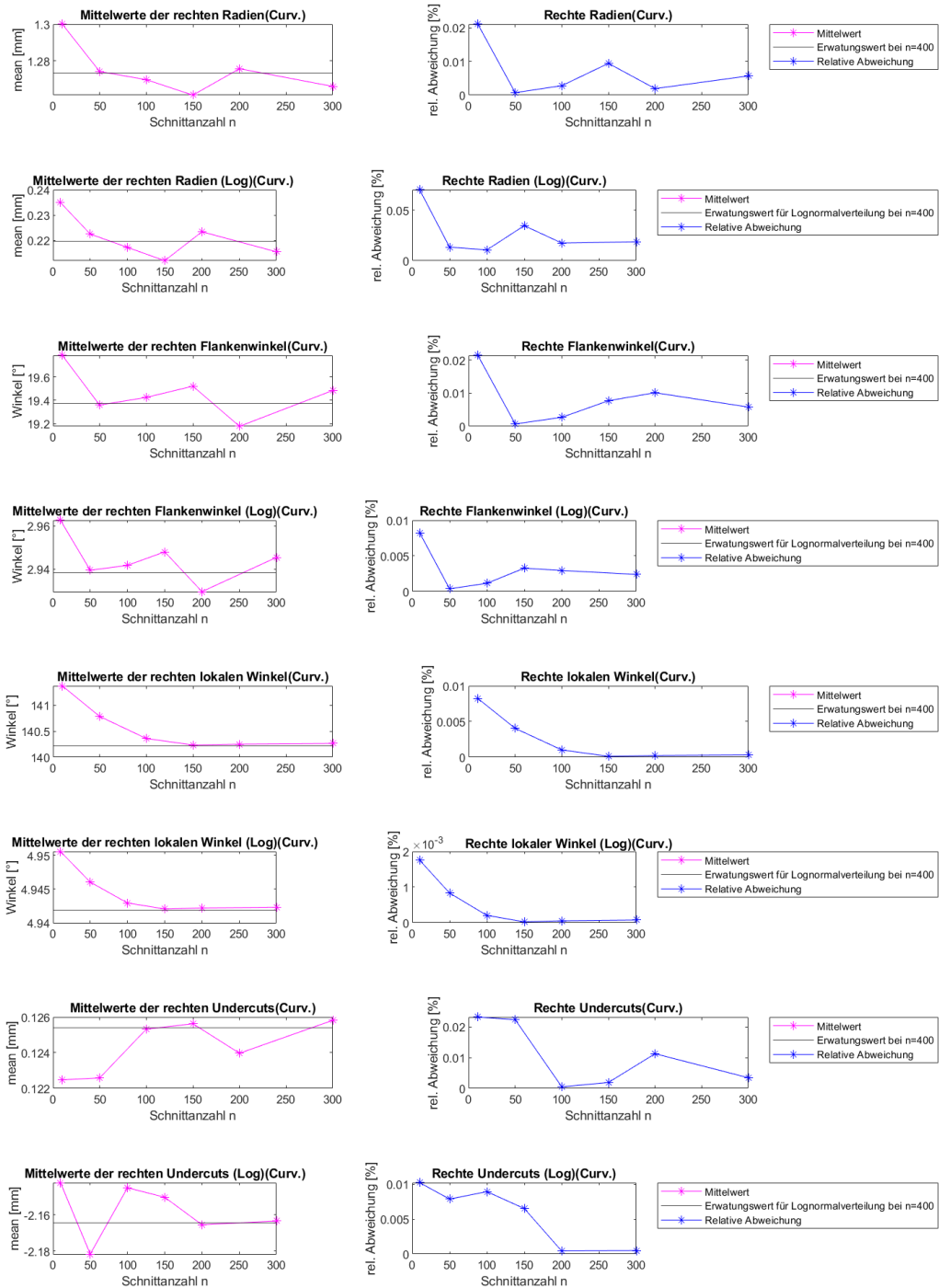


Abbildung 30: Plots der arithmetischen Mittelwertverläufe und relative Abweichungen der rechten Geometrieparameter für Normal-, Lognormalverteilung (Curvature-Methode)

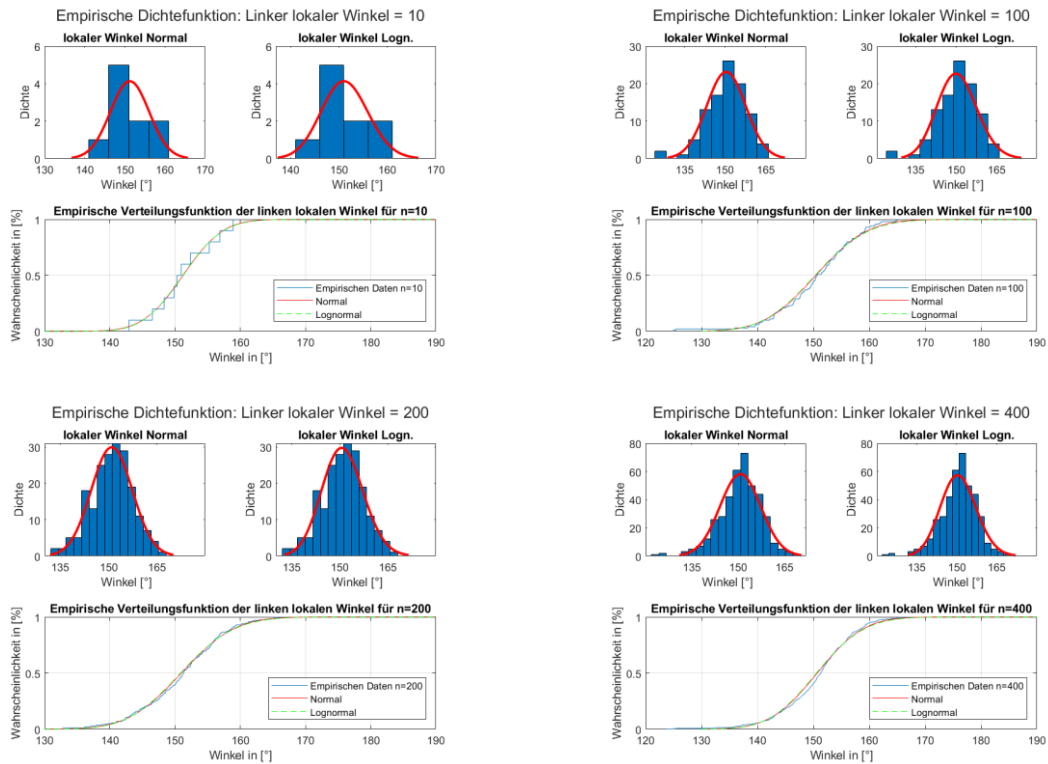


Abbildung 31: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Linker lokaler Winkel

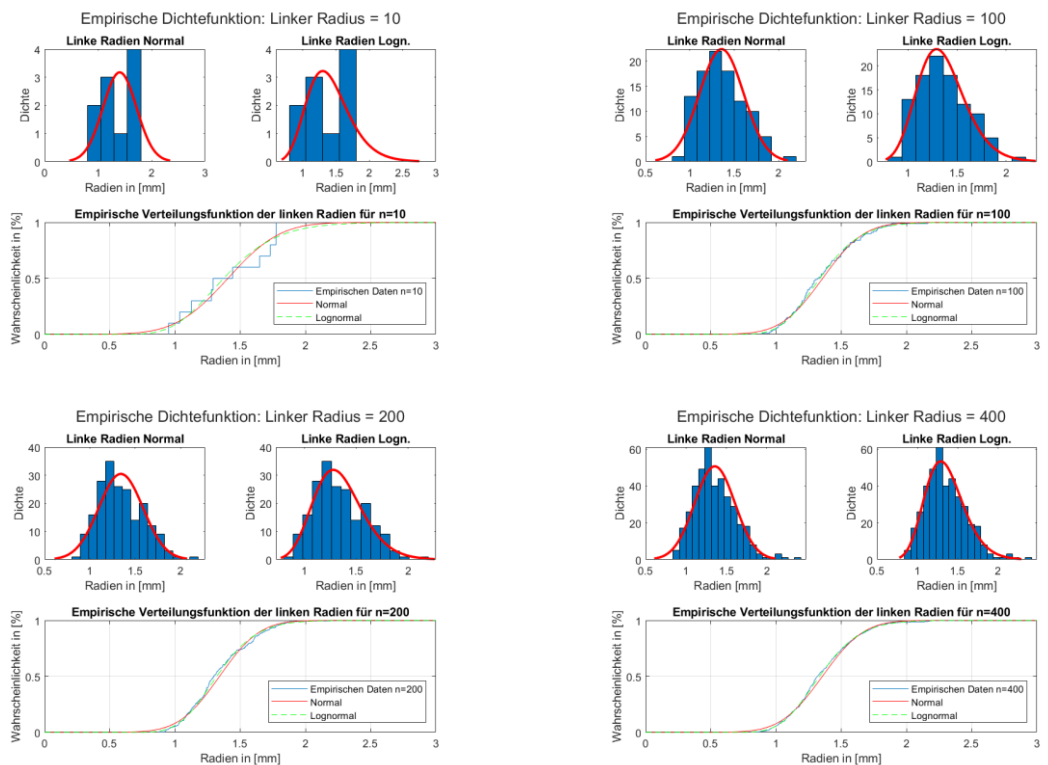


Abbildung 32: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Linker Radius

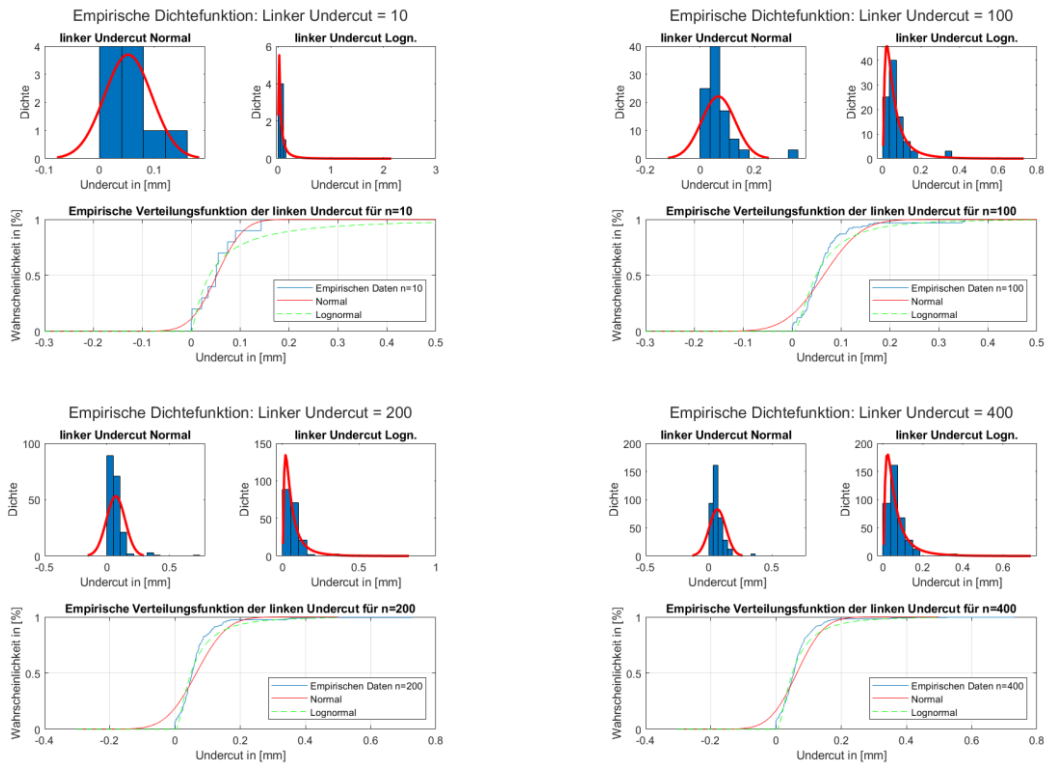


Abbildung 33: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Linker Undercut

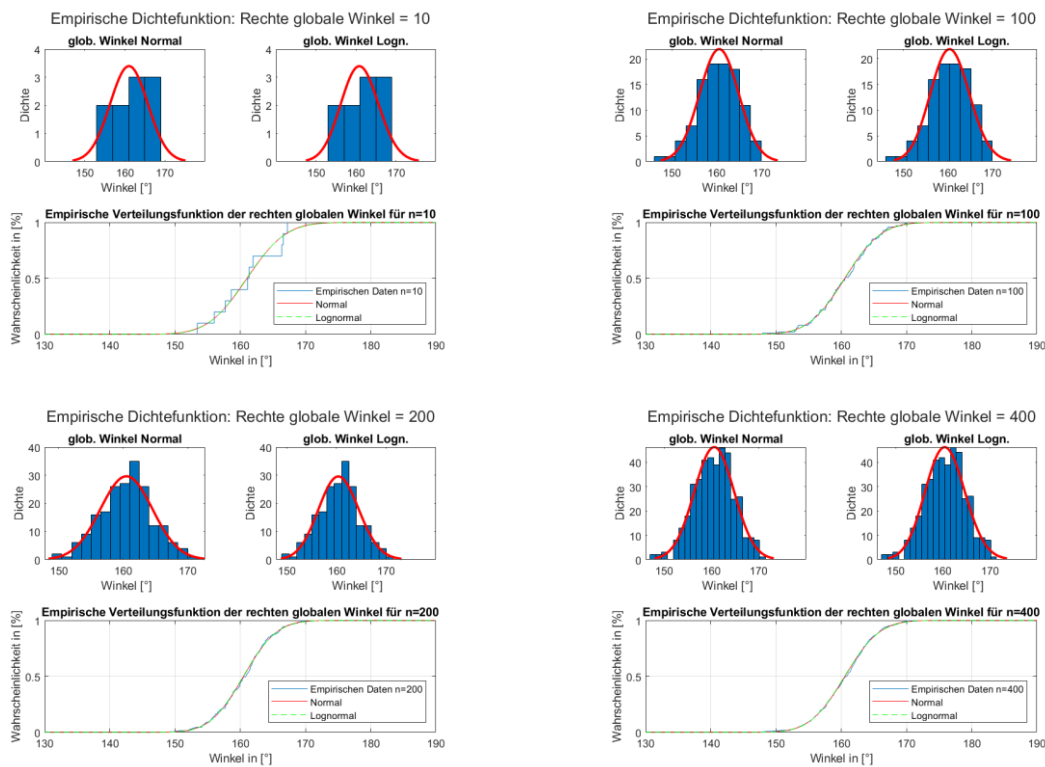


Abbildung 34: Emp. Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Rechter globaler Winkel

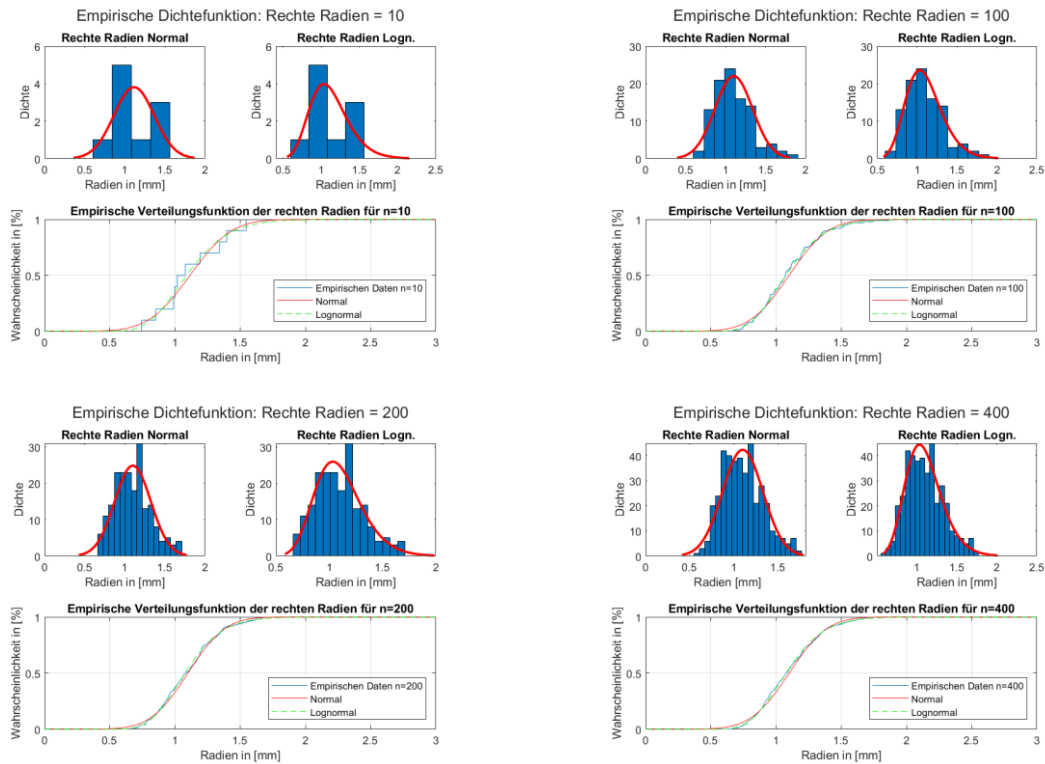


Abbildung 35: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Rechter Radius

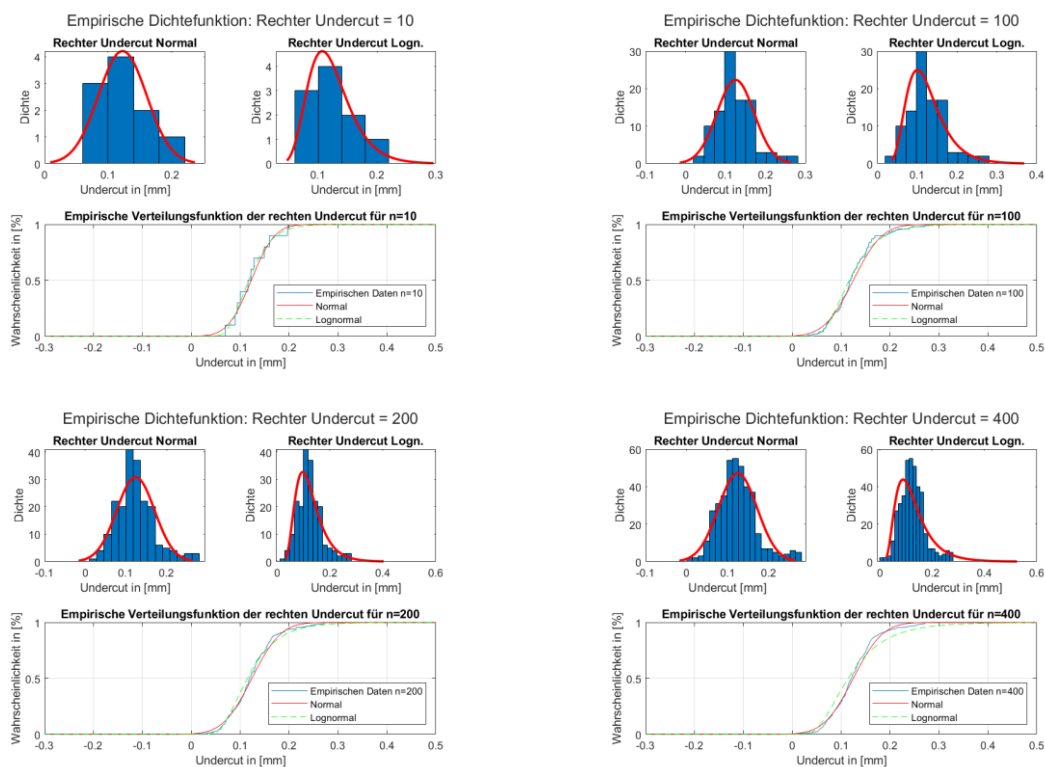


Abbildung 36: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Rechter Undercut

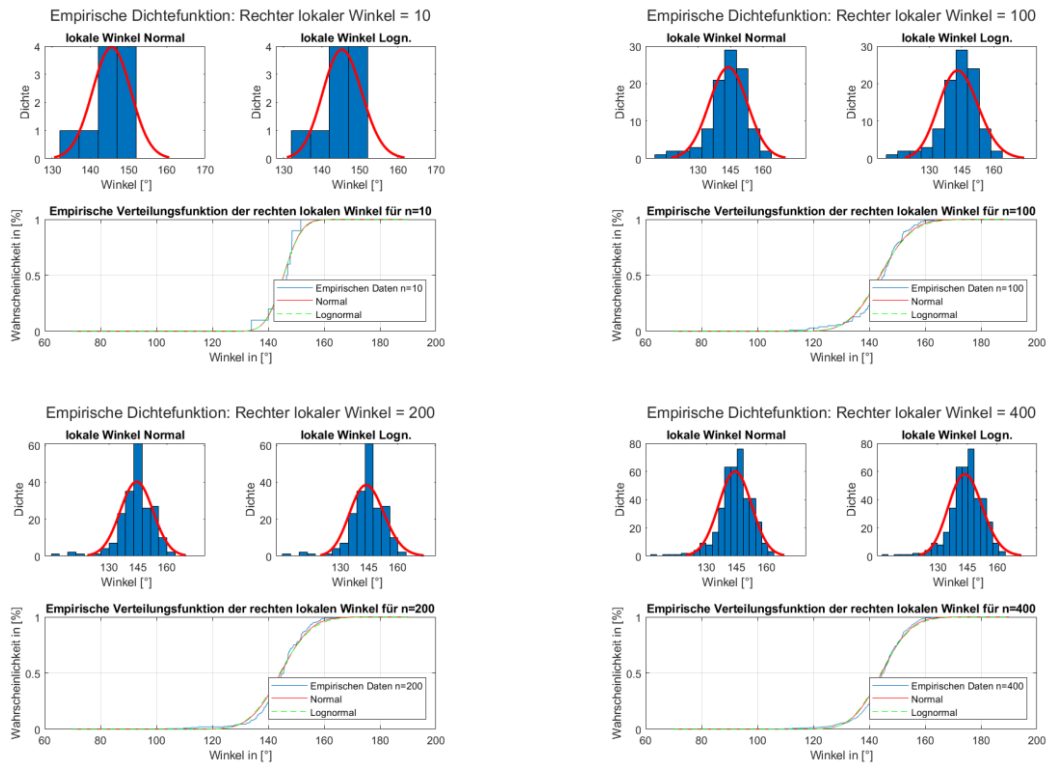


Abbildung 37: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Rechter lokaler Winkel

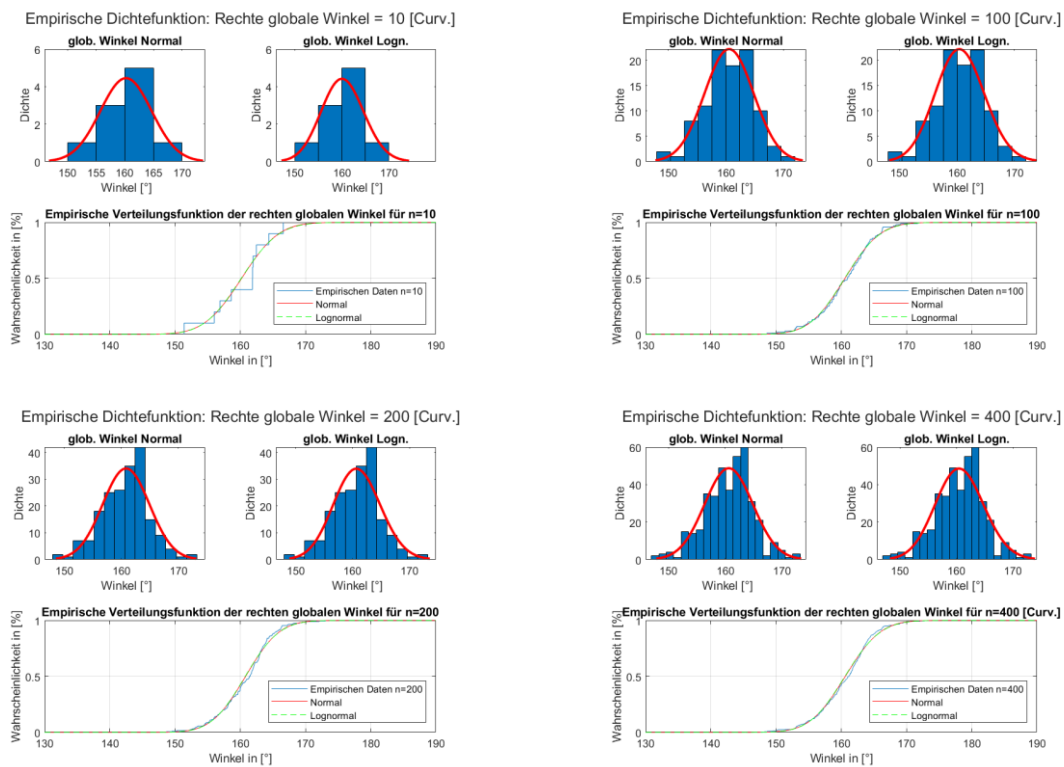


Abbildung 38: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Rechter globaler Winkel [Curvature-Methode]

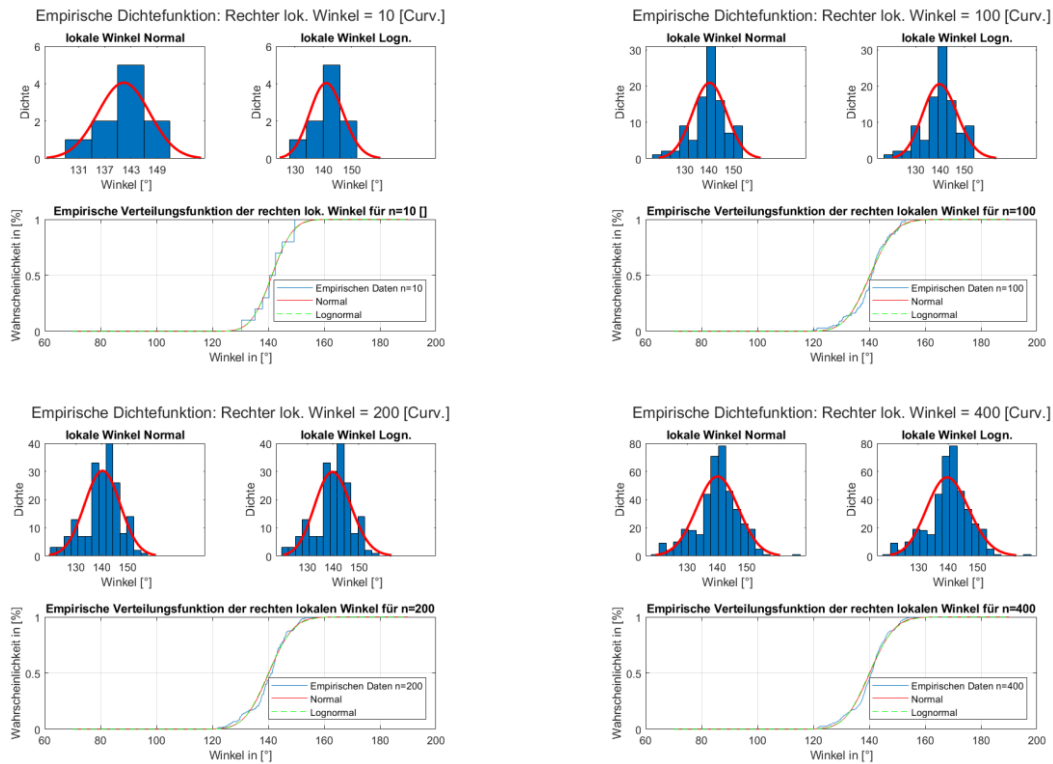


Abbildung 39: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Rechter lokaler Winkel [Curvature-Methode]

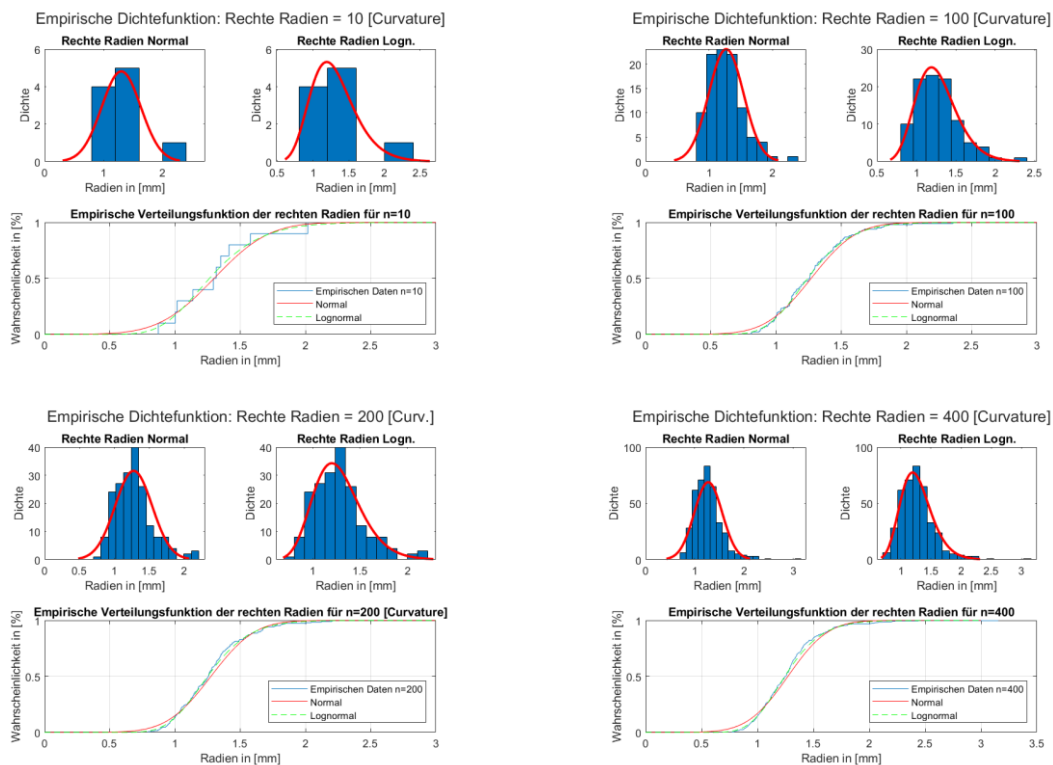


Abbildung 40: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Rechter Radius [Curvature-Methode]

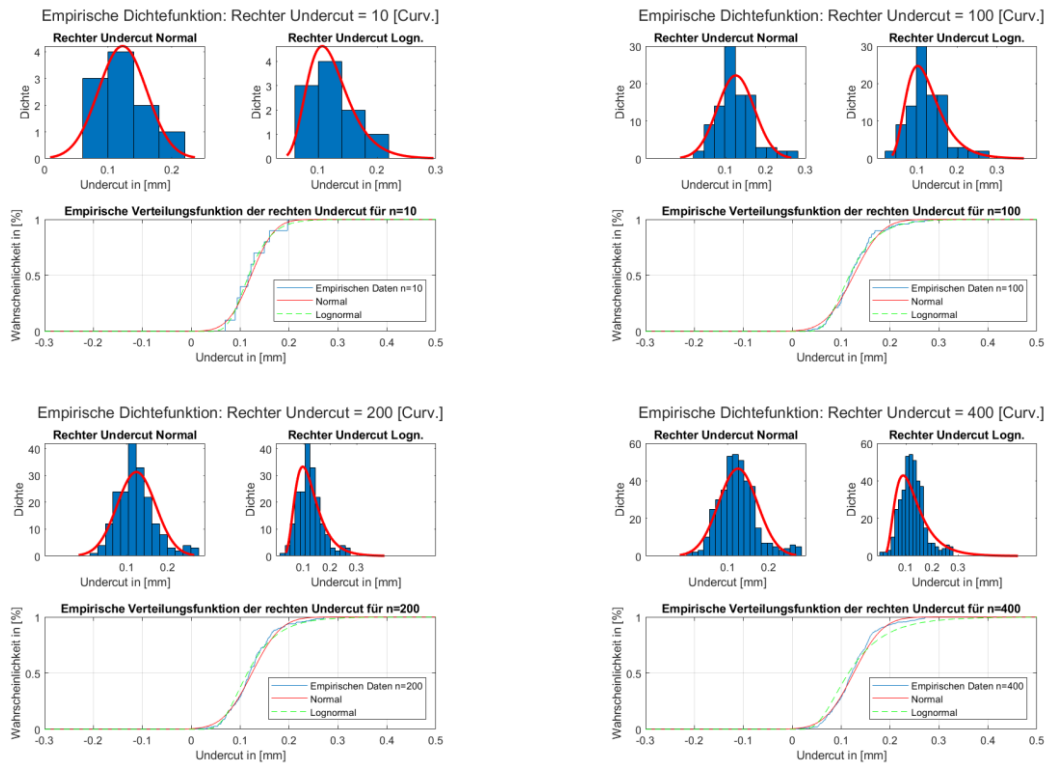


Abbildung 41: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Rechter Undercut [Curvature-Methode]

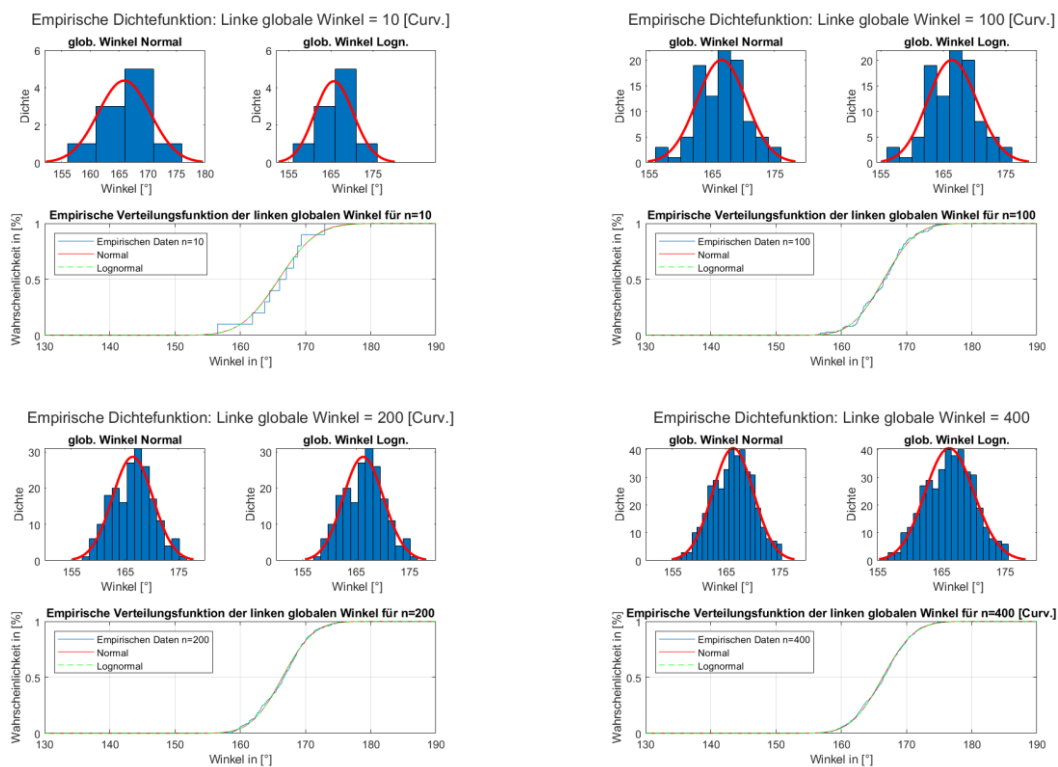


Abbildung 42: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Linker globaler Winkel [Curvature-Methode]

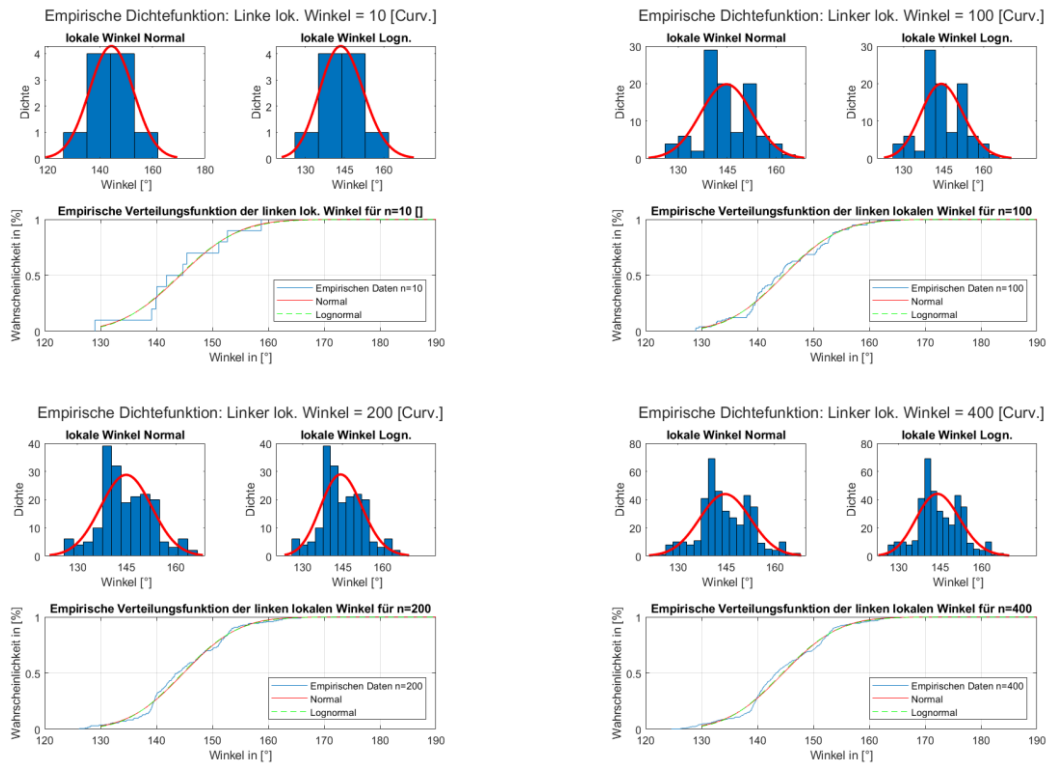


Abbildung 43: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Linker lokaler Winkel [Curvature-Methode]

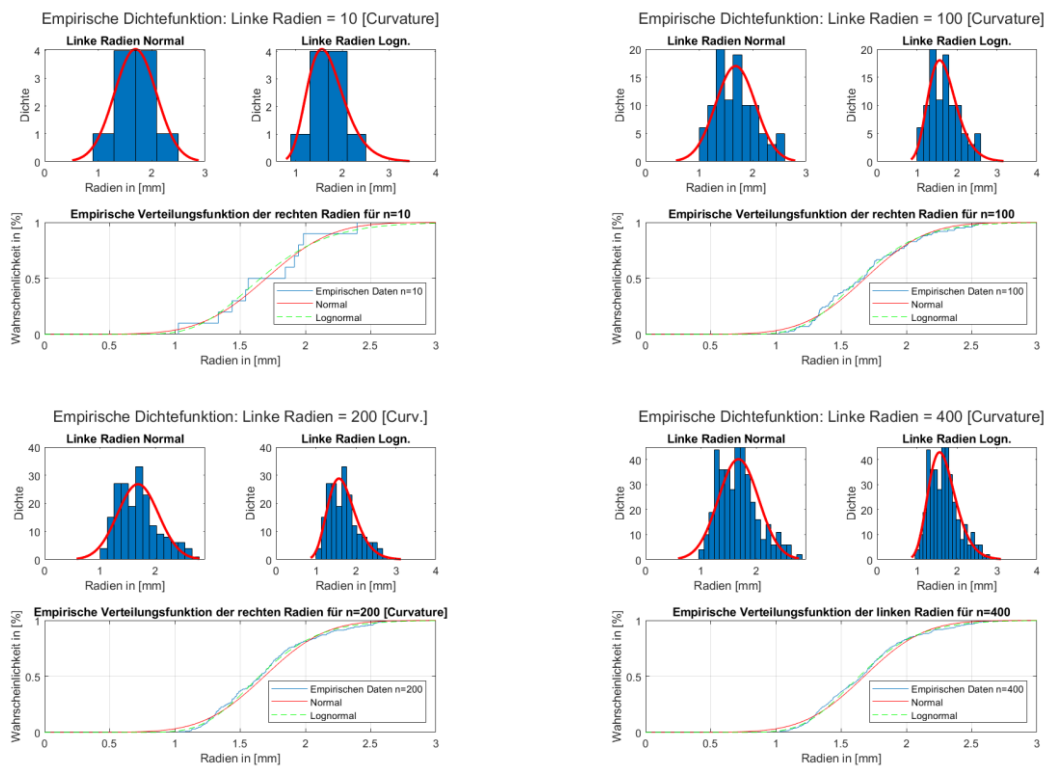


Abbildung 44: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Linker Radius [Curvature-Methode]

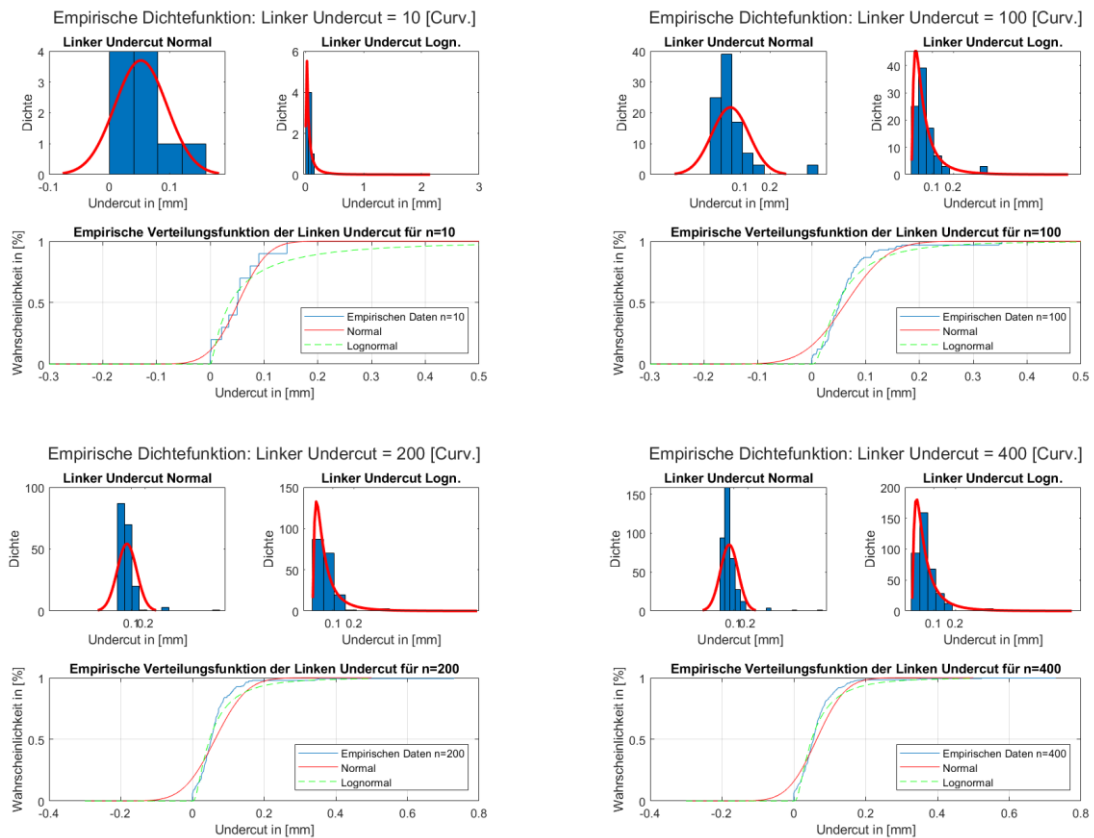


Abbildung 45: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Normal- und Lognormalverteilung: Linker Undercut [Curvature-Methode]

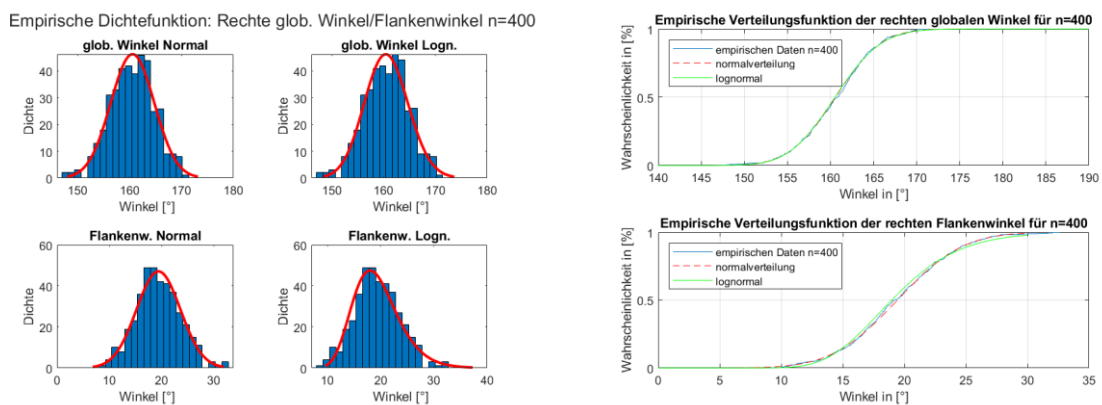
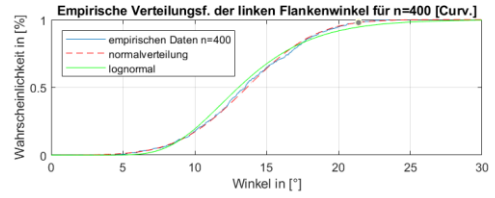
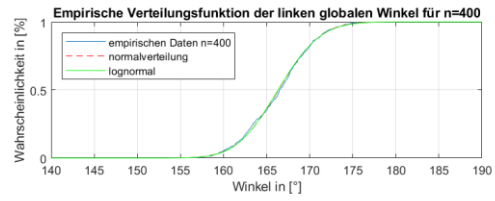
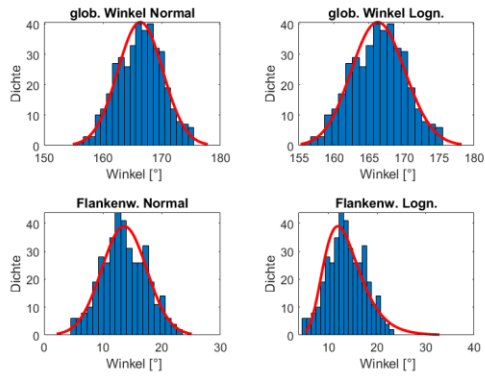


Abbildung 46: Vergleich vom rechten globalen Winkel zu Flankenwinkel

Empirische Dichtef.: Linker glob. Winkel/Flankenwinkel n=400 [Curv.]



Empirische Dichtef.: Rechte glob. Winkel/Flankenwinkel n=400 [Curv.]

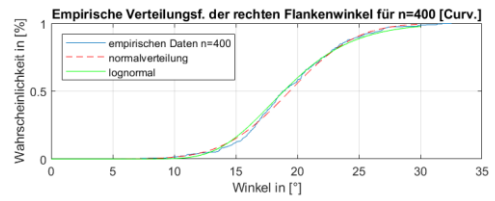
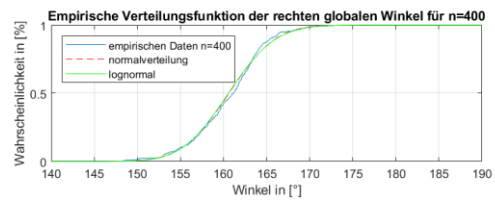
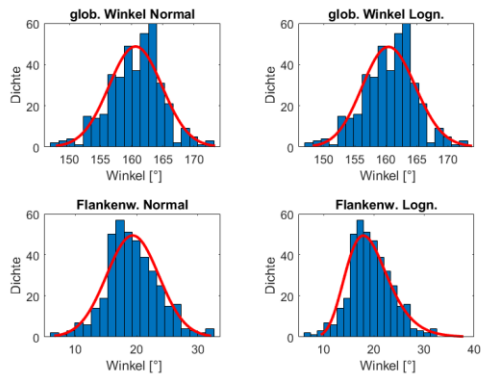


Abbildung 47: Vergleich vom globalen Winkel zu Flankenwinkel [Curvature-Methode]

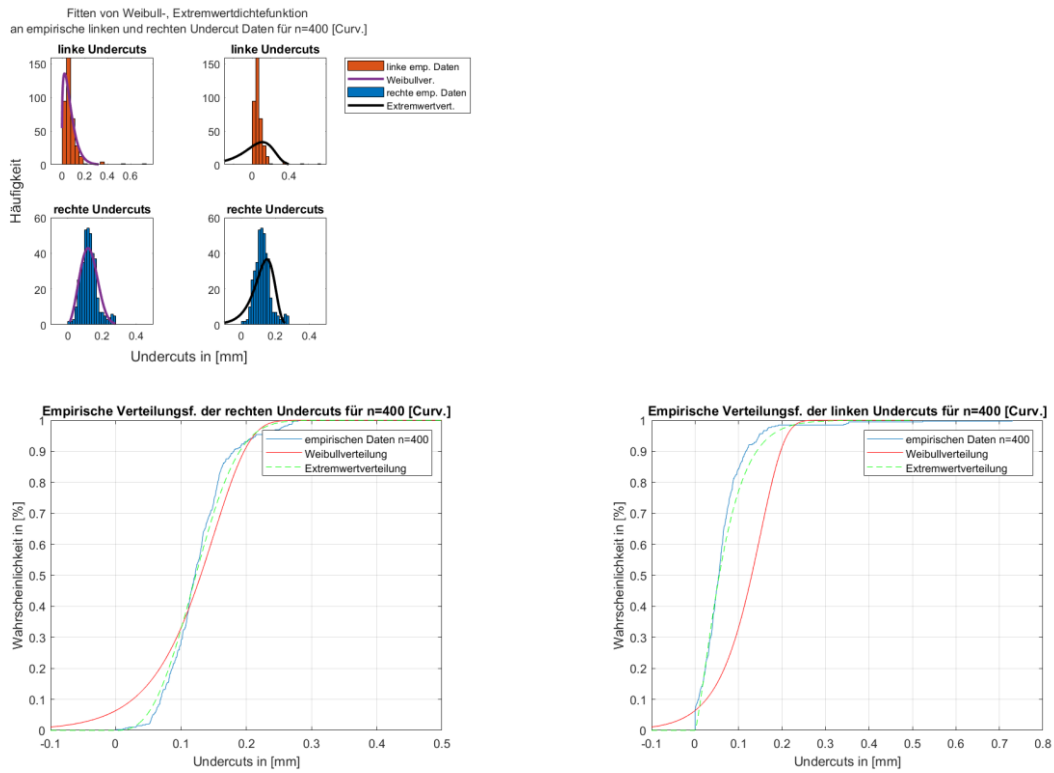


Abbildung 48: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Weibull- und Extremwertverteilung: Undercuts [Curvature-Methode]

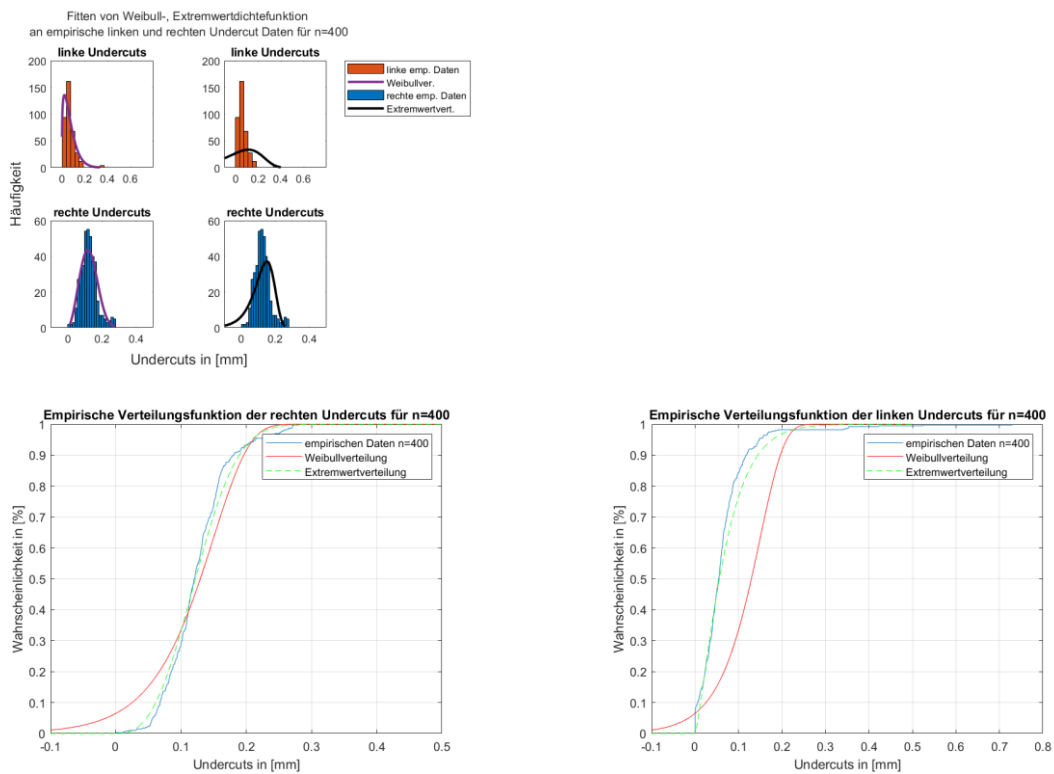


Abbildung 49: Empirische Dichte-, Verteilungsfunktion verglichen zu gefitteten Weibull- und Extremwertverteilung: Undercuts

2. Zusammenfassung der Tabellen

Tabelle 18: Hypothesentestergebnisse für Parameter: Rechter Radius

Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$ Schnittanzahl		Auswertungsmethode											
		Standard				Tangente				Curvature			
		Normal h	Lognormal h	extremwert	weibull h	Normal h	Lognormal h	extremwert	weibull h	Normal h	Lognormal h	extremwert	weibull h
n=10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
n=50	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
n=100	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1
n=150	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1
n=200	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1
n=300	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
n=400	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1

Tabelle 19: Hypothesentestergebnisse für Parameter: Rechter globaler Winkel

Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$ Schnittanzahl		Auswertungsmethode											
		Standard				Tangente				Curvature			
		Normal h	Lognormal h	extremwert	weibull h	Normal h	Lognormal h	extremwert	weibull h	Normal h	Lognormal h	extremwert	weibull h
n=10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
n=50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
n=100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
n=150	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1
n=200	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1
n=300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
n=400	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1

Tabelle 24: Hypothesentestergebnisse für Parameter: Rechter Radius

		Auswertungsmethode											
		Standard				Tangente				Curvature			
Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$	Schnittanzahl	Normal h	Lognormal h	extremwert	weibull h	Normal h	Lognormal h	extremwert	weibull h	Normal h	Lognormal h	extremwert	weibull h
	n=10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	n=50	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
	n=100	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1
	n=150	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1
	n=200	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1
	n=300	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
	n=400	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1

Tabelle 25: Hypothesentestergebnisse für Parameter: Rechter globaler Winkel

		Auswertungsmethode											
		Standard				Tangente				Curvature			
Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$	Schnittanzahl	Normal h	Lognormal h	extremwert	weibull h	Normal h	Lognormal h	extremwert	weibull h	Normal h	Lognormal h	extremwert	weibull h
	n=10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	n=50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	n=100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	n=150	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1
	n=200	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
	n=300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	n=400	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1

