
Studienarbeit

**Untersuchung der Relevanz verschiedener Einflussfaktoren
auf die Schwingfestigkeit von blecheben geschliffenen
Stumpfstößen**

Technische Universität Hamburg

Institut für Konstruktion und Festigkeit von Schiffen

Hadi Bakhschi

März 2022

Erstprüfer: Prof. Sören Ehlers

Zweitprüfer: Dr.-Ing. Moritz Braun

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Studienarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Hamburg, den 29.03.2022

Unterschrift des Prüflings

Symbolverzeichnis

a	Regressionsparameter	[-]
\hat{a}	Parameterschätzer	[-]
AD	Variable Anderson Darling Test	[-]
AD^*	Kritischer Wert Anderson Darling Test	[-]
b	Regressionsparameter	[-]
\hat{b}	Parameterschätzer	[-]
C	Lageparameter nach Basquin Gleichung	[-]
Cov	Kovarianz	[-]
D	Durchmesser	[mm]
k	Steigung nach Basquin Gleichung	[-]
k_t	Größeneinflussfaktor	[-]
k_0	Einflussfaktor der Oberflächengüte	[-]
n	Exponent nach Gurney	[-]
N	Lastspielzahl	[-]
Q_1	Unteres Quartil	[-]
Q_3	Oberes Quartil	[-]
r_{xy}	Korrelationskoeffizient	[-]
R	Grenzspannungsverhältnis	[-]
R_z	Rauheit	[μm]
S_a	Spannungsamplitude	[MPa]
s_x	Standardabweichung	[-]
σ	Lastamplitude	[MPa]
σ_a	Spannungsamplitude	[MPa]
σ_m	Zugfestigkeit	[MPa]
σ_M	Mittelspannung	[MPa]
σ_{mN}	Normalzugfestigkeit	[MPa]
σ_o	Oberspannung	[MPa]
σ_u	Unterspannung	[MPa]
σ_w	Wechselspannung	[MPa]
σ_y	Streckgrenze	[MPa]

σ_{yN}	Normalstreckgrenze	[MPa]
$\Delta\sigma_N$	Nennspannungsschwingbreite	[MPa]
t	Blechdicke	[mm]
t_0	Bezugsdicke	[mm]
u_i, u_j	Zufällige Störkomponente	[-]
w	Nahtbreite	[mm]
x_i	Unabhängige Variable	[-]
\bar{x}	Arithmetisches Mittel von x_i	[-]
y_i	Abhängige Variable	[-]
\bar{y}	Arithmetisches Mittel von y_i	[-]

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Relevante Einflussfaktoren auf die Festigkeit	4
2.1	Allgemeines	4
2.2	Besonderheiten der Schweißverbindungen bzgl. Festigkeitskennwerte	7
2.2.1	Blechdickeneffekt	7
2.2.2	Kerbeffekt	9
2.2.3	Grenzspannungsverhältnis R	11
2.2.4	Zugfestigkeit	11
2.2.5	Weitere relevante Faktoren	12
3	Statistische Auswertung	14
3.1	Datenerhebung und Aufbereitung	14
3.1.1	Explorative Datenanalyse:	14
3.1.2	Datenbereinigung:	17
3.2	Regressionsanalyse	18
3.2.1	Problemstellung	18
3.2.2	Schätzung der Regressionsparameter und der Störgrößen	19
3.2.3	Modellannahmen:	20
3.2.4	Korrelationskoeffizient	24
4	Ergebnisse und Diskussion	26
5	Ausblick	30
6	Literatur	31
7	Offizielle Aufgabenstellung	33

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Wöhlerlinie, abgewandelt nach [4]	1
Abbildung 2: Relevante Bereiche und Größen einer HY-Stumpfnah, nach [4]	2
Abbildung 3: Kenngrößen eines Schwingspiels, nach [4]	4
Abbildung 4: Grenzspannungsverhältnis und Beanspruchungsarten, nach [7]	5
Abbildung 5: Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith, nach [4]	6
Abbildung 6: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, nach [4]	7
Abbildung 7: technologischer Größeneinflussfaktor k_t nach [8]	8
Abbildung 8: Einfluss der Blechdicke auf die Schwingfestigkeit am Beispiel der Kehlnah, nach [7]	9
Abbildung 9: Dauerfestigkeit von ungeschweißter, gekerbter und geschweißter Platten aus Stahl, nach [3]	10
Abbildung 10: Wöhlerlinien von Stumpfnähten aus Schiffsbaustahl, nach [7]	10
Abbildung 11: Eigenspannungen in Nahtlängsrichtung eines Stumpsstoßes, nach [9]	11
Abbildung 12: Verteilung des Grenzspannungsverhältnisses R über $\log N$	15
Abbildung 13: Verteilung der Zugfestigkeit σ_m über $\log N$	15
Abbildung 14: Verteilung der Streckgrenze σ_y über $\log N$	16
Abbildung 15: Verteilung der Blechdicke t über $\log N$	16
Abbildung 16: Verteilung der Nahtbreite w über $\log N$	16
Abbildung 17: Allgemeiner Aufbau eines Boxplots	18
Abbildung 18: Punktwolke der logarithmierten Werte von N und $\Delta\sigma N$	19
Abbildung 19: Beliebige Beispiel für homoskedastische bzw. heteroskedastische Punktwolke, nach [22]	21
Abbildung 20: Boxplot der Residuen der linearen Regression mit 12 Ausreißer verdächtigen Beobachtungen	23
Abbildung 21: Verteilung der Residuen über logarithmierten Lastspielzahlen der Stichprobe	23
Abbildung 22: Quantil Quantil Plot der Residuen der Stichprobe, dieser zeigt nur an den Enden Abweichungen von der optimalen Normalverteilungsgerade	24
Abbildung 23: Mittlere positive Korrelation zwischen der Zugfestigkeit des Materials und den Residuen	26
Abbildung 24: Mittlere positive Korrelation zwischen der Streckgrenze des Materials und den Residuen	27
Abbildung 25: Schwache negative Korrelation zwischen des Grenzspannungsverhältnisses und den Residuen	28
Abbildung 26: Schwache negative Korrelation zwischen der Blechdicke des Materials und den Residuen	29
Abbildung 27: Schwache negative Korrelation zwischen der Nahtbreite des Materials und den Residuen	29

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gleichwertiger Durchmesser für andere Querschnitte nach [8]	8
Tabelle 2: Relevante statistische Kennzahlen der Stichprobe für die Parameter Grenzspannungsverhältnis R , Zugfestigkeit σ_m , Streckgrenze σ_y , Blechdicke t und Nahtbreite w	15
Tabelle 3: Beiwerte zur Bestimmung des kritischen AD Testes, nach [30]	22

1 Einleitung

Laut bisher vorliegenden Untersuchungen liegt das Beanspruchungsniveau beim Versagen von Bauteilen, welche zeitlich veränderlichen und häufig wiederholten Beanspruchungen ausgesetzt sind, weit unterhalb der statischen Festigkeit des Materials. Bei einer solchen dynamischen Belastung werden zunächst im Mikro- und später im Makrobereich des Bauteils zyklische plastische Verformungen hervorgerufen, welche die weitere Beanspruchbarkeit des Materials herabsetzen, Risse einleiten, diese stabil vergrößern lassen und schließlich zu einem Bruch führen. Diese Art von Werkstoff- und Bauteilversagen wird Materialermüdung genannt [1]. Während heute unter dem Begriff Betriebsfestigkeit das Festigkeitsverhalten des Materials unter allen im Betrieb auftretenden Belastungen wie z.B. die Festigkeit bei variabler Belastung, die statische Festigkeit oder die Festigkeit bei Überlasten verstanden wird, beschäftigt sich das Themengebiet der Schwingfestigkeit mit der Festigkeit von Bauteilen unter zyklischer Beanspruchung mit konstanter Amplitude [2]. Der Ablauf einer solchen Beanspruchung kann deterministisch, periodisch, aperiodisch oder aber auch zufallsbedingt sein [1]. Duktile Werkstoffe wie Stahl zeigen im Falle eines Gewaltbruches, also nach einmaliger Überschreitung der Bruchfestigkeit, große plastische Verformung und kündigen somit das Versagen des Materials praktisch an. Im Gegensatz dazu kommen Ermüdungsbrüche ohne „Vorankündigung“ nach einer bestimmten Lastspielzahl und ohne große plastische Verformungen [1]. Aus diesem Grund muss ein besonderer Fokus auf diese Art von Festigkeitsnachweis gelegt werden. Die Schwingfestigkeit dynamisch belasteter Schweißkonstruktionen lassen sich mit Hilfe von Wöhlerlinie anschaulich beschreiben. Diese zeigt den Zusammenhang zwischen Lastamplituden σ und Lastspielzahlen N und lässt sich entweder mit großem Aufwand experimentell bestimmen oder rechnerisch abschätzen. Jede Wöhlerlinie gilt für ein bestimmtes Grenzspannungsverhältnis R . Dabei kann auf der Ordinate statt der Spannungsamplitude andere Größen wie Kräfte oder Momente aufgetragen werden [3]. Wie der Abbildung 1 zu entnehmen ist, hat sich für die Wöhlerlinie die Darstellung im doppelt logarithmischen Maßstab durchgesetzt.

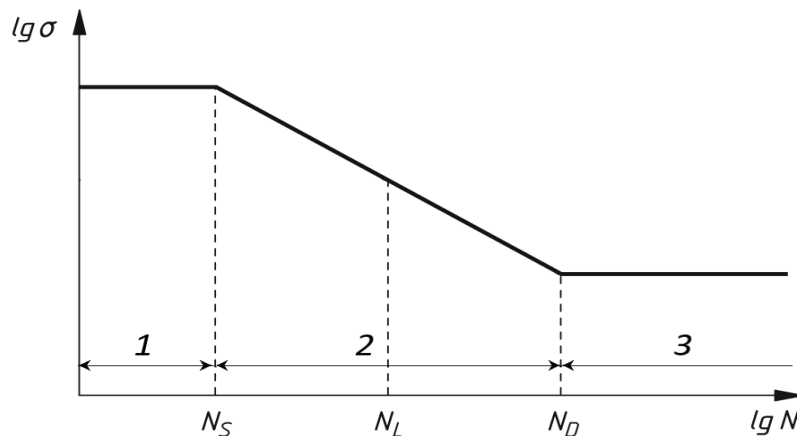


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Wöhlerlinie, abgewandelt nach [4]

In Abhängigkeit von den ertragbaren Lastspielzahlen wird zwischen Kurzzeitfestigkeit 1 (Low Cycle Fatigue LCF), Zeitfestigkeit 2 (High Cycle Fatigue HCF) und Langzeit- oder Dauerfestigkeit 3 (fatigue limit) unterschieden. Für die Lastwechselzahlen kleiner als 10^4 wird die ertragbare Schwingbreite durch einen nahezu horizontalen Verlauf der Kurzzeitfestigkeit beschrieben. Die anschließende im doppelt logarithmischen Maßstab linear abfallende Zeitfestigkeit beschreibt den gleichen

Zusammenhang für den Bereich bis zu 10^7 Lastspielwechseln. Ein Ansatz zur mathematischen Beschreibung dieses Bereiches ist die Basquin-Gleichung:

$$N = C \cdot S_a^{-k} \quad (1)$$

Dabei ist C in einer doppeltlogarithmischen Darstellung der Lageparameter, k die Steigung, S_a die Spannungsamplitude und N die Zahl der Lastspiele. Diese Exponentialgleichung stellt im doppeltlogarithmischen Verlauf einen linearen Fall dar. Der Bereich der Dauerfestigkeit schließt sich dem Bereich der Zeitfestigkeit an und beschreibt einen Spannungsamplitudenbereich, bis zu dem eine schwingende Beanspruchung beliebig oft ertragen werden kann. Er wird daher auch Schwingfestigkeitsbereich genannt [3].

Eine Schweißverbindung entsteht durch unlösbares Verbinden von Bauteilen unter Anwendung von Wärme und / oder Druck. Dabei können ebenfalls Schweißzusatzwerkstoffe verwendet werden [5]. Ein Schweißstoß ist im Allg. als Anordnung von Werkstücken oder von deren Endflächen, die geschweißt werden sollen, definiert. Die Art des Stoßes wird durch Anzahl, Abmessungen und relative Anordnung der zu verbindenden Teile zueinander bestimmt. Zu den häufigsten Stoßarten gehören vor allem Stumpfstoß, Parallelstoß, Überlappstoß, T-Stoß, Schrägstoß und Eckstoß. Ersteres bildet den Schwerpunkt dieser Arbeit, weshalb auf die Besonderheiten dieser Stoßart im Folgenden näher eingegangen wird [6]. Ein Stumpfstoß ist eine Stoßart, bei der die zu fugenden Teile idealerweise in einer Ebene liegen und die Fugeflächen stumpf gegeneinander stoßen [6]. Abbildung 2 zeigt die geometrisch relevanten Bereiche und Größen eines Stumpfstoßes am Beispiel einer HY-Naht.

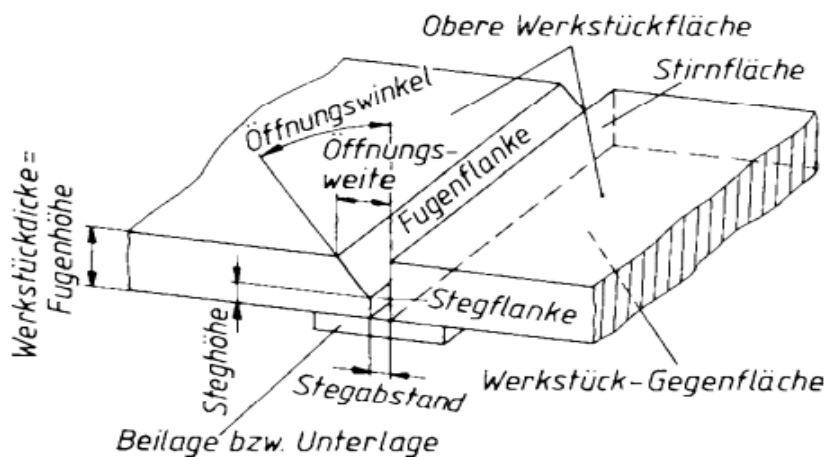


Abbildung 2: Relevante Bereiche und Größen einer HY-Stumpfnaht, nach [4]

Dabei ist die Wahl einer optimalen Fugenform von Relevanz, da diese über das Aufschmelzen der Blechkanten, das Durchschweißen der Wurzel und das Füllen des Nahtquerschnitts entscheidet und somit die späteren mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung beeinflusst. Die Wahl der geeigneten Fugenform ist im Prinzip vom Werkstoff, Blechdicke und Schweißverfahren abhängig und kann beispielsweise der Norm DIN EN ISO 9692-1 entnommen werden. Es sollte auch nicht unerwähnt bleiben, dass die Stumpfnaht bei gleicher Dicke einen glatteren Kraftfluss als die Kehlnaht aufweist und demzufolge, besonders bei dynamischer Belastung, höhere Festigkeitswerte ermöglicht. Gleichzeitig kann eine Stumpfnaht bei der Qualitätssicherung durch Röntgenstrahlen oder Ultraschallwellen leichter und sicherer auf innere Fehler geprüft werden. Insofern werden die Stumpfnahte gegenüber den Kehlnähten bevorzugt eingesetzt, sofern die Anordnung der Komponenten dies zulässt [4].

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, inwiefern Einflussfaktoren wie das Grenzspannungsverhältnis R , die Nahtgeometrie und Materialkennwerte die Schwingfestigkeit von blecheben geschliffenen Stumpfstöße beeinflussen. Für die Analyse wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Stichprobe mit insgesamt 446 Elementen aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Publikationen und Versuchen zusammengestellt. Bei den Elementen der Stichprobe handelt es sich um blecheben geschliffene Stumpfnähte aus Stahl, welche auf unterschiedlichen Spannungsniveaus dynamisch belastet wurden. Die Proben wurden für unterschiedliche Versuchszwecke hergestellt. Dementsprechend liegen in der Stichprobe unterschiedliche Prozessgrößen und Schweißverfahren sowie verschiedene Nahtgeometrien vor. Ziel dieser Arbeit ist es, die Stichprobe mithilfe von aus dem jeweiligen Versuch bekannten Parametern auf die Schwingfestigkeit zu untersuchen und spezielle Erkenntnisse für dynamisch belastete blecheben geschliffene Stumpfnähte zu gewinnen. Eine Herausforderung dabei ist, dass die Versuche bei verschiedenen Spannungen durchgeführt wurden, was eine direkte Verwendung der Daten für eine statistische Auswertung unmöglich macht. Um dies zu umgehen, wird zunächst eine lineare Regression zwischen den Nennspannungsschwingbreiten und den dazugehörigen Lastspielzahlen erzeugt und anschließend die Korrelation zwischen den Residuen und den oben genannten Einflussfaktoren untersucht.

2 Relevante Einflussfaktoren auf die Festigkeit

2.1 Allgemeines

Bei der Auslegung von Bauteilen muss stets gewährleistet sein, dass die durch äußere Belastungen hervorgerufenen inneren Beanspruchungen einen bestimmten zulässigen Wert nicht überschreiten. Diese zulässige Spannung ist im Wesentlichen von dem Werkstoff selbst, der Belastungs- und Beanspruchungsart sowie den geometrischen Gegebenheiten des Bauteils abhängig. Dazu kommen noch eventuell eine ganze Reihe weiterer Faktoren wie z.B. Bauteiltemperatur, Eigenspannungen, Werkstofffehler oder umgebungsbedingte Korrosion. Aus den äußeren Belastungen resultieren entsprechende innere Beanspruchungen im Bauteil wie z.B. Zug, Druck, Biegung oder Torsion. Beim Auftreten mehrerer Beanspruchungsarten liegt eine zusammengesetzte Beanspruchung vor. In dem Fall muss zwischen gleichartigen und ungleichartigen Spannungen unterschieden werden. Bei gleichartigen Spannungen wird aus Einzelspannungen eine resultierende Spannung berechnet und bei ungleichartigen Spannungen eine Vergleichsspannung. Die zu ermittelnde Vergleichsspannung basiert auf einer Festigkeitshypothese, welche sich wiederum aus der Fähigkeit zur Absorption mechanischer Energie bei plastischer Verformung, also aus der Zähigkeit, ergibt. Zu den Festigkeitshypothesen gehören vor allem Normalspannungshypothese für spröde Werkstoffe und Gestaltänderungsenergiehypothese für duktile Werkstoffe. Je nach Art des zeitlichen Belastungsverlaufes wird zwischen statischen und dynamischen Beanspruchungen unterschieden. Während bei statischem Verlauf die Belastung über die gesamte Zeit idealerweise konstant bleibt, ist der dynamische Belastungsverlauf generell zeitabhängig. Zur Beschreibung eines idealisierten Beanspruchungsverlaufes wird ein sogenanntes Lastspiel (auch Schwingenspiel genannt), wie in Abbildung 3 dargestellt, definiert. Das Lastspiel wird durch folgende Kennzahlen beschrieben: Oberspannung σ_o , Unterspannung σ_u , Mittelspannung σ_M und Spannungsamplitude σ_a . Zur Kennzeichnung eines dynamischen Beanspruchungsverlaufes genügen zwei dieser Kennzahlen. Es gelten folgende Zusammenhänge:

$$\sigma_a = \sigma_o - \sigma_M \text{ bzw. } \sigma_a = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{2} \quad (2)$$

$$\sigma_M = (\sigma_o + \sigma_u)/2 \quad (3)$$

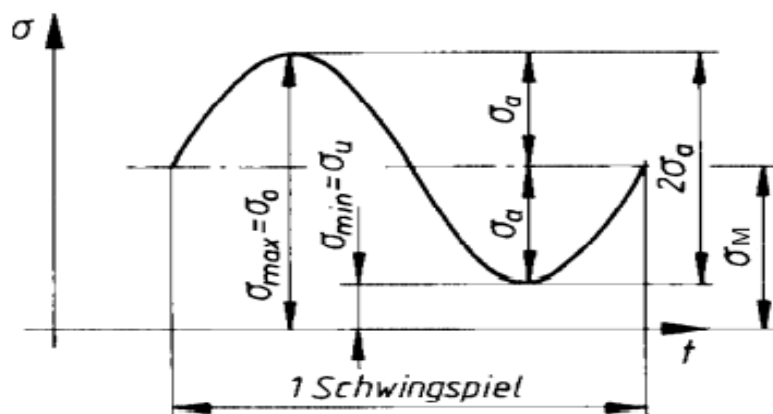


Abbildung 3: Kenngrößen eines Schwingenspiels, nach [4]

Zusätzlich wird noch die Kennzahl Grenzspannungsverhältnis $R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o}$ eingeführt. Diese gibt die Lage der Mittelspannung an und bestimmt somit die Beanspruchungsart. Es können folgende Bereiche, je nach Position der Mittelspannung, definiert werden:

- Zugschwellbereich $0 \leq R \leq +1$
- Wechselbereich $-\infty \leq R \leq 0$
- Druckschwellbereich $+1 \leq R \leq +\infty$

Abbildung 4 demonstriert diese Aufteilung:

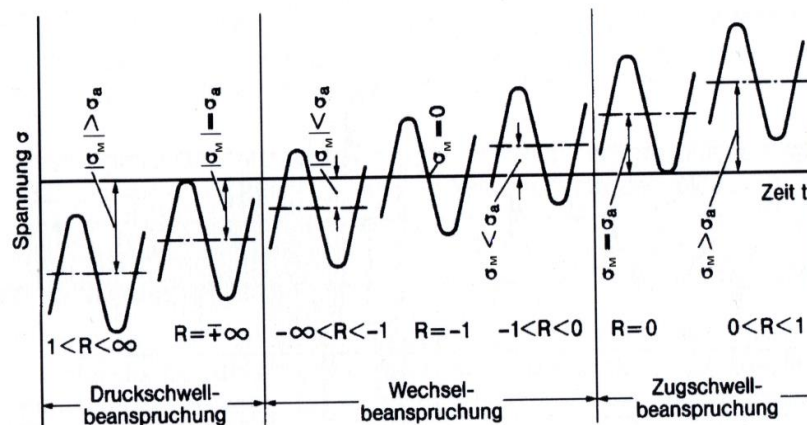


Abbildung 4: Grenzspannungsverhältnis und Beanspruchungsarten, nach [7]

Bei dem Zug- bzw. Druckschwellbereich haben σ_u und σ_o das gleiche Vorzeichen und die Mittelspannung σ_M ist positiv bzw. negativ. Der Zugschwellbereich bzw. Druckschwellbeanspruchung liegt also auf oder über bzw. unter der Spannungsnulllinie und der Bereich der Wechselbeanspruchung zeichnet sich dadurch aus, dass der Beanspruchungsverlauf die Spannungslinie schneidet. Dementsprechend haben σ_u und σ_o verschiedene Vorzeichen und die Mittelspannung σ_M kann positiv, negativ oder Null sein. In der Praxis werden viele Versuche bei reiner Zugschwellbeanspruchung $R = 0$ oder reiner Wechselbeanspruchung $R = -1$ durchgeführt [7].

Wie in Kapitel 1 beschrieben wird in der Praxis die Wöhlerkurve oft in doppelt logarithmischen Maßstab (linear) dargestellt. Die Ermittlung der Betriebsfestigkeit der Bauteile im realen Einsatz ist häufig mit großem Aufwand verbunden. Da diese oft stark variierenden Belastungsintensitäten und -frequenzen ausgesetzt sind, müssen für eine exakte Vorhersage der Lebenserwartung oft Erfahrungswerte oder Simulationsmethoden verwendet werden. Folglich werden Bauteile, welche zeitlich veränderlichen Belastungen unterworfen sind, meist auf Dauerfestigkeit ausgelegt. Dauerfestigkeit kann mit Hilfe von diversen Schaubildern wie z.B. Smith Diagramm dargestellt werden. Dieses zeigt die Dauerfestigkeit eines bestimmten Werkstoffes in Abhängigkeit von der Mittelspannung. Auf der x-Achse wird die Mittelspannung und auf der y-Achse die ertragbare Amplitude aufgetragen. Dabei muss die maximal ertragbare Amplitude für eine dauerfeste Auslegung innerhalb der abgebildeten Kontur liegen. Diese wird von einer maximal zulässigen Spannung, in der Regel der Streckgrenze, nach oben hin begrenzt. Die Streckgrenze ist bekanntlich eine werkstoffabhängige Größe, welche die maximale mechanische Spannung angibt, bis zu der ein Werkstoff elastisch verformbar ist. Da eine Überschreitung der Streckgrenze zu plastischen Verformungen führen würde und das Bauteil somit beschädigt und nicht mehr dauerhaft wäre, ist die

Annahme der Fließgrenze als maximal zulässige Spannungsamplitude sinnvoll. Das Smith Diagramm findet vor allem im Bereich des allgemeinen Maschinenbaus bevorzugt Verwendung. Eine präzise Darstellung solcher Schaubilder kann basierend auf einer Vielzahl von experimentell abgeleiteten Wöhlerlinien erfolgen. Diese Methode ist jedoch mit großem experimentellem und finanziellem Aufwand verbunden. Allerdings lassen sich die Dauerfestigkeitsschaubilder, wie in Abbildung 5 dargestellt, mit wenigen bekannten charakteristischen Werkstoffkennwerten graphisch konstruieren [4].

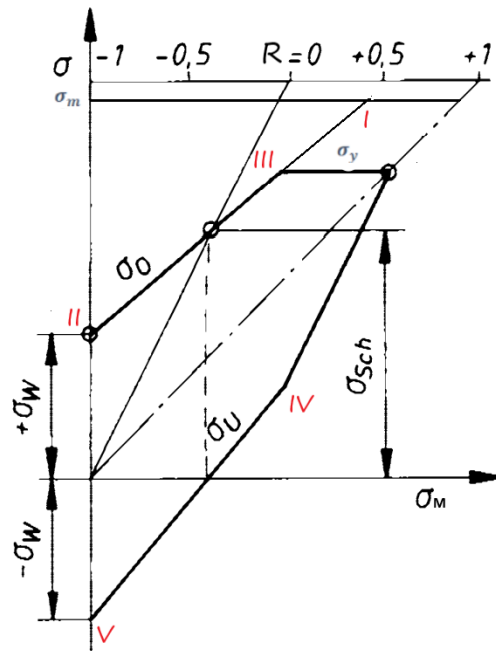


Abbildung 5: Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith, nach [4]

Für die graphische Konstruktion des Dauerfestigkeitsschaubildes nach Smith werden zunächst Zugfestigkeit σ_m und Streckgrenze σ_y als Horizontale ins Diagramm eingezeichnet. Während der Wert der Zugfestigkeit hier als reine Konstruktionshilfe dient, stellt die Streckgrenze die obere Abgrenzung des zulässigen Bereiches für die Dauerfestigkeit dar. In einem nächsten Schritt wird eine 45° Linie in das Diagramm gezeichnet. Von deren Schnittpunkt mit der Zugfestigkeit wird die halbe Wechselfestigkeit $\frac{\sigma_w}{2}$ abgetragen. Dieser Punkt I wird linear mit dem Wert der Wechselfestigkeit σ_w auf der y-Achse verbunden, Punkt II. Somit ergibt sich zusammen mit der horizontalen der Streckgrenze die Begrenzung der Oberspannung. Für den unteren Bereich des Smith Diagrammes muss die Amplitude am Schnittpunkt des bisherigen Verlaufes mit der Streckgrenze an der 45° Linie (Punkt III) in die negative Richtung gespiegelt werden. Dies ergibt einen neuen Punkt (Punkt IV) für den unteren Verlauf. Dieser wird mit dem negativen Wert der Wechselfestigkeit σ_w und dem Schnittpunkt der 45° Linie mit der Streckgrenze (Punkt V) verbunden. Damit schließt sich die Kontur wieder.

Anhand des Smith Diagramm kann für jede Mittelspannung $\sigma_M \geq 0$ die maximal ertragbare Amplitude für eine dauerfeste Auslegung abgelesen werden, ohne aufwendige Wöhlerexperimente durchführen zu müssen. Das oben dargestellte Smith Diagramm kann für wechselnde oder schwellende Beanspruchungen angewendet werden. Der Wechselnde Bereich reicht von $\sigma_M = 0$ bis zum Nulldurchgang der Kontur. Der Schwellbereich geht vom Nulldurchgang bis zur horizontalen Projektion der Kontur auf die x-Achse. Aus dem Smith Diagramm lässt sich für eine bekannte Mittelspannung die

zulässige Ober- und Unterspannung, sowie die Schwell- bzw. Wechselfestigkeit ablesen. Es ist noch relevant zu erwähnen, dass es sich für jede Belastungsart, Biegung-, Torsion- oder Zugbelastung und einen entsprechenden Werkstoff ein unterschiedliches Smith Diagramm ergibt. Des Weiteren kann dem Smith Diagramm entnommen werden, dass die ertragbare Spannungsamplitude mit zunehmender Mittelspannung herabgesetzt wird. Dementsprechend wird die betragsmäßig größte Amplitude bei einer Mittelspannung von Null $\sigma_M = 0$, also einer reinen Wechselbeanspruchung $R = -1$ erreicht. Alternativ zum Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith können je nach Anwendungsgebiet andere Schaubilder wie z.B. GOODMAN oder HAIGH Diagramm verwendet werden.

2.2 Besonderheiten der Schweißverbindungen bzgl. Festigkeitskennwerte

In diesem Kapitel wird auf besondere Merkmale von Schweißverbindungen, welche die Dauerfestigkeit des Bauteils beeinflussen eingegangen.

2.2.1 Blechdickeneffekt

Die Kenntnis über das Werkstoffverhalten bei der Auslegung eines Bauteils ist grundlegend wichtig. Dieses wird bei einer statischen Kurzzeitbeanspruchung anhand des Zugversuchs an einem idealen Probestab (glatt, poliert, meist $D = 10$ mm) beschrieben. Das Resultat dieses Versuchs wird meist in einem Spannungs-Dehnungsdiagramm (SD-Diagramm), welches die elastischen und plastischen Formänderungen sowie den statischen Gewaltbruch darstellt, festgehalten. Wie in Abbildung 6 zu erkennen ist, zeigt das SD-Diagramm je nach Material bzw. Stahlsorte eine mehr a) oder weniger ausgeprägte Fließgrenze b).

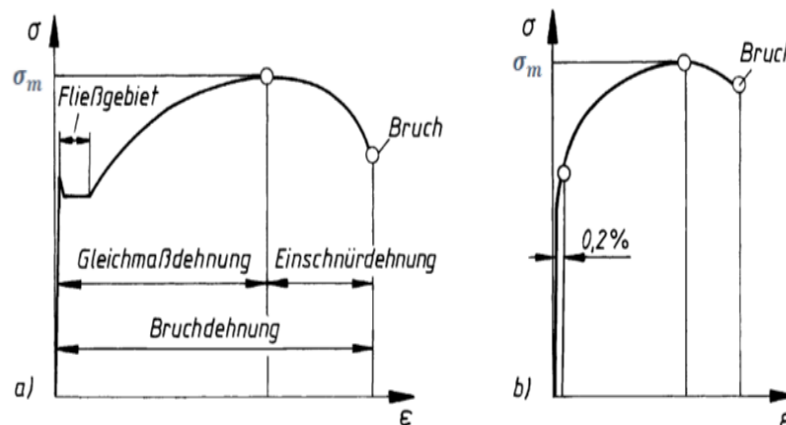


Abbildung 6: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, nach [4]

Rein elastische Verformungen treten unterhalb der maximalen Streckgrenze σ_{yN} . In diesem Bereich gilt ebenfalls das Hooksche Gesetz, welches die Proportionalität der Verformung eines Festkörpers zu der entsprechend einwirkenden Belastung beschreibt. Oberhalb dieser Grenze treten neben den elastischen Formänderungen auch plastische Verformungen auf. Mit zunehmender Dehnung erreicht die Kurve einen Maximalwert bei der Zugfestigkeit σ_{mN} , danach beginnt die Einschnürung des Materials bis der statische Gewaltbruch eintritt. Allerdings müssen hierbei die Normfestigkeitswerte σ_{mN} und σ_{yN} für die von Norm abweichenden Bauteile durch einen Größeneinflussfaktor k_t umgerechnet werden.

Dieser Faktor k_t ist neben dem Bauteildurchmesser ebenso von der Stahlsorte und den damit einhergehenden mechanischen Eigenschaften abhängig und soll den Festigkeitsabfall mit zunehmender Bauteilgröße berücksichtigen. Es gilt für das Bauteil:

$$\sigma_m = k_t \cdot \sigma_{mN} \quad (4)$$

$$\sigma_y = k_t \cdot \sigma_{yN} \quad (5)$$

Da k_t nur Werte kleiner als 1 annehmen kann, wird der tatsächliche bauteilbezogene Wert für Zugfestigkeit σ_m und Streckgrenze σ_y stets kleiner sein als die Normfestigkeitswerte σ_{mN} und σ_{yN} . Abbildung 7 illustriert, dass k_t mit zunehmender Bauteilgröße (-durchmesser) bis zu einem bestimmten Durchmesser abfällt und schließlich einen horizontalen Verlauf zeigt.

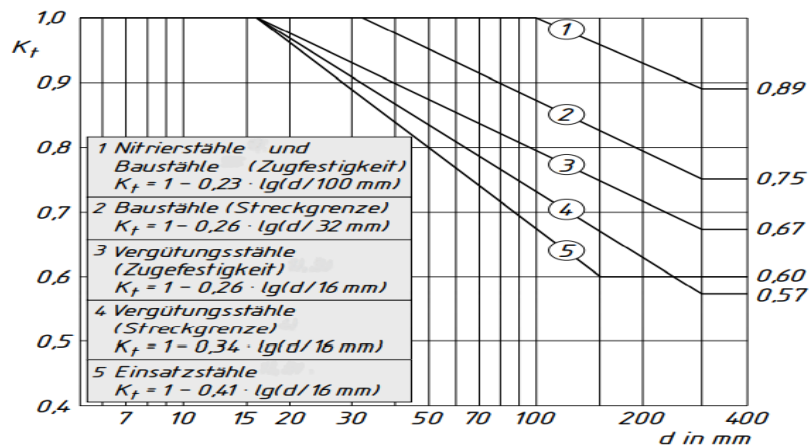


Abbildung 7: technologischer Größeneinflussfaktor k_t nach [8]

Für andere Bauteilquerschnitte wird je nach Legierungszusammensetzung, Gefügestruktur und Herstellungsverfahren ein gleichwertiger Durchmesser definiert. Tabelle 1 zeigt einige Beispiele.

Tabelle 1: Gleichwertiger Durchmesser für andere Querschnitte nach [8]

Form des Querschnitts					
$d = {}^1)$	d	t	t	b	t
$d = {}^2)$	d	$2t$	$2t$	b	$\frac{2b \cdot t}{b+t}$

¹⁾ Für unlegierte Baustähle, Feinkornstähle, normalgeglühte Vergütungsstähle und Stahlguss.

²⁾ Für vergüteten Vergütungsstahl, Einsatzstahl, Nitrierstahl, Vergütungsstahlguss, GJS, GJL, GJMB, GJMW, Schmiedestücke.

Die oben beschriebene Abhängigkeit der Festigkeitskenngrößen Zugfestigkeit σ_m und Streckgrenze σ_y von der Bauteilgröße bzw. von dessen Durchmesser und Form kann ebenfalls auf Schweißverbindungen und insbesondere auf blecheben geschliffene Stumpfnahte übertragen werden. Dementsprechend ist bei einem geschweißten Stumpfstoß der gleichwertige Durchmesser entweder die Blechdicke oder die doppelte Blechdicke, wobei dies von der Legierungszusammensetzung,

Herstellverfahren und Gefügestruktur abhängig ist (Siehe Tabelle 1) [4]. Der gleichwertige Durchmesser bzw. die Blechdicke einer Schweißverbindung hat ebenfalls bei zeitlich veränderlichen Belastungen einen negativen Einfluss auf das Werkstoffverhalten. Mit steigender Blechdicke sinkt die Schwingfestigkeit. Dieser Zusammenhang kann anhand folgender mathematischer Formel, von GURNEY (1982), beschrieben werden:

$$\Delta\sigma_R(t) = \Delta\sigma_R\left(\frac{t_0}{t}\right)^n \quad (6)$$

wobei t die Dicke des Blechs und t_0 eine Bezugsdicke zwischen 16 und 32 mm ist. Der Exponent beträgt laut Gurney $n = 0,25$. In der Zeitfestigkeitszone bei doppelt logarithmischem Maßstab verschieben sich die entsprechenden Geraden mit gleicher Steigung weiter nach unten und illustrieren damit, dass mit zunehmender Blechdicke und gleichbleibender Spannungsschwingbreite immer weniger Lastspiele bis zum endgültigen Bruch nötig sind. Die Schweißverbindung bei größeren Blechdicken versagt früher als bei dünneren Blechen. Abbildung 8 zeigt diesen Zusammenhang am Beispiel einer Kehlnaht.

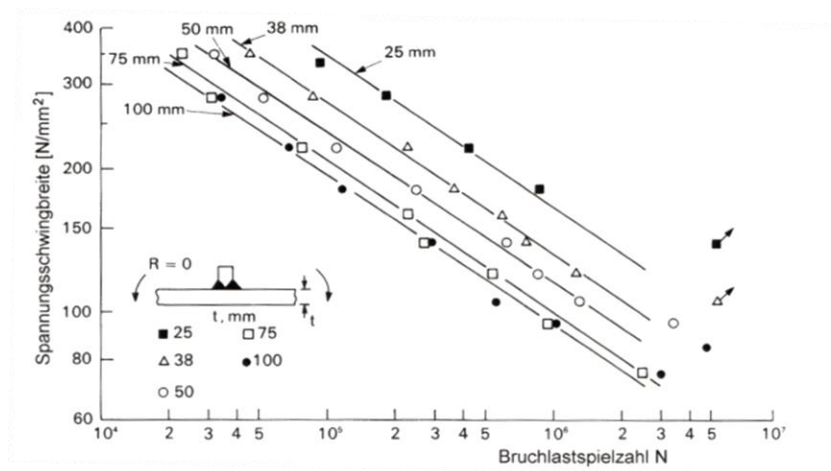


Abbildung 8: Einfluss der Blechdicke auf die Schwingfestigkeit am Beispiel der Kehlnaht, nach [7]

Diese Feststellung hängt damit zusammen, dass das Verhältnis aus Kerbradius zu Plattendicke bei größeren Blechdicken kleiner ist. Dies führt zu einer höheren Spannungsspitze und somit zu einem früheren Anriss im Werkstoff. Außerdem herrschen im Bereich des Nahtübergangs hohe Zugeigenspannungen, welche das Risswachstum beschleunigen und so zu einem früheren Materialversagen führen [7].

Der weiter oben beschriebene Größeneinflussfaktor k_t und der Ausdruck nach GURNEY $\left(\frac{t_0}{t}\right)^n$ nehmen beide definitionsbedingt einen Wert an, welcher kleiner als eins ist. Deshalb liegen die tatsächlichen bauteilbezogenen Festigkeitswerte bzw. Nennspannungsschwingbreiten unterhalb dem Norm- bzw. Referenzwert. Somit kann der negative Effekt der Blechdicke analog zum negativen Effekt der Bauteilgröße berücksichtigt und der Ausdruck nach GURNEY als ein spezieller Fall des Größeneinflussfaktors k_t für Dauerfestigkeit dynamisch belasteter Schweißverbindungen betrachtet werden.

2.2.2 Kerbeffekt

Wie bereits erwähnt ist die Gleichmäßigkeit der Spannungsverteilung im Bauteilquerschnitt für die Dauerfestigkeit entscheidend. Diese Verteilung ist sowohl von äußeren Belastungen als auch von den

Querschnittsveränderungen des Bauteils selbst, den sogenannten konstruktiven Kerben an Bohrungen, Nuten, Einstiche u.a. abhängig. Diese Kerben verdichten die Kraftlinien und benachteiligen deren Fluss. Folglich kommt es an diesen Stellen zur Spannungserhöhungen, wobei die Kerbform bei der Höhe der Spannungsspitze eine entscheidende Rolle spielt. Je schärfer die Kerbe, umso größer die Spannungskonzentration und somit ihre festigkeitsmindernde Wirkung. Parallel kann eine Schweißverbindung prinzipiell als eine Kerbe betrachtet werden, welche die Dauerfestigkeit der Schweißkonstruktion abmindert. Diese Abminderung führt zu Änderungen bei der entsprechenden Wöhlerlinie. Wie in den Abbildungen 9 und 10 zu erkennen ist, verläuft in der Zeitfestigkeitszone die Kurve einer Schweißverbindung steiler als die des Grundwerkstoffes und in der Dauerfestigkeitszone liegt die Kurve unter der des Grundwerkstoffes. Durch einen Vergleich der Abbildungen 9 und 10 wird deutlich, dass ein gleichartiger Verlauf für eine gekerbte Probe festgestellt werden kann.

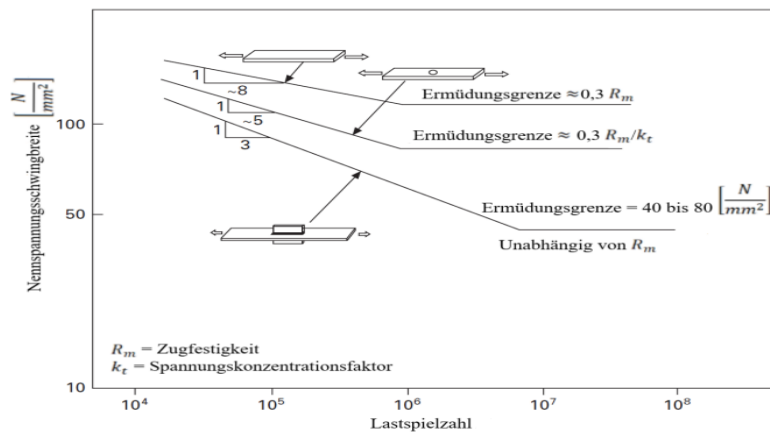


Abbildung 9: Dauerfestigkeit von ungeschweißter, gekerbter und geschweißter Platten aus Stahl, nach [3]

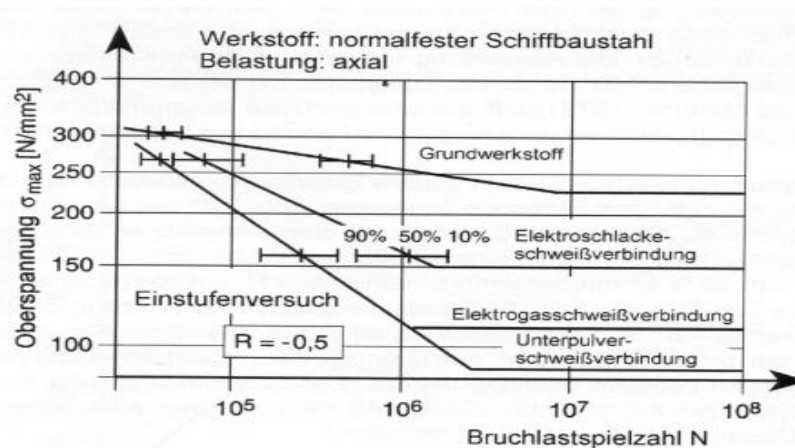


Abbildung 10: Wöhlerlinien von Stumpfnähten aus Schiffbaustahl, nach [7]

Aus der Abbildung 9 lässt sich ebenfalls ablesen, dass die Kurve der geschweißten Probe steiler als die der gekerbten Probe verläuft. Das hängt damit zusammen, dass die geschweißte Probe zusätzlich zur harten Änderung der Geometrie am Nahtübergang eine Inhomogenität der Gefügestruktur in der Wärmeeinflusszone infolge unterschiedlicher Abkühlbedingungen beim Schweißvorgang mit sich bringt. Die Änderung der Mikrostruktur in der Wärmeeinflusszone kann aufgrund ihres negativen Einflusses auf die Festigkeit als eine Art werkstoffmechanische Kerbe betrachtet werden. Die Effekte der konstruktiven und werkstoffmechanischen Kerbe überlagern sich zum Nachteil der Festigkeit und

fungieren als eine scharfe Kerbe. Dies zeigt sich in Form einer steileren und nach unten versetzten Kurve in Abbildung 9.

2.2.3 Grenzspannungsverhältnis R

Das Grenzspannungsverhältnis R bestimmt die Lage der Mittelspannung σ_M und gibt somit Auskunft darüber, ob eine Belastung im Zug-, Wechsel- oder Druckbereich liegt. In der Literatur wie z.B. von OLIVER UND RITTER (1979) wird von einem geringen Einfluss von R auf die Schwingfestigkeit ausgegangen. Dies wird damit begründet, dass die aus dem Schweißprozess resultierenden Zugeigenspannungen an kritischen Stellen derart hoch sind, dass sie in der Regel die Streckgrenze des Werkstoffes erreichen, siehe Abbildung 11. Der überlagerte Spannungszyklus der äußeren Belastung und des inneren Spannungsfeldes liegen also meist unabhängig vom R -Wert im Zugbereich. Aus diesem Grund wird im Regelwerk der R -Einfluss geschweißter Verbindungen auf die Schwingfestigkeit nur mit großer Vorsicht berücksichtigt.

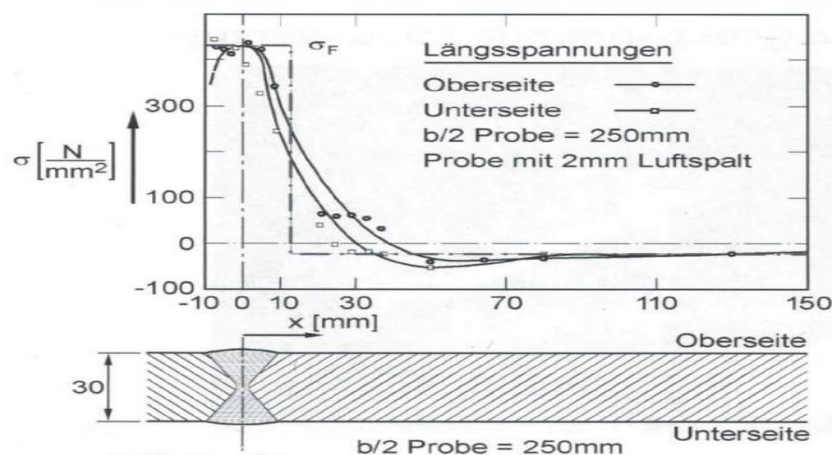


Abbildung 11: Eigenspannungen in Nahtlängsrichtung eines Stumpsstoßes, nach [9]

In der für diese Arbeit verwendeten Stichprobe wurden die Versuche größtenteils entweder bei reiner Zugschwellbeanspruchung oder bei reiner Wechselbeanspruchung durchgeführt. Mit Berücksichtigung der Schweißeigenspannungen kann man davon ausgehen, dass der Belastungszyklus im Zugbereich liegen müsse und somit das Grenzspannungsverhältnis R einen geringen Einfluss auf die Festigkeit haben werde. In Kapitel 4 wird unter anderem die Richtigkeit dieser Annahme mit Hilfe von statistischen Methoden geprüft.

2.2.4 Zugfestigkeit

Ein weiterer ähnlicher Fall kann bei der Zugfestigkeit des Werkstoffes beobachtet werden. Es lässt sich möglicherweise intuitiv vermuten, dass eine höhere Materialfestigkeit mit einer hohen Schwingfestigkeit einhergehen müsse. Ergebnisse zahlreicher Studien berichten allerdings von einem nur geringen Festigkeitsunterschied zwischen zwei unterschiedlich festen Schweißverbindungen aus Stahl [7]. Das hängt im Wesentlichen mit der hohen Spannungskonzentration am Nahtübergang zusammen. Eine solche Spannungsspitze kann im ungünstigsten Fall zusätzlich durch eine weitere Imperfektion (z.B. einen Schweißspritzer am Nahtübergang) in ihrer Kerbwirkung verstärkt werden. In diesem Fall ergibt sich aufgrund der extrem hohen Spannungen eine sehr kurze Rissbildungsphase, fast unabhängig von Materialfestigkeit. Der anschließende Risswachstumswiderstand und somit auch die Festigkeit ist bei beiden Stählen ähnlich. Außerdem gibt es für ultrahochfeste Stähle keine

gleichwertigen Zusatzwerkstoffe, weshalb diese mit einem Werkstoff geringerer Festigkeit geschweißt werden müssen [3].

2.2.5 Weitere relevante Faktoren

Oberflächenbeschaffenheit im Nahtbereich

Der Anfang eines Dauerbruches ist oft die Oberfläche des Bauteils, da bei dynamisch belasteten Bauteilen dort die höchste Spannung auftritt. Kleine Rauheiten auf der Bauteiloberfläche wirken im Prinzip wie kleine Kerben, welche zu Spannungsspitzen führen und somit die Dauerfestigkeit vermindern. Die Oberflächengüte wird durch den Einflussfaktor der Oberflächenrauheit K_o erfasst. Dieser beträgt bei feinstbearbeiteten Oberflächen ($1 \mu m \leq R_z \leq 1,6 \mu m$) 1 und hat somit keinen negativen Einfluss auf die Dauerfestigkeit. Bei einer schruppbearbeiteten Oberfläche kann K_o Werte von ca. 0,5 erreichen und somit eine 50-prozentige Minderung der Dauerfestigkeit allein durch den Oberflächeneinfluss hervorrufen. Außerdem nimmt der Einfluss der Oberflächengüte mit steigender Materialfestigkeit zu. Das heißt je höher die Festigkeit, umso größer der negative Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Dauerfestigkeit [4]. Diese Erkenntnis lässt sich in gewisser Weise auf Schweißverbindungen übertragen. Je milder der Nahtübergang vom Grundwerkstoff zur Naht, umso günstiger der Kraftfluss und umso höher die Dauerfestigkeit der Verbindung. Der optimale Kraftfluss kann dabei bei blecheben geschliffenen Proben erreicht werden, da diese keine Nahtüberwölbung, Wurzeldurchhang und Spritzer im Nahtbereich aufweisen. Somit kann bei dieser Art von Nachbehandlung eine ganze Reihe von Schweißimperfectionen, welche sich im Prinzip wie Kerben auf die Festigkeit auswirken, beseitigt werden. Vor diesem Hintergrund wird nach IIW (engl.: International Institute of Welding) für blecheben geschliffene Stumpfnähte eine FAT Klasse¹ von 112 angenommen. Dies ist zugleich die höchste FAT Klasse für transversal belastete Stumpfnähte [3].

Oberflächenverfestigung und Temperatur

Neben den oben erläuterten Einflüssen haben auch die Oberflächenverfestigung, die Umgebung und die Temperatur einen Einfluss auf die Dauerfestigkeit. So kann sich die Verfestigung des Werkstoffes an der Oberfläche z.B. durch aufgebrachte Druckspannung in dieser Zone positiv auf die Dauerfestigkeit auswirken. Ein aggressives umgebendes Medium kann hingegen die Festigkeit verringern. Auch die Temperatur kann die Dauerfestigkeit bedeutend beeinflussen. Mit steigender Temperatur nimmt die Dauerfestigkeit ab und niedrigere Temperaturen führen zur höheren Dauerfestigkeitswerten [10].

Schweißimperfectionen und Schweißfehler

Auch die Schweißnahtfehler und -imperfectionen können die Schwingfestigkeit maßgebend herabsetzen. Es sind vor allem die üblichen Imperfectionen wie Poren, Risse, Bindefehler, Schlackeneinschlüsse, Nahtüberhöhung, Kantenversatz und Winkelschrumpfung, welche sich prinzipiell wie eine Kerbe auf die Schweißkonstruktion auswirken, das Spannungsbild an der Schweißverbindung benachteiligen und zu einer niedrigeren Dauerfestigkeit führen [4].

Ferner empfiehlt sich für ein besseres Verständnis, auf die zahlreichen Vorarbeiten von BRAUN (2021) und weiteren Co-Autoren (Siehe [24] bis [27]) auf dem Gebiet des Tieftemperatureffektes auf die

¹ IIW (engl.: International Institute of Welding) definiert die Nennspannungsschwingbreite in MPa für 95%ige Überlebenswahrscheinlichkeit des Bauteils bzw. der Probe bei einer Lastspielzahl von 2×10^6 als entsprechende FAT Klasse.

Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen sowie nachbehandelter und Geometrie-optimierter Schweißverbindungen zu verweisen.

3 Statistische Auswertung

3.1 Datenerhebung und Aufbereitung

Es sind insgesamt 514 Datensätze aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Veröffentlichungen im Rahmen dieser Arbeit zusammengefügt worden. Diese Daten stammen aus unabhängigen Experimenten mit jeweils verschiedenen Zwecken und Rahmenbedingungen. Nichtsdestotrotz handelt es sich bei allen Daten um blecheben geschliffene Stumpfstöße. Je nach Veröffentlichung wurde der Fokus auf unterschiedliche Dinge gelegt und deshalb verfügt jeder Datensatz über bestimmte Parameter, welche dann auch als Output des Versuchs aufgenommen wurden. In dieser Arbeit wird auf folgende fünf Parameter, welche eventuell einen Einfluss auf die Schwingfestigkeit der Stumpfstöße haben, näher eingegangen. Zum einen wird das Spannungsverhältnis R als eine einstellbare Prozessgröße näher betrachtet und zum anderen wird der Einfluss der Schweißnahtbreite w und der Blechdicke t als geometrische Gegebenheiten des Schweißnahtprofils, sowie der Zugfestigkeit σ_m und der Streckgrenze σ_y als Werkstoffkennzahl genauer unter die Lupe genommen. Von den insgesamt 514 erhobene Daten sind bei 446 Daten alle oben genannten Parameter bekannt. Somit besteht die für die Auswertung verwendete Stichprobe aus 446 Elementen, von denen jedes Element die fünf obigen Parameter enthält.

3.1.1 Explorative Datenanalyse:

Zunächst wird auf all diese Daten eine explorative Datenanalyse durchgeführt, um die wichtigsten Kennzahlen zur Beschreibung dieser Daten in eine Tabelle zu verdichten. Die wichtigsten Kennzahlen sind vor allem das arithmetische Mittel und die Standardabweichung. Das arithmetische Mittel ist die Datensumme geteilt durch die Anzahl der Daten. Wenn wir die Daten mit x_1, x_2, \dots, x_n bezeichnen, wird das arithmetische Mittel traditionsgemäß mit \bar{x} symbolisiert und lässt sich formell wie folgt berechnen: [11]

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (7)$$

Die Standardabweichung ist als die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung der Daten von ihrem arithmetischen Mittel definiert und stellt ein Maß für die Streuung der Daten um ihren arithmetischen Mittelwert dar. Die Formel zur Berechnung der Standardabweichung lautet: [11]

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (8)$$

Ferner stellt das Quadrat der Standardabweichung s_x^2 eine weitere wichtige Kennzahl, welche Varianz genannt wird. Sie wird als die mittlere quadratische Abweichung einer reellen Zufallsvariable um ihren Erwartungswert definiert und gibt ein Maß für die Streuung der Wahrscheinlichkeitsdichte um ihren Schwerpunkt an. Mit Hilfe von dem größten und kleinsten Wert kann die Spannweite, der Median, welcher eine aufsteigend geordnete Datenreihe in zwei Hälften aufteilt sowie das untere und das obere Quartil, Q_1 und Q_3 . Die Quartile werden ebenfalls für aufsteigend geordnete Datenreihe bestimmt. Ein Viertel der Daten liegt unterhalb und drei Viertel der Daten oberhalb des unteren Quartils Q_1 . Q_3 teilt die Daten umgekehrt in drei Viertel unterhalb und ein Viertel oberhalb des oberen Quartils [11].

Tabelle 2 zeigt die oben genannten statistischen Kennzahlen für die zur Verfügung stehende Stichprobe. Diese besteht aus 446 Datenzeilen, wobei jede Zeile Informationen über das Spannungsverhältnis R , die Streckgrenze σ_y , die Zugfestigkeit σ_m , die Blechdicke t , die Schweißnahtbreite w sowie den logarithmierten Wert der Lastspielzahl $\log N$ und der Nennspannungsschwingbreite $\log \Delta\sigma_N$ beinhaltet und sich auf einen bestimmten blecheben

geschliffenen Stumpfstoß bezieht. Der gesamte Datensatz kann in Form einer Tabelle dem Anhang der Arbeit entnommen werden. Anschließend zeigen Abbildungen 12 bis 16 die Streuung einzelner Parameter über den logarithmierten Lastspielzahlen $\text{Log } N$.

Tabelle 2: Relevante statistische Kennzahlen der Stichprobe für die Parameter Grenzspannungsverhältnis R , Zugfestigkeit σ_m , Streckgrenze σ_y , Blechdicke t und Nahtbreite w

	Min	Max	Spannweite	Median	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
R [-]	-1,00E+00	2,00E+00	3,00E+00	0,00E+00	-2,04E-01	4,93E-01	2,44E-01
σ_m [MPa]	4,03E+02	9,00E+02	4,97E+02	6,10E+02	6,55E+02	1,76E+02	3,11E+04
σ_y [MPa]	2,36E+02	8,50E+02	6,14E+02	4,36E+02	5,03E+02	2,01E+02	4,05E+04
t [mm]	7,00E+00	6,30E+01	5,60E+01	1,50E+01	1,68E+01	1,02E+01	1,04E+02
w [mm]	1,50E+01	1,01E+02	8,64E+01	3,50E+01	4,35E+01	2,63E+01	6,95E+02

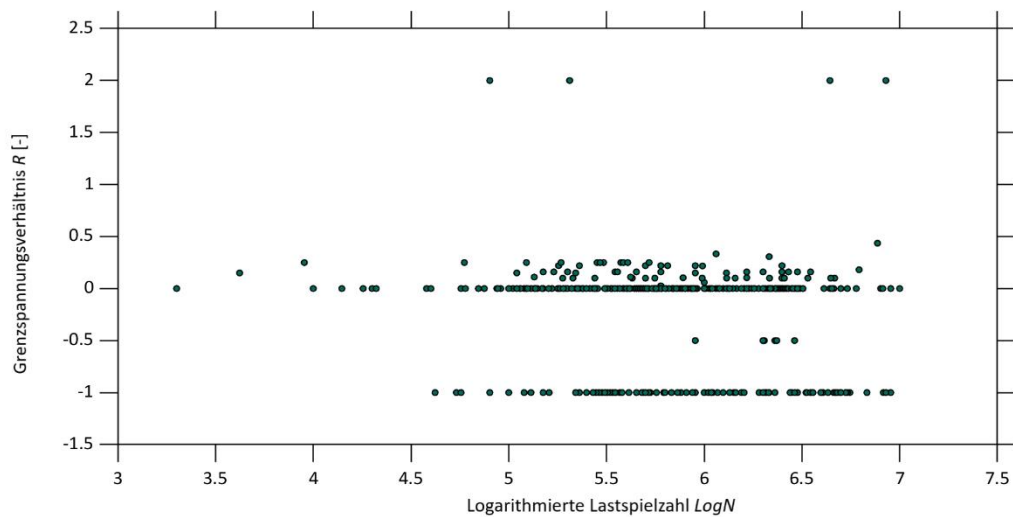


Abbildung 12: Verteilung des Grenzspannungsverhältnises R über $\text{Log } N$

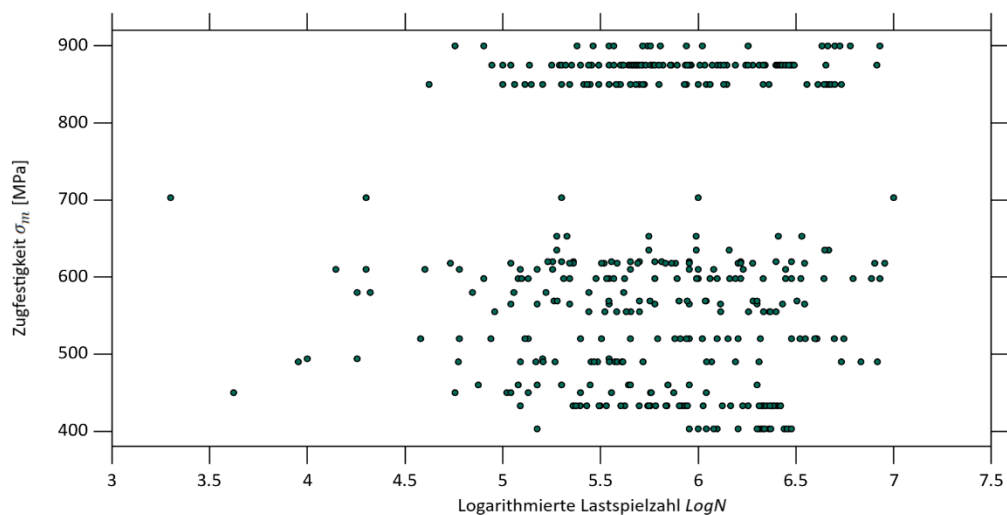


Abbildung 13: Verteilung der Zugfestigkeit σ_m über $\text{Log } N$

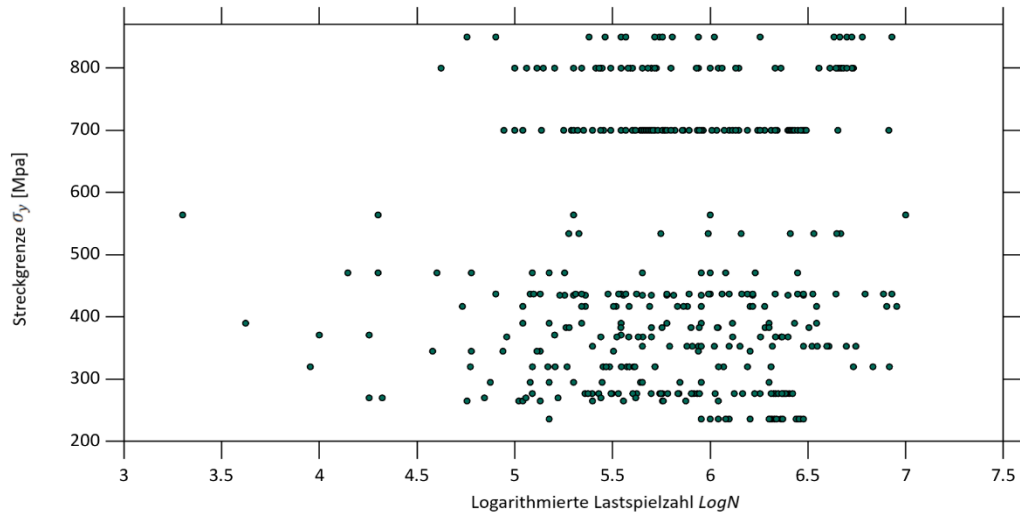


Abbildung 14: Verteilung der Streckgrenze σ_y über $\text{Log} N$

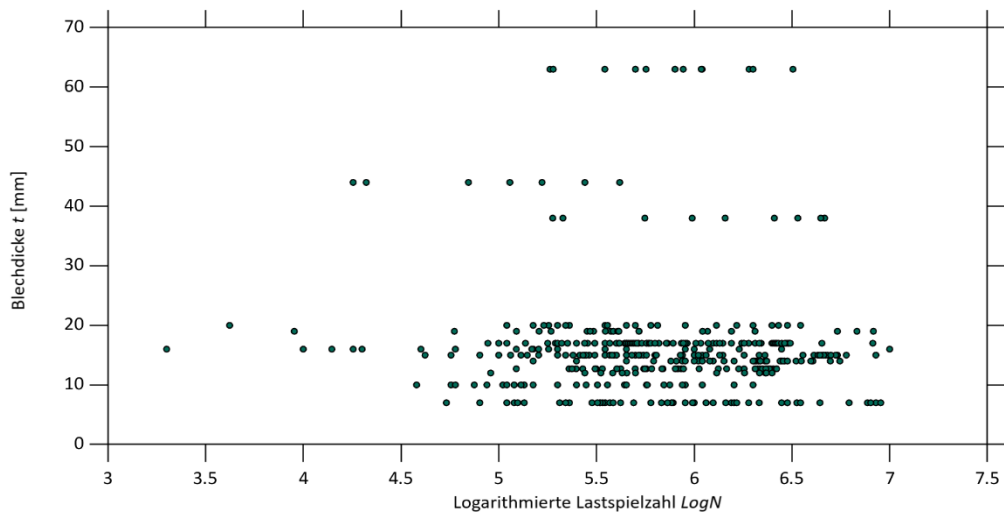


Abbildung 15: Verteilung der Blechdicke t über $\text{Log} N$

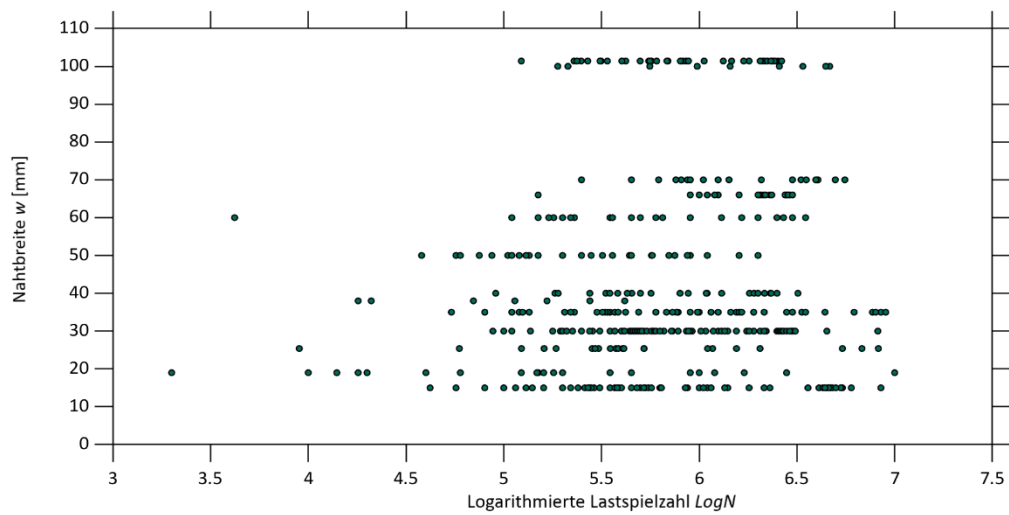


Abbildung 16: Verteilung der Nahtbreite w über $\text{Log} N$

3.1.2 Datenbereinigung:

Ausreißer können statistische Auswertungen negativ beeinflussen, in dem sie deren Ergebnisse verzerren. Deshalb ist es von großer Bedeutung mögliche Ausreißer bei der Modellierung aus der Stichprobe zu entfernen. Eine einheitliche Definition für Ausreißer hat sich bislang nicht durchgesetzt. Im Allgemeinen wird unter einem Ausreißer eine Beobachtung verstanden, welche unter einer gewissen Modellannahme mit dem Großteil der Beobachtungen unvereinbar scheint. Es wird also vermutet, dass dem Ausreißer ein abweichender datengenerierter Prozess zugrunde liegt. Die Identifikation und Entfernung der Ausreißer ist für die weitere Auswertung relevant, weil diese Art von Beobachtungen durch Messfehler erzeugt sein können und somit die Robustheit der Parameterschätzer für das lineare Regressionsmodell negativ beeinflussen. Des Weiteren können Ausreißer wertvolle Hinweise auf bisher nicht beachtete Phänomene und falsche Modellannahmen liefern und somit die wichtigsten Beobachtungen in der Stichprobe sein. In der Literatur gibt es je nach Dimension des betrachteten Datensatzes vielfältige Möglichkeiten zur Ausreißeranalyse. Dazu gehören unter anderem das Konzept von α -Ausreißer bei bekannter Verteilungsfamilie, welches erstmals 1989 von DAVIES und GATHER für normalverteilte Daten definiert wurde. Liegen die Daten in Form von Kontingenztafeln², so eignet sich das sogenannte Minimalmusterverfahren. Dieses Verfahren basiert auf loglinearen Poissonmodell, in dem die Einträge der Kontingenztafel als Zielgrößen fungieren und die Designmatrix anhand der Dimension der Kontingenztafel und der Abhängigkeitsstruktur der Merkmale konstruiert wird. Die Verfahren zur Identifikation von Ausreißern sind sehr vielfältig und vor allem zeitaufwendig. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit keine formalen Kriterien zur Identifikation von Ausreißern angewendet. Stattdessen wird, wie oft in der Praxis, das statistische Tool „Boxplot“ zur Datenvisualisierung und Ausreißeridentifikation eingesetzt [12].

Ein Boxplot ist die graphische Darstellung eines Datensatzes, welcher aus Messungen einer einzelnen Variable besteht. Der Boxplot besteht in der Regel aus vier Segmenten, welche durch ein Minimum, 25. Perzentil, Median, 75. Perzentil und ein Maximum bestimmt werden. Der Median stellt in einer aufsteigend geordneten Datenreihe den mittleren Wert also das 50. Perzentil dar und besitzt somit wie das 25. und das 75. Perzentil eine eindeutige Position in der Verteilung eines Datensatzes. Anders ist es bei den Methoden zur Bestimmung des minimalen bzw. des maximalen Wertes in einem Boxplot. Diese Extremwerte, oft auch Whisker genannt, können beispielsweise den absoluten Minimal- bzw. Maximalwert einer Datenreihe darstellen oder willkürlich anders definiert sein [13]. Bei der für diese Arbeit verwendeten Software, Matlab R2021b, wird die Position der Whisker durch die Multiplikation der Boxlänge mit 1,5 bestimmt, wobei sich die Boxlänge aus der Differenz des 75. und 25. Perzentils berechnen lässt und auch als Interquartilsabstand bezeichnet wird. Dieser gibt an, wie groß das Intervall ist, in dem sich die mittleren 50% der Stichprobenelemente befinden. Abbildung 17 zeigt die fünf charakteristischen Größen zur Beschreibung eines Boxplots. Beobachtungen jenseits der Whisker sind Ausreißer verdächtig und werden als rote Kreuze dargestellt. Ein Boxplot kann sowohl horizontal als auch vertikal orientiert sein.

Da in der Stichprobe die Versuche bei unterschiedlichen Spannungsschwingbreiten durchgeführt wurden, kann der Einfluss der Nennspannungsschwingbreite nicht direkt untersucht werden. Um den Einfluss anderer Parameter auf die Schwingfestigkeit zu durchleuchten, wird zunächst den Einfluss der Nennspannungsschwingbreite eliminiert. Dazu wird ein lineares Regressionsmodell zwischen Nennspannungsschwingbreiten und dazugehörigen Lastzyklen gebildet und die Residuen des linearen Regressionsmodells ermittelt. In einem nächsten Schritt wird der Einfluss einzelner Faktoren auf diese Residuen untersucht [10].

² Kontingenztafeln stellen die absoluten oder relativen Häufigkeiten von Kombinationen mehrerer Merkmale tabellarisch dar.

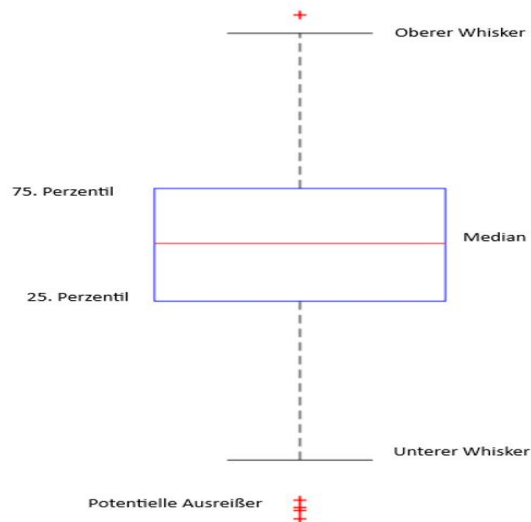


Abbildung 17. Allgemeiner Aufbau eines Boxplots

Eine wichtige Voraussetzung für die Annahme eines linearen Modells ist die Normalverteilung der Stichprobe, in dieser Arbeit ist also die Normalverteilung der Residuen die Voraussetzung für eine lineare Regression. Es bestehen diverse Möglichkeiten, um eine Stichprobe auf Normverteilung zu testen. Dazu gehören beispielsweise KOLMOGOROW SMIRNOW Test, CRAMER VON MISES Test und ANDERSON DARLING (AD) Test. All diese Verfahren folgen dem Ansatz, die Abweichung der Häufigkeitsverteilung einer Stichprobe von einer gegebenen hypothetischen Wahrscheinlichkeitsverteilung zu bestimmen. Anderson Darling Test stellt sich jedoch im Vergleich als akkurateres Verfahren heraus, da dieser für den Normalitätstest bestimmte kritische Werte verwendet. Die genaue Beschreibung dieses Testverfahrens nach AD sowie die Bildung des linearen Regressionsmodells wird im folgenden Kapitel erläutert.

3.2 Regressionsanalyse

3.2.1 Problemstellung

Regressionsanalyse ist ein Instrument der statistischen Analyseverfahren, mit dem Ziel, den Einfluss einer oder mehrerer unabhängigen Variablen auf eine abhängige Variable zu untersuchen und eventuelle Zusammenhänge zu quantifizieren oder die Werte der abhängigen Variable zu prognostizieren. Eine besondere Form der Regression ist die einfache lineare Regression, welche den Einfluss einer unabhängigen Variable (Regressor) auf eine abhängige Zielvariable (Regressand) modelliert. Ziel der einfachen linearen Regression ist es, den Achsenabschnitt und Steigung der Regressionsgeraden sowie die Varianz der Störgröße zu schätzen. Das Konzept der linearen Einfachregression geht von zwei metrischen Größen aus: einer Einflussgröße und einer Zielgröße. Des Weiteren müssen möglichst viele Werte vorliegen, welche untereinander in einem Zusammenhang stehen. Idealerweise bestünde dieser Zusammenhang aus einem rein systematischen Teil $f(x_i) = a + bx_i$. In der Realität ist dieser jedoch ebenfalls mit zufälligen und unsystematischen Fehlern behaftet. Dieser Teil wird mit u_i bezeichnet und fließt in die Formel der einfachen linearen Regression mit ein: $y_i = f(x_i) + u_i = a + bx_i + u_i$. Wobei y_i die abhängige Variable, x_i die unabhängige Variable, a und

b die reellen unbekanntenen Regressionsparameter und u_i die zufällige Störkomponente darstellen. Bevor es zur tatsächlichen Modellierung geht, soll ein grobes Bild der Daten erstellt werden. Dazu werden die Wertpaare (x_i, y_i) , also die logarithmierten Werte der Lastspielzahlen $\text{Log } N$ und der Nennspannungsschwingbreiten $\text{Log } \Delta\sigma_N$ in einem Diagramm eingetragen. Es ergibt sich eine Punktwolke, welche auch Streudiagramm genannt wird. Die grobe Form des Streudiagramms gibt eventuell Grund zur Annahme, ob eine mögliche lineare Regression in Frage kommt. Für die Stichprobe dieser Arbeit sieht es einer Ellipse mit negativer Steigung ähnlich aus und lässt somit einen linearen Zusammenhang zwischen $\text{Log } N$ und $\text{Log } \Delta\sigma_N$ vermuten, Siehe Abbildung 18.

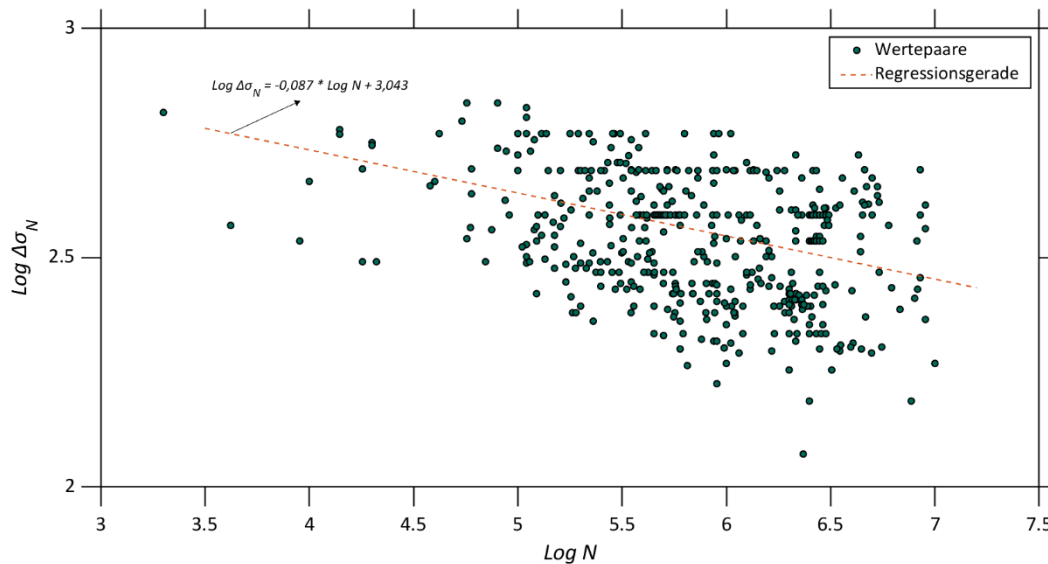


Abbildung 18: Punktwolke der logarithmierten Werte von N und $\Delta\sigma_N$

Dem Streudiagramm kann ebenfalls entnommen werden, dass der Zusammenhang nicht nur aus systematischem Teil, sondern auch aus einem stochastischen Teil besteht, welcher durch beispielsweise Messfehler, Fehler der menschlichen Komponente (Prüfer) bei der Versuchsdurchführung und vor allem durch die Variabilität der Prüfkörper zustande kommen kann. Dies erscheint im Streudiagramm in Form von Streuung um die Regressionsgerade (rot gestrichelte Linie). Mit anderen Worten lässt sich sagen, dass ohne jegliche zufälligen Fehler, also in einem rein deterministischen Fall, lägen alle Datenpunkte auf der Regressionsgerade. Damit kann weiterhin von einem linearen Regressionsmodell ausgegangen werden [14].

3.2.2 Schätzung der Regressionsparameter und der Störgrößen

Um die unbekanntenen Regressionsparameter zu bestimmen wird die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Die Kernaussage dieser Strategie besteht darin, große Abweichungen der Modellfunktion von den Daten stärker zu gewichten als die Kleinen [15]. Demzufolge gilt eine Gerade als die Beste, deren Koeffizienten folgende Funktion minimieren:

$$\sum_{i=1}^n u_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \quad (9)$$

Mit Hilfe von Verfahren zur Bestimmung von Extremwerten ergeben sich dann folgende Ausdrücke zu Ermittlung der Regressionsparameter:

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

$$\text{und } \hat{a} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x} \quad (11)$$

Das Dachzeichen symbolisiert eine Schätzung. Nach dem \hat{a} und \hat{b} bekannt sind, kann auch die Störkomponente u_i durch folgende Funktion geschätzt werden:

$$\hat{u}_i = y_i - \hat{a} - \hat{b}x_i \quad (12)$$

Für die Stichprobe betragen die Parameterschätzer $\hat{a} = 3,043$ und $\hat{b} = -0,087$.

3.2.3 Modellannahmen:

Wie üblich in der Modellierung, gibt es auch hier Annahmen, welche über die Güte des Modells entscheiden und daher von großer Relevanz sind. Diese beziehen sich sowohl auf die Regressionsparameter als auch auf die Störgröße, auch Residuum genannt. Zu den Annahmen der unabhängigen Variable gehört, dass diese deterministisch sein muss, sie kann also in einem Experiment kontrolliert werden. Diese Eigenschaft wird auch Exogenität der Regressoren genannt. Eine weitere Annahme für die unabhängige Variable ist, dass die Realisierung dieser Variable in ihrer Stichprobe variiert und nicht gleich ist. Dies impliziert, dass die Summe der Abweichungsquadrate positiv $\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ sein muss. Diese Annahme wird im weiteren Verlauf der Schätzung benötigt. Eine dritte Annahme, welche sowohl für die abhängige als auch für die unabhängige Variable gilt, ist, dass die Regressionsgleichung durch einen linearen Zusammenhang mit Hilfe von a und b wie folgt beschrieben werden können: $y_i = a + bx_i + u_i$. Die Ausdrücke x_i und y_i können jedoch selbst nicht lineare Terme enthalten [14].

Auch in Bezug auf die Störgröße werden mehrere Annahmen getroffen. Die erste Annahme lautet, dass der Erwartungswert der Störgrößen Null sein muss. Das bedeutet, dass die einzelnen Störgrößen zwar schwanken, die Schwankungen jedoch in der Gesamtheit der Stichprobe ausgeglichen werden müssen. Demzufolge ergibt sich ein lineares Regressionsmodell, welches im Mittel der tatsächlichen Beziehung entspricht. Wäre der Erwartungswert der Störgröße nicht gleich Null, würde man im Mittel einen verzerrten Zusammenhang schätzen. Die zweite Annahme wird Homoskedastizität genannt. Unter diesem Begriff wird eine konstante Varianz der Störgröße verstanden. Die Begründung dieser Annahme liegt darin, dass eine nicht konstante Varianz mit Hilfe von Modellen beschrieben werden könnte und somit mit der Definition der Störgröße, welche besagt, dass diese grundsätzlich durch zufällige Faktoren beeinflusst werden, in einem Widerspruch stünde. Diese beiden Annahmen lassen sich am einfachsten und effektivsten graphisch prüfen. Dazu werden die Regressionswerte \hat{y}_i auf der x-Achse und die entsprechenden Residuen auf der y-Achse aufgetragen. Wenn die Residuen ohne ein bestimmtes Muster in einer konstanten Bandbreite um die x-Achse schwanken, kann von einer konstanten Varianz ausgegangen werden. Eine Heteroskedastizität liegt vor, wenn sich die Residuen eher durch eine asymmetrische Form abbilden, welche sich in eine Richtung öffnet, Siehe Abbildung 19. Eine quantitative Methode zur Prüfung dieser Annahme ist der BREUSCH PAGAN Test. Die ausführliche Beschreibung dieser Methode sowie die weitere Vorgehensweise bei Heteroskedastizität kann in [16] nachgelesen werden [11].

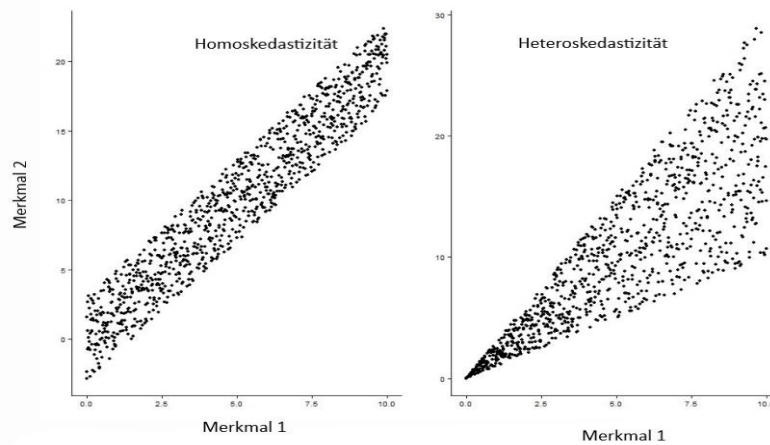


Abbildung 19: Beliebiges Beispiel für homoskedastische bzw. heteroskedastische Punktwolke, nach [22]

Eine weitere wichtige Annahme über die Störgrößen lautet, dass diese voneinander unabhängig sein müssen. Wären die Störgrößen in irgendeiner Weise voneinander abhängig, könnte diese Abhängigkeit modelliert werden und die Störgrößen wären nicht länger unsystematisch. Mathematisch betrachtet muss die Kovarianz zweier verschiedenen Störgrößen u_i und u_j Null sein: $Cov(u_i, u_j) = 0$ für $i \neq j$. Auch die Existenz dieser Eigenschaft lässt sich durch die Variabilität der Residuen in einem annähernd konstanten Feld um die x-Achse prüfen. Eine Korrelation zwischen den einzelnen Störkomponenten kann ein Hinweis auf eine Nichtlinearität oder auf einen nicht beachteten Regressor sein. Diese Art von Korrelation wird Autokorrelation genannt und kann mit Hilfe des DURBIN WATSON Testes quantitativ überprüft werden. Die letzte Annahme über die Residuen lautet, dass deren Stichprobe aus einer Normalverteilung stammen. Auch hier lässt sich die Richtigkeit dieser Modellannahme sowohl graphisch mittels des sogenannten QQ Plots (Quantil-Quantil-Plot) oder auch rechnerisch mit Hilfe von ANDERSON DARLING Test überprüfen.

Da die verwendeten Daten für diese Arbeit aus verschiedenen Quellen herkommen und demzufolge die Ermüdungsversuche bei unterschiedlichen Spannungsniveaus durchgeführt worden sind, können diese nicht direkt für die statistische Auswertung benutzt werden. Aus diesem Grund wird zunächst geprüft, ob eine lineare Regression zwischen Lastspielzahlen und Nennspannungsschwingbreiten existiert. Eine Voraussetzung dafür ist, dass die gesamte Stichprobe normal- bzw. logarithmisch normalverteilt sein muss. Im weiteren Verlauf wird diese Annahme als Nullhypothese H_0 bezeichnet. Die Alternativhypothese H_1 lautet dementsprechend: Die Beobachtungen der Stichprobe stammen nicht aus einer Normalverteilung. Um die Stichprobe auf Normalverteilung zu testen, werden sowohl graphische Methoden als auch statistische Verteilungstests angewendet.

Eine Möglichkeit zur quantitativen Normalitätsprüfung ist der ANDERSON DARLING (AD) Test. Dieser ist benannt nach den amerikanischen Mathematikern THEODORE WILBUR ANDERSON und DONALD ALLAN DARLING, die ihn 1952 erstmals beschrieben haben [17]. Die genaue Durchführung dieses Testes wird im Folgenden beschrieben [18].

Der AD Test kann systematisch in folgenden Schritten durchgeführt werden:

1. Sortierung der gesamten Stichprobe in aufsteigender Reihenfolge: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ wobei x_n der größte Wert ist.

2. Berechnung der kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilung:

$$F_X(x_i) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x_i-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (13)$$

wobei x_i , für $i=1,2,3,\dots,n$.

3. Berechnung der AD Statistik:

$$A^2 = -\sum_{i=1}^n \left[\frac{(2i-1)\{\ln F_X(x_i) + \ln[1-F_X(x_{n+1-i})]\}}{n} \right] - n \quad (14)$$

4. Berechnung der angepassten AD Wert für eine Normalverteilung:

$$A^* = A^2 \left(1,0 + \frac{0,75}{n} + \frac{0,25}{n^2} \right) \quad (15)$$

5. Auswahl des Signifikanzniveaus α und Bestimmung des entsprechenden kritischen Wertes C_α :

$$C_\alpha = a_\alpha \left(1 + \frac{b_0}{n} + \frac{b_1}{n^2} \right) \quad (16)$$

Die Beiwerte a_α , b_0 und b_1 können der Tabelle 3 entnommen werden:

Tabelle 3: Beiwerte zur Bestimmung des kritischen AD Testes, nach [30]

Signifikanz Level α	a_α	b_0	b_1
2,0000E-01	5,0910E-01	-7,5600E-01	-3,9000E-01
1,0000E-01	6,3050E-01	-7,5000E-01	-8,0000E-01
5,0000E-02	7,5140E-01	-7,9500E-01	-8,9000E-01
2,5000E-02	8,7280E-01	-8,8100E-01	-9,4000E-01
1,0000E-02	1,0348E+00	-1,0130E+00	-9,3000E-01
5,0000E-03	1,1578E+00	-1,0630E+00	-1,3400E+00

Ein AD Test auf Normalität der Stichprobe von 458 Residuen, also inklusive mögliche Ausreißer, führt zu dem Ergebnis, dass der berechnete Wert für AD Test über dem kritischen Wert AD^* liegt. Dies bedeutet, dass die angenommene Nullhypothese H_0 , welche besagt, dass die Residuen aus einer Normalverteilung stammen, vorerst verworfen werden muss. Abbildung 20 demonstriert den dazugehörigen Boxplot. Der Boxplot beinhaltet viele Ausreißer verdächtige Beobachtungen, dargestellt als rote Kreuze.

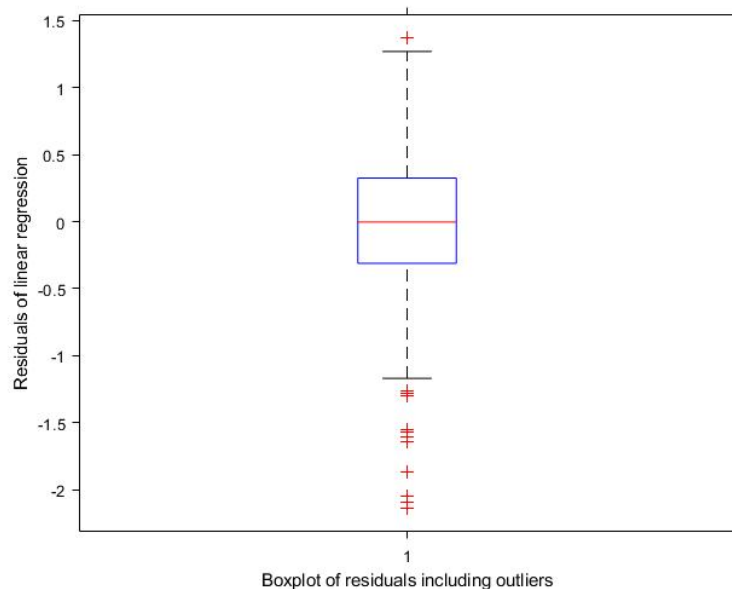


Abbildung 20: Boxplot der Residuen der linearen Regression mit 12 Ausreißer verdächtigen Beobachtungen

Dabei stellen die roten Kreuze im Boxplot jene Beobachtungen dar, welche die Länge eines Whiskers überschreiten. Die Länge eines Whiskers beträgt das 1,5-Fache des Interquartilsabstand. Diese Beobachtungen werden direkt als Ausreißer angesehen und von der Stichprobe entfernt. Nach der Entfernung wird erneut der AD Test auf die bereinigte Stichprobe angewendet. Diesmal liegt der AD Wert deutlich unter dem kritischen Wert AD^* . Dadurch wird die Nullhypothese H_0 bestätigt und somit eine der Voraussetzungen für die Annahme eines linearen Regressionsmodells erfüllt. Abbildung 21 zeigt eine annähernd symmetrische Verteilung der Residuen über den logarithmierten Lastspielzahlen. Abbildung 22 kann entnommen werden, dass der QQ Plot der Residuen der optimalen Normalverteilungsgeraden annäherungsweise folgt. Zudem kann quantitativ bestätigt werden, dass der berechnete AD Wert 0,61 den kritischen $AD^* = 0,75$ nicht überschreitet. Aus diesem Grund kann die Nullhypothese angenommen werden.

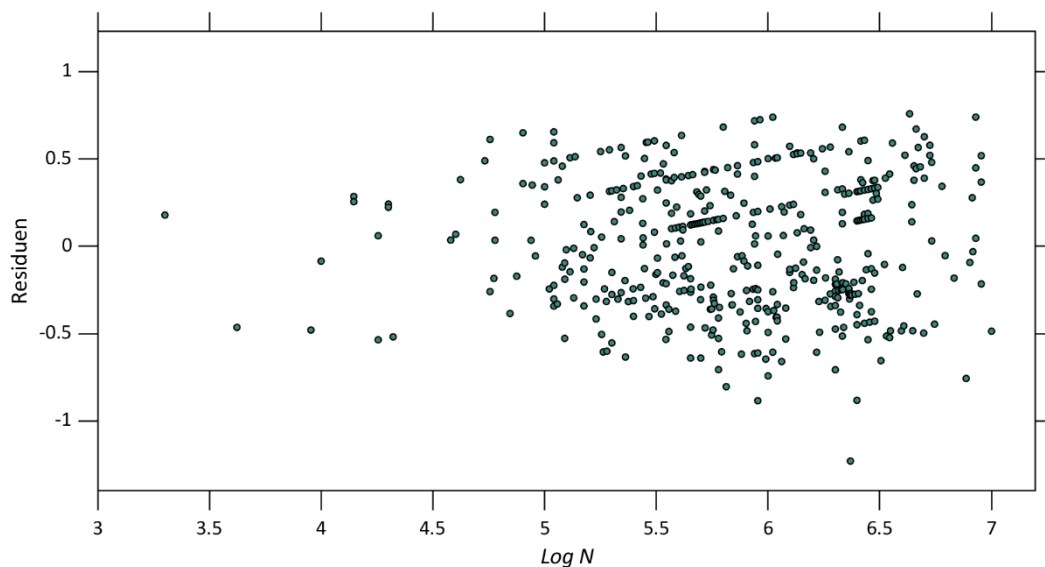


Abbildung 21: Verteilung der Residuen über logarithmierten Lastspielzahlen der Stichprobe

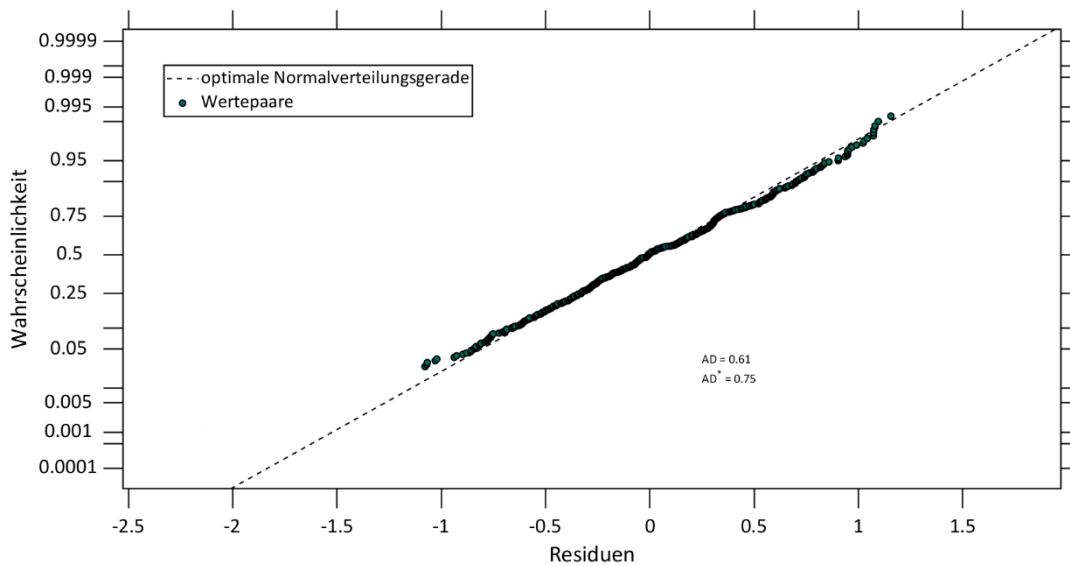


Abbildung 22: Quantil Quantil Plot der Residuen der Stichprobe, dieser zeigt nur an den Enden Abweichungen von der optimalen Normalverteilungsgerade

Für die graphische Prüfung der Normalität kann der QQ Plot eingesetzt werden. Der QQ Plot zeigt auf der x-Achse die jeweiligen Werte der Residuen und auf der y-Achse die entsprechende Wahrscheinlichkeitswerte für eine Normalverteilung. Würden die Residuen perfekt normalverteilt sein, wäre der QQ Plot eine Gerade. Liegen allerdings die Werte annähernd nah und symmetrisch an der optimalen Gerade, so kann von einer Normalverteilung der Stichprobe ausgegangen werden. Für die in dieser Arbeit betrachtete Stichprobe kann der Abbildung 22 entnommen werden, dass die Werte relativ nah an der optimalen Normalverteilungsgerade liegen und dieser symmetrisch folgen. Somit kann die Annahme der Normalverteilung der Residuen auch graphisch bestätigt werden.

3.2.4 Korrelationskoeffizient

Nach der erfolgreichen Prüfung der Gültigkeit der Modellannahmen für eine einfache lineare Regression, kann auf das Ausmaß des linearen Zusammenhangs näher eingegangen werden. Die Kennzahl, welche die Stärke und die Richtung des linearen Zusammenhangs beschreibt, wird Korrelationskoeffizient r_{xy} genannt. Dieser wurde von KARL PEARSON erstmals in den 1870er mathematisch formuliert und wird deshalb auch oft Pearson Korrelation genannt. Der Korrelationskoeffizient ist dimensionslos und kann Werte zwischen -1 und +1 annehmen. Bei einem Wert von +1 (bzw. -1) besteht ein vollständig positiver (bzw. negativer) Zusammenhang zwischen der unabhängigen und der abhängigen Variable. Weist der Korrelationskoeffizient den Wert 0 auf, hängen die beiden Variable nicht linear voneinander ab. Möglich wäre jedoch ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen diesen noch immer. Der mathematische Ausdruck zur Berechnung eines Korrelationskoeffizienten lautet wie folgt: [20]

$$r_{xy} = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i y_i) - (\sum_{i=1}^n x_i) \cdot (\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2] \cdot [n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}} \quad (17)$$

Es ist wichtig zu erwähnen, dass ein von Null verschiedener Wert des Korrelationskoeffizienten keine hinreichende, sondern nur eine notwendige Bedingung für einen linearen Zusammenhang darstellt.

Die in Kapitel 3 beschriebenen statistischen Methoden wurden auf die Stichprobe von 446 Elementen angewendet. Jedes Element beinhaltet die 5 möglichen Einflussfaktoren: Zugfestigkeit σ_m , Streckgrenze σ_y , Grenzspannungsverhältnis R , Blechdicke t und Nahtbreite w . Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse präsentiert und besprochen.

4 Ergebnisse und Diskussion

Mit der im Kapitel 3.2 beschriebenen Methode wurde ein Stichprobenumfang von 446 Elementen analysiert und statistisch ausgewertet. Bei den Elementen handelt es sich um blecheben geschliffene Stumpfstöße, bei denen die Schweißverbindung bei einer Lastspielzahl kleiner als 10^7 versagt hat und somit nicht als dauerhaft gelten kann. Die Elemente der Stichprobe stammen aus unterschiedlichen Versuchen, demzufolge liegen verschiedene Materialkennwerte, Nahtgeometrien, Spannungsverhältnisse und Schweißverfahren vor. Die Versuche wurden ebenfalls bei unterschiedlichen Spannungsschwingbreiten durchgeführt, was die angewendete Methode in Kapitel 3.2 und den damit verbundenen Einsatz von Residuen zu Grunde liegt. Im Fokus der Analyse stehen vor allem die Materialkennwerte Streckgrenze und Zugfestigkeit sowie die Nahtgeometrieparameter und das Grenzspannungsverhältnis. Die erreichten Lebensdauerzyklen liegen zwischen $2 \cdot 10^3$ und 10^7 Lastspiele.

Die angenommene Streckgrenze der Stichprobe liegt zwischen 236 und 850 MPa, die Zugfestigkeiten zwischen 403 und 900 MPa. Mit Hilfe der Regressionsanalyse und der Software Matlab konnte ein Zusammenhang zwischen diesen Materialkennwerten und den Residuen der linearen Regression festgestellt werden. Dieser Zusammenhang wird anhand der berechneten Korrelationskoeffizienten r_{xy} quantifiziert. Dieser beträgt sowohl für die Streckgrenze als auch für die Zugfestigkeit $r_{xy, \sigma_m} = r_{xy, \sigma_y} = r_{xy, \sigma_m \sigma_y} = 0,33$. Abbildungen 23 und 24 illustrieren diesen Zusammenhang.

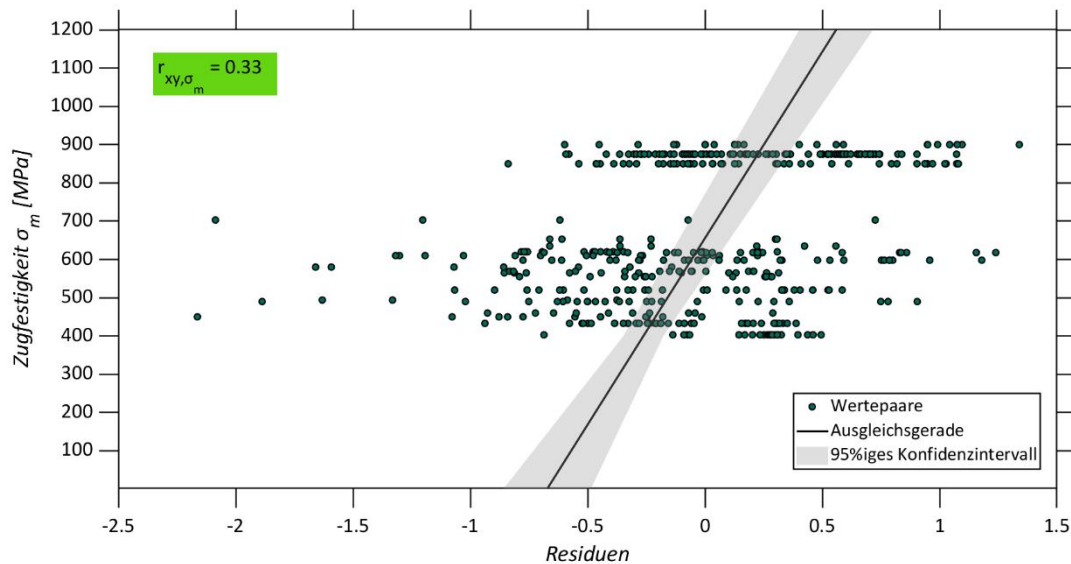


Abbildung 23: Mittlere positive Korrelation zwischen der Zugfestigkeit des Materials und den Residuen

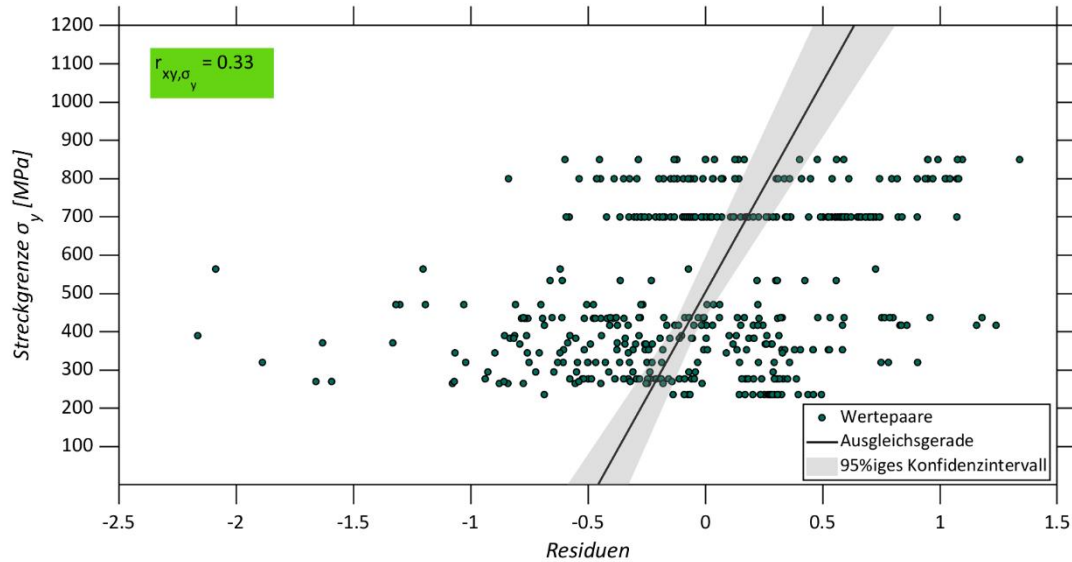


Abbildung 24: Mittlere positive Korrelation zwischen der Streckgrenze des Materials und den Residuen

Der vorliegende Wert für $r_{xy, \sigma_m \sigma_y}$ zeigt die Stärke und Richtung des linearen Zusammenhangs. Es handelt sich um eine mittlere positive Korrelation zwischen der Streckgrenze bzw. Zugfestigkeit und den Residuen. Die Stärke der Korrelation wird nach [21] als mittelstark eingestuft, da $r_{xy, \sigma_m \sigma_y} = 0,33 > 0,3$ und somit $0,3 < r_{xy, \sigma_m \sigma_y} < 0,5$ liegt. In Kapitel 2 wurde im Allgemeinen auf die Dauerfestigkeit eingegangen und festgestellt, dass es sich für Stähle mit unterschiedlichen Festigkeiten und bei dynamischen Belastungen nur einen geringen Festigkeitsunterschied feststellen lässt. Bei Schweißverbindungen verstärkt sich dieser Effekt, da zum einen durch den Schweißprozess selbst eine metallurgische Kerbe im Nahtübergangsbereich erzeugt wird, welche den optimalen Kraftfluss stört und so zu einer lokalen Spannungsspitze führt. Zum anderen können eventuelle Schweißfehler und -imperfectionen diese Kerbwirkung zusätzlich verstärken, sodass es sich für alle Stähle eine ähnlich kurze Rissentstehungsphase ergibt. Die anschließende Risswachstumsrate wird für alle Stähle annähernd gleich sein, weshalb Schweißverbindungen aus unterschiedlich festen Stählen nur eine geringe Differenz bezüglich der Dauerfestigkeit aufweisen. In gleicher Weise beschreiben FRICKE [7] und die Autoren von [23] das Zusammenspiel zwischen dem Kerbeffekt und der Materialfestigkeit bezüglich der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen. In dieser Arbeit wurde zwischen der Streckgrenze bzw. der Zugfestigkeit von blecheben geschliffenen Stumpfstoßen und den Residuen (einer linearen Regression von entsprechenden logarithmierten Lastspielzahlen und Nennspannungsbreiten) eine positive (schwache bis) mittlere Korrelation festgestellt, was mit den oben beschriebenen Feststellungen übereinstimmt und diese insbesondere auch für blecheben geschliffene Stumpfstoße bestätigt.

Wie in Abbildung 25 dargestellt liegen die Werte für das Grenzspannungsverhältnis R größtenteils entweder bei 0 oder bei -1. Im Falle $R = 0$ schneidet die Unterspannung σ_u die Zeitachse als einziger Punkt im Schwingspielkurve und es liegt eine reine Zugschwellbeanspruchung vor. Bei $R = -1$ ist das Schwingspiel symmetrisch zur Zeitachse und insbesondere die Mittelspannung σ_M stellt ein Nulldurchgang der Schwingspielkurve mit der Zeitachse dar, es handelt sich hierbei um eine reine Wechselbeanspruchung. Der Korrelationskoeffizient für das Grenzspannungsverhältnis beträgt $r_{xy, R} = -0,23$, welcher eine negative schwache Korrelation zwischen dem Grenzspannungsverhältnis und Residuen darstellt.

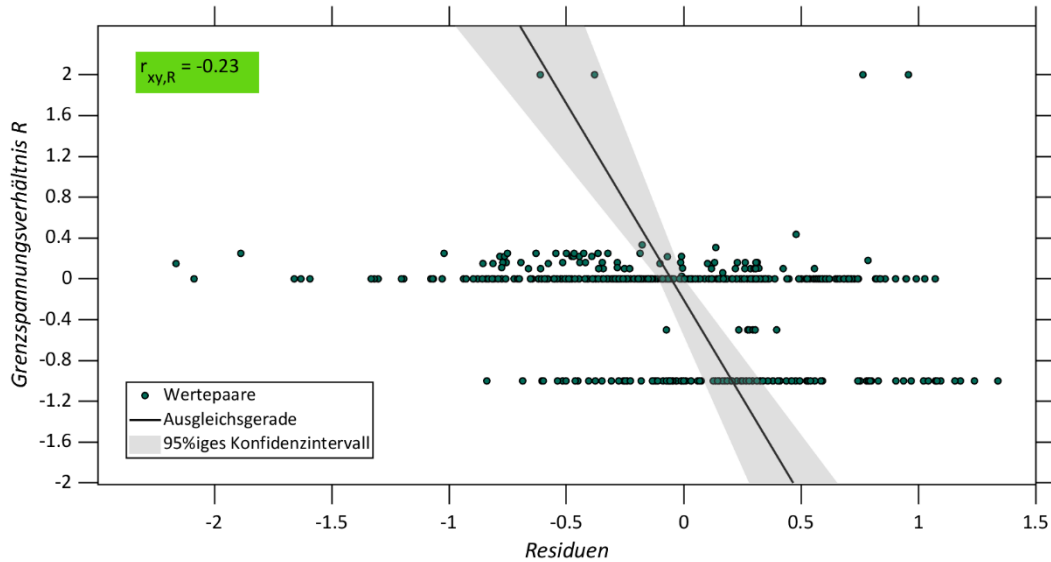


Abbildung 25: Schwache negative Korrelation zwischen des Grenzspannungsverhältnisses und den Residuen

Die negative schwache Korrelation lässt sich durch die starken im Nahtübergangsbereich vorhandenen Eigenspannungen erklären. Eigenspannungen sind ohne Einwirkung äußerer Kräfte bereits im Bauteil vorhanden und kommen durch thermisches Erhitzen und Abkühlen infolge des Schweißvorgangs zustande [4]. Diese können im Nahtbereich in der Regel die Streckgrenze des Werkstoffes erreichen. Eine Überlagerung der äußeren Belastung und der Eigenspannungen an der Schweißnahtzone liegt also meist unabhängig vom R -Wert im Zugbereich. Basierend auf dem Festigkeitsschaubild nach SMITH (Siehe Kapitel 2.1) lässt sich sagen, dass die ertragbare Spannungsamplitude mit zunehmender Mittelspannung sinkt. Dies ist mit der negativen und schwachen Korrelation des Grenzspannungsverhältnis insofern vereinbar, da eine hohe Mittelspannung mit einem hohen R -Wert einhergeht. Basierend auf den ermittelten Korrelationskoeffizient $r_{xy,R} = -0,23$ lässt sich sagen, dass bei blecheben geschliffenen Stumpfstoßen mit steigendem R -Wert bzw. mit steigender Mittelspannung die Korrelation zu den Residuen abnimmt.

In Kapitel 2 wurde auf die relevanten Einflussfaktoren auf die Dauerfestigkeit im Allgemeinen und insbesondere bei Schweißverbindungen eingegangen. Zu diesen Faktoren gehören vor allem die Geometrie der Schweißnaht und insbesondere die Blechdicke. Wie im Kapitel 2 beschrieben kann der Effekt der Blechdicke als ein gleichwertiger Durchmesser für die Konstruktionsberechnungen sowohl bei statischen als auch bei dynamischen Belastungen durch den technologischen Größeneinflussfaktor k_t berücksichtigt werden. Der negative Einfluss der Blechdicke auf die Dauerfestigkeit bei Schweißverbindungen wurde 1982 durch GURNEY erkannt und mathematisch durch die Formel $\Delta\sigma_R(t) = \Delta\sigma_R\left(\frac{t_0}{t}\right)^n$ erfasst. Für unterschiedliche Werte für Blechdicke t_0 und bei konstantem Exponenten n und konstanter Bezugsdicke t ergeben sich parallele Wöhlerlinien im doppelt logarithmischen Maßstab, welche sich mit zunehmender Blechdicke dem Ursprung des Koordinatensystems nähern. Dies lässt sich als immer weiter abnehmende Spannungsschwingbreiten bei gleicher Lastspielzahl und somit als einen negativen Effekt der Blechdicke interpretieren. Dieser Effekt wird jedoch erst bei Blechdicken ab 20 bis 30 mm relevant. Die betrachteten blecheben geschliffenen Stumpfstoße in dieser Arbeit weisen jedoch zu 93% eine Blechdicke kleiner gleich 20 mm, weshalb ein niedriger negativer Wert $r_{xy,t} = -0,15$ für die Korrelation zwischen der Blechdicke und den Residuen plausibel ist. Abbildung 26 illustriert diesen Zusammenhang.

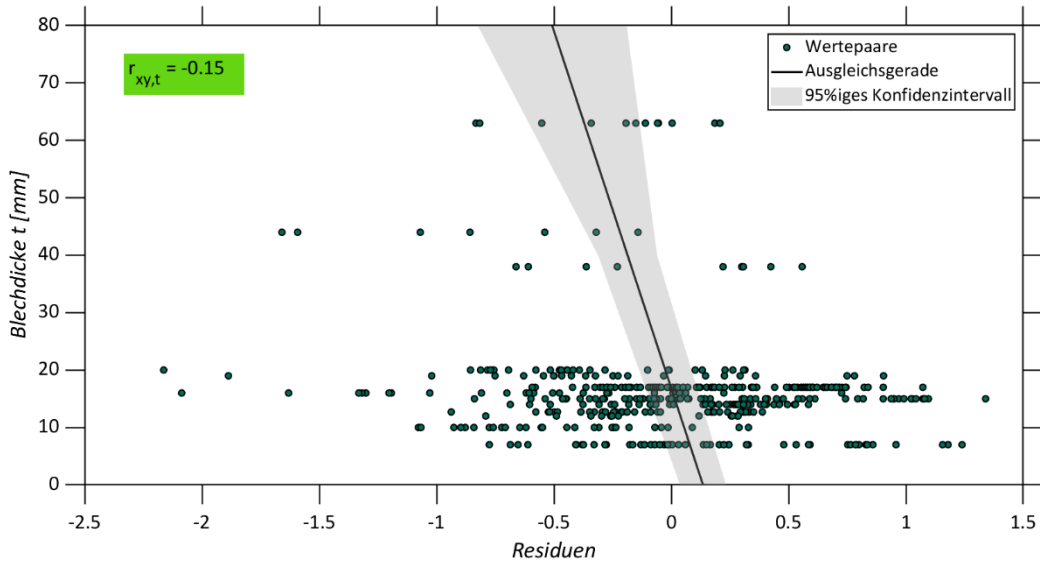


Abbildung 26: Schwache negative Korrelation zwischen der Blechdicke des Materials und den Residuen

Auch für die Nahtbreite ergibt sich eine negative schwache Korrelation $r_{xy,t} = -0,13$. Siehe Abbildung 27. Angesichts dessen, dass die Stumpfstöße blecheben geschliffen wurden und somit Einflüsse der geometrischen Imperfektionen wie der Einfluss des Nahtübergangswinkels oder des Nahtübergangsradius ausgeschlossen werden können, ist auch dieser Wert plausibel.

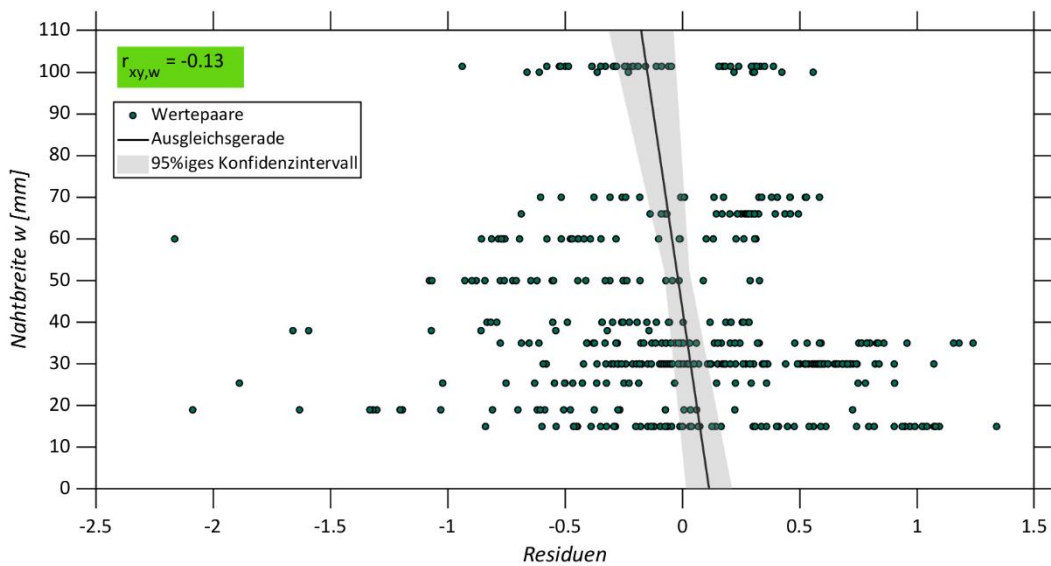


Abbildung 27: Schwache negative Korrelation zwischen der Nahtbreite des Materials und den Residuen

5 Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Zusammenhänge im Kapitel 4 basieren auf der Annahme, dass es zwischen dem jeweiligen Parameter und den Residuen ein linearer Zusammenhang besteht. Auch die ermittelten Korrelationskoeffizienten setzen eine lineare Beziehung zwischen dem jeweiligen Faktor und den Residuen voraus. Die Schwierigkeit dabei besteht darin, dass es sich bei einem PEARSON -Korrelationskoeffizient von nahezu null möglicherweise um einen starken Zusammenhang anderer Art handeln könnte. Ist der tatsächliche Zusammenhang nicht linear, dann kann dieser möglicherweise mittels eines anderen Ansatzes bzw. einer anderen mathematischen Funktion z.B. einer Exponentialfunktion oder Polynome höheren Grades präziser beschrieben werden. Der Korrelationskoeffizient ist also lediglich ein Maß für den Grad des linearen Zusammenhangs. Mit den Überlegungen aus vorherigem Kapitel lässt sich diese Problematik zwar für die Stichprobe dieser Arbeit ausschließen, jedoch im Allgemeinen muss diese immer berücksichtigt werden.

Des Weiteren bietet sich die Methode der statistischen Versuchsplanung (engl.: Design of experiments DOE) für eine strukturierte Analyse der Problemstellung an. Im Gegensatz zur konventionellen Methode one factor at a time (OFAT) können durch eine gut überlegte statistische Versuchsplanung zum einen zusätzlich die möglichen Wechselwirkungen zwischen den Variablen, z.B. Wechselwirkung zwischen Festigkeit des Materials und Blechdicke in Bezug auf die Schwingfestigkeit, analysiert werden und zum anderen an Versuchen und somit an Kosten einzusparen, ohne an der Informationstiefe verlieren zu müssen. Außerdem können mit der DOE-Methode auch nichtlineare Zusammenhänge identifiziert und modelliert werden. Hierzu kann das bereits hergeleitete lineare Modell falls nötig nachträglich um die quadratischen Terme ergänzt werden.

Was sich noch eventuell bei solchen hochdimensionalen Eingangsdaten, wie bei der für diese Arbeit verwendete Stichprobe, anbietet, ist der Einsatz von Algorithmen des maschinellen Lernens. Diese sind in der Lage, aus den vielen gestaltlosen Eingangsdaten Strukturen zu erkennen und Vorhersagen für eine bestimmte Zielgröße zu treffen. Außerdem kann sich so ein Algorithmus kontinuierlich verbessern und benötigt deshalb kaum menschliche Eingriffe. Nichtsdestotrotz hat auch maschinelles Lernen wie jedes andere Verfahren seine Grenzen. Dazu gehören beispielsweise die Fehleranfälligkeit und das Herausfinden der Hauptquelle eines solchen Fehlers bei diesen Verfahren.

6 Literatur

- [1] RADAJ D, VORMWALD M (2007): Ermüdungsfestigkeit. Grundlagen für Ingenieure. 3. Auflage. Verlag Springer. Berlin. Heidelberg.
- [2] GÖTZ S, EULITZ KG (2020): Betriebsfestigkeit. Bauteile sicher auslegen. Verlag Springer Vieweg. Wiesbaden.
- [3] BAKHSCHI H (2020): Effekt schweißnahtprofil-optimierender Methoden auf die Schwingfestigkeit von Stumpfstößen. Technische Universität Hamburg. Institut für Konstruktion und Festigkeit von Schiffen. Hamburg.
- [4] WITTEL H, JANNASCH D, VOBIEK J, SPURA C (2017): Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung Berechnung Gestaltung. 23. Auflage. Verlag Springer. Wiesbaden.
- [5] O.V.: Schweißverbindung Wikipedia URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Schwei%C3%9Fverbindung> Abruf am 08.11.2021.
- [6] O.V. (2005) Schweißen mehrsprachige Benennung für Schweißverbindungen mit bildlichen Darstellungen ISO 17659. DIN Deutsche Norm.
- [7] FRICKE W (2010): Betriebsfestigkeit von Schiffen und meerestechnischen Konstruktionen. Technische Universität Hamburg. Institut für Konstruktion und Festigkeit von Schiffen. Hamburg.
- [8] WITTEL H, JANNASCH D, VOBIEK J, SPURA C (2013): Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung Berechnung Gestaltung. 21. Auflage. Verlag Springer. Wiesbaden.
- [9] EHLERS S (2015): Grundlagen der Konstruktionslehre. Schweiß- / Klebe- / Lötverbindungen. Technische Universität Hamburg. Institut für Konstruktion und Festigkeit von Schiffen. Hamburg.
- [10] BRAUN M (2021): Assessment of fatigue strength of welded steel joints at sub-zero temperatures based on the micro-structural support effect hypothesis. Technische Universität Hamburg. Institut für Konstruktion und Festigkeit von Schiffen. Hamburg.
- [11] FROST I (2018): Einfache lineare Regression. Die Grundlage für komplexe Regressionsmodelle verstehen. Verlag Springer. Wiesbaden.
- [12] REHAGE A (2016): Ausreißeridentifikation für kategoriale und funktionale Daten im generalisierten linearen Modell. Technische Universität Dortmund. Dortmund.
- [13] KADER G, PERRY M (1996): To boxplot or not to boxplot. Application State University. North Carolina.
- [14] O.V.: Lineare Einfachregression Wikipedia URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Lineare_Einfachregression. Abruf am 12.01.2022.
- [15] O.V.: Methode der kleinsten Quadrate Wikipedia URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Methode_der_kleinsten_Quadrate. Abruf am 12.01.2022
- [16] FAHRMEIR L, HEUMANN C, KÜNSTLER R, PIGEOT I, TUTZ G (2016): Der Weg zur Datenanalyse. 8. Auflage. Verlag Springer. Wiesbaden.
- [17] O.V.: Anderson Darling Test Wikipedia URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Anderson-Darling-Test>. Abruf am 09.01.2022.
- [18] ALFREDO HS. ANG, WILSON H. TANG (2007): Probability Concepts in Engineering. Emphasis on Applications in Civil and Environmental Engineering. 2nd Edition. San Francisco, California.

- [19] BOURIER G (2018): Beschreibende Statistik. Praxisorientierte Einführung mit Aufgaben und Lösungen. 13. Auflage. Verlag Springer Gabler. Wiesbaden.
- [20] BORTZ J, SCHUSTER C (2010): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. 7. Auflage. Verlag Springer. Berlin. Heidelberg.
- [21] Cohen J (1988): Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. Revised Edition. New York University. New York.
- [22] O.V.: Lineare Regression Diagnose in R Homoskedastizität URL: <https://www.politikwissenschaften.ch/blog.php?categorie=3>. Abruf am 20.01.2022
- [23] COSTAA J. D. M., FERREIRAA J. A. M., ABREU L. P. M. (2010): Fatigue behaviour of butt welded joints in a high strength steel, ScienceDirect, Published by Elsevier Ltd., Agueda Portugal.
- [24] BRAUN M, GRIMM J H, HOFFMEISTER H, EHLERS S, FRICKE W (2018): Comparison of fatigue strength of post-weld improved high strength steel joints and notched base material specimens. Ships and Offshore Structures, 13, 47-55, doi:10.1080/17445302.2018.1425522. Hamburg.
- [25] BRAUN M, WANG X A (2021): review of fatigue test data on weld toe grinding and weld profiling. International Journal of Fatigue, 145, doi:10.1016/j.ijfatigue.2020.106073. Hamburg.
- [26] BRAUN M, HENSEL J, SONG S, EHLERS S (2021): Fatigue strength of normal and high strength steel joints improved by weld profiling. Engineering Structures, 246, doi:10.1016/j.engstruct.2021.113030. Hamburg.
- [27] BRAUN M (2021): Statistical analysis of sub-zero temperature effects on fatigue strength of welded joints. Welding in the World, doi:10.1007/s40194-021-01207-y. Hamburg.

7 Offizielle Aufgabenstellung



TUHH · M-10 · Am Schwarzenberg Campus 4C · D-21073 Hamburg

PROJECT THESIS 2021

für

Hadi Bakhschi

Untersuchung der Relevanz verschiedener Einflussfaktoren auf die Schwingfestigkeit von blecheben geschliffenen Stumpfstößen

Assessment of various influencing factors on fatigue strength of flush ground butt joints

Die Nachbehandlung von Schweißnahtprofilen ermöglicht eine signifikante Steigerung der Schwingfestigkeit gegenüber dem Zustand nach dem Schweißen. Kürzlich veröffentlichte Studien zeigen, dass die Steigerung der Schwingfestigkeit höher als oft gedacht sein kann. Im Rahmen dieser Arbeit soll das daher Schwingfestigkeitsverhalten von blecheben geschliffenen Stumpfstöße untersucht und bewertet werden. Hierzu sollen Literaturdaten und Testergebnisse aus früheren Arbeiten statistisch ausgewertet werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Konstruktion von nachbehandelten Schweißverbindungen zu verbessern, indem der Effekt der Nahtnachbehandlung unter Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren herausgestellt wird. Im Weiteren soll damit die internationale Normgebung verbessert werden. Für die statistische Auswertung sollen international anerkannte Normen und Standards Anwendung finden. Im Rahmen der Arbeit sollen die folgenden Punkte bearbeitet werden:

1. Literaturstudie bezüglich der Verbesserung der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen und insbesondere von Stumpfstößen mittels Schleifens und zu relevanten Einflussfaktoren
2. Aufbereitung und Darstellung der gesammelten Daten
3. Eine Methode zur Auswertung der gesammelten Ergebnisse im Hinblick auf den Einfluss einzelner Einflussgrößen soll entwickelt werden
4. Bewertung der ermittelten Zusammenhänge basierende auf der gesammelten Literatur und Domänenwissen

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. 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. However, he hereby accepts to transfer the ownership to TUHH M-10. Any use of the thesis has to be approved by TUHH M-10 (or external partner when this applies). 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.

Thesis supervisors

Sören Ehlers
Moritz Braun

Deadline: 15.04.2022

Hamburg, 15.10.2021