

Diplomarbeit

# Systematische Untersuchung der Schweißparameter beim linearen Reibschweißen

Johannes Löffelmann

Betreuer:

Dipl.-Ing. Kemal Mucic

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Enzinger

Erstellt am:

Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik



Technische Universität Graz

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. C. Sommitsch

Graz, 2012



## Danksagung

Ein herzlicher Dank für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Diplomarbeit gilt vor allem meinem Betreuer am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik Dipl.-Ing. Kemal Mucic, welcher mir stets moralische und fachliche Unterstützung bot.

Mein aufrichtiger Dank gilt der Firma pewag GmbH und im Besonderen Herrn Ing. Franz Fuchs, durch welchen die Diplomarbeit erst zustande gekommen ist.

Ein großer Dank gebührt den Kollegen am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik, insbesondere dem Institutsvorstand Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch, welcher die Durchführung dieser Arbeit ermöglicht hat.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Enzinger für die hervorragende Supervision des Projekts.

Dank gebührt meinen Bürokollegen, welche mich in der Zeit meiner Diplomarbeitserstellung in jeder Hinsicht unterstützten.

Ein besonderer Dank gebührt den Labormitarbeitern am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik für den herausragenden fachlichen Beistand.

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich bei der Erstellung dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Graz, Juni 2012

Johannes Löffelmann





## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

## STATUTORY DECLARATION

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

Graz, am .....

.....

(Unterschrift)



## Kurzfassung

Das lineare Reibschweißen ist eine Verfahrensvariante des Reibschweißens, bei welchem es durch geradlinige Relativbewegung unter Druck sowie dem nachfolgenden Stauchvorgang ohne Relativbewegung zur Schweißverbindung der Füge­teile kommt. Durch Wärme und Kraft die dabei auf die Füge­stelle wirken, kommt es zu einer viskoplastischen Verformung des Materials. Das so plastifizierte Material wird während des Schweißprozess und in der Stauchphase aus der Füge­stelle gedrückt und bildet einen charakteristischen Grat.

In der vorliegenden Arbeit wurde unter Anwendung der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE) der Zusammenhang zwischen den wesentlichen Schweißparametern, dem Schweißgrat und der Verbindungsfestigkeit untersucht.

Für diese Untersuchung wurden geschmiedete Kettenhalbglieder aus 30CrNiMo8 linearreibgeschweißt und anschließend detaillierte metallografische, licht- und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen zur Charakterisierung der Verbindungsqualität durchgeführt.

Die statischen Festigkeitseigenschaften der Verbindungen wurden quantifiziert, und mit der Statistiksoftware Minitab 16 ausgewertet. Dabei wurden die signifikanten Einflussfaktoren für das lineare Reibschweißen von Kettengliedern ermittelt, sowie deren optimale Kombination zur Sicherstellung höchster Qualität bei sehr guter Reproduzierbarkeit.

## Abstract

Linear friction welding is a kind of friction welding, in which linear movement and pressure on the parts, with a following forging phase with no motion, leads to a welding. Through the heat and pressure applied to the welding area, a viscoplastic deformation occurs. The plasticized material is expelled during the welding and the forging process and creates the characteristic flash.

In this thesis the correlation between the welding parameters, the formed flash, and the strength of the weld are investigated with the help of Design of Experiments (DoE).

For this research, forged chain-half-links made of 30CrNiMo8 were linear friction welded. Afterwards, a detailed metallographic, optical and scanning electron microscopic examination was carried out to characterize the welding quality.

The statistical software Minitab 16 was applied to evaluate the strength of the bond and to find the significant factors for the linear friction welding process. Also the optimal parameter combination was defined to produce the best quality and repeatability.



# Inhaltsverzeichnis

---

<b>DANKSAGUNG .....</b>	<b>III</b>
<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG .....</b>	<b>V</b>
<b>KURZFASSUNG .....</b>	<b>VII</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>XII</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>13</b>
<b>2 AUFGABENSTELLUNG .....</b>	<b>15</b>
<b>3 LITERATUR .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1 Reibschweißen .....</b>	<b>16</b>
3.1.1 Reibschweißverfahren .....	16
<b>3.2 Lineares Reibschweißen .....</b>	<b>19</b>
3.2.1 Prozessablauf .....	20
3.2.2 Schweißparameter .....	23
3.2.3 Power Input .....	24
3.2.4 Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften der Proben .....	29
3.2.5 Schweißgrat .....	32
<b>3.3 Versuchsplanung .....</b>	<b>36</b>
3.3.1 Statistische Versuchsplanung .....	36
3.3.2 Vorversuch .....	47
3.3.3 Hauptversuch .....	47
3.3.4 Bestätigungsversuch .....	47
<b>4 BESCHREIBUNG DER ANLAGE .....</b>	<b>48</b>
4.1 Maschineneinstellungen .....	48
4.2 Fügeteile .....	53
<b>5 UNTERSUCHUNGSMETHODEN .....</b>	<b>55</b>
5.1 Visuelle Beurteilung .....	55
5.2 Metallografie .....	55
5.2.1 Probenentnahme .....	56
5.2.2 Mikroskopie .....	58
5.3 Härtemessung .....	60
5.3.1 Schweißnahtbreite .....	62
5.4 Zugversuch .....	63
5.4.1 Zugprüfmaschine .....	63
5.4.2 Probenentnahme .....	64
5.4.3 Zugprobe .....	64

5.5	Rasterelektronenmikroskop (REM).....	65
5.6	Nach dem Schweißen wärmebehandelte Proben.....	67
<b>6</b>	<b>WERKSTOFF – 30CRNIMO8 .....</b>	<b>68</b>
6.1	Einsatzgebiet.....	68
6.2	Chemische Zusammensetzung.....	68
6.3	Mechanische Eigenschaften .....	68
6.3.1	Zugfestigkeit.....	68
6.4	Physikalische Eigenschaften .....	70
6.5	Schweißbarkeit .....	70
6.6	Wärmebehandlung .....	70
6.6.1	ZTU-Schaubild für kontinuierliche Abkühlung.....	70
6.6.2	Wärmebehandlung für den Vorversuch.....	71
<b>7</b>	<b>VORVERSUCH .....</b>	<b>74</b>
7.1	Sammlung der Einflussgrößen .....	74
7.2	Schweißgrat.....	77
7.3	Reibzeit.....	81
7.4	Schweißnahtbreite.....	85
7.5	Maximale Härte in der Schweißzone .....	91
7.6	Zugfestigkeit .....	92
7.7	Einfluss der Wärmeeinflusszone auf die Zugfestigkeit.....	96
7.8	Wärmeeinflusszone .....	97
7.8.1	Wärmeeinflusszone links.....	97
7.8.2	Wärmeeinflusszone rechts .....	100
7.9	Zusammenfassung der Untersuchungen vom Vorversuch .....	102
<b>8</b>	<b>HAUPTVERSUCH.....</b>	<b>103</b>
8.1	Versuchsreihe mit niedrigen Einstellungen .....	104
8.1.1	Zugfestigkeit.....	105
8.1.2	Schweißgrat.....	107
8.1.3	Reibzeit .....	109
8.2	Versuchsreihe mit hohen Einstellungen .....	111
8.2.1	Zugfestigkeit.....	112
8.2.2	Schweißgrat.....	113
8.2.3	Reibzeit .....	115
<b>9</b>	<b>VERSUCHE ZUM POWER INPUT .....</b>	<b>118</b>

9.1	Schweißgrat in Abhängigkeit des Power Inputs.....	119
9.2	Zugfestigkeit in Abhängigkeit des Power Inputs.....	124
9.3	Reibzeit in Abhängigkeit des Power Inputs .....	127
<b>10</b>	<b>BRUCHFLÄCHENANALYSE.....</b>	<b>129</b>
<b>11</b>	<b>ZUSAMMENHANG VON SCHWEIßGRAT UND SCHWEIßQUALITÄT .....</b>	<b>133</b>
<b>12</b>	<b>ZUSAMMENHANG VON REIBZEIT UND EINSTELLPARAMETER .....</b>	<b>136</b>
<b>13</b>	<b>BESTÄTIGUNGSVERSUCH .....</b>	<b>139</b>
<b>13.1</b>	<b>Auswahl der besten Parameterkombination für den Bestätigungsversuch.....</b>	<b>139</b>
13.1.1	Zugfestigkeit .....	139
13.1.2	Schweißgrat.....	141
13.1.3	Reibzeit.....	142
13.1.4	Probe 14 vom Vorversuch.....	143
<b>13.2</b>	<b>Durchführung des Bestätigungsversuches .....</b>	<b>143</b>
13.2.1	Zugfestigkeit .....	143
13.2.2	Reibzeit.....	145
13.2.3	Schweißgrat.....	146
<b>14</b>	<b>WÄRMEBEHANDLUNG NACH DEM SCHWEIßEN.....</b>	<b>147</b>
<b>15</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>149</b>
<b>16</b>	<b>AUSBLICK .....</b>	<b>151</b>
<b>17</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>152</b>
<b>18</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>156</b>
<b>19</b>	<b>FORMELVERZEICHNIS .....</b>	<b>157</b>
<b>20</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>158</b>
<b>21</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>160</b>
21.1	Fügeteile .....	160
21.2	Werkstoff: Datenblatt.....	162
21.3	Probe 14 VV.....	167

## Abkürzungsverzeichnis

A	Reibfläche, Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]
a, $\alpha$	Amplitude [mm]
BV	Bestätigungsversuch
e	Residuum
d	Durchmesser [mm]
f	Frequenz [Hz]
flash	engl. für Grat (Schweißgrat)
$F_R$	Reibkraft [kN]
GW (engl. PM)	Grundwerkstoff
HV	Hauptversuch
k	Anzahl der Faktoren
KG	Kettenglied
KHG	Kettenhalbglied
L	Länge [mm]
LRS	Linearreibschweißen
n	Stichprobenumfang
p	Reibdruck [N/mm <sup>2</sup> ]
PI	Power Input [mW/mm <sup>2</sup> ]
$P_m$	maximaler PI [mW/mm <sup>2</sup> ]
REM	Rasterelektronenmikroskop
s	Standardabweichung einer Stichprobe
St	Stauchkraft [kN]
SZ (engl. WZ)	Schweißzone
TMBZ (engl. TMAZ)	Thermomechanisch beeinflusste Zone
v	Geschwindigkeit [m/s]
VV	Vorversuch
w	spezifischer Power Input [kW/mm <sup>2</sup> ]
WBH	Wärmebehandlung
WEZ (engl. HAZ)	Wärmeeinflusszone
WNBH	Wärmenachbehandlung
$\bar{x}$	Arithmetischer Mittelwert
$x_i$	Merkmalsausprägungen am $i$ -ten Element der Stichprobe
y	beobachteter Wert
$\hat{y}$	durch das Modell geschätzter Wert



## 1 Einleitung

Das lineare Reibschweißen ist eine Verfahrensvariante des Reibschweißens, bei welchem es durch geradlinige Relativbewegung unter Druck sowie nachfolgenden Stauchvorgang ohne Relativbewegung zur Schweißverbindung der Fügeteile kommt. Durch die Wärme und Kraft die dabei auf die Fügestelle wirken, kommt es zu einer viskoplastischen Verformung des Materials. Das so plastifizierte Material wird während des Schweißprozess aus der Fügestelle gedrückt und bildet einen charakteristischen Grat. Dieses Fügeverfahren bietet eine Reihe von Vorteilen gegenüber der traditionellen Fertigung von Ketten mittels Widerstandsschweißen. Bei geringen Kettendurchmessern (<18 mm) wird das Widerstandsstumpfschweißen angewandt; bei größeren das Abbrennstumpfschweißen.

Nachteile des Abbrennstumpfschweißens:

- Aufschmelzen des Werkstoffes und eine daraus resultierende Gefügeveränderung, welche eine Wärmebehandlung nach dem Schweißen fordert
- Lange Schweißzeiten bei großen Kettendurchmessern
- Geringe Prozesssicherheit fordert teure Qualitätskontrollen

Diese nicht unerheblichen Nachteile rechtfertigen die Erforschung innovativer Schweißverfahren. Im Jahr 2007 wurde daher das Projekt: „Innovative Verfahren für das Verschweißen von Kettengliedern von hochfestem Rundstahl- und Profilstahlketten“ in Zusammenarbeit mit pewag und dem Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik der TU Graz im Rahmen des K-net Kompetenznetzwerks JOIN gestartet.

In der durchgeführten Kosten-Nutzen-Analyse wurde das Linearreibschweißen mit anderen Schweißverfahren verglichen. Dabei lag das bisher eingesetzte Verfahren des Abbrennstumpfschweißens an letzter Stelle, und das Linearreibschweißen konnte das beste Ergebnis erzielen.

Vorteile des Linearreibschweißens:

- Verwendung von Kettengliedern mit unterschiedlichen Profilen
- Verbinden von gegossenen, geschmiedeten oder gesinterten Kettenhalbgliedern
- Verschweißen unterschiedlicher Werkstoffe
- Schmelztemperatur wird nicht erreicht
- Symmetrische Wärmeeinbringung
- Geringe Wärmebelastung
- Kleine WEZ
- Gute Reproduzierbarkeit
- Kurze Prozesszeit
- Niedriger Energiebedarf
- Patentsituation

Der erste Prototyp für das lineare Reibschweißen von Kettengliedern wurde von pewag Engineering entwickelt. Dieser Prototyp RSM1 stand für die Versuche in dieser Diplomarbeit zur Verfügung.

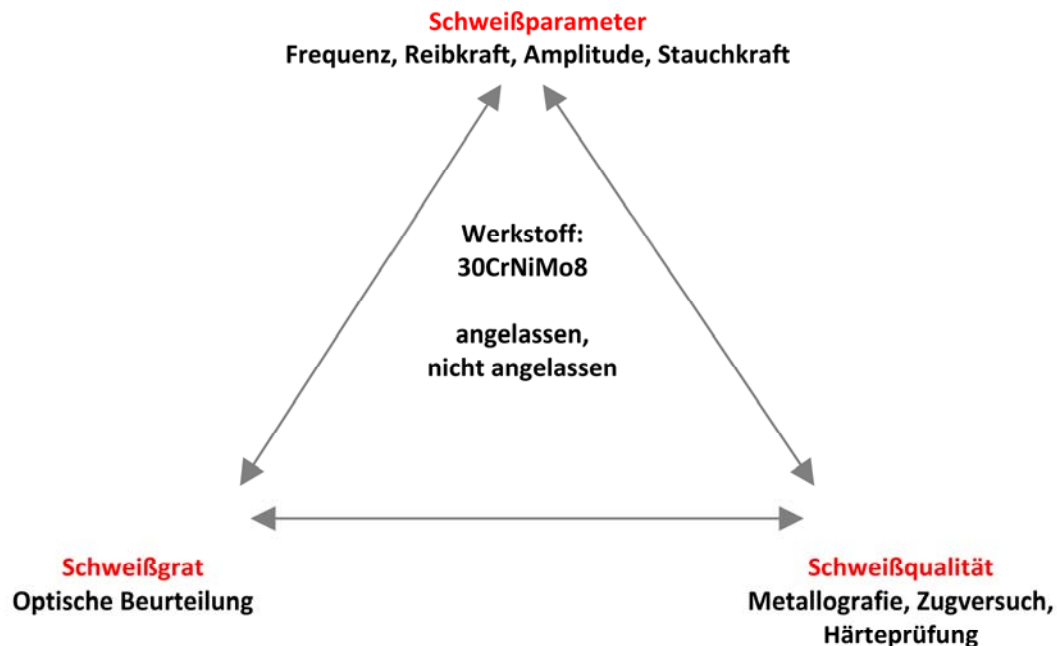
In den lichtmikroskopischen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass eine homogene, schmale (5 mm) und gleichförmige Schweißverbindung, durch die homogene und intensive Wärmeeinbringung, erreicht wird. Im Zugversuch brach die Probe im Grundwerkstoff, was bedeutet, dass die Schweißverbindung eine höhere Festigkeit besitzt. [1]

Die vorliegende Arbeit ist ein Teil des JOIN4+ 2.3 Projekts.

Das K-Projekt Network of Excellence for Joining Technologies JOIN4+ wird im Rahmen von COMET - Competence Centers for Excellent Technologies durch BMVIT, BMWFJ, FFG, Land Oberösterreich, Land Steiermark, SFG und ZIT gefördert. Das Programm COMET wird durch die FFG abgewickelt. [2]

## 2 Aufgabenstellung

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, bei einer bestehenden Linearreißschweißmaschine eine Parameteroptimierung durchzuführen. Dabei werden die Geometrie und der Werkstoff 30CrNiMo8 der zu verschweißenden Proben vorgegeben. Bei den Proben handelt es sich um Kettenhalbglieder. Des Weiteren soll ein Zusammenhang zwischen den gewählten Schweißparametern, dem entstehendem Schweißgrat und der Qualität (Zugfestigkeit) gefunden und beschrieben werden.



Um diese Zielvorgaben zu erreichen, wurde die statistische Versuchsplanung angewandt. Dabei wurde ein Screeningversuch (Vorversuch) mit den wichtigsten Parametern durchgeführt und die Ergebnisse mit dem Programm Minitab 16 ausgewertet. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde der Hauptversuch festgelegt. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse wurde ein Bestätigungsversuch, welcher 15 Versuche zu den besten Einstellungen umfasst, durchgeführt.

Für diese Untersuchung wurden geschmiedete Kettenhalbglieder aus 30CrNiMo8 linearreibgeschweißt und anschließend detaillierte metallografische, licht- und rasterelektronenmikroskopische, sowie zerstörende (Zugversuch) Untersuchungen, zur Charakterisierung der Verbindungsqualität durchgeführt.

Die statischen Festigkeitseigenschaften der Verbindungen wurden quantifiziert, und mit der Statistiksoftware Minitab 16 ausgewertet. Dabei wurden die signifikanten Einflussfaktoren für das lineare Reißschweißen von Kettengliedern ermittelt, sowie deren optimale Kombination zur Sicherstellung höchster Qualität bei sehr guter Reproduzierbarkeit.

## 3 Literatur

### 3.1 Reibschweißen

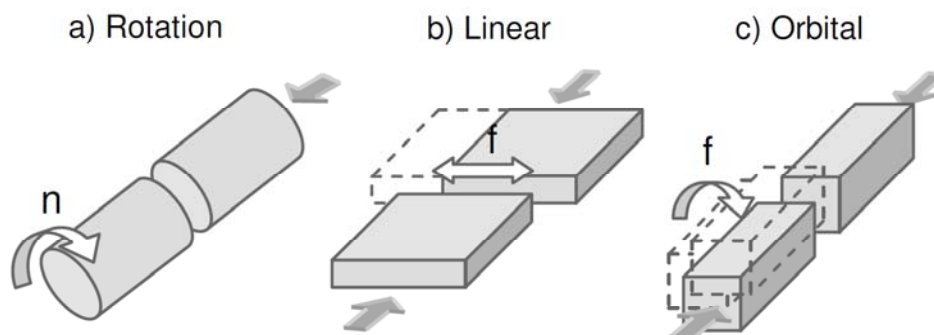
Beim Reibschweißen berühren sich die zu fügenden Teile an den Kontaktflächen. Danach wird eine Relativbewegung aufgebracht, welche zur Wärmeentwicklung an der Fügefläche aufgrund von Reibung führt. Das erwärmte Material wird plastifiziert und aufgrund der Reibkraft aus der Fügestelle gedrückt. Nach ausreichender Erwärmung werden die Fügeteile zueinander positioniert und der Fügedruck aufgebracht. Dies führt zur Entstehung des charakteristischen Schweißgrats. Mithilfe des Reibschweißens können unterschiedliche Werkstoffe miteinander verschweißt werden. Ein weiterer Vorteil ist die geringe Wärmeeinflusszone gegenüber anderen Verfahren. Die gute Wiederholgenauigkeit und kurze Schweißzeiten führen zu wirtschaftlichen Vorteilen.

Das Schweißen von unterschiedlichen Werkstoffen (z.B.: Stahl und Aluminium) wurde beim Rotationsreibschweißen bereits erforscht, weshalb beim Linearreibschweißen eine gleich gute Schweißseignung zu erwarten ist.

Im Allgemeinen sind alle Reibschweißvarianten „Solid state“ Prozesse. Das bedeutet, dass während des Schweißprozesses die Temperatur an der Fügestelle unterhalb der Solidustemperatur bleibt. Das Material wird lediglich plastifiziert. Da kein Material aufgeschmolzen wird, unterscheidet sich das lineare Reibschweißen wesentlich von anderen Schweißverfahren. Beim bisher eingesetzten Abbrennstumpfschweißen von Kettengliedern wird, durch die hohe Stromdichte an den Kontaktstellen, das Material verflüssigt. Dies hat den Nachteil, dass mit den Problemen von Porosität, Heißrissen, Entmischung usw. zu rechnen ist. [3]

#### 3.1.1 Reibschweißverfahren

Reibschweißen ist seit mehr als hundert Jahren bekannt. Generell unterscheidet man zwischen drei Reibschweißverfahren, welche in Abbildung 3-1 dargestellt sind. [4]



**Abbildung 3-1: Reibschweißverfahren: Rotations-, Linear- und Orbitalreibschweißen [4]**

Rotationsreibschweißen und Orbitalreibschweißen basieren auf Rotationsbewegungen, während Linearreibschweißen auf einer linearen Bewegung beruht.

### 3.1.1.1 Rotationsreibschweißen

Rotationsreibschweißen ist das älteste Reibschweißverfahren und tauchte 1894 in den USA zum ersten Mal auf. Bei diesem Verfahren werden rotationssymmetrische Fügeteile unter Druck zusammengedrückt, wobei die Wärme durch die Rotation eines Teiles entsteht. Man unterscheidet zwischen "Reibschweißen mit kontinuierlichem Antrieb" und dem "Schwungradreibschweißen". [5]

Nachteil des Rotationsreibschweißens ist es, dass nur rotationssymmetrische Bauteile geschweißt werden können. Des Weiteren ist die Wärmeentwicklung von der Relativgeschwindigkeit der beiden Teile abhängig, was dazu führt, dass im Kern keine Wärme entsteht (Abbildung 3-2), da die Geschwindigkeit dort gleich Null ist. Hohlzylinder bieten hier Vorteile, da hier dieses Problem nicht auftritt.

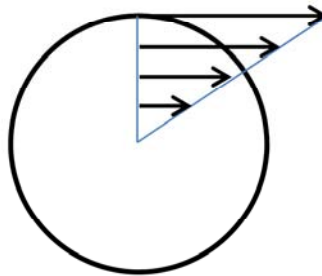


Abbildung 3-2: Geschwindigkeitsprofil - Rotationsreibschweißen

#### 3.1.1.1.1 *Reibschweißen mit kontinuierlichem Antrieb*

Bei dieser Methode wird ein Fügeteil mit konstanter Geschwindigkeit gedreht, während das andere still steht. Sobald ein ausreichender Abbrand erreicht wurde, wird die Rotation gestoppt und die Teile mit der Fügekraft zusammengedrückt (Abbildung 3-3).

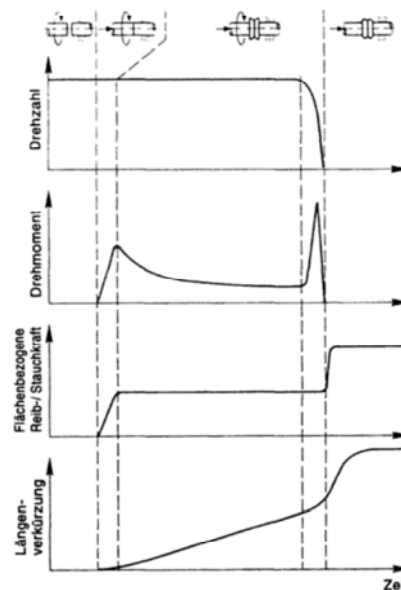


Abbildung 3-3: Verlauf der Prozessgrößen beim Reibschweißen mit kontinuierlichem Antrieb [6]

### 3.1.1.1.2 Schwungradreibschweißen

Bevor die Fügeteile in Kontakt treten wird ein Werkstück, welches mit einem Schwungrad verbunden ist, auf eine festgelegte Geschwindigkeit beschleunigt. Danach wird der Antriebsstrang entkoppelt und die Werkstücke in Verbindung gebracht. Die im Schwungrad gespeicherte Energie wird in der Berührstelle in Wärme umgewandelt. Ist der gewünschte Abbrand erreicht, werden die Teile gestoppt und mit der Fügekraft zusammengepresst (Abbildung 3-4).

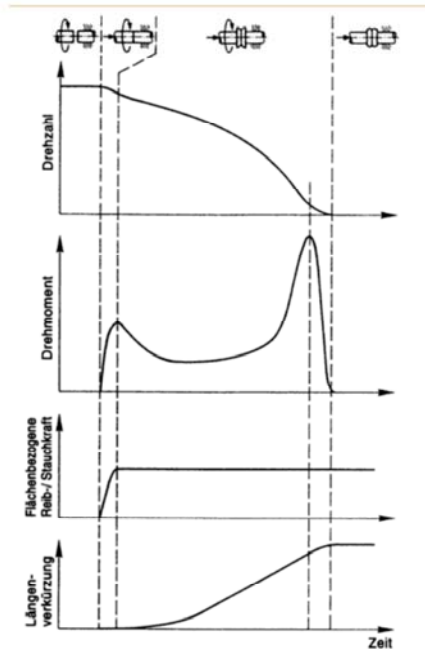


Abbildung 3-4: Verlauf der Prozessgrößen beim Reibschweißen mit Schwungradantrieb [6]

### 3.1.1.2 Orbitalreibschweißen

Beim Orbitalreibschweißen werden die Fügeteile in die gleiche Richtung, mit derselben Geschwindigkeit, mit einer Achsversetzung gedreht. Dieses Verfahren wird auf nicht achsensymmetrische Teile angewendet. [7] (Abbildung 3-5)

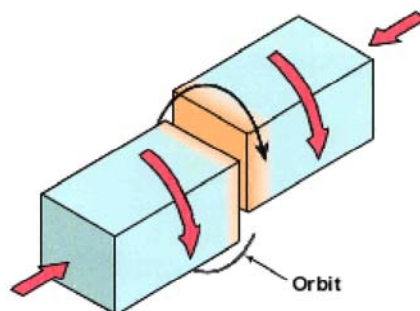


Abbildung 3-5: Prinzip des Orbitalreibschweißens [7]



### 3.1.1.3 Lineares Reibschweißen

Beim linearen Reibschweißen werden die Teile linear zueinander bewegt. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass die Teile nicht rotationssymmetrisch sein müssen. Durch die entstehende Wärme, die Hin- und Herbewegung und dem aufgebrauchten Druck wird das Material an der Fügefläche plastifiziert und herausgedrückt. Es entsteht der spezifische Schweißgrat. Das Linearreibschweißen wird seit den 1980er Jahren angewendet. [8] Bereits 1929 reichte Richter das Patent ein, in welchem er den Prozess grob beschrieb. [9] Das Linearreibschweißen wird in Kapitel 3.2 Lineares Reibschweißen (Seite: 19) näher beschrieben. Abbildung 3-6 zeigt eine Prinzipskizze des linearen Reibschweißens mit den wichtigsten Parametern.

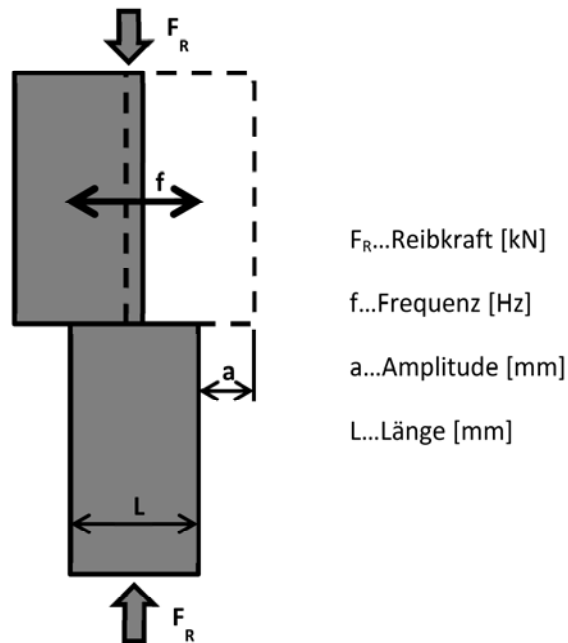
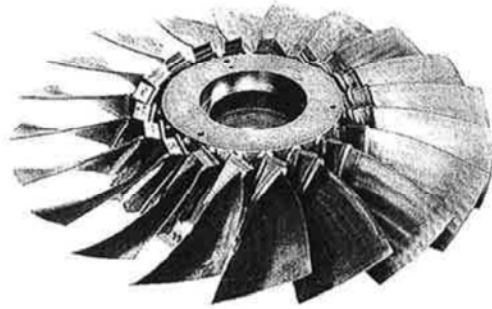


Abbildung 3-6: Beschreibung des LRS

## 3.2 Lineares Reibschweißen

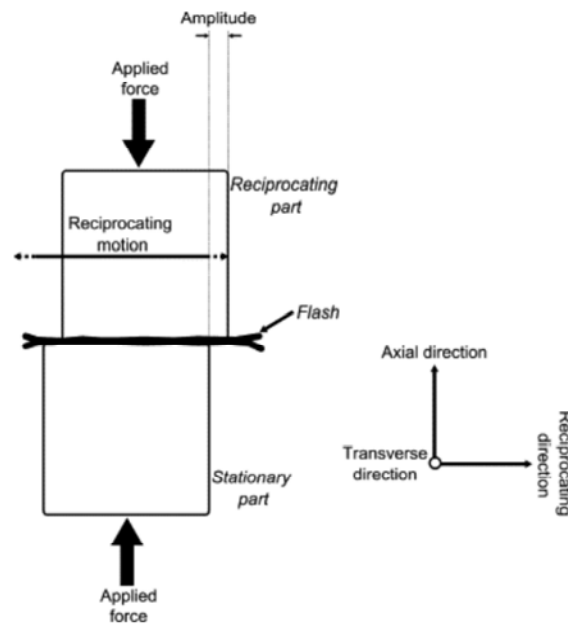
Frühere Forschungen zum linearen Reibschweißen beruhten eher auf der Erforschung der Maschine, welche die, für lineares Reibschweißen, typische Bewegung erzeugt. Wesentlicher Nachteil dieses Schweißverfahrens sind die hohen Maschinenkosten gegenüber einer Rotationsreibschweißmaschine. Vairis steuerte einen erheblichen Beitrag zur Beschreibung des Linearreibschweißens in der Arbeit „High frequency linear friction welding“ [10] bei.

Hauptsächlich wurde lineares Reibschweißen beim Bau von Flugzeugtriebwerken benötigt. Dort wird das Verfahren für das Fügen von „blisks“ (blades and discs) verwendet. Der verwendete Werkstoff ist meist eine Titanlegierung. [11] Mateo beschreibt in seiner Arbeit „Welding repair by linear friction in titanium alloys“ das Linearreibschweißen als gute Möglichkeit zur Reparatur von Blisks (Abbildung 3-7). Die Schweißzone hatte dabei eine höhere Streckgrenze als der Grundwerkstoff, weshalb die Proben im Grundwerkstoff brachen. [12]



**Abbildung 3-7: Blisk – linearreibgeschweißt [11]**

Durch die lineare Bewegung und den Reibdruck wird das plastifizierte Material als Schweißgrat (flash) aus der Fügefläche gedrückt. In Abbildung 3-8 ist der Prozess des Linearreibschweißens schematisch dargestellt.

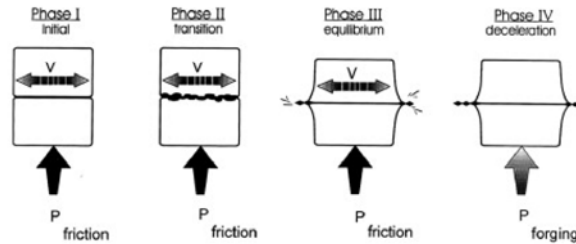


**Abbildung 3-8: Darstellung des Linearreibschweißprozesses [3]**

### 3.2.1 Prozessablauf

Vairis und Frost unterscheiden zwischen vier Prozessstufen (Abbildung 3-9). [13] Die erste Phase ist die Anfahrphase (initial phase), gefolgt von der Übergangsphase (transition phase). Phase drei und vier sind die Gleichgewichtsphase (equilibrium phase) und die Stauchphase (forging phase).





**Abbildung 3-9: Prozessphasen beim LRS [14]**

### **1. Anfahrphase:**

Die Fügeteile berühren sich an den Fügeflächen. Druck wird aufgebracht und die Teile bewegen sich mit einer vorgegebenen Frequenz relativ zueinander. Durch die Reibung entsteht ein Temperaturanstieg. Die Kontaktfläche beginnt durch die Glättung der Oberfläche zu wachsen. Durch die angepasste Amplitude, Frequenz und Reibkraft beginnt die Oberfläche zu erweichen.

### **2. Übergangsphase:**

In dieser Phase berühren sich die Teile an der Oberfläche vollständig. Die Wärmeeinflusszone weitet sich aus. Die plastifizierte Schicht kann der Scherkraft nicht länger standhalten. Partikel werden herausgerissen und gelangen als Schweißgrat nach außen. Hier beginnt sich der Grat zu bilden, obwohl noch keine nennenswerte Achsverkürzung stattgefunden hat.

### **3. Gleichgewichtsphase:**

Hier wird die maximale Temperatur erreicht, diese liegt aber immer noch unter der Schmelztemperatur. Unter dem Einfluss des Drucks finden aber Mikrostrukturumwandlungen in der Nähe der Schweißzone statt. Diese sind abhängig vom verwendeten Werkstoff und dessen Eigenschaften. In dieser Phase findet eine Achsverkürzung infolge des Abbrennvorganges statt. Das plastifizierte Material wird in den Schweißgrat transportiert.

### **4. Stauchphase:**

Nachdem die gewünschte Achsverkürzung erreicht wurde, wird die Pendelbewegung gestoppt und die Teile zueinander positioniert. Ein Stauchdruck, welcher normalerweise höher oder mindestens gleich groß wie der Reibdruck ist, wird aufgebracht um eine zufriedenstellende Schweißung zu gewährleisten.

Eine andere Aufteilung der Prozessphasen wird von Bhamji gewählt. [11] Hier werden die Phasen des Schweißprozesses nach vorne und hinten erweitert. Es werden insgesamt sechs Phasen unterschieden:

#### **1. Einspannen:**

Die beiden zu verschweißenden Bauteile werden in die Reibschweißmaschine eingespannt. Es muss sichergestellt sein, dass sich die Teile in der Einspannung, aufgrund der während des Schweißprozesses auftretenden Kräfte, nicht bewegen können. Das bedeutet, dass die Einspannvorrichtung der Bauteilgeometrie angepasst ist.

## 2. Berühren und Zurückfahren:

Um den Nullpunkt zu definieren, werden die beiden Bauteile mit einer definierten leichten Kraft zusammengedrückt und anschließend wieder um einen gewissen Abstand auseinandergefahren.

## 3. Konditionierungsphase (A):

Die oszillierende Bewegung eines Bauteiles beginnt und die Teile werden zusammengebracht.

## 4. Reibphase (B):

Die Reibkraft wird erhöht bis sie einen bestimmten Wert erreicht. Danach wird sie auf diesem konstant gehalten. An den Berührflächen wird Wärme erzeugt, wodurch das Material plastifiziert wird. Durch den Druck und die oszillierende Bewegung wird das Material nach außen gedrückt und es entsteht der charakteristische Schweißgrat (engl. flash). Die Reibphase endet nachdem eine bestimmte axiale Verkürzung erreicht wurde. Andere Triggerkriterien stellen die Reibzeit oder die Reibzyklen dar.

## 5. Stauchphase (C):

Sobald das Kriterium zur Beendigung der Reibphase erreicht wurde, wird die Stauchphase gestartet. Die Amplitude wird auf null reduziert, die Fügepartner werden positioniert und eine Stauchkraft wird aufgebracht. Dies geschieht normalerweise sehr schnell. Die Stauchkraft, welche üblicherweise gleich oder höher der Reibkraft ist, wird für eine gewisse Zeit aufrechterhalten.

## 6. Entfernen des geschweißten Bauteiles (D):

Das Bauteil kann aus der Einspannvorrichtung und der Maschine entfernt werden.

Die Reibphase wird weiter in drei Unterphasen unterteilt, wobei diese den Phasen 1 bis 3 von Vairis und Frost entsprechen. [13]

In Abbildung 3-10 werden die Phasen A bis D dargestellt.

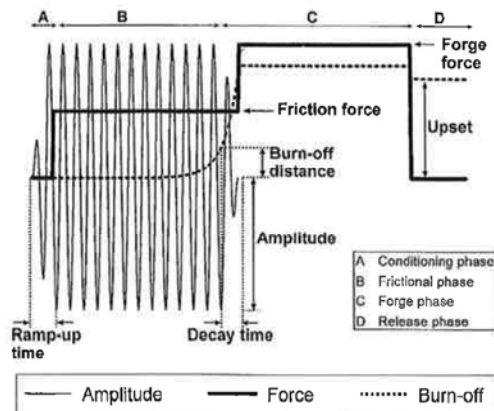
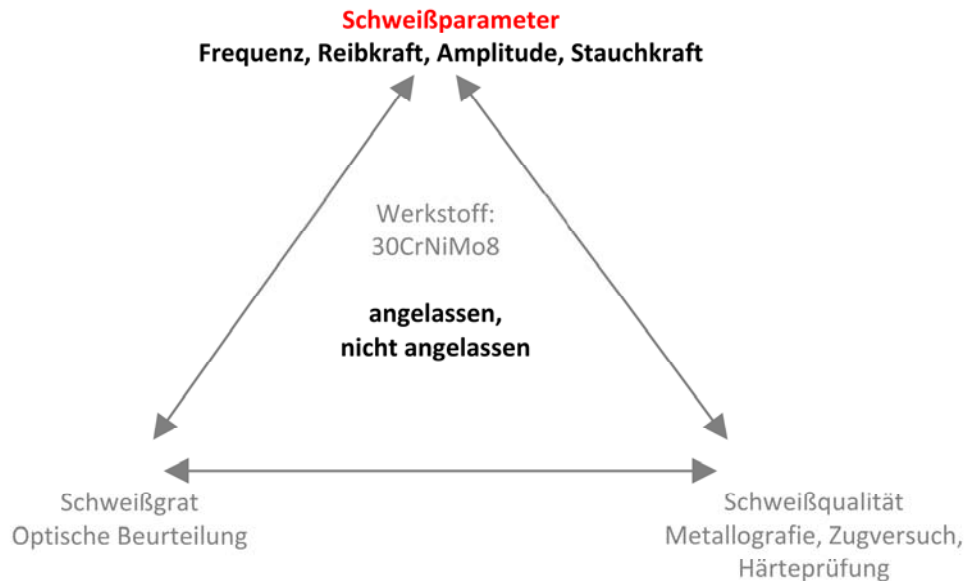


Abbildung 3-10: Phasen des LRS [11]

### 3.2.2 Schweißparameter



Die durch Reibung hervorgerufene Wärme ist elementar für die Reibphase. Sie wird vor allem durch drei Hauptparameter erzeugt:

1. Reibkraft
2. Frequenz
3. Amplitude

#### 3.2.2.1 Haupt-Prozessparameter

Die Haupt-Prozessparameter werden an der Linearreißschweißmaschine eingegeben und sind während des Reibprozesses von besonderer Bedeutung. [11]

- Frequenz [Hz]:** Anzahl der Schwingungen pro Sekunde.
- Amplitude [mm]:** Maximale Verschiebung des bewegten Teils ausgehend von der Mittellage.
- Reibdruck [kN]:** Druck auf die Fügeteile während der Reibphase. Dieser ergibt sich aus der Division der Reibkraft durch die gesamte Querschnittsfläche.
- Axiale Verkürzung [mm]:** Die Länge, um welche sich die Fügeteile während der Reibphase verkürzen. Nach einer eingestellten Verkürzung endet die Reibphase.
- Anfahrzeit [s]:** Die Zeit, welche für die Erreichung einer gleichmäßigen Bewegung und des Reibdrucks benötigt wird.
- Ausschwingdauer [s]:** Dauer bis die Pendelbewegung der Fügeteile gestoppt wird. Diese sollte so gering wie möglich gehalten werden.

**Stauchdruck [kN]:** Druck mit der die Fügeiteile in der Stauchphase aneinander gepresst werden.

**Stauchzeit [s]:** Dauer der Stauchphase.

### 3.2.2.2 Prozessparameter, welche aus den Haupt-Prozessparametern folgen

Diese Parameter sind ebenfalls von Bedeutung, können aber nicht eingestellt werden, da sie sich aus den Haupt-Prozessparametern ergeben. [11]

**Gesamte axiale Verkürzung [mm]:** Gesamte Verkürzung nach dem Schweißvorgang.

**Scherkraft [kN]:** Kraft parallel zu den Fügeflächen. Hervorgerufen durch die Schwingbewegung und die Reibkraft.

**Abbrandrate [mm/s]:** Gradient der axialen Verkürzung (auch: Burn-off-rate).

**Schweißzeit [s]:** Gesamte Dauer des Schweißprozesses.

Versuche mit rostfreiem Stahl wurden von Bhamji durchgeführt. Auch durch größere Veränderungen hinsichtlich der Schweißparameter, konnte die Stabilität der Schweißung aufrechterhalten werden. Solange die Parameter in einem günstigen Bereich liegen, konnten gute Ergebnisse für Zugfestigkeit und Dehnung erreicht werden. Weiters konnte er feststellen, dass die Abbrandrate die Mikrostruktur der Schweißzone wesentlich beeinflusst. Mit steigendem Reibdruck und mittleren Amplituden und Frequenzen konnte eine schnellere Abbrandrate und eine geringere Reibzeit erreicht werden. [3]

Addison konnte für die Beziehung zwischen Reibdruck und Reibzeit einen ähnlichen Verlauf nachweisen, jedoch unterscheiden sich die Ergebnisse hinsichtlich der Verläufe für Frequenz und Amplitude. Bei allen drei Parametern sinkt die Reibzeit mit steigenden Werten. [9]

Bei Versuchen mit Titanlegierungen stellte Ma fest, dass mit steigendem Reibdruck eine schnellere axiale Verkürzung erreicht werden kann. Der Reibdruck wurde dabei von 50 bis 60 N/mm<sup>2</sup> variiert. Eine weitere Geschwindigkeitssteigerung wurde bei einer Amplitude von 3 mm und einer Frequenz von 35 Hz erreicht. Dabei war der Einfluss des Reibdrucks ausschlaggebender als die Amplitude. Der Einfluss der Frequenz war am geringsten. Der Querschnitt betrug 180 mm<sup>2</sup>. [15]

### 3.2.3 Power Input

Der Power Input ist ein Parameter, welcher den Zusammenhang zwischen Amplitude, Reibkraft, Frequenz und Querschnittsfläche angibt. Üblicherweise wird der spezifische Power Input, welcher auf die Querschnittsfläche bezogen ist, angegeben. Dieser Parameter soll die Energieeinbringung in die Schweißverbindung pro Sekunde und Quadratmillimeter beschreiben. Ausgehend von Vairis wurde dieser Parameter eingeführt und von weiteren Autoren übernommen. Jedoch gibt es Autoren, welche den Power Input anders definieren. In weiterer Folge sollen nun einige Definitionen erläutert werden.

### 3.2.3.1 Vairis

Vairis definierte den spezifischen Power Input Parameter  $w$  (Formel 3-1) erstmals in der Arbeit „High frequency linear friction welding“. [10]

$$w = \frac{\alpha \times f \times P_{fr}}{2 \times \pi \times \text{cross-sectional area}}$$

**Formel 3-1: spezifischer Power Input Parameter (Vairis) [10]**

Wobei die Amplitude  $\alpha$  in Millimeter, die Frequenz  $f$  in Hz und der Reibdruck  $P_{fr}$  in MPa angegeben wird. Unter cross-sectional area wird dabei die Nettoquerschnittsfläche in  $\text{mm}^2$  verstanden. Der spezifische Power Input Parameter  $w$  erhält dabei die Einheit  $\text{kW}/\text{mm}^2$ . Betrachtet man nun die angegebenen Einheiten, so ist festzustellen, dass hier ein Fehler vorliegen muss. Verwendet man die angegebenen Einheiten, so erhält man für  $w$  eine Einheit von  $\text{mW}/\text{mm}^4$ . Von Vairis wurde jedoch die Einheit  $\text{kW}/\text{mm}^2$  angegeben. (Formel 3-2)

$$\frac{\text{mm} \times \frac{1}{\text{s}} \times \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\text{mm}^2} = \frac{\text{mW}}{\text{mm}^4} \neq \frac{\text{kW}}{\text{mm}^2}$$

**Formel 3-2: Einheitengleichung zum Power Input (Vairis)**

### 3.2.3.2 Vairis und Frost

In der Arbeit „High frequency linear friction welding of a titanium alloy“ von Vairis und Frost wurde die gleiche Definition und Einheitenerklärung verwendet. Zusätzlich wurde hier  $w$  noch mit „maximum power input per unit area“ erklärt. [13]

Beispiel:  $w = f \cdot a \cdot P_{fr} / (2 \cdot \pi \cdot A) = 20 \text{ Hz} \cdot 3 \text{ mm} \cdot 20,9 \text{ MPa} / (2 \cdot \pi \cdot 60 \text{ mm}^2) = 3,33 \text{ mW}/\text{mm}^4$

Angegeben wurde jedoch nicht  $\text{mW}/\text{mm}^4$  sondern  $\text{kW}/\text{mm}^2$ .

Erwähnt wurde hier auch der Power Input (Formel 3-3) mit:

$$\text{Power Input} = \text{coefficient of friction} \times \text{friction pressure} \times \text{velocity}$$

**Formel 3-3: Power Input (Vairis und Frost) [13]**

Hier würde sich die Einheit  $\text{mW}/\text{mm}^2$  ergeben wenn man für friction pressure MPa und für velocity  $\text{mm}/\text{s}$  annimmt.

### 3.2.3.3 Bhamji, Preuss, Threadgill und Addison

In der Arbeit „Solid state joining of metals by linear friction welding“ von Bhamji, Preuss, Threadgill und Addison wurde ebenfalls die gleiche Definition vom spezifischen Power Input Parameter verwendet. Jedoch wurden hier keine Einheiten erwähnt. [11]



### 3.2.3.4 Wanjara und Jahazi

In der Arbeit „Linear Friction Welding of Ti-6Al-4V: Processing, Microstructure, and Mechanical – Property Inter-Relationships“ von Wanjara und Jahazi wurde der spezifische Power Input Parameter mit der Abkürzung PI festgelegt. Die Formel ist jedoch gleich geblieben. (Formel 3-4) Auf die Angabe der Einheiten für die Parameter wurde verzichtet. Der Power Input erhielt dabei die Einheit kW. [16]

$$PI = \frac{\alpha \times f \times P}{2 \times \pi \times A}$$

#### Formel 3-4: Power Input (Wanjara und Jahazi)

Beispiel aus der Arbeit:  $PI = 50 \text{ Hz} \cdot 2 \text{ mm} \cdot 70 \text{ MPa} / (2 \cdot \pi \cdot 13 \text{ mm} \cdot 26 \text{ mm}) = 3,3 \text{ mW/mm}^4$

Es besteht wiederum ein Einheitenproblem.

Des Weiteren wurde hier festgestellt, dass der Power Input kein ausreichendes Kriterium für gute Schweißverbindung darstellt. Es muss auch die axiale Verkürzung beachtet werden. [16]

### 3.2.3.5 Bhamji, Michael Preuss, Philip L. Threadgill, Richard J. Moat, Adrian C. Addison, Matthew J. Peel

In der Arbeit “Linear friction welding of AISI 316L stainless steel” von Imran Bhamji, Michael Preuss, Philip L. Threadgill, Richard J. Moat, Adrian C. Addison, Matthew J. Peel wird ebenfalls ein Power Input erwähnt. Hier wird der maximale Power Input berechnet, welcher die Einheit  $\text{MNmm}^{-1}$  besitzt. Diese Einheit konnte nachvollzogen werden. [3]

$$P_m = F \cdot v_m = F \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \alpha = p \cdot A \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \alpha$$

Beispiel S11:  $P_m = (160 \text{ N/mm}^2 \cdot 400 \text{ mm}^2) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 40 \text{ Hz} \cdot 2,5 \text{ mm} = 40212378 \text{ mW} = 40 \text{ MNmm/s} = 40 \text{ kW}$

mit der Fläche  $A = 20 \text{ mm} \cdot 20 \text{ mm} = 400 \text{ mm}^2$

Herleitung [3]:

$$\begin{aligned} P_m &= F \cdot v_m = F \cdot 2\pi f a \\ P &= F_j \cdot v = F_j \cdot a \omega \cos(\omega t) = F_j \cdot a 2\pi f \cos(2\pi f t) \\ \cos(\omega t) &= 1 \text{ für den maximalen Power Input} \\ P_m &= F_j \cdot a \omega = F_j \cdot v_m \\ F_j &= \mu F \text{ für den Reibkoeffizient wird der Wert 1 angenommen} \\ P_m &= F \cdot v_m = F \cdot 2\pi f a \end{aligned}$$

Diese Formel ist sowohl in der Herleitung als auch in den Einheiten schlüssig.

Vergleicht man nun diese Formel mit der spezifischen Power Input Parameter Formel von Vairis, so kann man feststellen, dass hier mit dem Power Input und nicht mit dem spezifischen Power Input gerechnet wurde, was bedeutet, dass nicht durch die Querschnittsfläche dividiert wurde. Würde man den Power Input  $P_m$  durch die Querschnittsfläche  $A$  dividieren, gelangt man zu folgender Formel, welche man als spezifischen Power Input (Formel 3-5) festlegen kann:

$$\text{spezifischer Power Input} = \frac{Pm}{A} = \frac{F \times 2 \times \pi \times f \times \alpha}{A} \left[ \frac{mW}{mm^2} \right]$$

#### Formel 3-5: Spezifischer Power Input

Wobei folgende Einheiten zu verwenden sind: F[N], f[Hz],  $\alpha$ [mm], A[mm<sup>2</sup>]

Im Vergleich dazu die Formel 3-6 von Vairis:

$$w = \frac{\alpha \times f \times P_{fr}}{2 \times \pi \times \text{cross-sectional area}} \left[ \frac{mW}{mm^4} \right]$$

#### Formel 3-6: spezifischer Power Input w

Diese Formel sollte jedoch auch die Einheit kW/mm<sup>2</sup> besitzen.

Eine mögliche Lösung wäre anstatt des Reibdrucks  $P_{fr}$  die Reibkraft zu verwenden. Somit wäre das Einheitenproblem gelöst. Fraglich ist jedoch noch warum die Faktoren 2 x Pi im Nenner des Bruches stehen.

Wenn man den Reibkoeffizienten mit 1 festlegen würde wäre eine nachvollziehbare Formel für den maximalen spezifischen Power Input Parameter somit folgende: (Formel 3-7)

$$\text{spezifischer Power Input} = \frac{Pm}{A} = \frac{F \times 2 \times \pi \times f \times \alpha}{A} \left[ \frac{mW}{mm^2} \right]$$

#### Formel 3-7: spezifischer Power Input

### 3.2.3.6 Ma, Li und Yang

In der Arbeit "Impact toughness and fracture analysis of linear friction welded Ti-6Al-4V alloy joints" von Ma, Li und Yang [17] und "Linear Friction Welding of Ti-6Al-4V Alloy: Microstructure Characterization" [18] wurde der durchschnittliche Power Input PI folgendermaßen charakterisiert: (Formel 3-8)

$$PI = 4 \times \mu \times f \times a \times p \left[ \frac{mW}{mm^2} \right]$$

#### Formel 3-8: Power Input (Ma, Li und Yang)

Hier taucht der Reibkoeffizient  $\mu$  in der Formel auf. Der Reibdruck ergibt sich aus der Division von Reibkraft durch Querschnittsfläche. Die mittlere Geschwindigkeit ergibt sich durch die Multiplikation von  $4 \times a \times f$ . Diese mittlere Geschwindigkeit wird durch die Gleichung: Weg/Zeit errechnet. Wobei der zurückgelegte Weg =  $4 \times a$  für einen Zyklus ist. Die Zeit ist dabei der Kehrwert der Frequenz.

Multipliziert man den Reibkoeffizienten mit der Reibkraft erhält man die tatsächliche Scherkraft in Reibrichtung. Durch eine weitere Multiplikation mit der mittleren Geschwindigkeit gelangt man zur mittleren Reibleistung. Durch die Division mit der Querschnittsfläche gelangt man zum durchschnittlichen Power Input PI pro mm<sup>2</sup>.

### 3.2.3.7 Dalgaard

Um nähere Informationen bezüglich des Power Inputs zu erhalten, wurde versucht mit Dr. Wanjara Kontakt aufzunehmen, um den Power Input zu diskutieren. Auf die übermittelte Fragestellung bekamen wir von Elvi Dalgaard eine Rückmeldung. Es wurde der Fehler in der Arbeit von Dr. Achilles Vairis hinsichtlich der Power Input Formel bestätigt. Um die Formel zu korrigieren, muss anstelle des Reibdrucks die Reibkraft, welche senkrecht auf die Querschnittsfläche wirkt, verwendet werden. Alternativ kann auch mit dem Reibdruck gerechnet werden, wobei die Querschnittsfläche, welche im Nenner steht, weggelassen werden muss. Auf die Frage, warum  $2 \cdot \pi$  in der Gleichung vorkommt, wurde dies mit der Sinus-Schwingung erklärt. In der Arbeit „Evolution of Microstructure, Microtexture and Mechanical Properties in Linear Friction Welded Titanium Alloys“ von Elvi Dalgaard wurde bereits auf den Fehler bezüglich der Reibkraft eingegangen. [19]

### 3.2.3.8 Verwendeter Power Input

Generell wird darauf hingewiesen, dass der berechnete Power Input lediglich zum Vergleich der Parametereinstellungen bei den jeweiligen Versuchen verwendet wird, weshalb sehr unterschiedliche Definitionen auftreten. Die vier Parameter: Frequenz, Amplitude, Reibkraft und Reibfläche treten jedoch in jeder Definition auf.

Somit wurde beschlossen folgende Gleichung zu verwenden, welche den maximalen spezifischen Power Input (PI) angibt. (Formel 3-9) Für A wird dabei die gesamte Querschnittsfläche eingesetzt. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass der Reibkoeffizient mit 1 angenommen wird.

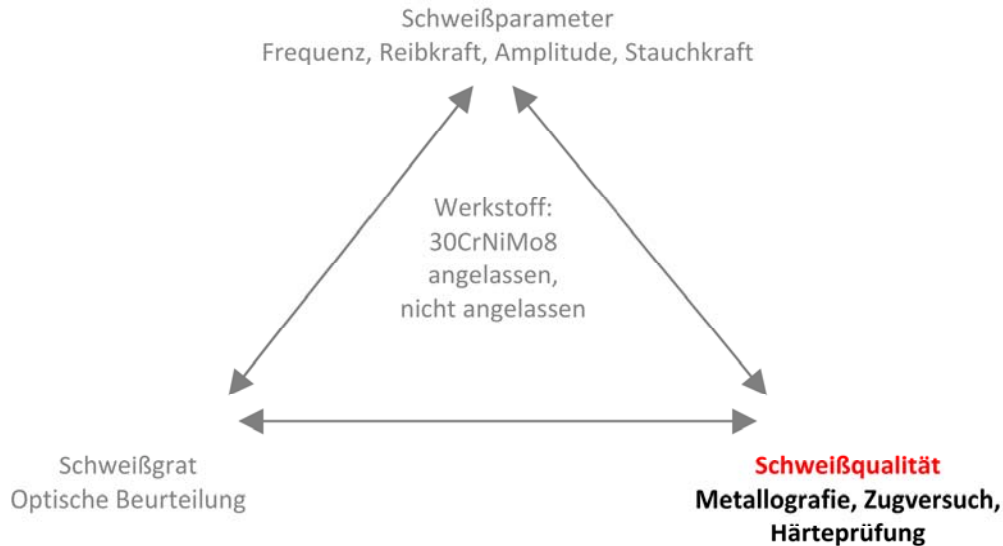
$$PI = \frac{2 \times \pi \times F \times f \times a}{A} = 2 \times \pi \times p \times f \times a \left[ \frac{mW}{mm^2} \right]$$

#### Formel 3-9: Verwendeter maximaler spezifischer Power Input

Wobei Reibkraft F in N, die Fläche A in mm<sup>2</sup>, die Frequenz f in Hz und die Amplitude a in mm einzutragen ist. Wodurch sich die Einheit für den PI in mW/mm<sup>2</sup> ergibt. Der Faktor  $2 \cdot \pi \cdot f \cdot a$  definiert die maximale Geschwindigkeit der Bewegung. [9] Es wird darauf hingewiesen, dass der berechnete PI nur zum Vergleich der Parameterkombinationen für die Versuche verwendet wird und sich von der tatsächlichen Energieeinbringung unterscheidet.



### 3.2.4 Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften der Proben



Für eine gute Schweißbeignung sind eine geringe Wärmeleitfähigkeit, eine hohe Warmfestigkeit, ein hoher E-Modul und ein ausgeglichener Reibungskoeffizientenverlauf von Vorteil. Bei hoher Warmfestigkeit und geringer Wärmeleitfähigkeit liegen auch mit zunehmender Reibzeit stabile Reibbedingungen vor, da nur geringe Schwingverluste auftreten. Metallische Werkstoffe mit guter Warmfestigkeit und begrenzter Wärmeleitfähigkeit (z.B. legierter Stahl X5CrNi1810) haben daher eine gute Voraussetzung. Werkstoffe, welche unter erhöhter Temperatur schnell und tiefgreifend zum Entfestigen neigen, sind nur bedingt zum Linearreibschweißen geeignet (z.B. Aluminium Al 99,5). Aber auch diese können erfolgreich geschweißt werden. Nur ist hier genauer auf die Einhaltung des Parameterbereichs zu achten. Wegen der zunehmenden Schwingverluste ist während des Schweißens eine höhere Amplitude von Vorteil. [20]

Obwohl die Solidustemperatur nicht überschritten wird, können die Spitzentemperaturen nahe am Schmelzpunkt liegen. Zusammen mit dem aufgebrachtten Druck wird eine Veränderung der Mikrostruktur nahe an der Schweißzone stattfinden. Abhängig von den Mikrostrukturveränderungen und der auftretenden Temperatur lassen sich vier Zonen in den geschweißten Proben festlegen. Bhamji entschied sich einen Vergleich mit dem Rührreibschweißen anzustellen, wo vier Zonen festgelegt wurden [11]:

1. Schweißzone (SZ, engl. WZ),
2. Thermomechanisch beeinflusste Zone (TMBZ, engl. TMAZ),
3. Wärmeeinflusszone (WEZ, engl. HAZ) und
4. Grundwerkstoff (GW, engl. PM).

Andere Forscher ließen die Wärmeeinflusszone außer Acht und definierten nur die Zonen: SZ, TMBZ und GW. [16]

### 3.2.4.1 Beschreibung der vier Zonen der Schweißverbindung

Aus Literaturrecherchen konnte festgestellt werden, dass Bhamjis Methode gut anwendbar ist. Deshalb wird diese Vier-Zonen-Methode auch in dieser Arbeit angewendet. Im Anschluss werden die vier Zonen der Schweißverbindung näher erklärt, wobei die Definition von Bhamji [11] berücksichtigt wurde:

#### **Grundwerkstoff (PM):**

Mechanische, mikrostrukturelle oder andere Eigenschaften vor und nach dem Schweißen bleiben unverändert, da die Schweißzone weit genug entfernt ist.

#### **Wärmeeinflusszone (HAZ):**

Durch die Schweißung wurden die Mikrostruktur und/oder andere Eigenschaften infolge von Wärme verändert. Eine makroskopische plastische Verformung kann nicht festgestellt werden. Veränderungen hinsichtlich Korngröße, mechanische oder physikalische Eigenschaften sind jedoch möglich.

#### **Thermo-Mechanische-Einflusszone (TMAZ):**

Diese liegt zwischen Wärmeeinflusszone und Schweißzone und wurde während des Schweißprozesses, durch die höhere Wärmeeinwirkung, plastisch verformt. Phasenumwandlungen, die abhängig vom Werkstoff sind, können auftreten.

#### **Schweißzone (WZ, Weld centre):**

In der Schweißzone wird das Gefüge durch Wärme- und Krafteinwirkung am stärksten verändert und unterscheidet sich deutlich von den anderen Zonen. Dies entsteht meist durch Rekristallisation, wodurch eine Kornverfeinerung stattfindet.

Diese Zonen sind in Abbildung 3-11 eingezeichnet, wobei die Schweißverbindung unter polarisiertem Licht betrachtet wurde.

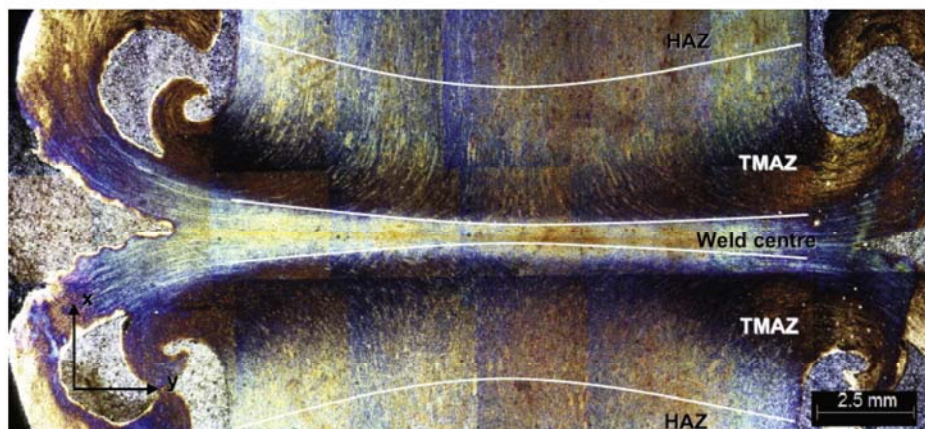


Abbildung 3-11: Bereiche in der Schweißverbindung unter polarisiertem Licht [21]

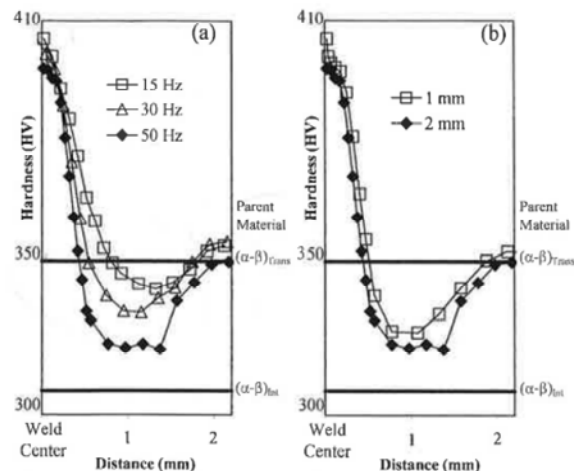
In Abbildung 3-12 sind die Bereiche an Probe 14 des Vorversuchs eingezeichnet. Die verschiedenen Zonen sind durch die Ätzung klar ersichtlich.

Laut Vairis hängt die Größe der Wärmeeinflusszone umgekehrt proportional mit dem aufgebrauchten Reibdruck zusammen. Kleinere Reibdrücke oder kleinere Frequenzen mit großen Amplituden führen zu großen Wärmeeinflusszonen mit guten Ergebnissen bei Kerbschlagbiegeversuchen. [10]



**Abbildung 3-12: Schweißnaht - Probe 14 VV**

Bei den Versuchen von Wanjara wurden Härtemessungen durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass mit zunehmender Frequenz und Amplitude der Bereich des Härteabfalls vergrößert wird. [22] (Abbildung 3-13)



**Abbildung 3-13: Härtemessung - Ti6Al4V [22]**

Bei Untersuchungen hinsichtlich des Rotationsreibschweißens von rostfreiem Stahl stellte Sathiya fest, dass mit einer kürzeren Reibzeit eine höhere Zugfestigkeit erzielt wird. Dabei sollen die Reibkraft und die Stauchkraft so hoch wie möglich gewählt werden. Die Härte des Grundwerkstoffs liegt hier immer unterhalb der Härte der durch die Wärme beeinflussten Bereiche. Der Bruch lag im Bereich mit der maximalen Härte. [23]

Romero konnte einen Zusammenhang zwischen dem aufgebrauchten Reibdruck und der Schweißnahtbreite feststellen. Dabei sinkt die Breite des Bereichs höherer Härte mit zunehmendem Reibdruck. (Abbildung 3-14) Die verbleibenden Eigenspannungen sind dabei geringer und weisen auf geringere Schweißtemperaturen hin. [24, 25]

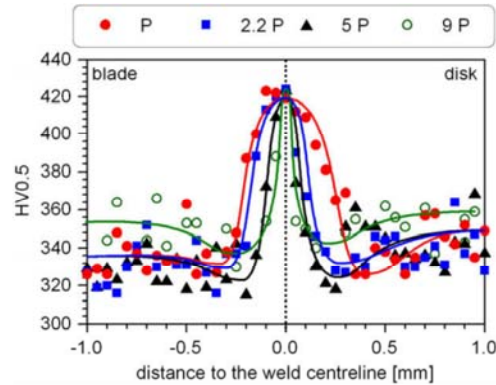
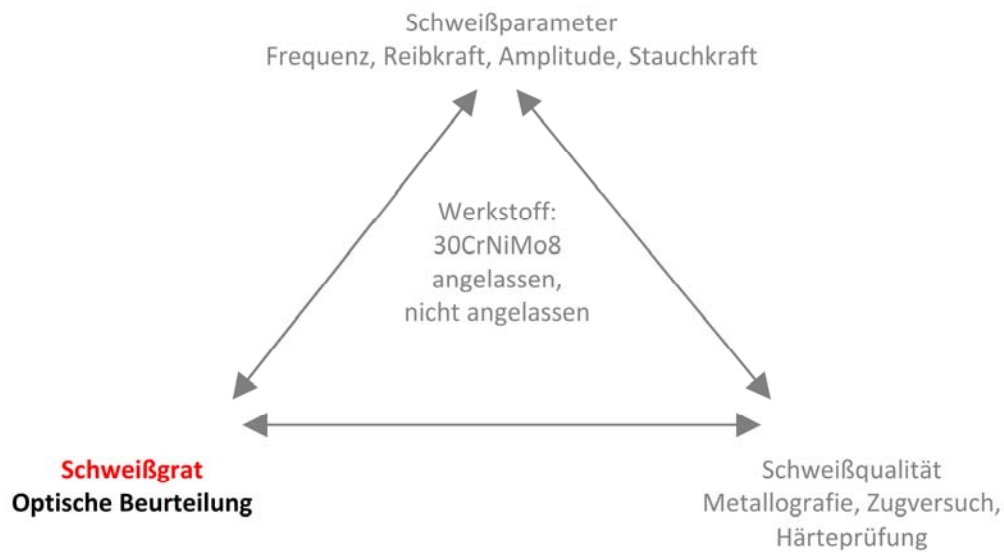


Abbildung 3-14: Einfluss des Reibdrucks auf Breite der Schweißnaht [24]

### 3.2.5 Schweißgrat



Der Schweißgrat (engl. Flash) bildet sich während des Schweißprozesses und soll zur Qualitätsbestimmung dienen. Es wird zwischen vier Schweißgratarten unterschieden, wobei diese optisch zu bestimmen sind. Der beste Schweißgrat wird mit D bzw. 4 bezeichnet, wohingegen der Schlechteste mit A bzw. 1 definiert wird. Unten stehende Abbildungen zeigen die verschiedenen Schweißgratarten.

- Schweißgrat 1 ist der Schlechteste, bei welchem sich nahezu kein Schweißgrat ausbildet. Die Querschnittsflächen sind nicht vollständig verbunden.
- Ist ein Schweißgrat entstanden, welcher aber die beiden Flächen nicht vollständig verbindet, spricht man von Schweißgrat B bzw. 2.
- Ist der entstandene Schweißgrat über der vollen Querschnittsfläche entstanden, sind aber die Schweißgratenden nicht verbunden, so wird dieser als Schweißgrat C bzw. 3 bezeichnet.
- Der beste Schweißgrat, bei welchem die Schweißgratenden auch verbunden sind, wird somit als Schweißgrat D bzw. 4 festgelegt.



Durch die oszillierende Bewegung in der Reibphase und den Druck in der Reib- und Stauchphase wird plastifiziertes Material aus der Schweißzone transportiert. Dabei entstehen durch die verschiedenen Parameterkombinationen unterschiedliche Schweißgratformen. Mit einer geringeren Reibzeit soll die Schweißgratqualität steigen. [26]

Beim Linearreibschweißen entsteht der Schweißgrat einerseits dadurch, dass plastifiziertes Material durch den Reibdruck aus der Schweißnaht gedrängt wird und andererseits durch die oszillierende Bewegung, bei der das Material nach außen transportiert wird. Der Großteil des Schweißgrats befindet sich an den beiden Seiten, in welche die Hin- und Herbewegung stattfindet. Der Grat besteht aus Riefen, welche durch die Oszillation hervorgerufen werden. Nur ein geringer Schweißgrat entsteht an den anderen beiden Seiten. [16, 27] (Abbildung 3-15, Abbildung 3-16)

Entsteht nicht genügend Schweißgrat, so werden die Fügeteile nicht vollständig miteinander verbunden. Eine Verbindung erfolgt nur in der Querschnittsflächenmitte. Dies tritt vor allem bei einem geringen Power Input oder zu geringer Reibkraft auf. [3]

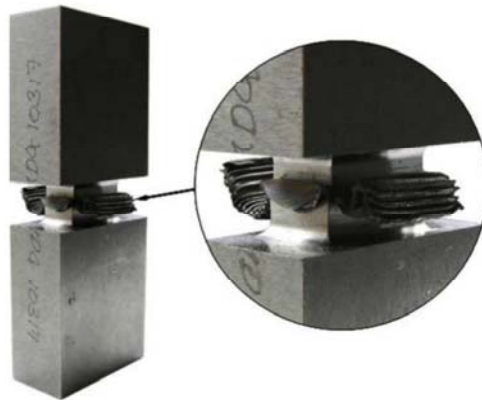


Abbildung 3-15: Schweißgrat - Ti-6Al-4V [24]

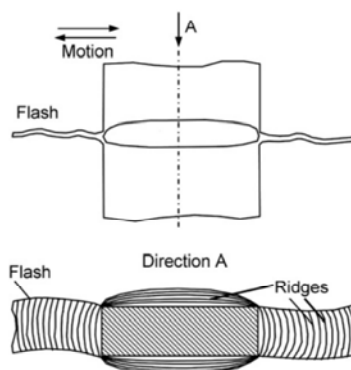


Abbildung 3-16: Schematische Darstellung des Schweißgrats [27]

### 3.2.5.1 Schweißgrat A (bzw. 1):

Der Schweißgrat A ist der Schweißgrat mit der geringsten Qualität. Er kennzeichnet sich dadurch aus, dass so gut wie kein Schweißgrat während der Schweißung entstanden ist. Der Prozess war somit nicht erfolgreich. (Abbildung 3-17)

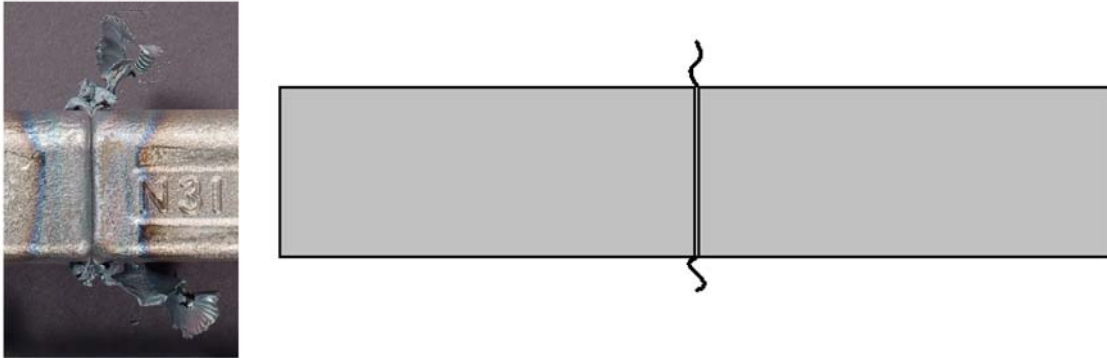


Abbildung 3-17: Schweißgrat A

Schweißgrat	Grat entstanden	Grat über ganze Fläche	Gratenden verbunden
A (1)	-	-	-

### 3.2.5.2 Schweißgrat B (bzw. 2):

Bei diesem Schweißgrat ist ein ausreichender Schweißgrat entstanden, der jedoch nicht die komplette Querschnittsfläche überdeckt. Besonders an den Kanten kann man sich bei diesem Schweißgrat nicht darauf verlassen eine ausreichende Schweißverbindung erzeugt zu haben. Auch diese Schweißgratqualität kann nicht für einen ausreichend gute Qualität für die Schweißverbindung stehen. (Abbildung 3-18)

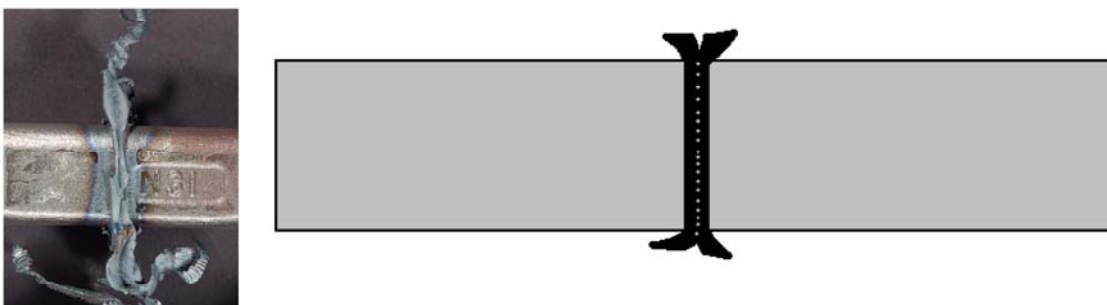


Abbildung 3-18: Schweißgrat B

Schweißgrat	Grat entstanden	Grat über ganze Fläche	Gratenden verbunden
B (2)	JA	-	-

### 3.2.5.3 Schweißgrat C (bzw. 3):

Beim Schweißgrat C ist ein ausreichender Grat entstanden. Zusätzlich bedeckt er die komplette Querschnittsfläche. Auch an den Ecken scheint eine gute Verbindung zu bestehen. Dieser Schweißgrat wurde jedoch mit C beurteilt, da die Gratenden nicht ausreichend verbunden sind, sie klaffen auseinander. (Abbildung 3-19)

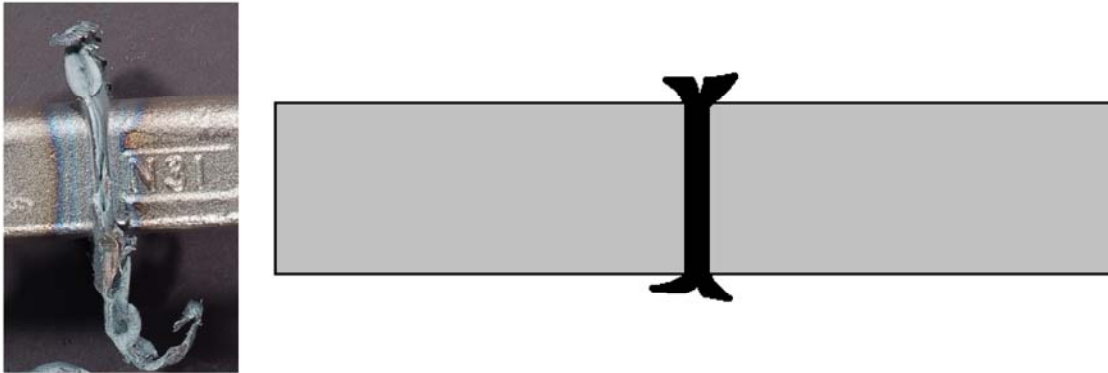


Abbildung 3-19: Schweißgrat C

Grat	Grat entstanden	Grat über ganze Fläche	Gratenden verbunden
C (3)	JA	JA	-

### 3.2.5.4 Schweißgrat D (bzw. 4):

Schweißgrat D kennzeichnet den besten Schweißgrat. Er ist durch einen ausreichenden Grat, welcher über die gesamte Fläche geht und verbundene Gratenden aufweist, charakterisiert. (Abbildung 3-20)

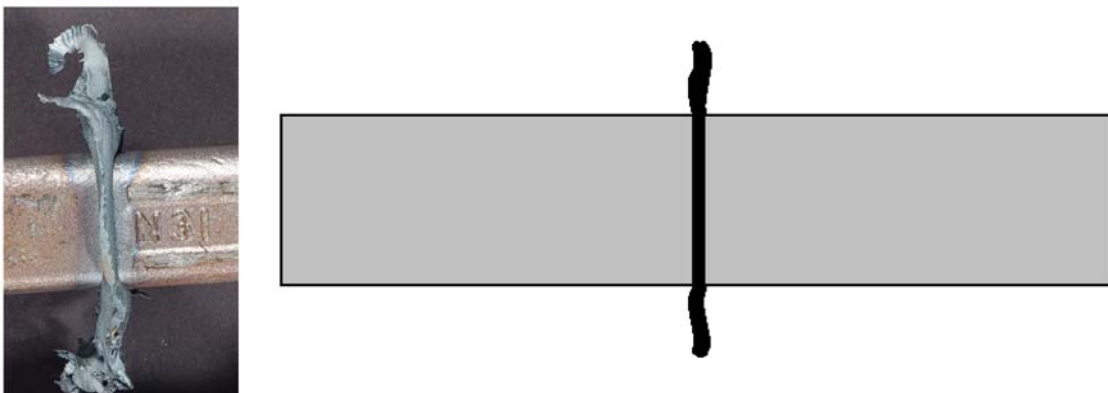


Abbildung 3-20: Schweißgrat D

Grat	Grat entstanden	Grat über ganze Fläche	Gratenden verbunden
D (4)	JA	JA	JA

### 3.3 Versuchsplanung

#### 3.3.1 Statistische Versuchsplanung

Die Aufstellung des Versuchsplans sowohl für den Vorversuch als auch für den Hauptversuch wurde mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung durchgeführt. Diese Methode bietet einige Vorteile gegenüber anderen Methoden. Die statistische Versuchsplanung (engl. Design of Experiments, DoE) wird für die Planung und die Auswertung von Versuchen verwendet. Dabei ist das Ziel, mit möglichst wenigen Versuchen (Kosten und Zeitersparnis), viel über den Zusammenhang von Input- und Outputgrößen zu erfahren. Dabei werden die Eingabeparameter variiert und die Ergebnisse, mit dem Ziel die wichtigsten Prozessinputparameter zu finden, bestimmt. [28-31] (Abbildung 3-21)



Abbildung 3-21: Zweck eines Experiments [29]

Andere Methoden:

#### **Versuch und Irrtum:**

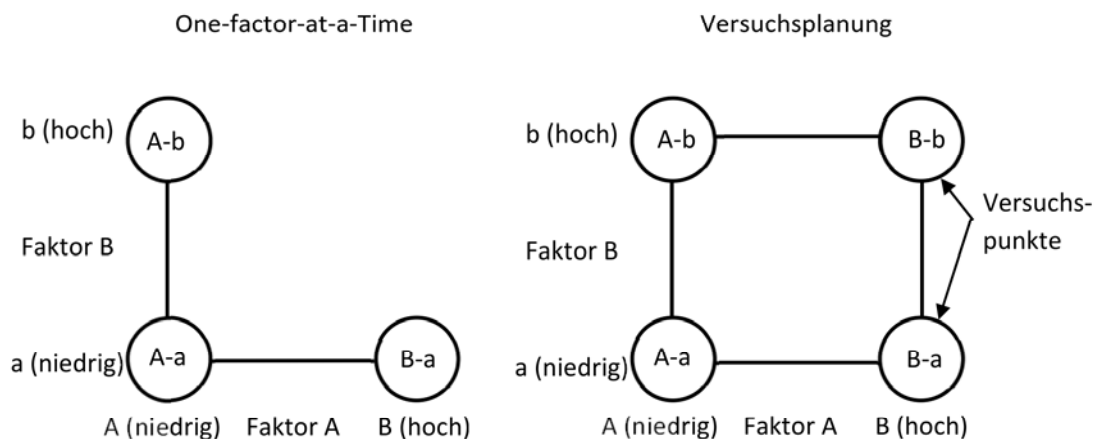
Dabei werden viele Faktoren zu selben Zeit geändert.

#### **One-factor-at-a-Time-Methode (OFAT):**

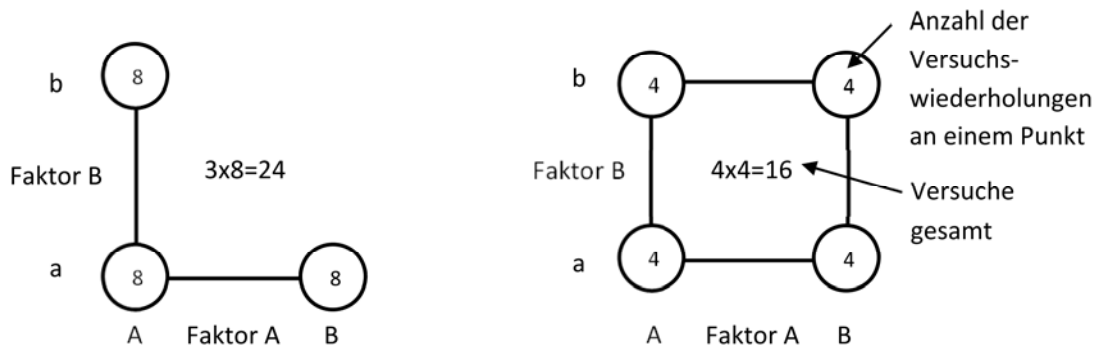
Bei der One-factor-at-a-Time-Methode, welche als traditionelle Vorgehensweise bekannt ist, wird jeweils nur ein Faktor verändert, während die anderen konstant gehalten werden.

#### **Vergleich: OFAT und Versuchsplanung [28]:**

Beispiel mit zwei Faktoren mit jeweils zwei Faktorstufen: (Abbildung 3-22)







**Abbildung 3-22: Vergleich: One-factor-at-a-Time - Versuchsplanung**

In diesem Beispiel soll der Effekt des Faktors A und des Faktors B bestimmt werden. Jeder Faktor hat zwei Faktorstufen (niedrig und hoch). Um den Effekt für Faktor B zu ermitteln, muss die Zielgröße von der niedrigen Stufe mit der der hohen Stufe verglichen werden. Bei dem gezeigten Beispiel werden, um eine ausreichende Bestimmtheit der Unterschiede zu erhalten, je 16 Versuche miteinander verglichen. Um beispielsweise den Effekt des Faktors B zu bestimmen, werden bei der OFAT-Methode 8 Versuche bei der Einstellung „A-a“ (d.h. Faktor A auf Stufe A und Faktor B auf Stufe a) und 8 Versuche bei „A-b“ durchgeführt und der Unterschied berechnet. Für den Effekt des Faktors A gilt die analoge Betrachtung. Um die Effekte zu bestimmen, benötigt man 24 Versuche. Bei der statistischen Versuchsplanung hingegen ergeben sich nur 16 Versuche, es werden nur vier Versuche an den Eckpunkten durchgeführt, jedoch wird eine zusätzliche Kombination „B-b“ eingeführt. Die Genauigkeit der Effektberechnung bleibt gleich, da hier ebenfalls je 16 Versuche für jeden Effekt betrachtet werden. Um beispielsweise den Effekt des Faktors B zu bestimmen, werden hier die Versuche von „A-b“ und „B-b“ mit „A-a“ und „B-a“ verglichen. Dies ergibt untenstehende Vorteile.

**Vorteile der Versuchsplanung:**

- Weniger Versuche bei gleicher Untersuchungsgenauigkeit
- Zusätzliche Faktorkombination bei Punkt „B-b“
- Ausgewogener Versuchsplan, jedes Ergebnis wird mehrfach genutzt
- Auch Wechselwirkungen lassen sich berechnen

**Zusätzliche Vorteile:**

- Systematische Vorgehensweise: einfach mal probieren wird vermieden
- Verbesserte Kosten-Nutzen-Analyse
- Systematische Darstellung erlaubt bessere Maßnahmenableitung
- Erleichterte Dokumentation durch systematische Darstellung
- Einsparpotential bis zu 75 % der Zeit und der Kosten

Bei der Auswertung der Daten ist jedoch darauf zu achten, dass die vorliegenden Ergebnisse nur für den Untersuchungsbereich gültig sind. Eine Extrapolation ist somit nicht zulässig (wie auch bei anderen Verfahren).

Anwendung vollfaktorieller Versuchspläne (Abbildung 3-23):

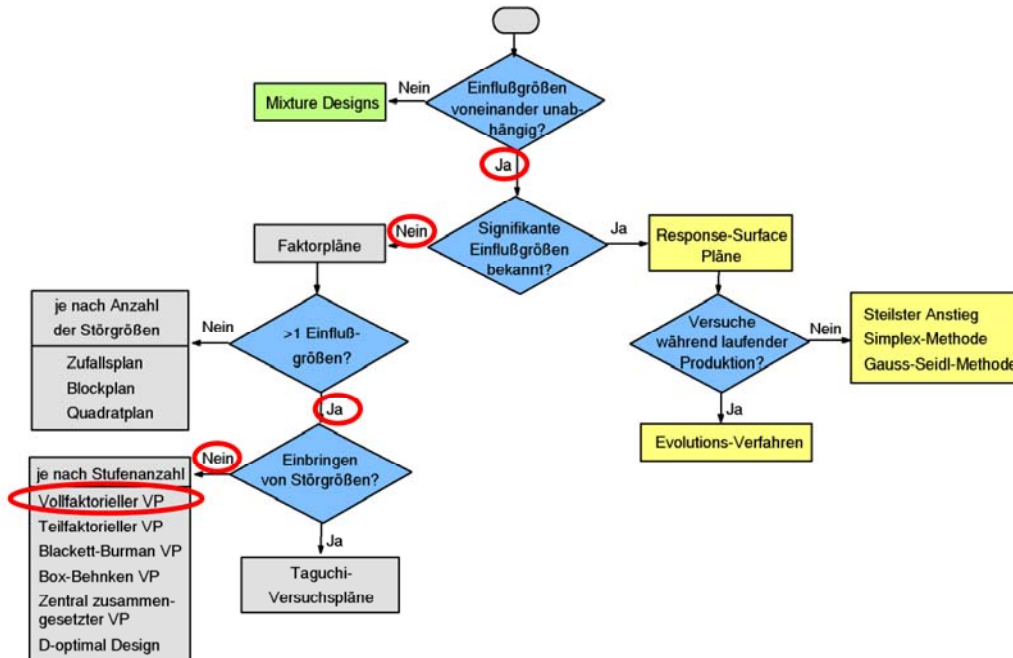


Abbildung 3-23: Anwendung von vollfaktoriellen Versuchsplänen [32]

Da die Einflussgrößen voneinander unabhängig sind und getrennt voneinander an der Maschine eingestellt werden, aber noch unbekannt ist welche Einflussgrößen signifikant sind, gelangt man zu den Faktorplänen. Des Weiteren werden mehrere Einflussgrößen untersucht und keine Störgrößen eingebracht. Diese Auswahl führt zu den Versuchsplänen, wovon der vollfaktorielle Versuchsplan gewählt wurde. Im Gegensatz zum teilfaktoriellen Versuchsplan werden hier alle möglichen Kombinationen getestet.

#### Vorgehensweise bei der statistischen Versuchsmethodik:

In Abbildung 3-24 ist die Vorgehensweise für die statistische Versuchsplanung dargestellt.

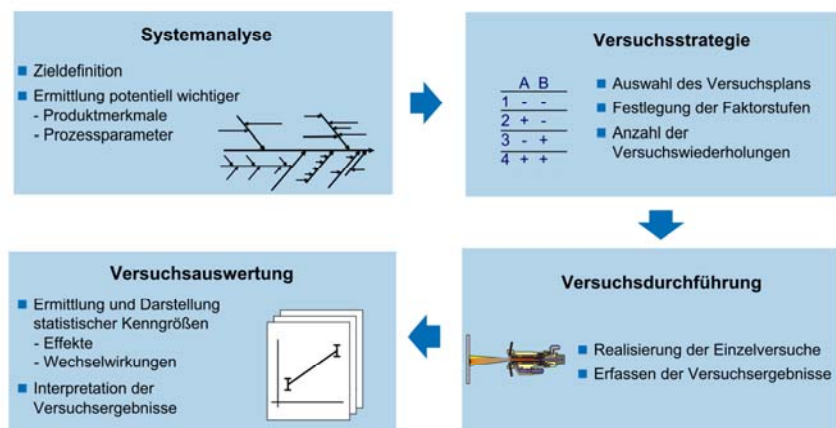


Abbildung 3-24: Vorgehensweise bei der statistischen Versuchsmethodik [33]

Bei der Versuchsdurchführung ist darauf zu achten, dass die Reihenfolge der Parameterkombinationen zufällig erfolgt. Diese zufällige Anordnung wird Randomisierung genannt. Damit wird ausgeschlossen, dass ein zeitlicher Einfluss fälschlicherweise einem Effekt der Faktoren zugeordnet wird. [34]

### 3.3.1.1 $2^k$ – vollfaktorielle Versuchspläne

Mit vollfaktoriellen Versuchsplänen werden Versuchspläne bezeichnet bei denen jede Faktorstufenkombination durchgeführt wird. Dabei hat die Bezeichnung  $2^k$  folgende Bedeutung:

- 2 → Anzahl der Stufen jedes Faktors
- k → Anzahl der Faktoren
- $2^k$  → Anzahl der Kombinationen für einen vollständigen Versuchsplan

Das heißt, dass insgesamt mindestens  $2^k$  Versuche durchzuführen sind. Nachteil dieses Verfahrens ist die große Anzahl der Versuche gegenüber teilfaktoriellen Versuchsplänen. Des Weiteren werden bei diesem Design keine nichtlinearen Zusammenhänge erkannt. Jedoch gibt es auch viele Vorteile eines solchen Versuchsplanes:

#### **Vorteile der $2^k$ – vollfaktoriellen Versuchspläne:**

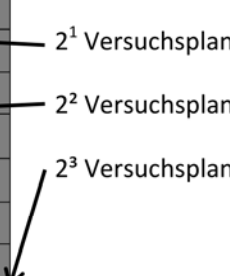
- Weniger Teilversuche pro Faktor als mehrstufige Versuchspläne
- Ausgangspunkt für komplexere Versuchspläne
- Können bereits im Anfangsstadium der Prozessverbesserung eingesetzt werden (viele Faktoren, aber nur 2 Stufen je Faktor)

#### **$2^3$ vollfaktorieller Versuchsplan**

Zum besseren Verständnis soll hier ein  $2^3$  vollfaktorieller Versuchsplan dargestellt werden. Er besitzt drei Faktoren, welche jeweils auf zwei Stufen getestet werden. Die untere Stufe wird dabei mit „-1“ und die obere mit „+1“ bezeichnet. Die gesamte Anzahl der Versuche ergibt sich durch die Kombination aller Möglichkeiten der Stufenanordnung der drei Faktoren. Bei einem  $2^3$  vollfaktoriellen Versuchsplan sind das  $2^3 = 8$  Versuche. (Tabelle 3-1)

**Tabelle 3-1:  $2^3$  vollfaktoriellen Versuchsplans**

Nr.	Faktor A	Faktor B	Faktor C
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1



Bei den  $2^3$  vollfaktoriellen Versuchsplänen ergeben sich drei Haupteffekte der Faktoren A, B und C, drei Zweifach-Wechselwirkungen AB, AC und BC, und eine Dreifach-Wechselwirkung ABC.

### 3.3.1.2 Zielgrößen

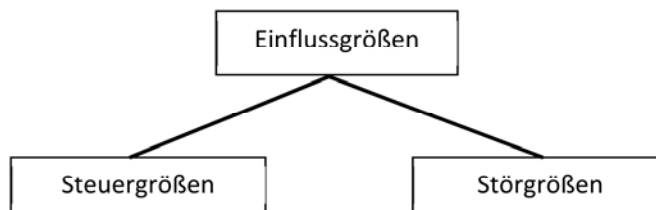
Als Zielgrößen können Messwerte oder daraus errechnete Größen verwendet werden.

In diesem Projekt wurden folgende Zielgrößen festgelegt:

- Schweißgrat
- Zugfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]
- Reibzeit [s]
- Schweißnahtbreite [mm]
- Wärmeeinflusszone (WEZ) links [HV1]
- Wärmeeinflusszone (WEZ) rechts [HV1]
- Maximale Härte [HV1]

### 3.3.1.3 Einflussgrößen

Einflussgrößen können die Versuchsergebnisse beeinflussen und werden in Steuergrößen und Störgrößen unterteilt. (Abbildung 3-25)



**Abbildung 3-25: Einteilung der Einflussgrößen**

**Unterteilung der Einflussgrößen in Steuergrößen und Störgrößen laut G. Taguchi:**

#### **Steuergrößen:**

Diese Größen können eingestellt und auf einem bestimmten Wert gehalten werden.

Steuergrößen beim Linearreibschweißen:

- Reibkraft
- Frequenz
- Amplitude
- Stauchkraft
- Anlasszustand

#### **Störgrößen:**

Störgrößen sind Einflussgrößen, welche nicht vorgegeben werden können. (oft aus Kostengründen)

Beim Linearreibschweißen treten folgende Störgrößen auf:

- Winkelabweichung bei der Ausrichtung der Fügepartner
- Oberflächenbeschaffenheit
- Umgebungstemperatur
- Unterschiede in der Härte des Grundwerkstoffs

### 3.3.1.4 Faktoren

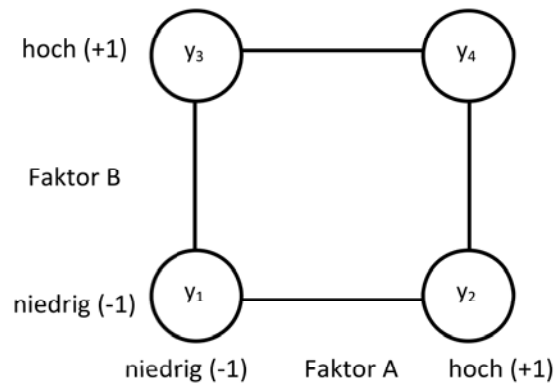
Als Faktoren bezeichnet man die für den Versuch als wesentlich erachteten Einflussgrößen. Dies können sowohl Steuergrößen als auch Störgrößen sein.

### 3.3.1.5 Effekt

Als Effekt bezeichnet man den Unterschied zweier Mittelwerte von jeweils der Hälfte der Versuche. Dabei kann man zwischen dem Effekte der Faktoren (Haupteffekt) und dem Effekt der Wechselwirkungen unterscheiden. Je größer dabei die Differenz der Mittelwerte ist, desto signifikanter ist der Effekt.

Um den Effekt eines Faktors zu berechnen, muss der Mittelwert der Zielgröße von der niedrigen Stufe des Faktors von dem Mittelwert der Zielgröße auf der hohen Stufe des Faktors abgezogen werden.

Beispielhaft erklärt an einem  $2^2$  vollfaktoriellen Versuchsplan (Abbildung 3-26):



**Abbildung 3-26:  $2^2$  vollfaktorieller Versuchsplan**

Dieser Versuchsplan kann auch in Tabellenform dargestellt werden (Tabelle 3-2).

**Tabelle 3-2: Effekte und Zielgrößen**

Versuch Nr.	Faktor A	Faktor B	Zielgröße
1	-1	-1	$y_1$
2	+1	-1	$y_2$
3	-1	+1	$y_3$
4	+1	+1	$y_4$



Mittelwert der Zielgrößen wenn Faktor A auf hoher Stufe =  $\frac{y_2+y_4}{2}$

Mittelwert der Zielgrößen wenn Faktor A auf niedriger Stufe =  $\frac{y_1+y_3}{2}$

Effekt von Faktor A =  $\frac{y_2+y_4}{2} - \frac{y_1+y_3}{2}$

Für Faktor B gilt eine analoge Berechnung:

Effekt von Faktor B =  $\frac{y_3+y_4}{2} - \frac{y_1+y_2}{2}$

### **Wechselwirkungen:**

Unter Wechselwirkungen versteht man die Abhängigkeit der Zielgröße von mehreren Faktoren. Bei einer Zwei-Faktor-Wechselwirkung beispielsweise hängt der Effekt von Faktor A auf die Zielgröße davon ab, welchen Wert der Faktor B besitzt. Dies gilt natürlich auch umgekehrt. Somit lässt sich der Effekt von Faktor A auf den beiden Stufen von B einzeln berechnen. Die Hälfte der Differenz der beiden Effekte ist ein Maß wie stark der Effekt von A vom Wert B abhängt und wird als Wechselwirkung bezeichnet.

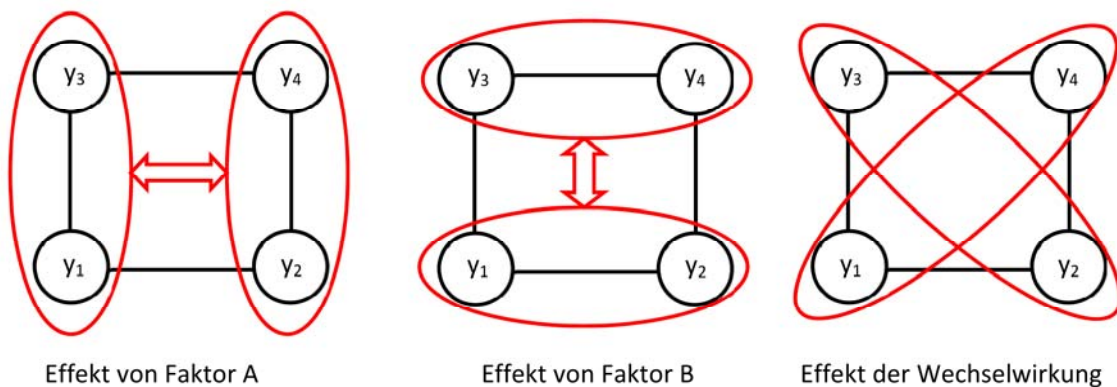
Berechnet wird der Effekt der Wechselwirkung wie folgt am Beispiel eines  $2^2$  faktoriellen Versuchsplanes:

Effekt von Faktor A wenn Faktor B auf hoher Stufe steht =  $y_4 - y_3$

Effekt von Faktor A wenn Faktor B auf niedriger Stufe steht =  $y_2 - y_1$

Effekt der Wechselwirkung der beiden Faktoren =  $\frac{y_4-y_3}{2} - \frac{y_2-y_1}{2}$

In Abbildung 3-27 sind die Effekte der Faktoren und der Wechselwirkungen grafisch dargestellt.



**Abbildung 3-27: Haupteffekte und Wechselwirkungen**



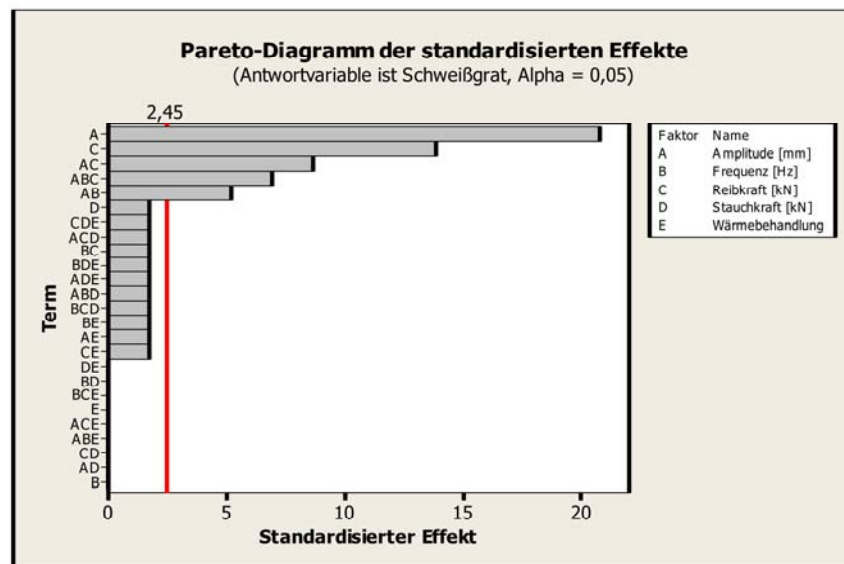
### 3.3.1.6 Signifikanz

Um zu erkennen ob sich eine Veränderung eines Parameters auf die zu untersuchende Zielgröße auswirkt, werden Signifikanzberechnungen durchgeführt. Dabei berechnet man die Effekte für alle Faktoren und Wechselwirkungen. Diese werden dann ins Wahrscheinlichkeitsnetz eingetragen. Die Effekte, welche auf der Geraden (Abbildung 3-29) liegen, haben nur wenig Einfluss auf die Zielgröße und können für die Berechnung der Zufallsstreuung verwendet werden. Effekte, welche stark von der Geraden abweichen sind die gesuchten Effekte. Diese beeinflussen die Zielgröße am stärksten.

Die dargestellte Signifikanzlinie (rote Linie im Pareto Diagramm) gibt dabei den Vertrauensbereich an. Sind dabei die Effekte größer als dieser Wert, so ist der Effekt signifikant. Je kleiner der Wert der Effekte ist, desto geringer ist der Einfluss dieses Effekts. Der Vertrauensbereich hängt von der Streuung der Stichprobenmittelwerte ab. Je geringer diese Streuung, desto kleiner ist der Vertrauensbereich und die Signifikanzlinie erhält einen geringeren Wert. Die Streuung wiederum wird kleiner, je größer der Stichprobenumfang und je kleiner die Standardabweichung ist. Der Vertrauensbereich wird mit 95% gewählt. Dies entspricht einem Alpha von 0,05. Das bedeutet, dass der wahre, aber unbekannte Mittelwert zu 95% im Vertrauensbereich liegt.

### 3.3.1.7 Pareto Diagramm

Im Pareto Diagramm werden die Effekte der Faktoren und der Wechselwirkungen nach Einfluss geordnet. Je größer der Einfluss ist, desto größer ist der standardisierte Effekt. Beispielhaft sei hier die Untersuchung zum Schweißgrat beschrieben. (Abbildung 3-28)



**Abbildung 3-28: Pareto Diagramm der Effekte**

Es ist zu erkennen, dass A, welches der Amplitude entspricht, den größten Effekt verursacht. Nicht zu erkennen hieraus ist jedoch welche Einstellung für die Amplitude besser ist. Dazu verwendet man das Wahrscheinlichkeitsnetz.

### 3.3.1.8 Wahrscheinlichkeitsnetz der Effekte

Das Wahrscheinlichkeitsnetz zeigt die Effekte der Faktoren und Wechselwirkungen. (Abbildung 3-29) Je weiter ein Punkt von der Geraden entfernt ist, desto größer ist sein Effekt. Liegt ein Faktor auf der rechten Seite der Geraden, so führt die höhere Stufe dieses Parameters zu einem höheren Wert der Zielgröße.

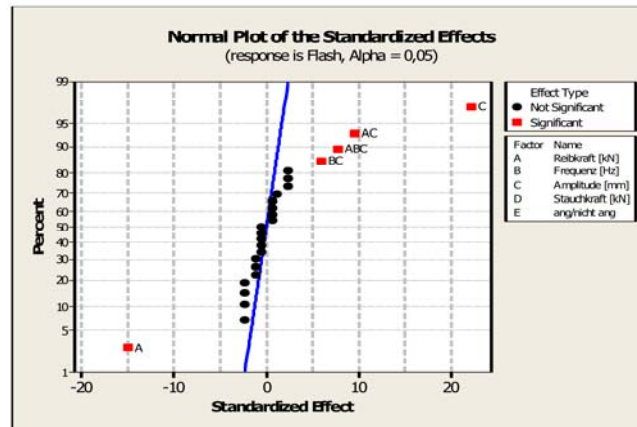


Abbildung 3-29: Wahrscheinlichkeitsnetz der Effekte

### 3.3.1.9 Darstellung der Haupteffekte

Die Effekte der Faktoren werden auch als Haupteffekte (Main Effects) bezeichnet. Dargestellt werden hier diejenigen Faktoren, bei welchen der Haupteffekt signifikant war; sie beeinflussen die Zielgröße am stärksten. Jeder Faktor besitzt zwei Faktorstufen. Im Diagramm kann man erkennen bei welcher Faktorstufe das bessere Ergebnis erreicht wird. Dabei werden die Mittelwerte für jede Faktorstufe berechnet und als Punkt eingetragen. Diese werden mit einer Geraden verbunden. Die Steigung der Geraden kann als Maß für den Einfluss des Effekts betrachtet werden. Die Haupteffekte werden nur betrachtet wenn der Faktor nicht in einer starken Wechselwirkung auftritt. Tritt der Faktor in einer signifikanten Wechselwirkung auf, muss die Wechselwirkung der Faktoren untersucht werden. In diesem Beispiel ist sogar eine Dreifachwechselwirkung (ABC) signifikant, was bedeutet, dass hier diese Wechselwirkung zu betrachten ist. Beispielhaft werden jedoch in Abbildung 3-30 die Haupteffekte dargestellt.

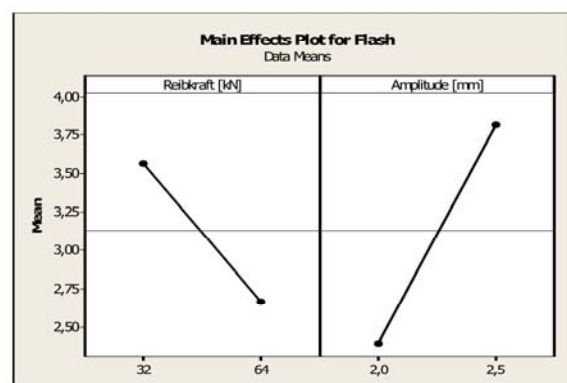


Abbildung 3-30: Effekte der Faktoren (Haupteffekte)

### 3.3.1.10 Darstellung der Wechselwirkungen

Die Effekte der Wechselwirkungen werden im Wechselwirkungsdiagramm (engl. Interaction Plot) dargestellt. (Abbildung 3-31) Hier beispielsweise anhand einer Zweifaktor-Wechselwirkung für die Zielgröße Schweißgrat erklärt. Es wird die Wechselwirkung zwischen Reibkraft und Amplitude als signifikant eingestuft. Das bedeutet, dass der Effekt von einem Faktor davon abhängt, welchen Wert ein anderer Faktor hat. Man erkennt, dass die Mittelwerte der Zielgröße für eine unterschiedliche Reibkraft davon abhängen, auf welchem Wert die Amplitude liegt. Die unterschiedliche Steigung der Geraden der beiden Effekte weicht stark ab, weshalb der Effekt für die Wechselwirkung der Faktoren Amplitude und Reibkraft als signifikant eingestuft wird.

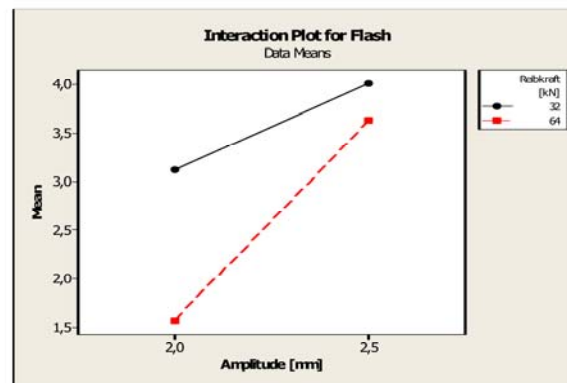


Abbildung 3-31: Effekte der Wechselwirkungen

### 3.3.1.11 4 in 1 Diagramm (Residuenanalyse)

In diesem Diagramm werden vier Diagramme dargestellt. (Abbildung 3-32) Links oben befindet sich das Normalverteilungs-Diagramm, welches die einzelnen Residuen der Messwerte im Wahrscheinlichkeitsnetz aufträgt. Die Werte sollen dabei annähernd auf einer Linie liegen. Eine geringe Abweichung von der Geraden beeinflusst das Ergebnis nicht wesentlich.

Im zweiten Diagramm (rechts oben) werden die Residuen den einzelnen Werten gegenübergestellt. Dabei soll eine gleichmäßige Verteilung um Null beobachtet werden und kein Trend erkennbar sein.

Links unten im Bild ist das Histogramm dargestellt, welches die Häufigkeitsverteilung der Residuen darstellt. Dieses soll annähernd eine Normalverteilung darstellen.

Rechts unten sind die Residuen der Messwerte der Reihe nach aufgetragen. Hier sollen die Werte ebenfalls um Null schwanken. Ist dies nicht der Fall, sondern lässt sich ein Verlauf erkennen, so kann es sich um zeitbezogene Effekte handeln.

Die Residuen  $e$  lassen sich aus der Differenz von dem beobachteten Wert  $y$  und dem durch das Modell geschätzten Wert  $\hat{y}$  errechnen. [35] (Formel 3-10)

$$e = y - \hat{y}$$

Formel 3-10: Berechnung der Residuen

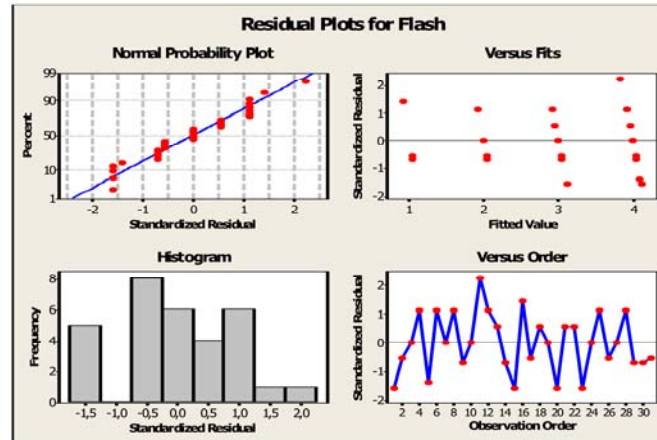


Abbildung 3-32: 4 in 1 Diagramm

### 3.3.1.12 Würfeldiagramm

Im Würfeldiagramm werden die Ergebnisse der ausgewählten Zielgröße für jeden Versuchspunkt dargestellt. In Abbildung 3-33 wurde das Würfeldiagramm für den Schweißgrat beispielhaft dargestellt. Der Würfel bildet sich mit den Parametern Frequenz, Reibkraft und Amplitude. Die Stauchkraft und die Wärmebehandlung sind ebenfalls Parameter, wurden hier aber nicht berücksichtigt, wodurch sich an den dargestellten acht Versuchspunkten je vier Messwerte für den Schweißgrat überlagern. Aus diesen vier Werten wurde jeweils der Mittelwert gebildet und an den Eckpunkten eingetragen. Deshalb kann der Schweißgrat auch ein nicht ganzzahliger Wert sein.

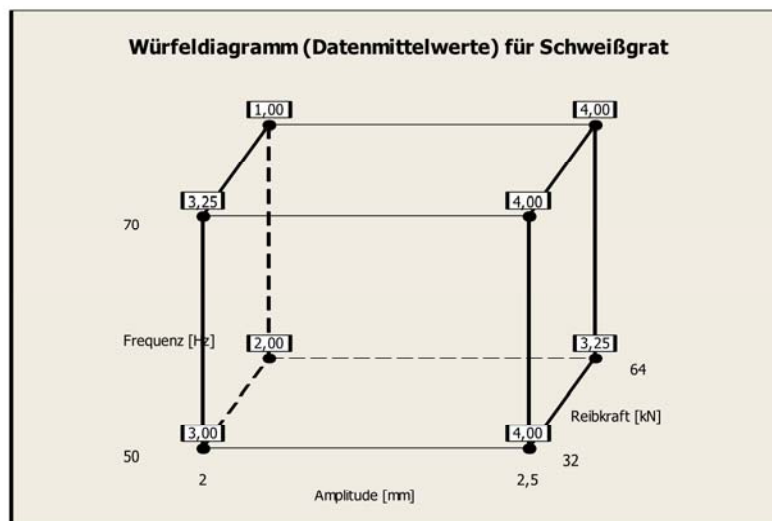


Abbildung 3-33: Würfeldiagramm

### 3.3.2 Vorversuch

Im Vorversuch sollen die wichtigsten Einflussgrößen auf den Prozess gefunden werden. Dazu werden eine Reihe von Einflussgrößen in einem Screeningversuch, welcher einen faktoriellen Versuchsplan darstellt, untersucht. Bei den gewählten Einflussgrößen wird vermutet, dass sie die Zielgrößen wesentlich beeinflussen.

### 3.3.3 Hauptversuch

Im Hauptversuch soll anhand der Erkenntnisse des Vorversuchs ein neues Parameterfenster definiert werden. Ziel ist es, eine optimale Parameterkombination in Bezug auf die Zielgrößen zu finden.

### 3.3.4 Bestätigungsversuch

Im Bestätigungsversuch werden Proben, mit der durch den Vor- und Hauptversuch gefundenen besten Einstellung, geschweift. Das Ziel ist eine Überprüfung der statistischen Abweichungen der Zielgrößen. Dabei werden die Mittelwerte (Formel 3-11) und die Standardabweichungen (Formel 3-12) der Zielgrößen berechnet.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i$$

**Formel 3-11: Arithmetischer Mittelwert**

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum (x_i - \bar{x})^2}$$

**Formel 3-12: Standardabweichung einer Stichprobe**

n ... Stichprobenumfang

$x_i$  ... Merkmalsausprägungen am  $i$ -ten Element der Stichprobe



## 4 Beschreibung der Anlage

### 4.1 Maschineneinstellungen

Die Versuche wurden bei der Firma pewag GmbH durchgeführt. Die Linearreibschweißmaschine stellt einen Prototyp dar. An dieser Anlage wurden alle Versuche für die Diplomarbeit geschweißt.

Da es sich um einen vollautomatisierten Prozess handelt, müssen vor dem Schweißen die Inputparameter festgelegt und eingegeben werden. Die Eingabemaske ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Dabei wird zwischen drei Kategorien unterschieden, welche beim Schweißprozess zeitlich aufeinander folgen.

The screenshot shows a control interface for an LRS machine. It is divided into three main sections:

- 1. Kraftschluss:**
  - Geschw. Kraftschluss: 1.0 mm/s
  - Rückziehen Stauch: 0.3 mm
  - Kraftwert Kraftschluss: 7000.0 N
- 2. Schweißen:** A table with 10 rows and 7 columns.
 

Schritt	Position [mm]	Kraft [N]	v[mm/s]	Frequenz[Hz]	Dauer[s]	Amplitude[mm]	Weitersprung
1	243.7	64000	4.0	70.0	10.0	2.50	Weg/Zeitgrenze
2	...	...	...	...	...	...	Ende Schweißen
3	...	...	...	...	...	...	Ende Schweißen
4	...	...	...	...	...	...	Ende Schweißen
5	...	...	...	...	...	...	Ende Schweißen
6	...	...	...	...	...	...	Ende Schweißen
7	...	...	...	...	...	...	Ende Schweißen
8	...	...	...	...	...	...	Ende Schweißen
9	...	...	...	...	...	...	Ende Schweißen
10	...	...	...	...	...	...	Ende Schweißen
- 3. Endstauchen:**
  - Haltezeit: 10.0 s
  - Staukraft: 88000 N
  - Geschw. Endstauchen: 2 mm/s

Abbildung 4-1: Eingabemaske der LRS-Maschine

#### 1. Kraftschluss:

Bevor der eigentliche Reibprozess startet, fahren die Fügeteile mit der Geschwindigkeit von 1 mm/s zusammen bis sie sich berühren und eine Kraft von 7000 N aufgebracht ist. Die oszillierende Bewegung ist dabei noch nicht aktiv. Danach bewegen sich die Reibpartner 0,3 mm in die entgegengesetzte Richtung. Die Geschwindigkeit, die Kraft und der Weg der Rückwärtsbewegung kann dabei eingestellt werden, wurde aber in dieser Arbeit auf den, in Abbildung 4-1 eingetragenen, Werten belassen.

#### 2. Schweißen:

Der darauffolgende Schritt umfasst den Reibprozess. Dieser kann in mehrere Phasen mit unterschiedlichen Einstellungen erfolgen, wobei für jede Phase die absolute Position, bei welcher die Phase gestartet werden soll, eingegeben werden kann. In dieser Arbeit umfasst der Reibprozess nur einen Schritt.

Für diese Arbeit wurde eine axiale Verkürzung von 6 mm gewählt, worauf die Endposition errechnet und eingegeben wurde. Dieser Wert ändert sich bei jedem Versuch, da die Kettenhalbglieder



herstellungsbedingt leicht unterschiedliche Längen besitzen. Weiters muss die Kraft (**Reibkraft**), die **Frequenz** und die **Amplitude** eingegeben werden. Bei jedem Versuch war die Geschwindigkeit gleichbleibend ( $v = 4 \text{ mm/s}$ ), welche die maximale Geschwindigkeit der axialen Verkürzung angibt. Die Dauer der Reibphase, welche die maximal zur Verfügung stehende Reibzeit angibt, wurde im Bereich von 10 bis 15 s angegeben. Ist nach dieser Zeit die axiale Verkürzung nicht erreicht worden, so wird die Reibphase abgebrochen und die Stauchphase startet.

### 3. Endstauchen:

Das Endstauchen startet sobald die Reibphase aufgrund der erreichten Position oder der verstrichenen Zeit endet. In diesem Bereich sind drei Eingaben zu definieren, wobei in dieser Arbeit die Haltezeit von 10 s und die Geschwindigkeit für das Endstauchen von 2 mm/s konstant bleibt. Die **Stauchkraft** wurde jedoch als veränderlichen Parameter gewählt und muss bei jedem Versuch eingestellt werden.

Sind die Einstellungen abgeschlossen, so kann der Schweißprozess gestartet werden. Dabei wird eine Messeinrichtung aktiv, welche die Position und Kraft des Stauch- und Puls-Zylinders mit 500 Hz aufnimmt. Ist der Prozess abgeschlossen, werden aus diesen Daten vier Diagramme erstellt, welche den zeitlichen Verlauf der Größen mit Hilfe der Messpunkte darstellen.

Diese Diagramme sollen nun anhand der Probe 14 des Vorversuches näher beschrieben werden. In Tabelle 4-1 sind die Parameter, welche in die Eingabemaske eingegeben werden, eingetragen.

**Tabelle 4-1: Parameter der Probe 14 des Vorversuchs**

Amplitude [mm]	Frequenz [Hz]	Reibkraft [kN]	Stauchkraft [kN]
2,5	70	64	88

Das Diagramm der axialen Verkürzung (Abbildung 4-2) zeigt den Verlauf der Istposition des Stauchzylinders über die Messpunkte. Dabei ist zu beobachten, dass obwohl eine axiale Verkürzung von 6 mm gewählt wurde, der aufgenommene Bereich größer ist (ca. 7,5 mm). Dies ist dadurch erklärbar, dass die Aufnahme der Messpunkte bereits startet, obwohl die Fügepartner noch nicht in Berührung sind.

## Axiale Verkürzung

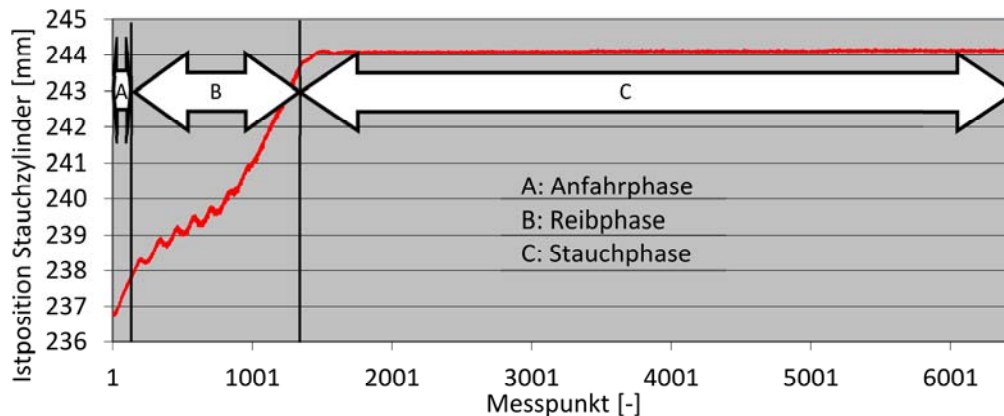
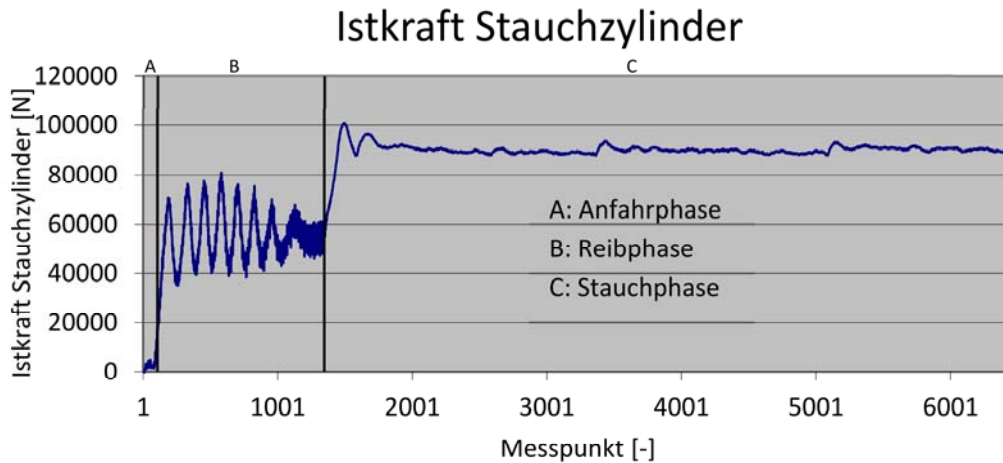


Abbildung 4-2: Axiale Verkürzung - Probe 14 (VV)

Zu Beginn der Reibphase bewegen sich die Fügepartner mit 4 mm/s aufeinander zu. Dies ist die definierte maximale Geschwindigkeit. Die oszillierende Bewegung ist dabei schon gestartet. Der lineare Anstieg der axialen Verkürzung endet, sobald ein entsprechender Widerstand durch das Aufeinandertreffen der Fügepartner zustande kommt. Danach beginnt der Verlauf der Kurve in schwankenden Bewegungen zu steigen. Dieser Verlauf ist eine Auswirkung der nicht konstanten Reibkraft. Bei einer Krafterhöhung werden die Kettenhalbglieder stärker zusammengedrückt, wodurch die axiale Verkürzung steigt. Sinkt die Reibkraft wieder, so nimmt auch die axiale Verkürzung wieder ab. Je konstanter der Reibkraftverlauf ist, desto gleichmäßiger nimmt die axiale Verkürzung zu. Diese Phase endet mit dem Erreichen der eingegebenen Position. Danach startet der Stauchvorgang, der zu einer zusätzlichen Verkürzung führt. Der Stauchvorgang ist mit einer Dauer von 10 s definiert.

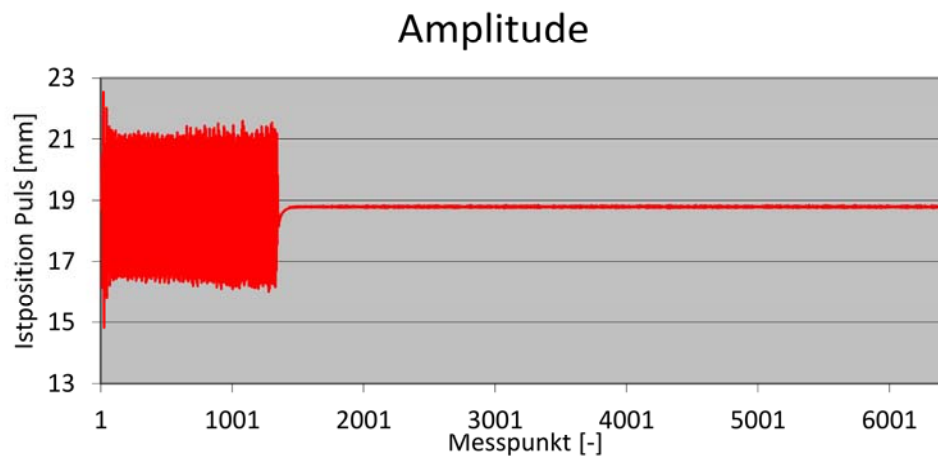
Bei genauerer Betrachtung lässt sich auch eine feine überlagerte Schwingung im Verlauf der Reibphase beobachten, welche aus der oszillierenden Bewegung resultiert. Dabei ändert sich die, in Abhängigkeit der Amplitude, effektive Fläche, auf welche die Reibkraft wirkt.

In Abbildung 4-3 ist der Kraftverlauf für den Stauchzylinder dargestellt. Zu Beginn ist die Kraft ca. null, da sich die Fügeteile noch nicht berühren und somit kein Druck erzeugt wird. Im weiteren Verlauf kommen die Fügepartner in Kontakt, was zu einem Anstieg der Reibkraft führt. Bei der dargestellten Probe wurde eine Reibkraft von 64 kN eingestellt. Die Kraft pendelt um diesen Wert. Ist die Reibphase abgeschlossen, wird die Stauchkraft erhöht/gesenkt. In diesem Fall wurden 88 kN für die Stauchkraft gewählt; man sieht auch hier, dass die Regelung übersteuert und eine maximale Stauchkraft von etwa 100 kN erreicht wird und sich schließlich auf den eingestellten Wert einpendelt.



**Abbildung 4-3: Istkraft Stauchzylinder - Probe 14 (VV)**

Abbildung 4-4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Amplitude. Der eingegebene Wert betrug 2,5 mm, welcher sehr gut eingehalten wird. Der „zackige“ Verlauf entsteht durch das Verhältnis von Messpunkten/s zu der Frequenz, welches bei 500 Messpunkte/s und 70 Hz etwa 7 Messpunkte/Schwingung ergibt. Für eine exakte Darstellung der Schwingbewegung ist dies daher zu wenig. Ist die Reibphase beendet, so beginnt die Stauchphase und die oszillierende Bewegung wird gestoppt. Die Amplitude erfährt daher keine Änderung mehr.



**Abbildung 4-4: Amplitude - Probe 14 (VV)**

In Abbildung 4-5 ist die Kraft des Puls-Zylinders dargestellt. Es ist ein Anstieg von etwa 20 kN auf 60 kN zu beobachten. Die Kraft schwingt um etwa null. Da durch die Schwingung eine Hin- und Herbewegung stattfindet, nimmt die Kraft positive und negative Werte an. Wenn die Stauchphase beginnt, wird die Bewegung gestoppt, wodurch keine Kräfte mehr auftreten.

### Istkraft Puls

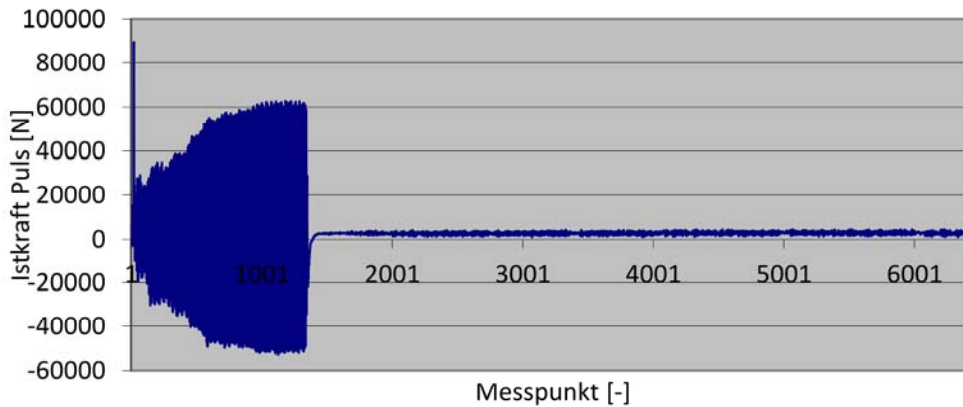


Abbildung 4-5: Istkraft Puls - Probe 14 (VV)

Abbildung 4-6 zeigt die kombinierte Darstellung der Diagramme: Axiale Verkürzung und Istkraft Stauchzylinder. Wobei hier die Daten über die Zeit (nicht den Messpunkten) aufgetragen sind.

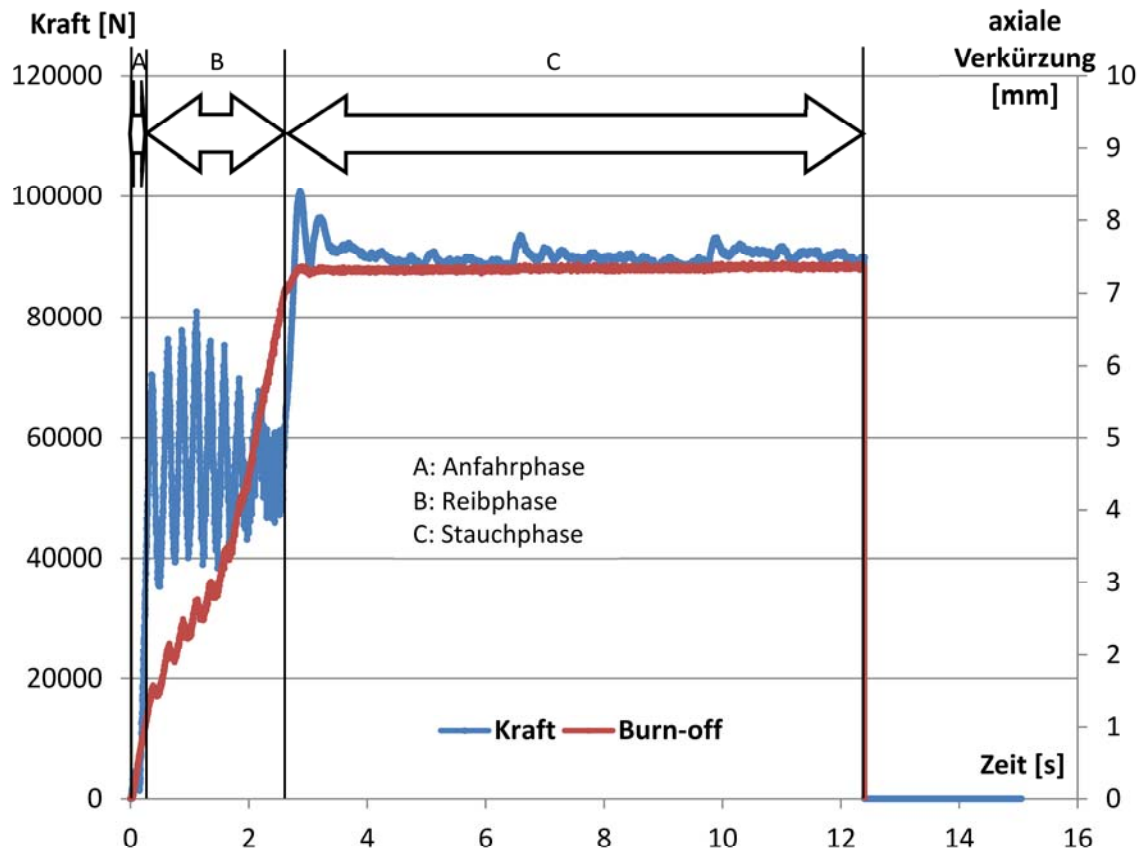


Abbildung 4-6: Kraft - Axiale Verkürzung - Probe 14 (VV)

## 4.2 Fügeiteile

Die verschweißten Fügeiteile waren Kettenhalbglieder aus 30CrNiMo8 und sind in Abbildung 4-7 dargestellt. Beim Schweißprozess werden jeweils zwei dieser Kettenhalbglieder in der Maschine gegenüber positioniert und miteinander verschweißt; dabei unterscheiden sich die Kettenhalbglieder geometrisch nicht voneinander. Der Grundwerkstoff bleibt unverändert, wobei aber in den Vorversuchen zwischen angelassenen und nicht angelassenen Kettenhalbgliedern unterschieden wird. Es werden jedoch nur Kettenhalbglieder mit der gleichen Wärmebehandlung verschweißt. Das Kettenhalbglied besitzt eine Länge von 77 mm. Detailzeichnungen befinden sich im Anhang.

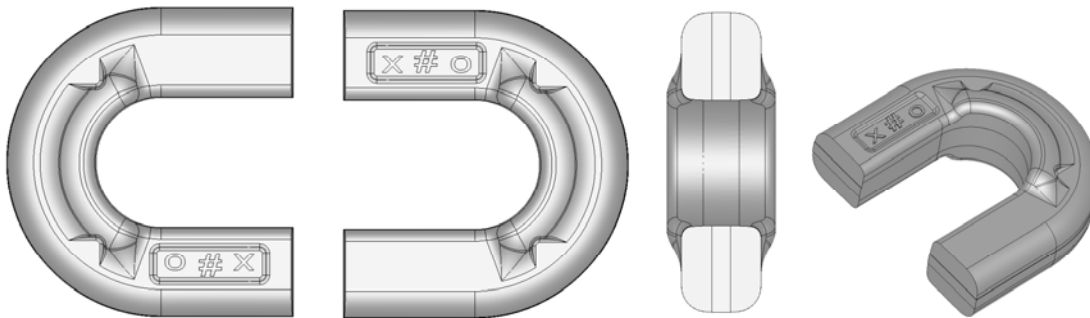


Abbildung 4-7: Kettenhalbglieder

In den durchgeführten Versuchen wurden jeweils nur die Kettenhalbglieder miteinander verschweißt, ohne ein Kettenvollglied einzubringen. Um eine vollständige Kette zu erzeugen, muss vor dem Verschweißen der beiden Kettenhalbglieder ein Kettenvollglied „eingefädelt“ werden. Die Kettenvollglieder sind in Abbildung 4-8 dargestellt.

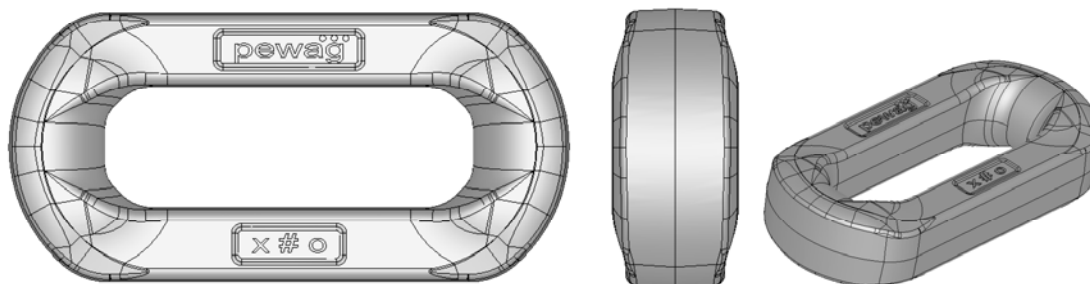


Abbildung 4-8: Kettenvollglieder

Die wichtigsten Maße für das Kettenhalbglied sind in Abbildung 4-9 links eingezeichnet. Dabei ist die Querschnittsfläche für das Reibschweißen  $2 \times 503,1 \text{ mm}^2 = 1006,2 \text{ mm}^2$ . In der rechten Darstellung sind zwei Kettenvollglieder und ein geschweißtes Kettenglied zu einer Kette verschweißt.

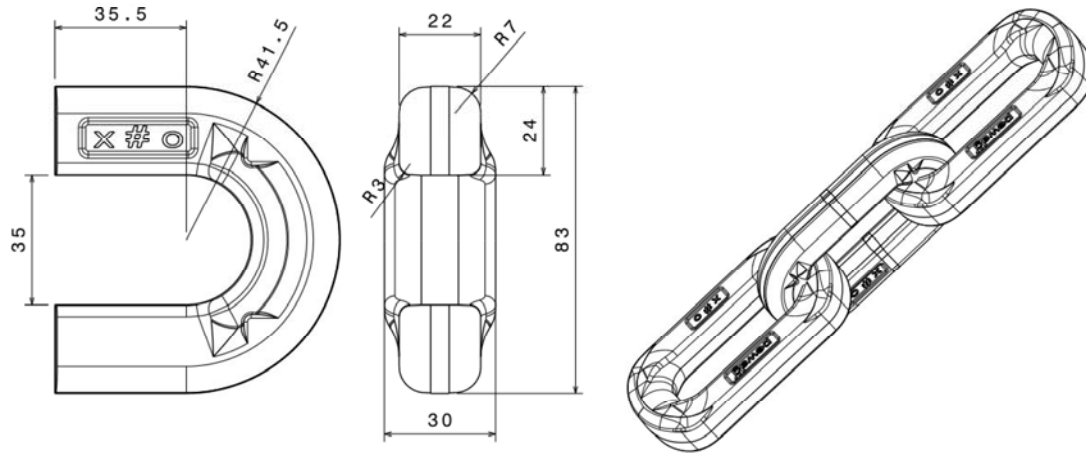


Abbildung 4-9: Wichtigsten Maße (links) & Kette (rechts)



## 5 Untersuchungsmethoden

Nach dem Schweißen der Kettenglieder an der Linearreißschweißmaschine wurden die Proben an der TU-Graz untersucht. Dabei wurde zuerst der Schweißgrat optisch bewertet. Anschließend erfolgte die Aufnahme eines Makrofotos des gesamten Kettengliedes. Um metallografische Untersuchungen durchzuführen, wurde an einer Hälfte des Kettengliedes ein Streifen der Probe abgeschnitten. Der verbleibende Teil dieser Hälfte wird für die Zugprobe verwendet. Proben mit dem Schweißgrat A konnten teilweise nicht untersucht werden, da diese bereits nach dem Schweißen aufgrund der schlechten Verbindung brachen.

### 5.1 Visuelle Beurteilung

Der erste Schritt nach dem Schweißen der Probe ist es, die Qualität des Schweißgrats zu beurteilen, dies erfolgte ausschließlich optisch. Zur Dokumentation wurde eine Makroaufnahme des Kettengliedes erstellt. Verwendet wurde dafür eine Spiegelreflexkamera des Modells D50 von Nikon. (Abbildung 5-1)



Abbildung 5-1: Spiegelreflexkamera Nikon D50

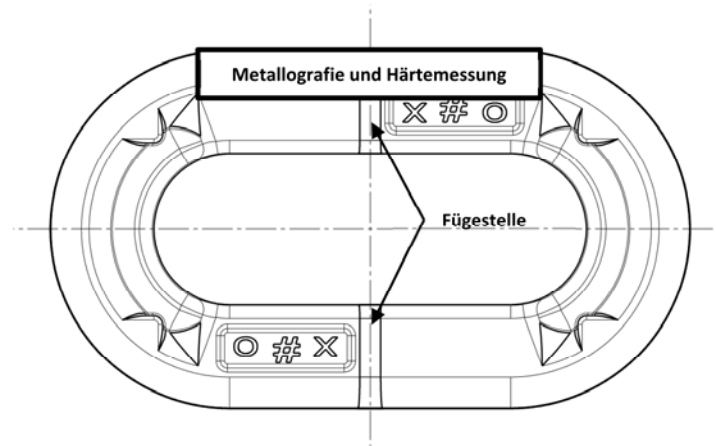
Die Schweißgratqualität wurde wie in Kapitel 3.2.5 Schweißgrat (Seite: 32) beschrieben in vier Stufen unterteilt.

### 5.2 Metallografie

Anders als für die Schweißgratuntersuchung muss für die metallografische Untersuchung die Probe zerstört werden.

## 5.2.1 Probenentnahme

Die Probenentnahme für metallografische Untersuchungen wurde, wie in Abbildung 5-2 gezeigt, durchgeführt. Dieser Teil wird für die Mikroskopie, als auch für die Härtemessungen verwendet. Die verbleibende, gegenüberliegende Hälfte des Kettengliedes wurde später für andere Versuche verwendet.



**Abbildung 5-2: Probenentnahme für Mikroskopie und Härtemessung**

### **Probenvorbereitung:**

Dieser entnommene Streifen wird auf eine Länge von ca. 3 cm gekürzt. Der verbleibende Teil wird nun, wie in Abbildung 5-3 gezeigt, mit einer Struers CitoPress-20 warmeingebettet.



**Abbildung 5-3: Einbettmaschine Struers CitoPress-20**

Nach dem Einbetten wird die Probe geschliffen und poliert. Dies erfolgt an der Maschine von Struers mit den Komponenten TegraPol-31 und TegraForce-5 (Abbildung 5-4). Dabei wird mit einer Körnung von P80 nach FEPA begonnen. Das Schleifen endet mit einer Körnung von P4000 nach FEPA. Nach dem Schleifen wird die Probe poliert, wobei die Korngröße bei 1  $\mu\text{m}$  liegt. Sobald die

Probenoberfläche keine Kratzer mehr aufweist, kann die Probe mit dem Ultraschallreiniger gereinigt werden. Danach wurde die Probe mit einem handelsüblichen Haartrockner getrocknet.



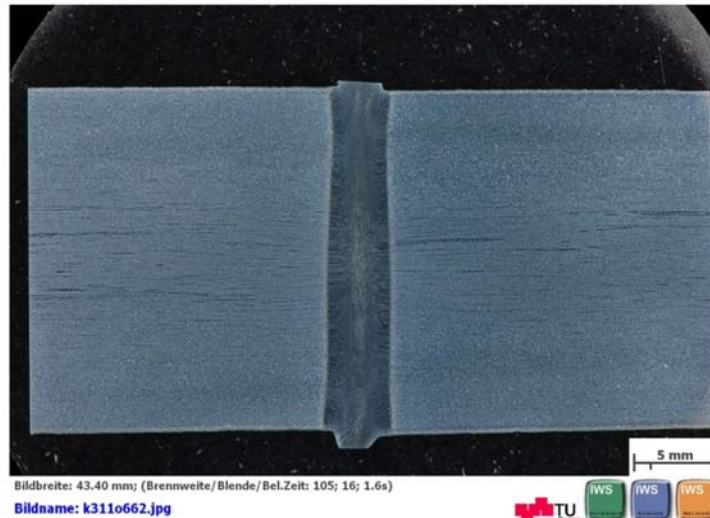
**Abbildung 5-4: Haartrockner (links), Schleifmaschine Struers (rechts)**

Bevor mit der Mikroskopie begonnen werden kann, muss die Probe geätzt werden. Die Ätzung erfolgte direkt nach dem Polieren, einer Ultraschallreinigung (Abbildung 5-5) und anschließendem Trocknen. Dafür wurde eine 3 % Nital Ätzung verwendet. Die Mischung erfolgte dabei mit 97 - 100 ml Ethanol und 3 ml Salpetersäure. Die Einwirkzeit betrug 5 bis 8 Sekunden, danach musste die Probe mit Wasser und Alkohol gereinigt und anschließend getrocknet werden.



**Abbildung 5-5: Ultraschallreiniger Bandelin Sonorex RK 106S**

Ein Übersichtsfoto der geätzten Probe wurde mit der Makrokamera, wie in Abbildung 5-6 dargestellt, erstellt. Danach konnte mit der Mikroskopie begonnen werden.



**Abbildung 5-6: Eingebettete Probe nach dem Ätzen**

## 5.2.2 Mikroskopie

Die Aufnahmen wurden mit dem Lichtmikroskop Zeiss Observer.Z1m durchgeführt. (Abbildung 5-7)



**Abbildung 5-7: Lichtmikroskop Zeiss Observer.Z1m**

Jede Probe wurde dabei an sieben wesentlichen Stellen untersucht. In Abbildung 5-8 sind diese untersuchten Positionen eingezeichnet. In den Bereichen 1, 2, 6 und 7 wurden Rissuntersuchungen im Randbereich durchgeführt. Dabei wurden Vergrößerungen von 25, 50, 100 und 200 verwendet (Abbildung 5-9). Die Bereiche 3, 4 und 5 sollen die Schweißzone (SZ), die thermomechanische Einflusszone (TMEZ) und die Wärmeeinflusszone (WEZ) dokumentieren. Verwendete Vergrößerungen waren hier 25, 50, 100, 200, 500 und 1000 (Abbildung 5-10, Abbildung 5-11).



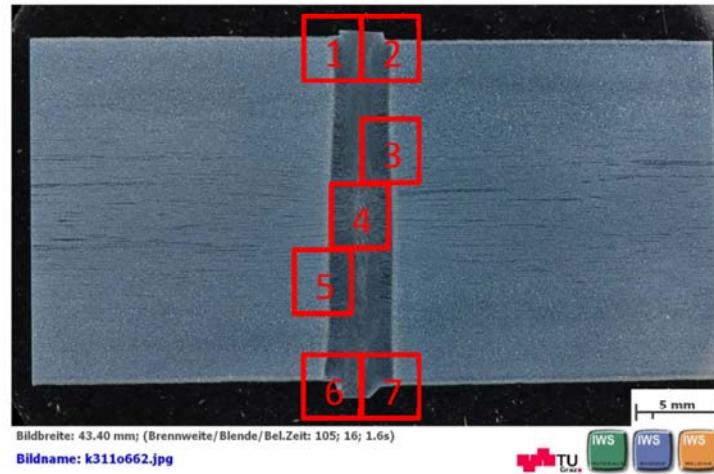


Abbildung 5-8: Bereiche der Mikroskopie

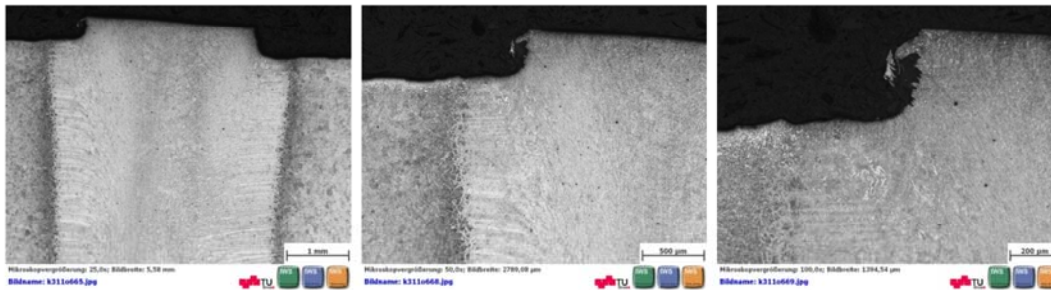


Abbildung 5-9: Mikroskopie - Position 1

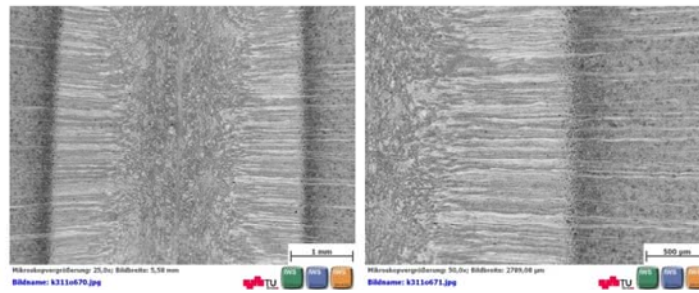


Abbildung 5-10: Mikroskopie - Position 4

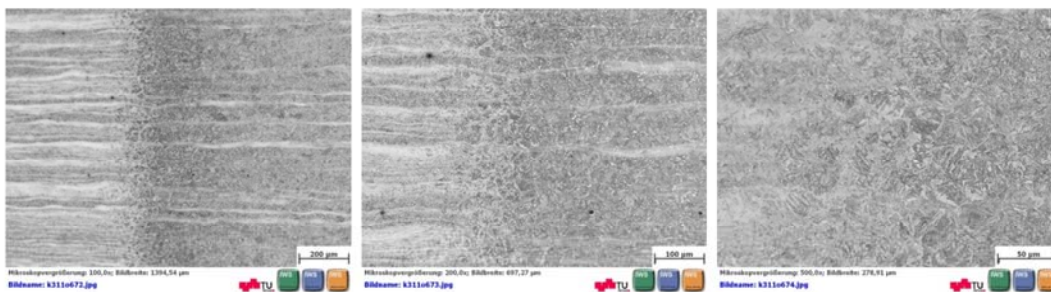


Abbildung 5-11: Mikroskopie - Position 3

### 5.3 Härtemessung

Die Härte der Proben wurde mit dem Härtemessverfahren nach Vickers ermittelt. Dabei wird eine Diamantpyramide mit einem Öffnungswinkel von  $136^\circ$  mit einer festgelegten Prüfkraft in das Werkstück eingedrückt. Dabei entsteht ein bleibender Eindruck, bei welchem die Diagonalen ( $d_1$  und  $d_2$ ) vermessen werden. Aus diesen beiden Werten lässt sich die mittlere Diagonale  $d$  [mm] berechnen. (Formel 5-1) Die Vickershärte ergibt sich durch die Multiplikation des Faktors 0,1891 mit der Prüfkraft  $F$  [N] und  $1/d^2$ . [36] (Formel 5-2)

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

**Formel 5-1: Berechnung der mittleren Diagonale [36]**

$$HV = 0,1891 \times \frac{F}{d^2}$$

**Formel 5-2: Bestimmung der Härte nach Vickers [36]**

Neben dem Härtewert werden auch das Prüfverfahren und die Prüfkraft angegeben. Die Bezeichnung setzt sich somit aus dem errechneten Härtewert, gefolgt von HV und der verwendeten Prüfkraft zusammen. [36]

Die verwendete Härteprüfmaschine ist in Abbildung 5-12 dargestellt. Es handelt sich um das Modell Emco-Test M1C 010.



**Abbildung 5-12: Härteprüfmaschine Emco-Test M1C 010**

Bei den Vorversuchen wurde mit einer Prüfkraft von 10 Kilopond gemessen, welche aber als zu ungenau erachtet wurde, weshalb zusätzlich eine Härteprüfung mit 1 Kilopond für jede Probe durchgeführt wurde. Auch in den Hauptversuchen wurden beide Messungen durchgeführt.



Bei der Härtemessung mit HV10 wurde ein Abstand der Messpunkte von 0,8 mm und bei der Messung mit HV1 ein Abstand von 0,2 mm gewählt, wodurch sich eine höhere Auflösung erzielen ließ. Vor allem im Bereich der Wärmeeinflusszone, wo ein deutlicher Härteabfall feststellbar ist, ist die Messung mit HV1 von besonderer Bedeutung. Da dieser Bereich nur sehr schmal ist, konnte mit der geringeren Messkraft der geringste Härtewert örtlich besser bestimmt werden. Im Übergang von der Wärmeeinflusszone zu der Schweißnaht ist ein Härteanstieg von über 200 HV1 feststellbar. Dies ist jedoch auch in der HV10 Messung eindeutig erkennbar. Im Bereich der Schweißnaht erlangt die HV1 Messung wieder an Bedeutung, da hier deutliche Härtesprünge von bis zu 100 HV1 auftreten.

Da die Messung mit HV1 deutlich mehr Messpunkte zur Folge hatte, wurde hier nur im Bereich der Schweißung und der Wärmeeinflusszone gemessen. Für die Härtewerte des Grundwerkstoffs waren die Messwerte mit HV10 ausreichend.

In Abbildung 5-13 ist der Bereich für die Ermittlung der mittleren HV10 Härte des Grundwerkstoffs eingezeichnet. Dabei wird der Mittelwert, aus den ersten 10 Messpunkten ausgehend vom Rand, für den Grundwerkstoff auf der linken und auf der rechten Seite errechnet. Die Bereiche werden von links nach rechts von 1 bis 5 beschriftet. Bereich 1 und 5 betreffen den Grundwerkstoff links und rechts. Bereich 2 und 4 sind dem niedrigsten Härtewert in der Wärmeeinflusszone zugeordnet. (Abbildung 5-14) Im Bereich 3 wird der höchste Härtewert in der Schweißnaht dokumentiert. Bereiche 2 bis 4 werden, aufgrund der höheren Genauigkeit, in der HV1 Messung bestimmt.

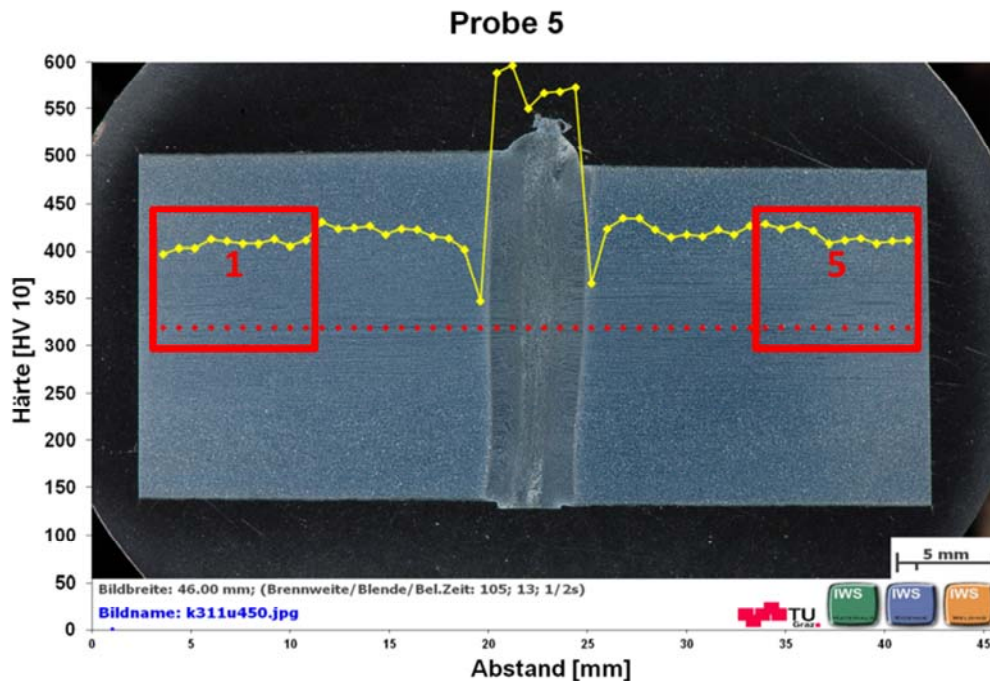


Abbildung 5-13: Härtemessung mit HV10

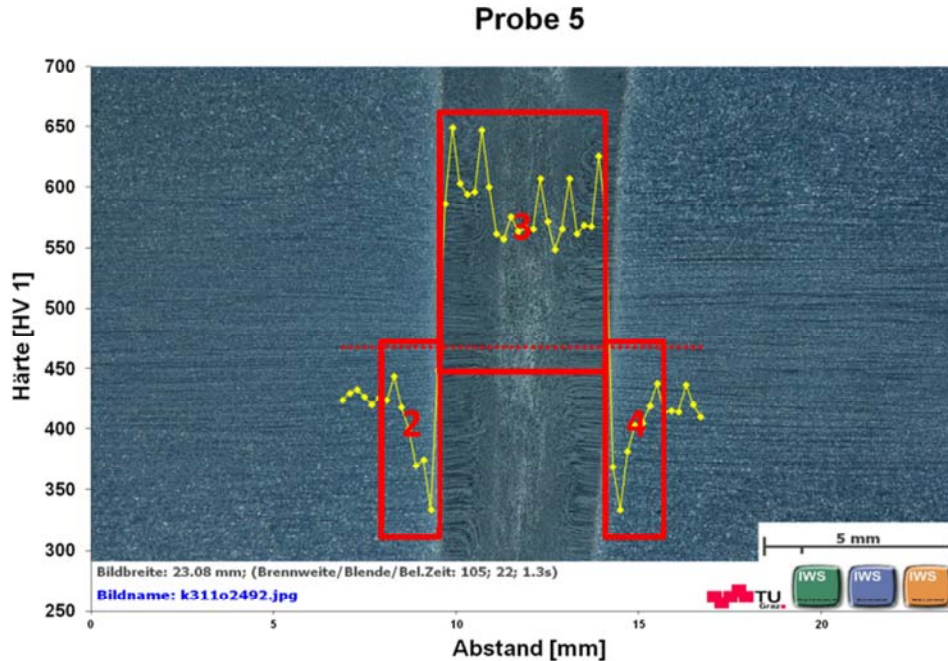


Abbildung 5-14: Härtemessung mit HV1

### 5.3.1 Schweißnahtbreite

Die Schweißnahtbreite, welche ein charakteristisches Maß für die Beurteilung der Schweißung darstellt, ändert sich je nach Parameterkonfiguration. Es wurde vermutet, dass diese Breite Einfluss auf die Zugfestigkeit hat. Aus diesem Grund wurde für jede geschweißte Probe diese Breite bestimmt. In Abbildung 5-15 ist die Schweißnahtbreite in einem Beispiel eingezeichnet. Dabei wird sie von dem tiefsten Härtewert links und rechts der Wärmeinflusszone begrenzt. Da die Bestimmung dieser Breite, genauso wie die Härtewerte in der Wärmeinflusszone, bei der HV1 Messung eine höhere Genauigkeit erreicht, wurde die Breite aus dem HV1 Diagramm herausgelesen.

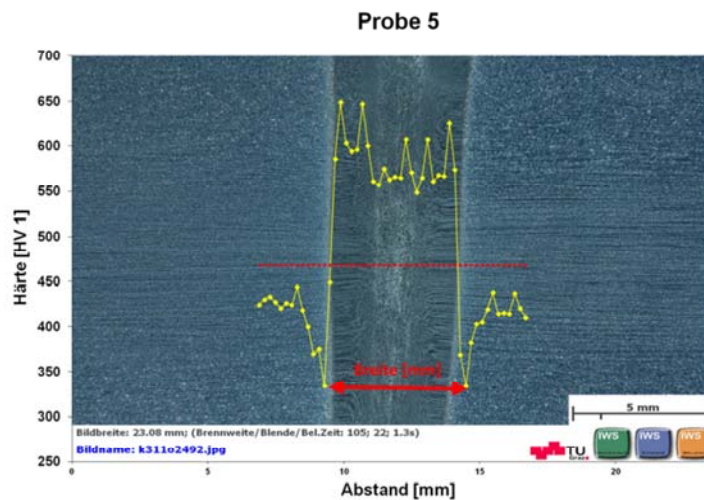


Abbildung 5-15: Bestimmung der Schweißnahtbreite

## 5.4 Zugversuch

Im Zugversuch soll die Zugfestigkeit der Proben ermittelt werden. Im Vorversuch wurden alle Proben getestet. Im Hauptversuch wurden die Proben mit Schweißgrat A nicht im Zugversuch getestet, da einige dieser Proben schon bei geringer Krafteinwirkung (beim Transport der geschweißten Kettenglieder) brachen.

### 5.4.1 Zugprüfmaschine

Die verwendete Zugprüfmaschine, mit der Bezeichnung RMC 100 von der Firma Zwick/Roell, besitzt eine maximale Zugkraft von 100 kN und befindet sich an der TU-Graz. In Abbildung 5-16 ist diese Maschine dargestellt. Die Prüftemperatur (Raumtemperatur) wurde mitprotokolliert. Die Traversengeschwindigkeit wurde mit 2 mm/min bei jedem Versuch konstant gehalten.

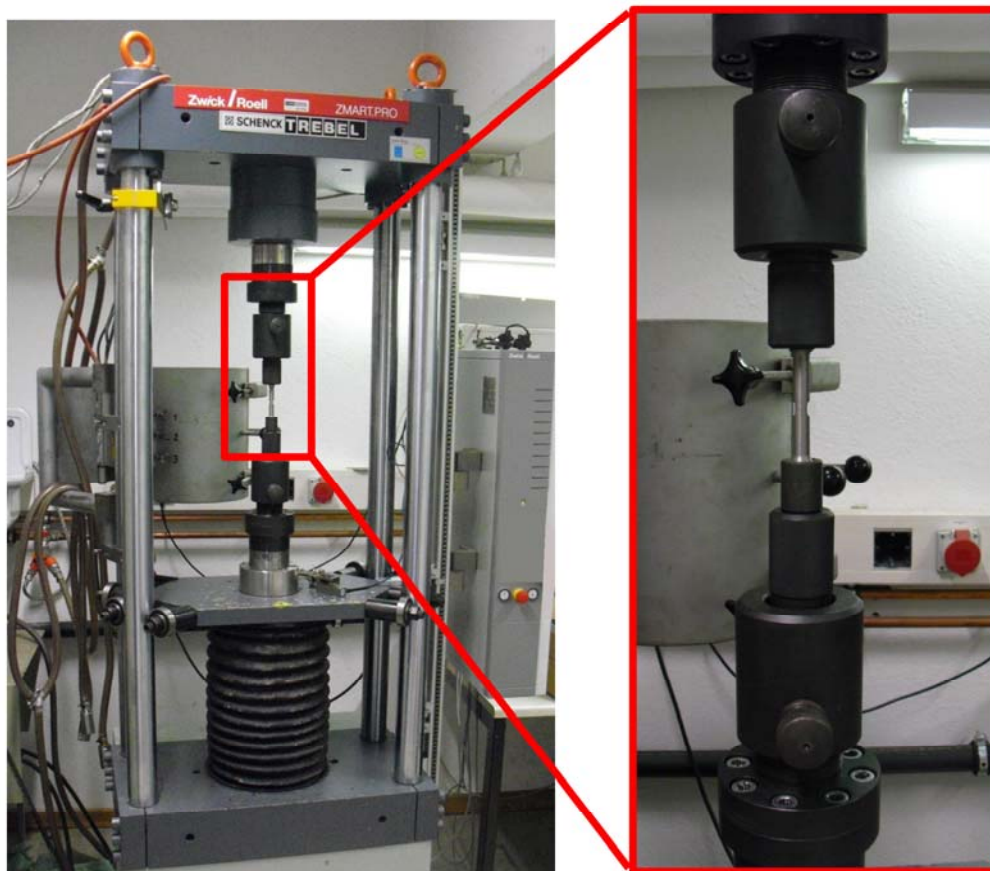


Abbildung 5-16: Zugprüfmaschine Zwick/Roell RMC 100 mit eingespannter Probe



## 5.4.2 Probenentnahme

Der verbleibende Teil der Kettenhälfte wird für die Erstellung der Zugprobe verwendet, wie in Abbildung 5-17 ersichtlich ist.

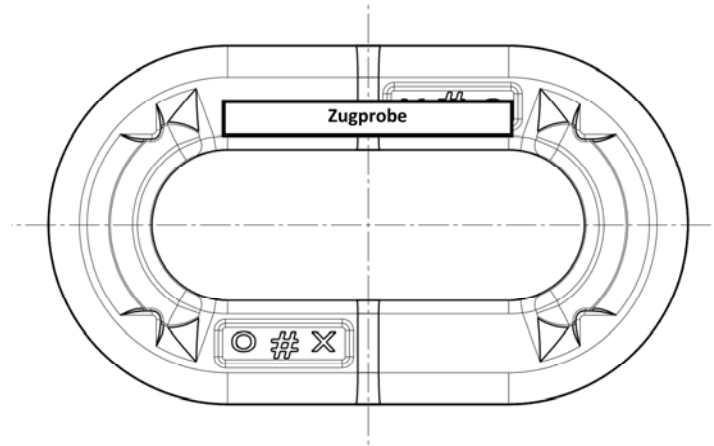


Abbildung 5-17: Probenentnahme für den Zugversuch

## 5.4.3 Zugprobe

Die Zugproben wurden nach der Norm DIN 50125-B10x50 gefertigt. Sie besitzen einen Durchmesser  $d_0$  von 10 mm und eine Anfangsmesslänge  $L_0$  von 50 mm (Abbildung 5-18).

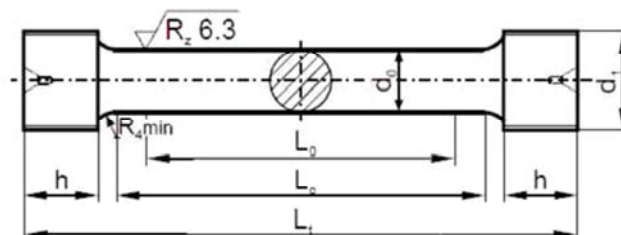


Abbildung 5-18: Zugprobe nach Norm DIN 50125 [37]

Diese Zugproben wurden im Bereich der Schweißnaht auf einen Durchmesser von 8 mm, über eine Länge von ca. 10 mm abgedreht. Dies hat den Vorteil, dass die Proben im Bereich der Schweißnaht und nicht im weicheren Grundwerkstoff brechen.

Die nach dem Schweißen wärmebehandelten Proben, welche mit 200 °C angelassen wurden, zeigten eine höhere Zugfestigkeit. Um die benötigte Zugkraft zu senken, wurde der Durchmesser von 8 auf 7 mm reduziert.

## 5.5 Rasterelektronenmikroskop (REM)

Die Bruchfläche von ausgewählten Proben wurde mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops des Typs LEO 1450 VP näher untersucht. Vergrößerungen sind im Bereich von 15 – 300.000x möglich. (Abbildung 5-19)



Abbildung 5-19: Rasterelektronenmikroskop LEO 1450 VP

### **Probenvorbereitung:**

Die Zugproben wurden von der Bruchfläche ausgehend, auf eine Länge von ca. 10 mm gekürzt, um durch die geringere Einspannlänge, eine höhere Auflösung im REM erzielen zu können. Das Kürzen erfolgte mit einer handelsüblichen Metallsäge. Die gekürzte Probe wurde anschließend noch im Ultraschallreiniger von Schmutz befreit und getrocknet, um keine störenden Partikel auf der Bruchfläche vorzufinden. Bevor die Proben im REM untersucht wurden, wurde von jeder Probe ein Übersichtsfoto mit dem Stereomikroskop Discovery.V20 (Abbildung 5-20) und ein Makrofoto gemacht.



Abbildung 5-20: Stereomikroskop Discovery.V20

Beim Rasterelektronenmikroskop wird die Oberfläche der Probe mit einem fein gebündelten Elektronenstrahl abgetastet. Diesen Vorgang bezeichnet man als Rastern. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurden die von der Probe rückgestreuten Elektronen, die Sekundärelektronen (SE), aufgezeichnet. Diese Elektronen stammen von der Probenoberfläche, weshalb dieses Verfahren für die Untersuchung der Bruchfläche eingesetzt wurde. Neben den Sekundärelektronen gibt es eine Vielzahl weiterer Elektronen, welche in Abbildung 5-21 gezeigt werden. In Abbildung 5-22 ist die Entstehung des Oberflächenbildes dargestellt. Der Kontrast des Anzegebildes entsteht durch die Neigungswinkel der Oberfläche an der Probe. [38, 39]

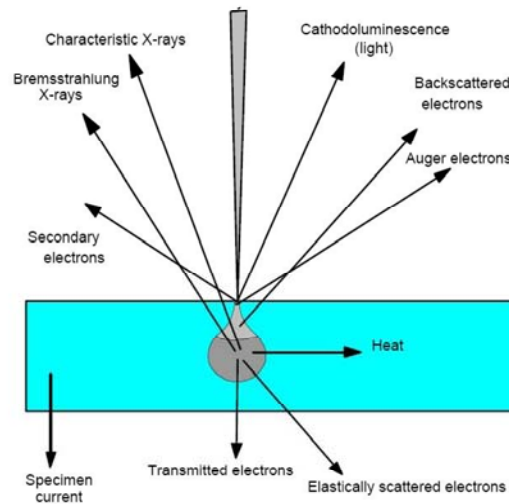


Abbildung 5-21: Wechselwirkung der Elektronen mit der Probe [38]

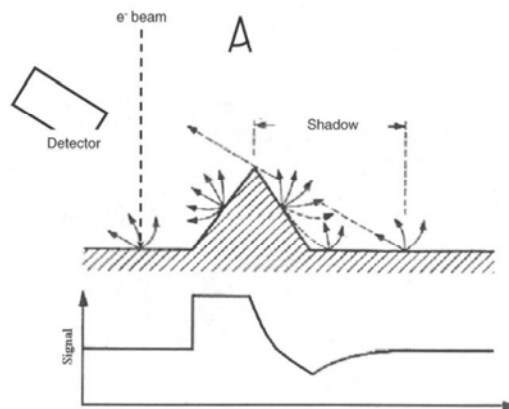
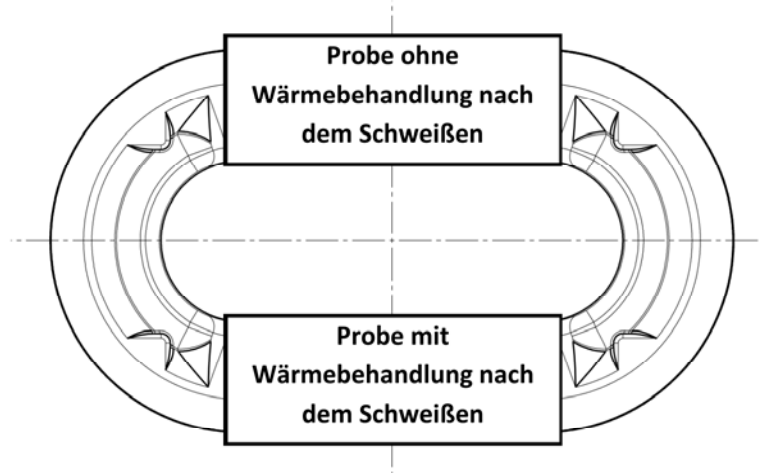


Abbildung 5-22: Kontrastentstehung bei SE [38]



## 5.6 Nach dem Schweißen wärmebehandelte Proben

Die zweite Hälfte, der im Vorversuch geschweißten Proben, wurde nach dem Entfernen der oberen Hälfte wärmebehandelt. (Abbildung 5-23)



**Abbildung 5-23: Probenentnahme nach der Wärmebehandlung**

Es wurde zwischen zwei Wärmebehandlungen unterschieden:

1. SB 830°C / Öl und anschließend mit 200°C anlassen
2. SB 830°C / Öl und anschließend mit 550°C anlassen

Nach der Wärmebehandlung wurden Proben für die Metallografie, die Härtemessung und den Zugversuch erstellt.

## 6 Werkstoff – 30CrNiMo8

Bei den Versuchen wurden Kettenglieder aus dem Vergütungsstahl 30CrNiMo8 zum Linearreibschweißen verwendet. Dieser Werkstoff stammt von Böhler Edelstahl GmbH & Co KG und besitzt hohe Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften bei großen Vergütungsquerschnitten. Durch den Mo-Gehalt ist er unempfindlich gegen Anlassversprödung. [40]

### 6.1 Einsatzgebiet

Eingesetzt wird der Werkstoff vor allem in Bereichen, wo hohe Beanspruchungen auftreten und große Vergütungsquerschnitte gefordert sind. Als Beispiele werden hier Propellerwellen, Pleuelstangen, Getriebewellen, Kurbelwellen und Teile für Fahrgestelle angeführt.

### 6.2 Chemische Zusammensetzung

Tabelle 6-1 zeigt die chemische Zusammensetzung des Grundwerkstoffes in %.

**Tabelle 6-1: Chemische Zusammensetzung [%] des Grundwerkstoffes [40]**

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
0,30	0,30	0,50	2,00	0,35	2,00

### 6.3 Mechanische Eigenschaften

Die verwendeten Kettenglieder haben einen Querschnitt von ca. 500 mm<sup>2</sup> und sind annähernd quadratisch. Betrachtet man einen Kreis mit dieser Fläche, so ergäbe sich ein Durchmesser von ca. 25 mm. Für die mechanischen Eigenschaften wird deshalb der Durchmesserbereich von 16<d≤40 mm gewählt. (Tabelle 6-2)

**Tabelle 6-2: Mechanische Eigenschaften des Grundwerkstoffes (vergütet) [40]**

Durchmesser	Min. Streckgrenze	Min. Zugfestigkeit	Min. Dehnung A <sub>5</sub>	Min. Einschnürung	Min. Kerbschlagarbeit
mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	%	J
16<d≤40	1050	1250-1450	9	40	30

#### 6.3.1 Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes (lt. Datenblatt) liegt unterhalb der Zugfestigkeit im Schweißbereich der Proben. Damit ein vergleichbarer Festigkeitswert des Grundwerkstoffes zur Verfügung steht, wurde eine geschweißte Probe für den Zugversuch vorbereitet. Ein Schweißen von zwei Kettenhalbgliedern musste durchgeführt werden, da sonst zu wenig Platz für die Entnahme der Zugprobe gegeben wäre. Diese wurde aber nicht wie die übrigen Proben an der Schweißnaht auf 8 mm eingedreht, sondern dies geschah 10 mm neben der Schweißnaht im Grundwerkstoff. (Abbildung 6-1)

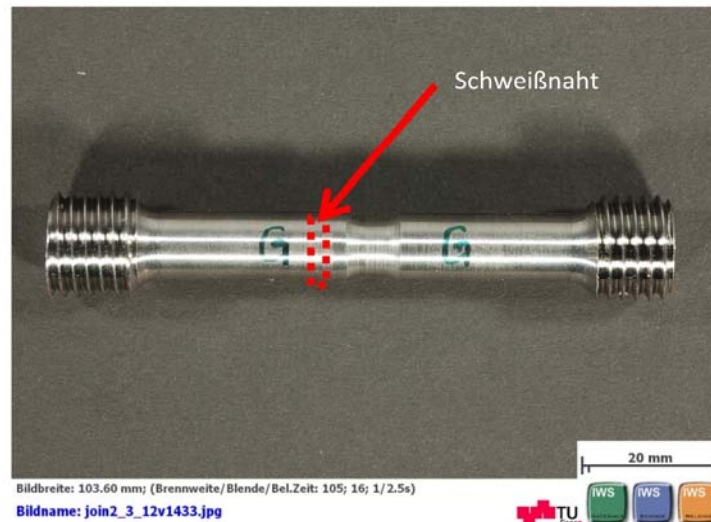


Abbildung 6-1: Zugprobe des Grundwerkstoffs

Beim Zugversuch erreichte diese Probe eine maximale Kraft von 76225 N. Bei einem Durchmesser von 8 mm an der eingedrehten Stelle, ergibt das eine Zugfestigkeit von  $1516 \text{ N/mm}^2$ . (Abbildung 6-2)

### Kraft - Weg - Diagramm

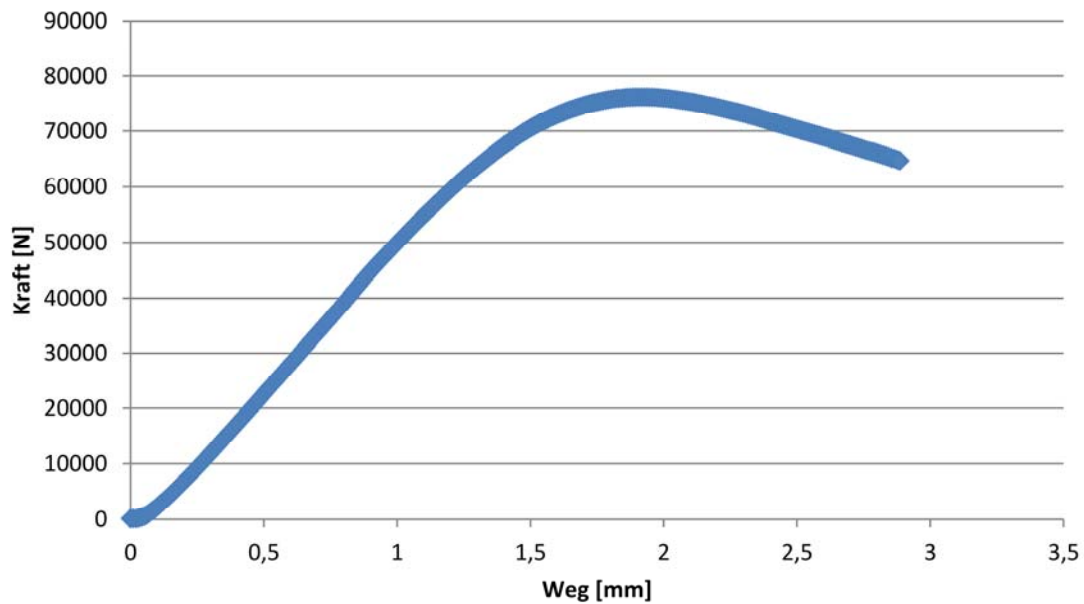


Abbildung 6-2: Kraft-Weg-Diagramm - Grundwerkstoff

## 6.4 Physikalische Eigenschaften

Die physikalischen Eigenschaften sind in den Tabellen Tabelle 6-3 bis Tabelle 6-5 aufgelistet.

**Tabelle 6-3: Physikalische Eigenschaften des Grundwerkstoffes bei 20°C [40]**

Dichte	Wärmeleitfähigkeit	Spezifische Wärme	Spez. Elektr. Widerstand	Elastizitätsmodul
kg/dm <sup>3</sup>	W/(m.K)	J/(kg.K)	Ω.mm <sup>2</sup> /m	N/mm <sup>2</sup>
7,85	42,0	460	0,19	210.10 <sup>3</sup>

**Tabelle 6-4: Wärmeausdehnung  $\alpha$  [10<sup>-6</sup> m/m.K] des Grundwerkstoffes zwischen 20 °C und 600 °C [40]**

T [°C]	100	200	300	400	500	600
$\alpha$ [10 <sup>-6</sup> m/m.K]	11,1	12,1	12,9	13,5	13,9	14,1

**Tabelle 6-5: Elastizitätsmodul [10<sup>3</sup> N/mm<sup>2</sup>] des Grundwerkstoffes [40]**

T [°C]	20	100	200	300	400	500
E [GPa]	210	205	195	185	175	165

## 6.5 Schweißbarkeit

Böhler Edelstahl GmbH & Co KG beschreibt diesen Werkstoff als schwer schweißbar, weshalb er für Schweißkonstruktionen nicht verwendet werden sollte.

## 6.6 Wärmebehandlung

Für das Härten gibt Böhler Edelstahl GmbH & Co KG einen Temperaturbereich von 830 bis 860°C an, wonach ein Abschrecken in Öl vorgeschlagen wird.

Der Anlassbereich liegt zwischen 540 und 660°C und anschließender Luftabkühlung. Das Anlassen soll unmittelbar nach dem Härten erfolgen und eine Haltedauer von mindestens einer Stunde inkludieren.

### 6.6.1 ZTU-Schaubild für kontinuierliche Abkühlung

In Abbildung 6-3 ist das ZTU-Schaubild für kontinuierliche Abkühlung dargestellt.

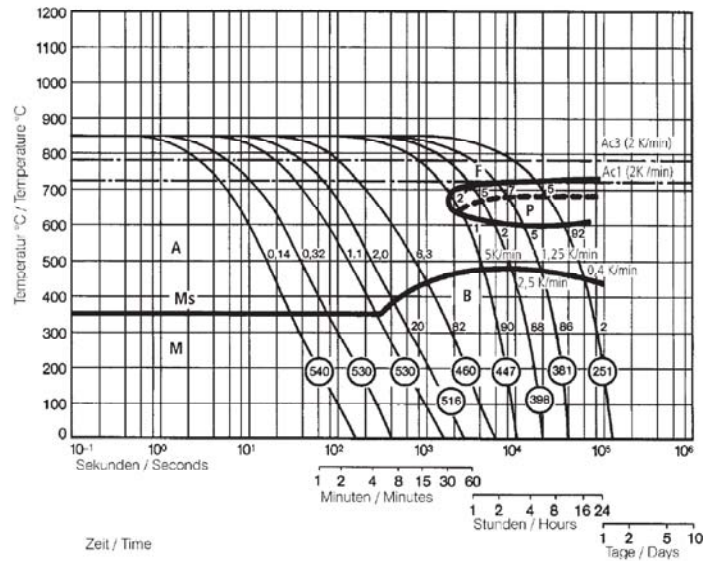


Abbildung 6-3: ZTU-Schaubild für kontinuierliche Abkühlung [40]

### 6.6.2 Wärmebehandlung für den Vorversuch

Im Vorversuch wurden fünf Faktoren auf zwei Stufen untersucht. Ein Faktor war dabei die Wärmebehandlung der Kettenhalbglieder vor dem Schweißen. Dabei wurde zwischen „angelassenem Grundwerkstoff“ und „nicht angelassenem Grundwerkstoff“ unterschieden. Es wurden nur KHG mit gleicher Wärmeverbehandlung miteinander verschweißt. Daraus ergaben sich 16 KG mit „angelassenem GW“ und 16 KG mit „nicht angelassenem GW“. (Abbildung 6-4)



Abbildung 6-4: Wärmebehandelte Proben des Vorversuchs

Da jedes KG zwei Schweißnähte besitzt, wurde das KG in zwei Hälften getrennt, wobei die obere Hälfte nicht wärmenachbehandelt und die untere Hälfte wärmenachbehandelt wurde. (Abbildung 6-5) Bei der Wärmenachbehandlung wurde zwischen zwei Arten unterschieden.

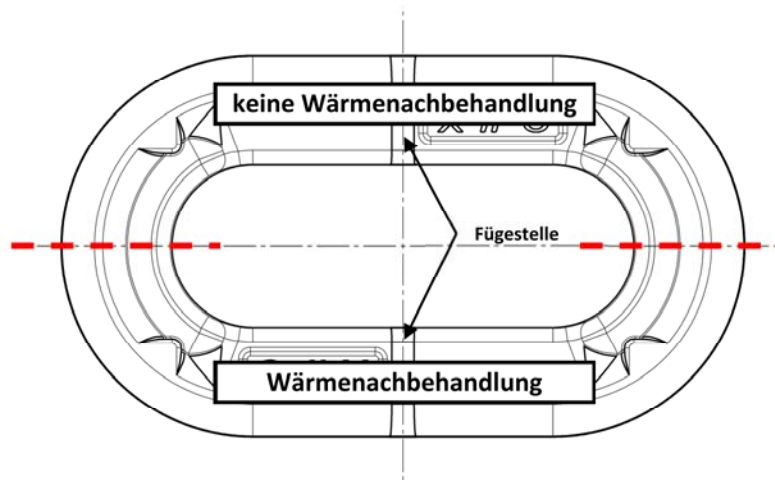


Abbildung 6-5: geschweißtes Kettenglied

**GW nicht angelassen:**

Die nicht angelassenen Kettenhalbglieder wurden keiner Wärmevorbehandlung unterzogen.

**GW angelassen:**

Die Kettenhalbglieder wurden einer Wärmevorbehandlung unterzogen. Dabei wurden sie bei 500 °C angelassen.

**Keine Wärmenachbehandlung:**

Die obere Hälfte des KG wurde nicht wärmenachbehandelt.

**Wärmenachbehandlung:**

Die untere Hälfte des KG wurde wärmenachbehandelt. Die Wärmenachbehandlung ist ein Vergütungsprozess, welcher aus Härten und Anlassen besteht. Beim Härten wird der Werkstoff auf 830 °C (über  $A_{c3}$ ) erwärmt, wodurch eine Austenitisierung stattfindet und 20 Minuten lang auf dieser Temperatur gehalten. Nach dem Abschrecken in Öl entsteht das Härtegefüge Martensit (für alle Kettenglieder gleich). Um die Duktilität zu erhöhen, wird das Kettenhalbglied angelassen. Dabei wird es auf eine Temperatur unterhalb  $A_{c1}$  erwärmt und eine Stunde auf dieser Temperatur gehalten. (Abbildung 6-6) Diese Temperatur wird bei den zwei Wärmenachbehandlungen unterschieden.

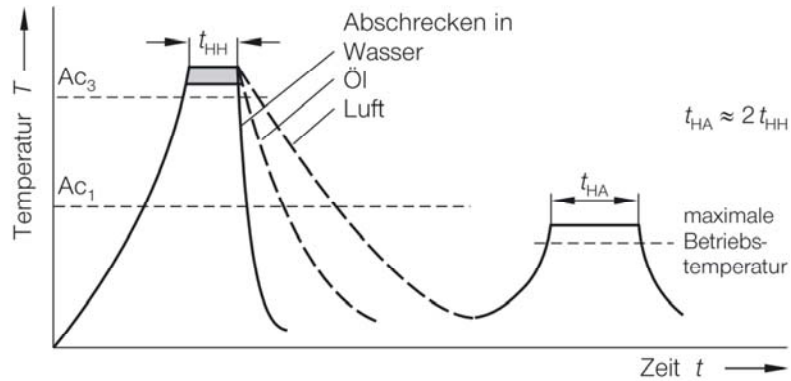
**Wärmenachbehandlung 200:**

Die Anlasstemperatur beträgt 200 °C

**Wärmenachbehandlung 550:**

Die Anlasstemperatur beträgt 550 °C





**Abbildung 6-6: Temperatur - Zeit Verlauf beim Vergüten [41]**

Beim Haupt- und Bestätigungsversuch werden ausschließlich „nicht wärmevorbehandelte“ Kettenhalbglieder verschweißt. Eine Wärmenachbehandlung erfolgte nicht. Es wurde jeweils nur eine Schweißnaht pro Kettenglied untersucht, da die verbleibende Schweißnaht für später durchzuführende Kerbschlagbiegeversuche reserviert ist.

## 7 Vorversuch

Der Vorversuch besteht aus einem Screening-Versuch. Dabei werden die angenommenen Haupteinflussgrößen auf jeweils zwei Stufen (hoch/niedrig) variiert und jede Kombination getestet.

### 7.1 Sammlung der Einflussgrößen

Um den Zusammenhang von Ursache und Wirkung darzustellen wird ein Ishikawa-Diagramm verwendet (Abbildung 7-1), in welchem alle Einflussgrößen einzuzuzeichnen sind. Wegen seiner Form wird diese Darstellung auch als Fischgrätendiagramm bezeichnet.

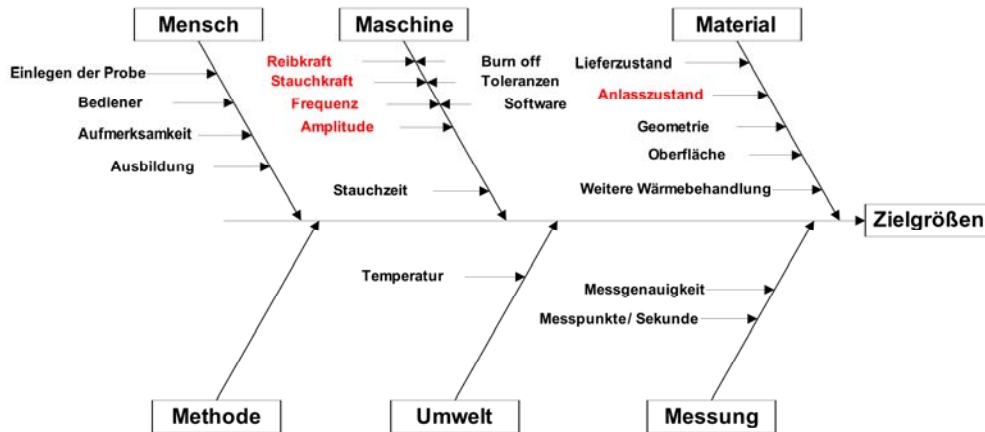


Abbildung 7-1: Ishikawa Diagramm; rot eingezeichnet sind die untersuchten Parameter

Es werden eine Vielzahl von Einflussgrößen gefunden, wobei nur die im Ishikawa-Diagramm rot eingezeichneten Größen als Faktoren verwendet und untersucht werden. Die anderen Einflussgrößen werden möglichst konstant gehalten.

Die so erhaltenen fünf Faktoren werden im Vorversuch auf jeweils zwei Faktorstufen getestet. Die geschätzten Haupteinflussparameter umfassen die Amplitude, die Frequenz, die Reibkraft, die Stauchkraft und die Wärmebehandlung vor dem Schweißen. Daraus ergibt sich ein theoretischer Würfel mit fünf Dimensionen. Dieser Versuchsplan wird als  $2^5$  vollfaktorieller Versuchsplan bezeichnet. Damit ergeben sich insgesamt  $2^5 = 32$  Versuche.

Das Parameterfenster (Tabelle 7-1) des Vorversuches wurde folgendermaßen definiert:

Tabelle 7-1: Parameterfenster des Vorversuchs

Parameter	Niedrig	Hoch
Amplitude [mm]	2	2,5
Frequenz [Hz]	50	70
Reibkraft [kN]	32	64
Stauchkraft [kN]	0	88
Wärmebehandlung vor dem Schweißen	Angelassen	Nicht angelassen

Die statistische Auswertung der Ergebnisse wurde mit dem Programm Minitab 16 durchgeführt.

Zielgrößen für das Linearreibschweißen:

- Schweißgrat
- Zugfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]
- Reibzeit [s]
- Schweißnahtbreite [mm]
- Minimale Härte der Wärmeeinflusszone (WEZ) links [HV1]
- Minimale Härte der Wärmeeinflusszone (WEZ) rechts [HV1]
- Maximale Härte in der Schweißnaht [HV1]

Bei der Durchführung der Schweißversuche musste besonders auf die Reihenfolge der Versuchsdurchführung geachtet werden. Um zeitabhängige Abweichungen der Schweißmaschine oder der Umgebung zu eliminieren, ist es wichtig die Versuchsreihenfolge zufällig anzuordnen (=Randomisierung). Das bedeutet, dass nicht zuerst alle Proben mit einer Amplitude von 2 mm und dann 2,5 mm geschweißt werden dürfen. Würden hier zeitabhängige Änderungen auftreten, könnten diese fälschlicherweise den geänderten Parametern zugeordnet werden. Um dies zu verhindern wird der Versuchsplan durchmischt ausgeführt.

Aus diesem Grund wurde mit Hilfe von Minitab 16 ein 2<sup>5</sup> vollfaktorieller Versuchsplan erstellt. Bei dieser Vorgehensweise wird von Minitab 16 automatisch eine zufällige Reihenfolge erstellt, nach welchem die Versuche an der Schweißmaschine durchgeführt wurden. Diese zufällige Reihenfolge der Versuche ist statistisch relevant und sollte bei faktoriellen Versuchsplänen immer eingehalten werden, jedoch muss ein erhöhter Zeitbedarf eingeplant werden, da die Maschinenparameter von einer Probe auf die nächste ständig variiert werden müssen.

Der mit Minitab 16 erstellte Versuchsplan besteht folglich aus 32 Versuchen und entsprechender Reihenfolge (Tabelle 7-2):

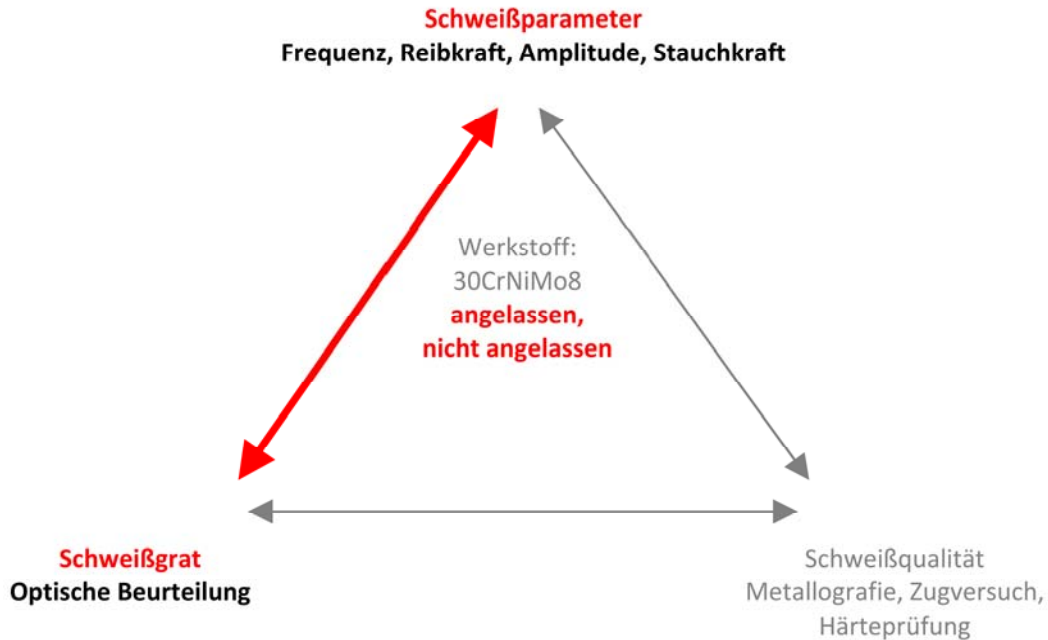
**Tabelle 7-2: Reihenfolge des Vorversuchs**

Probe	a [mm]	f [Hz]	F <sub>R</sub> [kN]	St [kN]	Wärmeverbehandlung
1	2,5	50	64	88	angelassen
2	2,0	70	64	0	angelassen
3	2,5	70	64	0	angelassen
4	2,5	70	64	88	angelassen
5	2,5	50	32	0	angelassen
6	2,0	70	32	88	angelassen
7	2,0	50	64	0	angelassen
8	2,5	50	64	88	nicht angelassen
9	2,0	70	64	88	angelassen
10	2,0	70	32	0	angelassen
11	2,5	50	32	88	angelassen
12	2,0	50	64	88	angelassen
13	2,5	50	32	0	nicht angelassen
14	2,5	70	64	88	nicht angelassen
15	2,5	70	32	88	angelassen
16	2,0	70	64	0	nicht angelassen
17	2,0	50	64	0	nicht angelassen
18	2,0	50	32	0	angelassen
19	2,0	50	32	0	nicht angelassen
20	2,5	50	32	88	nicht angelassen
21	2,5	50	64	0	angelassen
22	2,5	70	32	0	angelassen
23	2,0	50	32	88	angelassen
24	2,5	70	32	0	nicht angelassen
25	2,5	70	32	88	nicht angelassen
26	2,5	70	64	0	nicht angelassen
27	2,5	50	64	0	nicht angelassen
28	2,0	50	32	88	nicht angelassen
29	2,0	50	64	88	nicht angelassen
30	2,0	70	32	88	nicht angelassen
31	2,0	70	64	88	nicht angelassen
32	2,0	70	32	0	nicht angelassen

Dieser Versuchsplan wurde mit den Daten der gemessenen Zielgrößen erweitert. Die oben angeführten Datenreihen wurden mit Minitab 16 analysiert, um den Einfluss und den Zusammenhang der Parameter auf das Untersuchungsergebnis zu bestimmen. Zu Beginn werden alle Haupteffekte und alle Wechselwirkungen in der Signifikanzbestimmung zugelassen. Anschließend wird das Modell vereinfacht, indem Wechselwirkungen, welche keine Signifikanz aufweisen, gelöscht werden.

## 7.2 Schweißgrat

Als ersten Schritt sollen die Schweißparameter mit dem Schweißgrat verglichen werden. Die 32 Parameterkombinationen werden mit den zugehörigen Bewertungen des Schweißgrates in Minitab 16 geladen und anschließend mit der statistischen Versuchsplanung auf Signifikanz überprüft.



Bei der Auswertung der Effekte stehen drei Faktoren heraus. Die Abbildung 7-2 zeigt, dass die Amplitude, die Reibkraft und die Frequenz besonderen Einfluss auf die Schweißgratentstehung ausüben. Da Wechselwirkungen vierter und fünfter Ordnung keinen signifikanten Effekt aufweisen, wird die Auswertung anschließend nur bis zu den dreifach Wechselwirkungen durchgeführt.

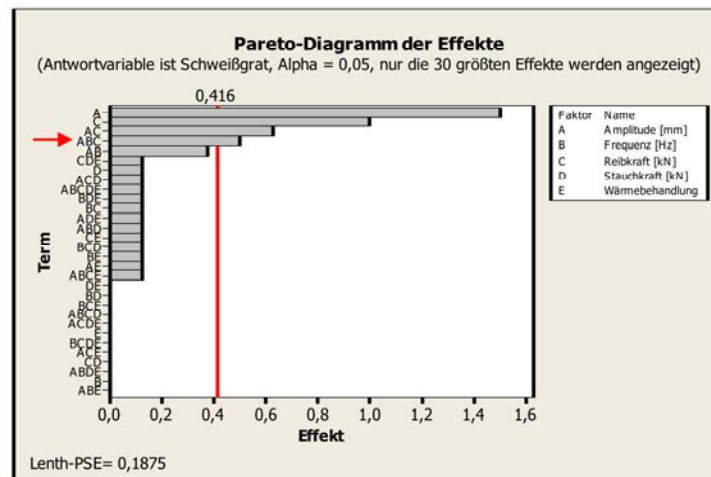


Abbildung 7-2: Pareto Diagramm - Vorversuch - Schweißgrat

Aus Abbildung 7-3 erkennt man, dass zwei Haupteffekte, zwei Zweifachwechselwirkungen und eine Dreifachwechselwirkung signifikant sind. Da die Wechselwirkung ABC signifikant ist, muss diese untersucht werden. Die Haupteffekte A und C dürfen hier nicht einzeln ausgewertet werden.

Weiters ist ersichtlich, dass die Wärmebehandlung und die Stauchkraft keinen Einfluss auf den Schweißgrat haben. Dieses Ergebnis scheint schlüssig, da der Schweißgrat hauptsächlich in der Reibphase entsteht und somit die Stauchkraft keinen Einfluss mehr aufweisen sollte.

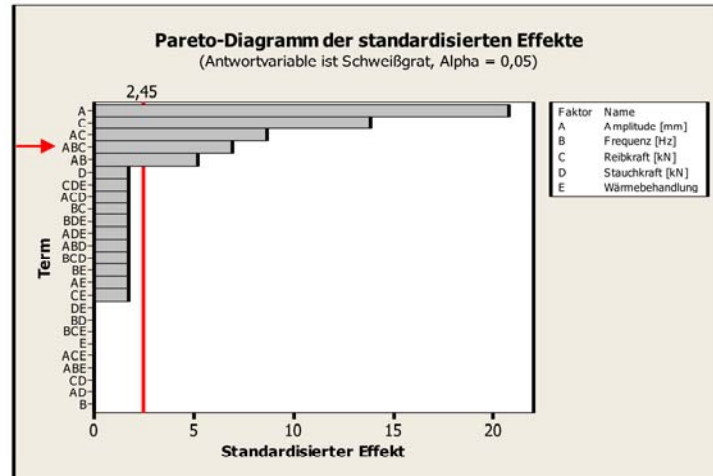


Abbildung 7-3: Pareto Diagramm - Vorversuch – Schweißgrat

Betrachtet man die Zweifachwechselwirkungen, so ist deutlich zu erkennen, dass die Einstellung mit einer Amplitude von 2,5 mm einen besseren Schweißgrat erzeugt. Auch zu erkennen ist, dass die Reibkraft mit 32 kN zu einem günstigeren Schweißgrat führt. Da jedoch eine Dreifachwechselwirkung signifikant ist, genügt es nicht die Zweifachwechselwirkungen alleine zu betrachten. (Abbildung 7-4)

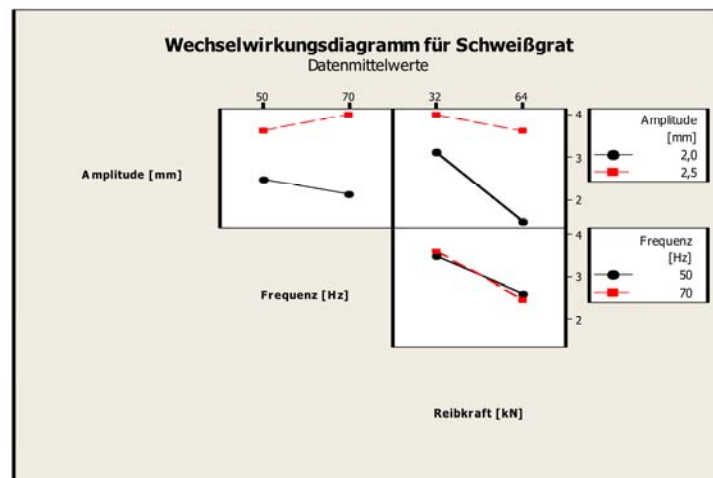


Abbildung 7-4: Wechselwirkung - Vorversuch - Schweißgrat



Stellt man nun die Ergebnisse des Schweißgrates in einem 3D-Streudiagramm dar, so ist ersichtlich, dass bei einer Amplitude von 2,5 mm lediglich bei einer Kombination von 50 Hz und 64 kN Reibkraft *ein* Schweißgrat entsteht, der nicht mit D (4) bewertet wurde. (Abbildung 7-5)

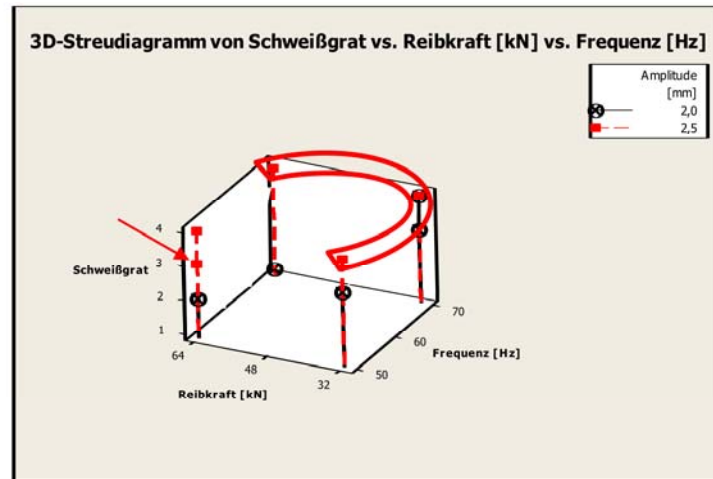


Abbildung 7-5: 3D-Streudiagramm - Vorversuch - Schweißgrat

Als beste Einstellung für einen guten Schweißgrat können somit folgende Parameterkonfigurationen festgelegt werden (Tabelle 7-3):

Tabelle 7-3: Beste Einstellungen für einen guten Schweißgrat

Amplitude [mm]	Reibkraft [kN]	Frequenz [Hz]
2,5	64	70
2,5	32	70
2,5	32	50

Die Wärmebehandlung und die Stauchkraft haben keinen signifikanten Einfluss auf den entstehenden Schweißgrat. Eine Verminderung der Amplitude hat den größten negativen Einfluss auf die Schweißgratqualität. In Abbildung 7-6 ist das Würfeldiagramm zu sehen. Dabei sind 4 Würfel dargestellt, welche sich von der Wärmebehandlung und der Stauchkraft unterscheiden. Da diese Faktoren jedoch keinen Einfluss auf den Schweißgrat haben, können diese Unterscheidungen vernachlässigt werden. Somit entsteht ein dreidimensionaler Würfel mit den Faktoren: Amplitude, Reibkraft und Frequenz. (Abbildung 7-7)

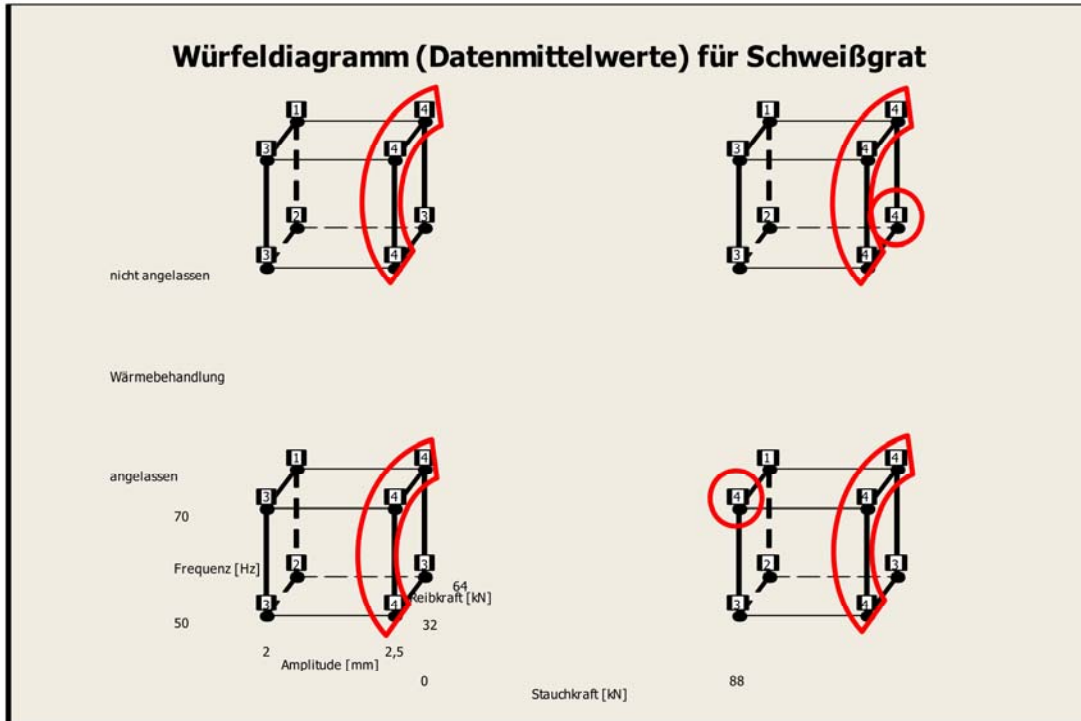


Abbildung 7-6: Würfeldiagramm - Vorversuch – Schweißgrat

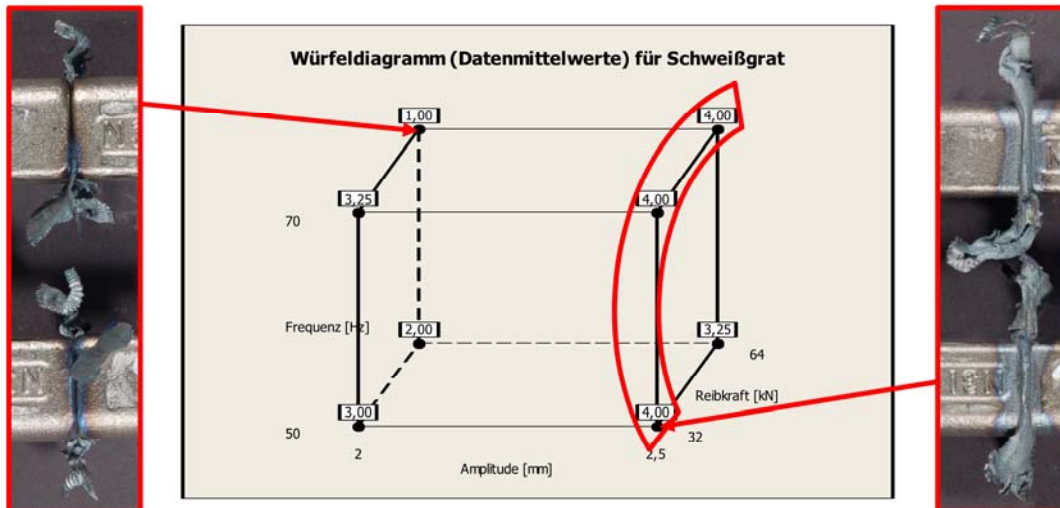


Abbildung 7-7: Würfeldiagramm - Vorversuch – Schweißgrat

### 7.3 Reibzeit

Als nächsten Schritt wird die Auswirkung der Parameteränderungen auf die Reibzeit untersucht. Dabei ist die Amplitude wieder der signifikanteste Haupteffekt. Wechselwirkungen sind bis zur dritten Stufe relevant. Daher werden höhere Wechselwirkungen aus dem System entfernt. (Abbildung 7-8, Abbildung 7-9)

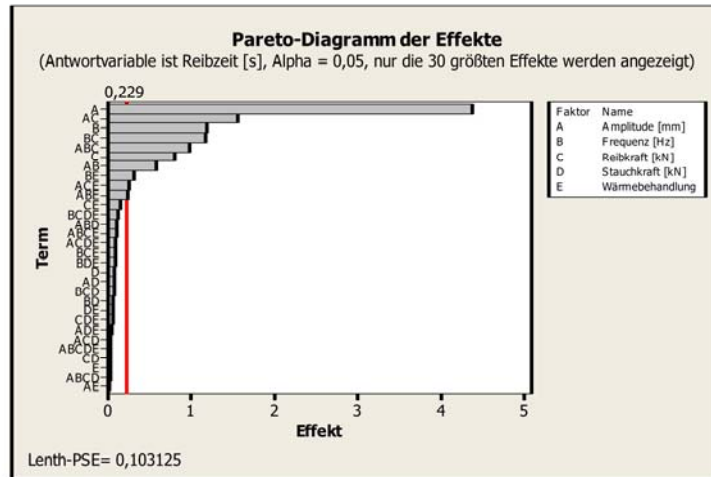


Abbildung 7-8: Pareto Diagramm - Vorversuch - Reibzeit

Die Dreifachwechselwirkung zwischen Amplitude, Reibkraft und Frequenz ist signifikant, daher dürfen die einzelnen Haupteffekte nicht einzeln betrachtet werden, sondern deren Dreifachwechselwirkung.

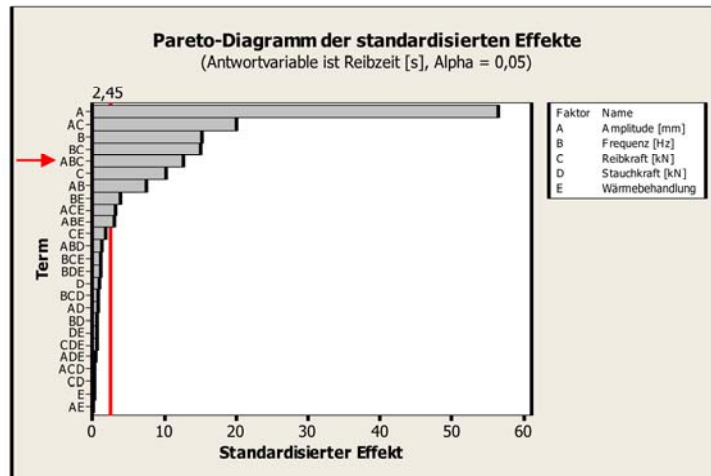
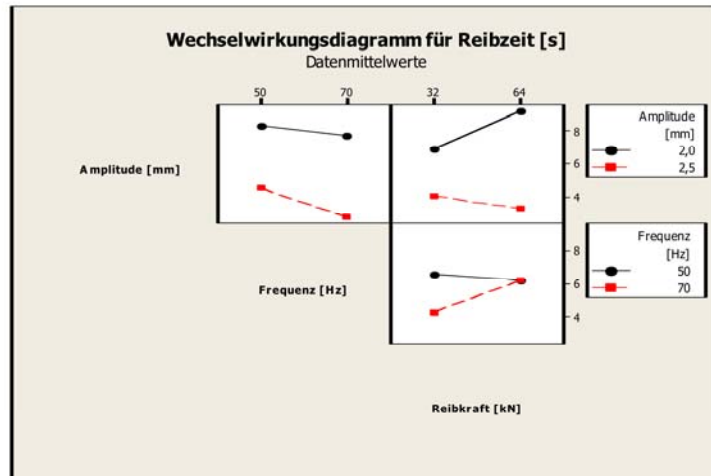


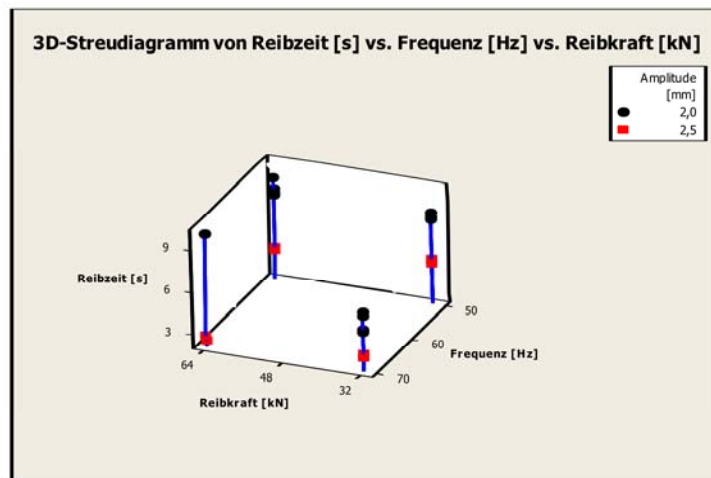
Abbildung 7-9: Pareto Diagramm - Vorversuch - Reibzeit

Betrachtet man vorerst die Zweifachwechselwirkungen, so ist ersichtlich, dass eine hohe Amplitude wesentlich für eine geringe Reibzeit ist. Auch eine hohe Frequenz scheint sich positiv auf eine kurze Reibzeit auszuwirken. (Abbildung 7-10)



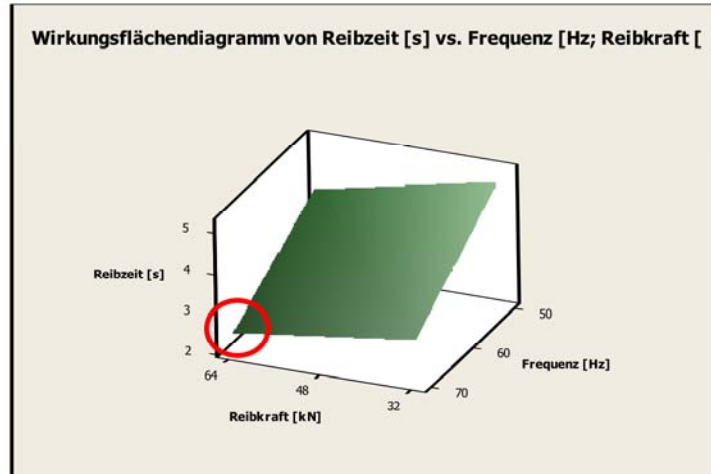
**Abbildung 7-10: Wechselwirkung - Vorversuch - Reibzeit**

Die Darstellung im 3D-Streudiagramm (Abbildung 7-11) zeigt, dass die Reibzeiten der Versuche, welche mit einer hohen Amplitude durchgeführt wurden, deutlich unter jenen mit einer geringen Amplitude liegen. Somit kann die Amplitude für eine geringe Reibzeit mit 2,5 mm festgelegt werden.



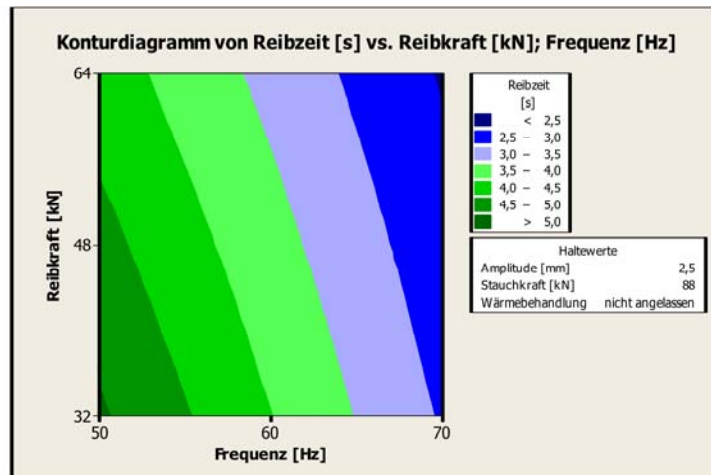
**Abbildung 7-11: 3D-Streudiagramm - Vorversuch - Reibzeit**

Für eine nähere Betrachtung der Frequenz und der Reibkraft bei einer Amplitude von 2,5 mm wurde das Wirkungsflächendiagramm (Abbildung 7-12) gewählt. Hier wird deutlich, dass mit zunehmenden Werten für Reibkraft und Frequenz, eine geringere Reibzeit erreicht wird. Folglich kann für die beste Reibzeit eine Parameterkonfiguration von einer hohen Amplitude, Reibkraft und Frequenz festgelegt werden. Dies entspricht einem hohen Power Input.



**Abbildung 7-12: Wirkungsflächendiagramm - Vorversuch - Reibzeit**

Die zweidimensionale Betrachtung kann im Konturdiagramm (Abbildung 7-13) realisiert werden. Hier ist die Amplitude mit 2,5 mm fixiert. Die Stauchkraft und die Wärmebehandlung waren nicht signifikant und wurden deshalb auf den Stufen 88 kN und „nicht angelassen“ gehalten.



**Abbildung 7-13: Konturdiagramm - Vorversuch – Reibzeit**

Das Wechselwirkungsdiagramm in Abbildung 7-14 zeigt die Wechselwirkung zwischen Wärmebehandlung und Frequenz. Eine Frequenz von 70 Hz liefert im Allgemeinen eine geringere Reibzeit, welche sich durch einen angelassenen Grundwerkstoff weiter senken lässt. Bei 50 Hz liegt die durchschnittliche Reibzeit höher. Bei dieser Frequenz wird eine kürzere Reibzeit, bei nicht angelassenem Grundwerkstoff, erreicht.



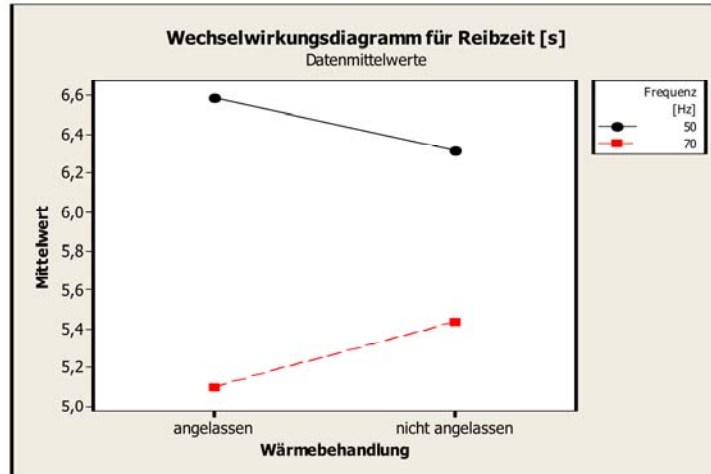


Abbildung 7-14: Wechselwirkung - Vorversuch – Reibzeit

Zur Überprüfung der Auswertung wird folglich das Würfeldiagramm dargestellt und die besten Reibzeiten markiert. (Abbildung 7-15)

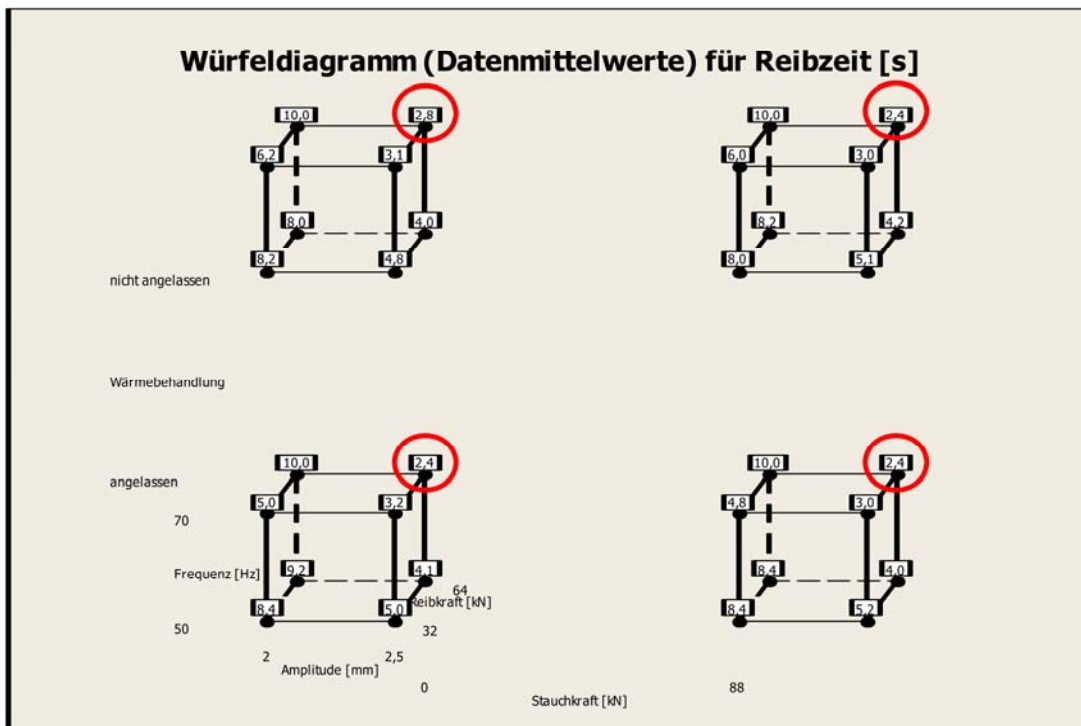


Abbildung 7-15: Würfeldiagramm - Vorversuch – Reibzeit

## 7.4 Schweißnahtbreite

Untersucht wird hier der Zusammenhang zwischen der Schweißnahtbreite und den Einstellparametern. Aus dem Pareto-Diagramm in Abbildung 7-16 ist zu erkennen, dass alle Wechselwirkungen, welche über eine Dreifachwechselwirkung hinausgehen nicht signifikant sind und können daher gelöscht werden.

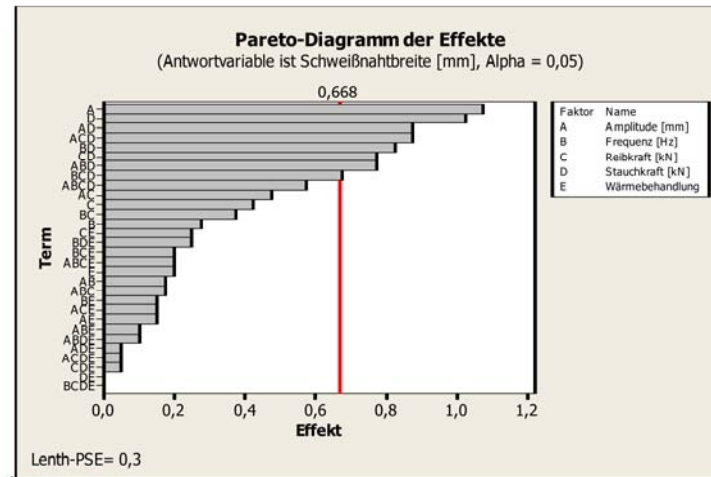


Abbildung 7-16: Pareto Diagramm - Vorversuch - Schweißnahtbreite

Daher ergibt sich, dass die Haupteffekte der Amplitude und der Stauchkraft signifikant für die Schweißnahtbreite sind. Aber auch Zwei- und Dreifach-Wechselwirkungen zeigen eine hohe Signifikanz. (Abbildung 7-17) Da die Dreifachwechselwirkung ABD nur knapp unterhalb des Signifikanzbereichs ist, wird diese auch berücksichtigt. Damit ist ersichtlich, dass eine hohe Wechselwirkung der Faktoren A, B, C und D besteht. Die Wärmebehandlung (E) ist in keinem Fall signifikant und hat daher keinen besonderen Einfluss auf die Schweißnahtbreite.

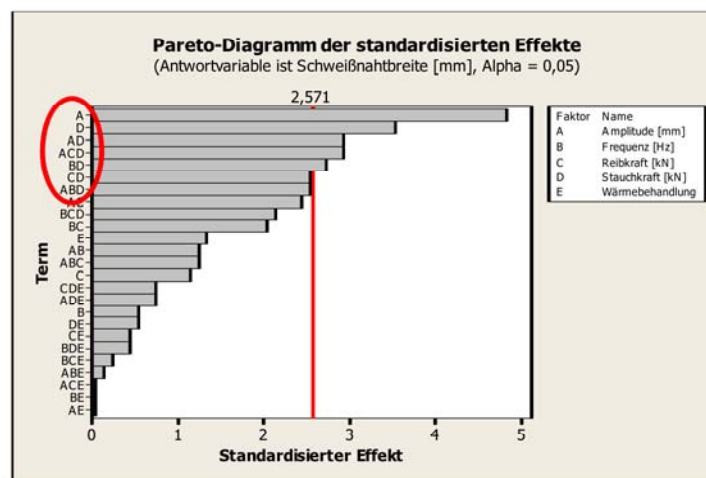
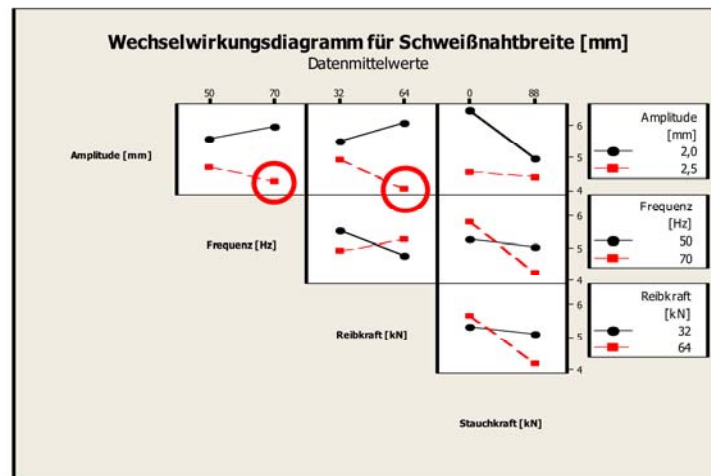


Abbildung 7-17: Pareto Diagramm - Vorversuch - Schweißnahtbreite

In Abbildung 7-18 sind die Zweifachwechselwirkungen der vier Faktoren gegenübergestellt. Man sieht die starke Abweichung der Parallelität von einer Faktorstufe auf die andere. Dies war durch die hohe Signifikanz der Wechselwirkungseffekte zu erwarten. Die hohen Signifikanzen der Haupteffekte der Amplitude und der Stauchkraft sind auch in den Wechselwirkungsdiagrammen klar ersichtlich. So führt eine Amplitude von 2,5 mm stets zu einer geringeren Schweißnahtbreite als eine Amplitude von 2 mm. Betrachtet man die Amplitude von 2,5 mm so sieht man, dass sich mit zunehmender Reibkraft, Frequenz oder Stauchkraft, die Schweißnahtbreite mindern lässt. Eine Verminderung der Breite bei einer höheren Stauchkraft lässt sich auch bei einer Amplitude von 2 mm feststellen.



**Abbildung 7-18: Wechselwirkung - Vorversuch – Schweißnahtbreite**

Im Allgemeinen sind die Wechselwirkungen hier sehr stark ausgeprägt. Dies erschwert das Festlegen einer optimalen Einstellung. Es handelt sich um einen komplexen Prozess, deren Parameter starke Wechselwirkungen aufweisen.

Um die geringste Schweißnahtbreite zu finden, wird das Würfeldiagramm in Abbildung 7-19 dargestellt.

Die geringste Schweißnahtbreite ergibt sich mit der Einstellung:

Amplitude = 2,5 mm

Reibkraft = 64 kN

Frequenz = 70 Hz

Strauchkraft = 88 kN und nicht angelassen oder

Strauchkraft = 88 kN und angelassen oder

Strauchkraft = 0 kN und angelassen

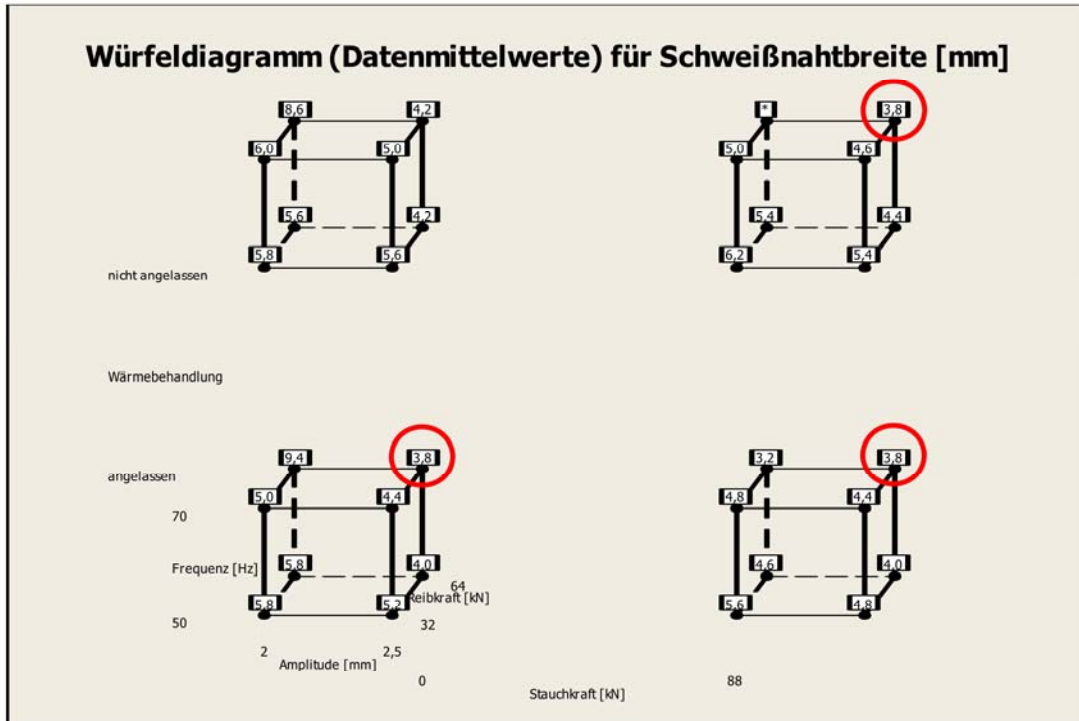


Abbildung 7-19: Würfeldiagramm - Vorversuch – Schweißnahtbreite

In Abbildung 7-20 sind die Schweißnahtbreiten für die Versuche mit einer Amplitude von 2,5 mm dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit zunehmender Reibkraft und Frequenz die Schweißnahtbreite sinkt.

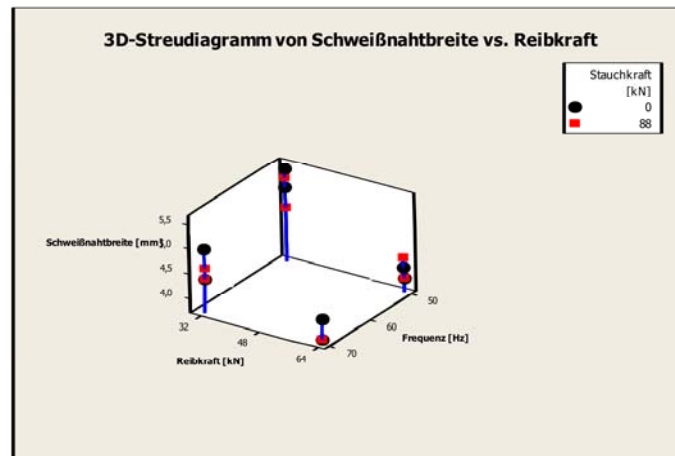


Abbildung 7-20: 3D-Streudiagramm - Vorversuch - Schweißnahtbreite

Auch bei der Auswertung in Excel sind diese Effekte gut ersichtlich. In Abbildung 7-21 ist die Schweißnahtbreite der Amplitude gegenübergestellt. Dabei wird der Schweißgrat in den vier Kategorien farblich unterteilt. Bei einer Amplitude von 2 mm ist sowohl die Schweißnahtbreite als auch die Schweißgratqualität breit gestreut. Bei einer Amplitude von 2,5 mm wurde eine wesentlich konstantere Schweißnahtbreite als auch Schweißgratqualität (C und D) erreicht.

### Schweißnahtbreite / Amplitude

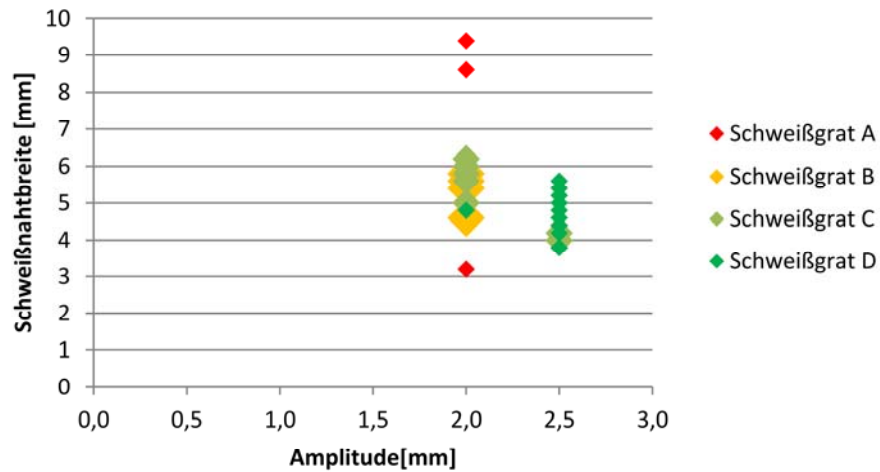


Abbildung 7-21: Schweißnahtbreite / Amplitude - Vorversuch

Wird der Schweißnahtbreite die Frequenz gegenübergestellt, so ist ersichtlich, dass sowohl bei 50 Hz als auch bei 70 Hz gute als auch schlechte Schweißgratqualitäten erzielt werden können. Dies liegt am Einfluss der Amplitude. Betrachtet man den Schweißgrat D so ist mit zunehmender Frequenz ein Sinken der Schweißnahtbreite zu beobachten. (Abbildung 7-22)

### Schweißnahtbreite / Frequenz

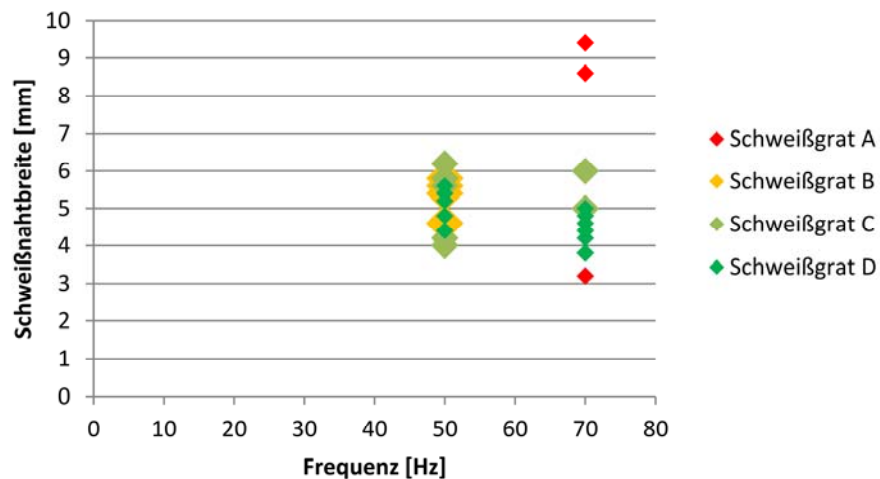


Abbildung 7-22: Schweißnahtbreite / Frequenz - Vorversuch

Vergleicht man die Breite der Schweißnaht mit der aufgebrachtten Reibkraft so kann man feststellen, dass mit zunehmender Reibkraft die Breite bei Schweißgrat C und D abnimmt. Dies lässt sich durch den stärkeren Druck auf das plastifizierte Material erklären, welches verstärkt aus der Schweißzone verdrängt wird. (Abbildung 7-23)



### Schweißnahtbreite / Reibkraft

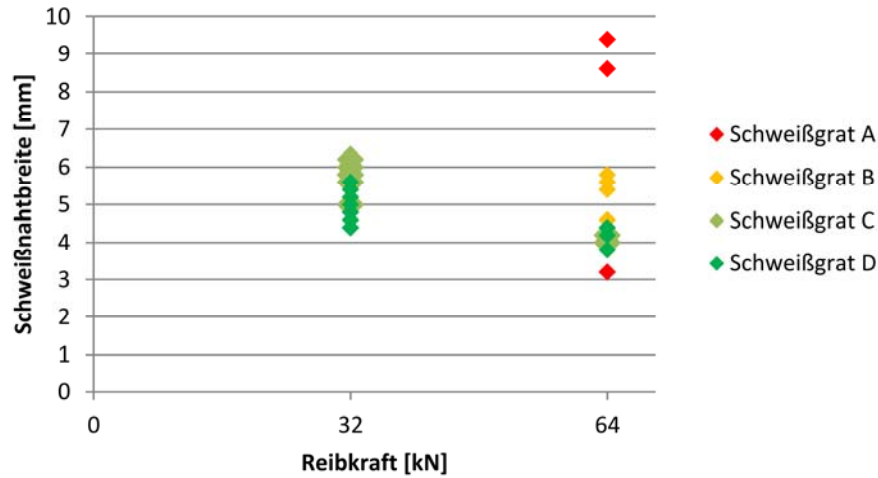


Abbildung 7-23: Schweißnahtbreite / Reibkraft - Vorversuch

Weiters ist festzustellen, dass die Breite der Schweißnaht mit sinkender Reibzeit abnimmt. Dies erscheint einleuchtend, da mit einer geringeren Reibzeit auch die Wärmezufuhr begrenzt ist. (Abbildung 7-24)

### Schweißnahtbreite / Reibzeit

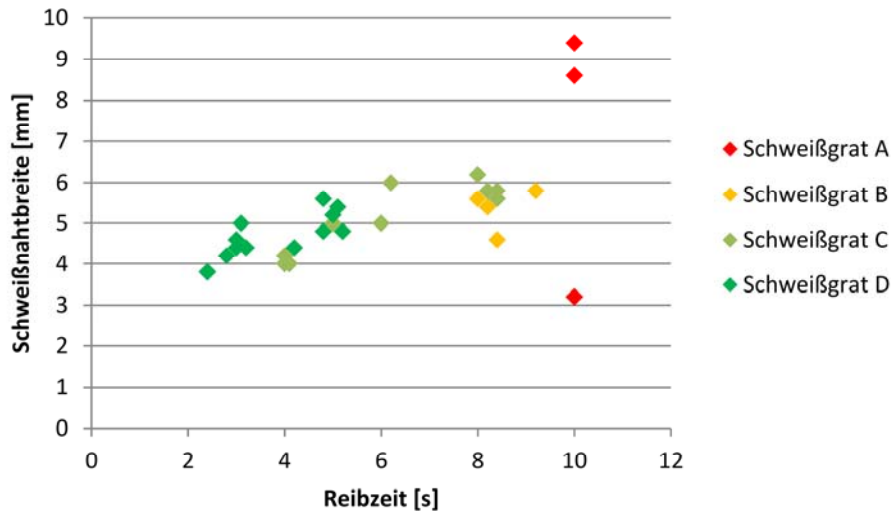


Abbildung 7-24: Schweißnahtbreite / Reibzeit - Vorversuch

In Abbildung 7-25 sieht man, dass die Zugfestigkeiten für Schweißgrat B, C und D über dem Festigkeitswert des Grundwerkstoffs liegen. Lediglich Schweißgrat A führt zu geringeren Werten. Schweißgrat C und D weisen in den Zugfestigkeitswerten keine großen Unterschiede auf. Schweißgrat B scheint jedoch bei höheren Schweißgratbreiten geringere Zugfestigkeiten zu besitzen.

## Schweißnahtbreite / Zugfestigkeit

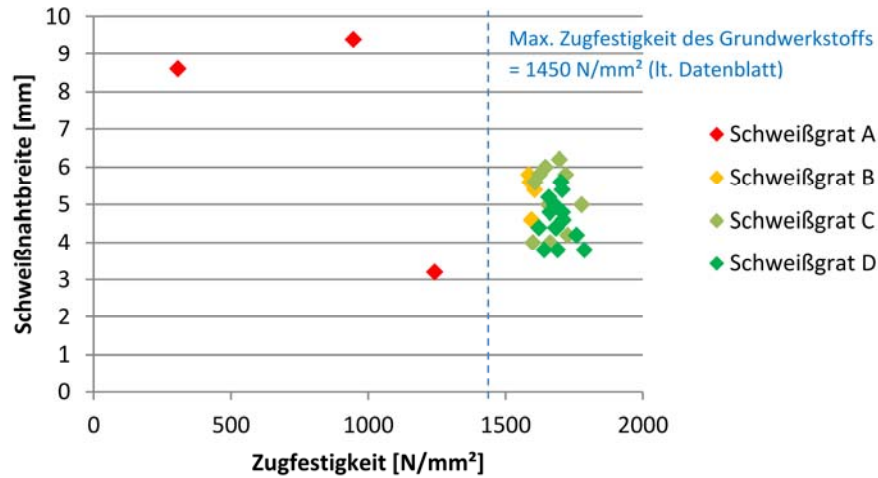


Abbildung 7-25: Schweißnahtbreite / Zugfestigkeit - Vorversuch

Ordnet man den Schweißnahtbreiten den jeweiligen Power Input zu (Abbildung 7-26), so sinkt die Schweißnahtbreite mit zunehmendem Power Input. Ausnahmen stellen die Versuche mit Schweißgrat A dar. Bei Schweißgrat C und D ist jedoch ein eindeutiger Verlauf erkennbar.

## Schweißnahtbreite / Power Input

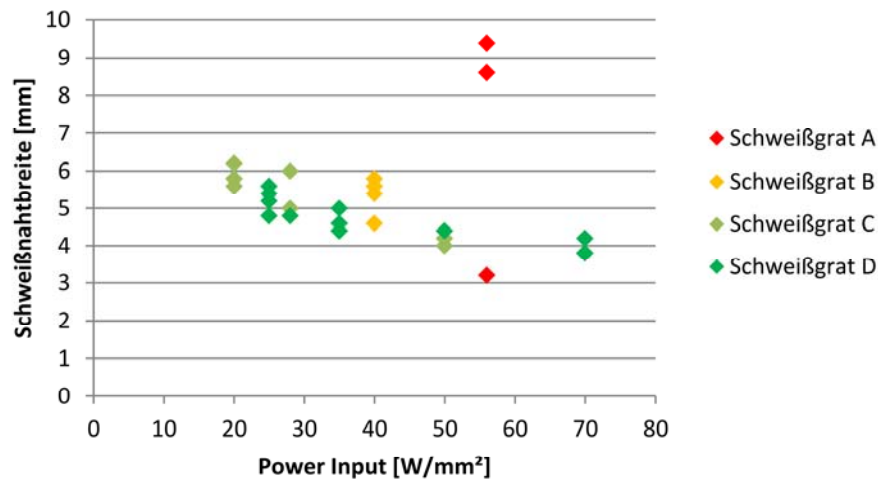


Abbildung 7-26: Schweißnahtbreite / Power Input – Vorversuch

**Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei Versuchen mit hohem Power Input, welche den Schweißgrat D ergeben, eine geringe Schweißnahtbreite auftritt. Dabei werden auch geringe Reibzeiten und hohe Zugfestigkeitswerte gemessen.**

## 7.5 Maximale Härte in der Schweißzone

Für die Signifikanzuntersuchung der Effekte für maximale Härte in der Schweißzone wurde für jeden Versuch der höchste Härtewert in der Schweißnaht ermittelt. Bei der Auswertung mit Minitab 16 konnte kein signifikanter Effekt beobachtet werden. (Abbildung 7-27) Dies erscheint schlüssig, da es unabhängig von den Schweißparametern zu einer ähnlichen Abkühlgeschwindigkeit und somit zur Martensitbildung kommt. Im Würfeldiagramm (Abbildung 7-28) sind die maximalen Härtewerte für jeden Versuch aufgeschlüsselt.

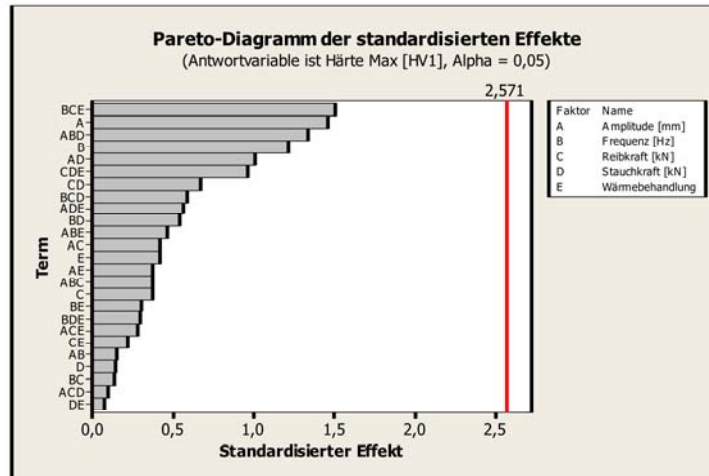


Abbildung 7-27: Pareto Diagramm - Vorversuch – maximale Härte

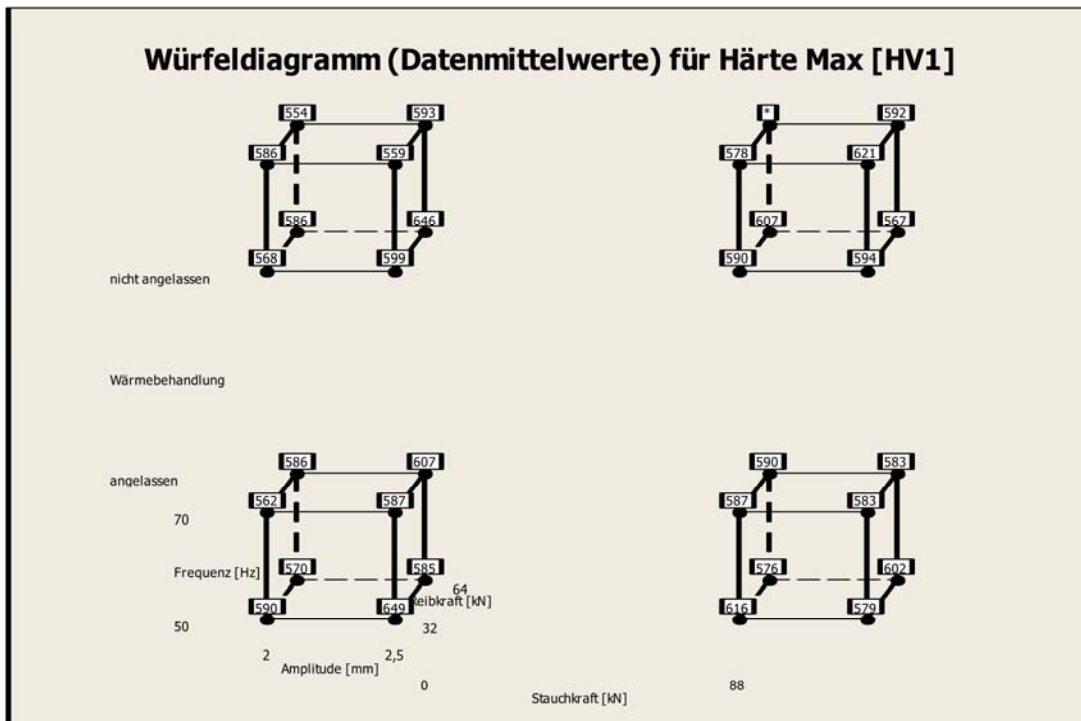
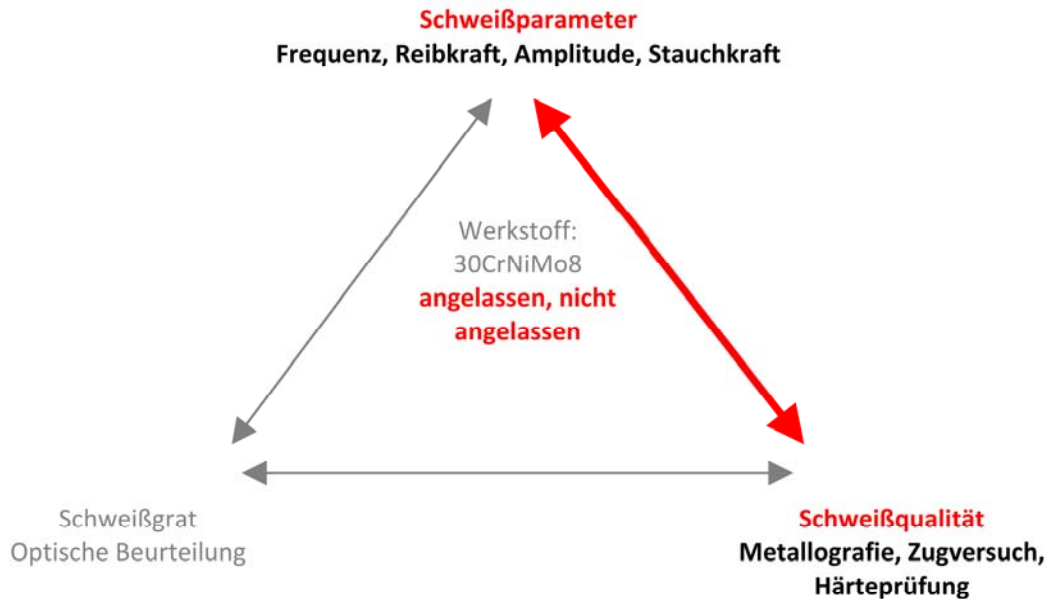


Abbildung 7-28: Würfeldiagramm - Vorversuch – maximale Härte

## 7.6 Zugfestigkeit

Die gleichen Untersuchungen werden auch für die gemessenen Zugfestigkeitswerte durchgeführt.



Bei dieser Untersuchung wurde die Signifikanz der Parameter auf die Zugfestigkeit ausgewertet. (Abbildung 7-29) Hier können alle vier- und fünffach Wechselwirkungen gestrichen werden, da diese als nicht signifikant ausgewiesen werden. Diese Auswertung wurde noch einmal ohne vier- und fünffach Wechselwirkungen durchgeführt. (Abbildung 7-30)

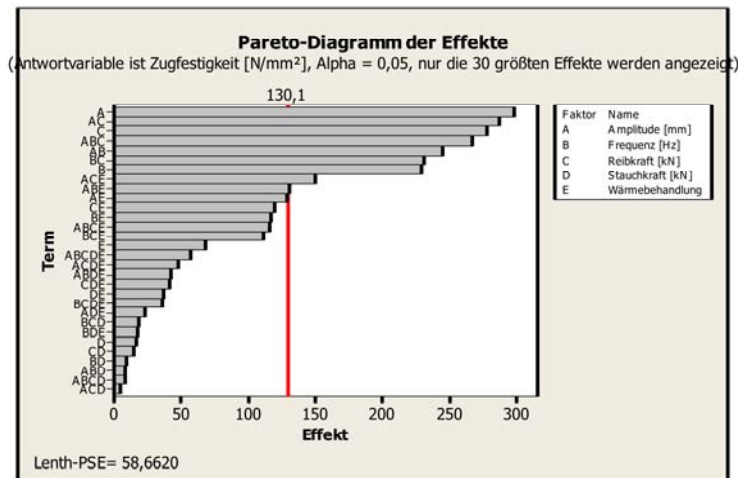


Abbildung 7-29: Pareto Diagramm - Vorversuch - Zugfestigkeit

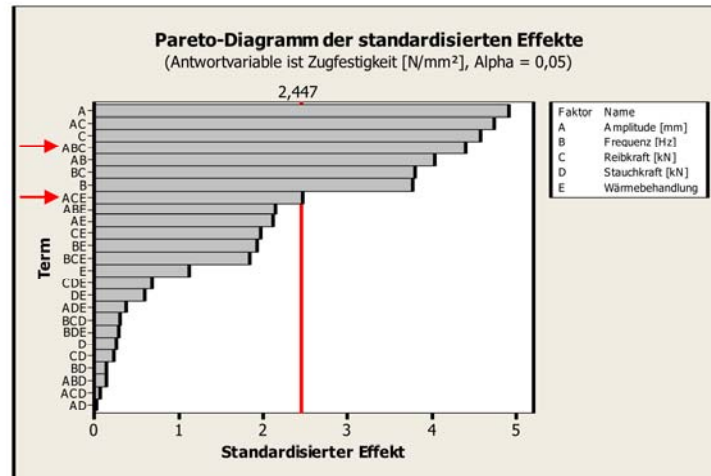


Abbildung 7-30: Pareto Diagramm - Vorversuch - Zugfestigkeit

Als signifikante Haupteffekte wurden die Amplitude, die Reibkraft und die Frequenz ausgewiesen. Diese drei Parameter ergaben auch signifikante zweifach und dreifach Wechselwirkungen. Zusätzlich wurde auch eine weitere dreifach Wechselwirkung (Amplitude, Reibkraft, Wärmebehandlung) als signifikant beurteilt. Da hier nicht nur die Haupteffekte signifikant sind, sondern auch Wechselwirkungen, dürfen daher die Haupteffekte nicht einzeln betrachtet werden. Es muss die Dreifach-Wechselwirkung untersucht werden.

Auch im Wahrscheinlichkeitsnetz für Effekte (Abbildung 7-31) können die signifikanten Haupteffekte und Wechselwirkungen identifiziert werden.

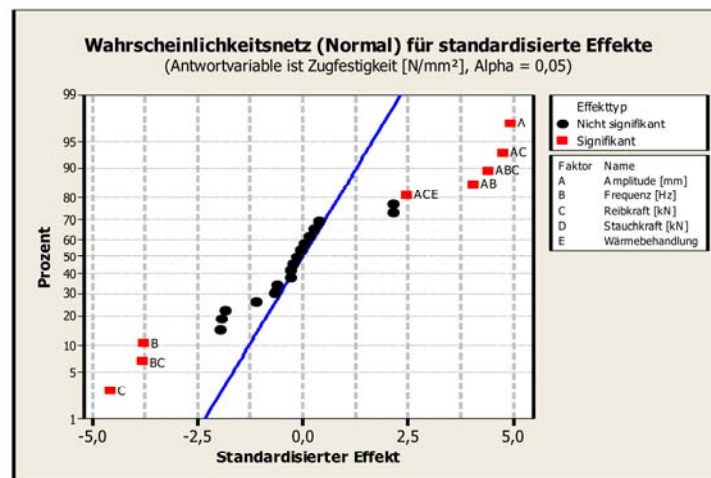


Abbildung 7-31: Wahrscheinlichkeitsnetz der Effekte - Vorversuch - Zugfestigkeit

Da die Untersuchung der Dreifachwechselwirkung erhebliche Schwierigkeiten mit sich bringt, werden anstelle der Dreifachwechselwirkung, die drei Zweifachwechselwirkungen untersucht. Die signifikanteste Zweifachwechselwirkung ist zwischen Amplitude und Reibkraft.

Im Wechselwirkungsdiagramm ist eine starke Abweichung der Parallelität der Geraden zu beobachten. Besonders auffällig ist der geringe Zugfestigkeitswert bei 64 kN Reibkraft und einer Amplitude von 2 mm. Das beste Ergebnis wird mit der Kombination von einer Reibkraft von 64 kN und einer Amplitude von 2,5 mm erreicht. (Abbildung 7-32)

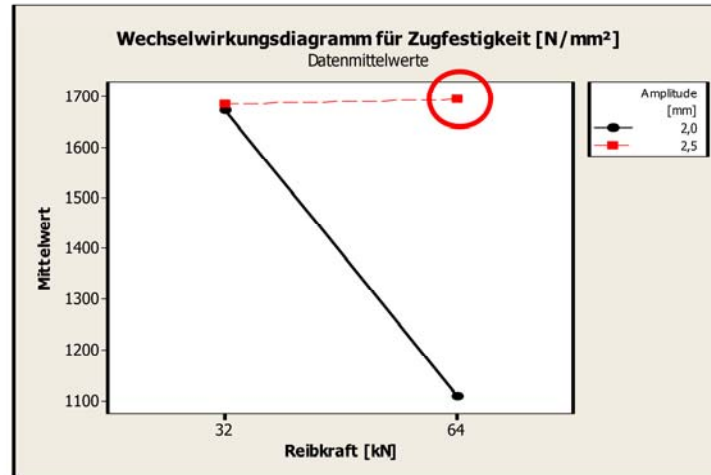


Abbildung 7-32: Wechselwirkung - Vorversuch - Zugfestigkeit

Betrachtet man die anderen beiden Wechselwirkungen, so wird im Vergleich zur Amplitude mit der Frequenz das beste Ergebnis mit jeweils hohen Einstellungen erreicht. Bei der dritten Wechselwirkung ist jedoch die Kombination von einer hohen Frequenz und einer hohen Reibkraft als schlechtestes Ergebnis ausgewiesen. Dies erschwert das Festlegen einer optimalen Parameterkombination, da hier nicht zwischen den beiden Amplitudeneinstellungen unterschieden wird. (Abbildung 7-33)

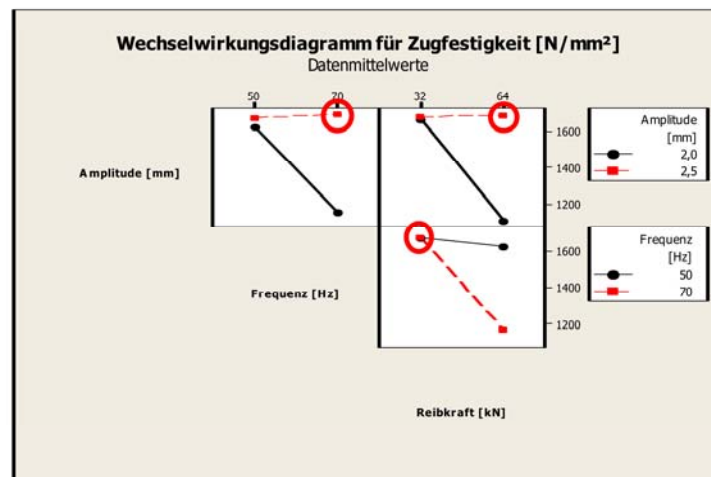


Abbildung 7-33: Wechselwirkung - Vorversuch - Zugfestigkeit

Um dennoch die beste Parameterkonfiguration festzulegen wird das 3D-Streudiagramm verwendet. Dabei werden die Zugfestigkeitswerte auf der z-Skala und die Frequenz und Reibkraft auf der x- und



y-Skala aufgetragen. Um die Amplitude zu berücksichtigen, wurden diese als Gruppen hinzugefügt und in unterschiedlichen Farben dargestellt. (Abbildung 7-34)

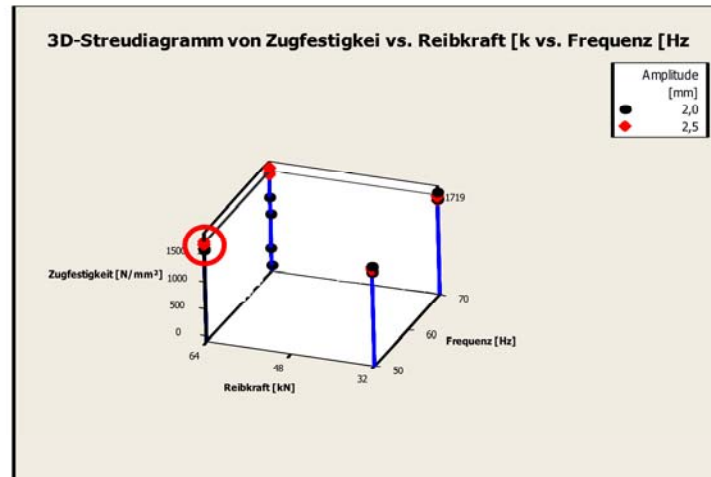


Abbildung 7-34: 3D-Streudiagramm - Vorversuch – Zugfestigkeit

Dabei ergeben sich zu jeder Parameterkonfiguration je vier Versuche, welche sich durch unterschiedliche Wärmebehandlung und Stauchkraft unterscheiden. Vergleicht man nun die Mittelwerte dieser Parameterkonfigurationen, so ergibt sich der beste Wert mit 1719 N/mm<sup>2</sup> bei den hohen Einstellungen der Amplitude, Reibkraft und Frequenz. Dies kann als das gefundene Optimum für die Dreifachwechselwirkung ABC festgelegt werden.

Als nächstes gilt es zu ermitteln wie sich die Wärmebehandlung und die Stauchkraft auf die Zugfestigkeit auswirken. Da die Werte für die Amplitude, die Reibkraft und die Frequenz schon festgelegt wurden, werden diese konstant gehalten. Das beste Ergebnis für eine hohe Zugfestigkeit wird somit bei hohem Power Input und hoher Stauchkraft bei nicht angelassenem Grundwerkstoff gefunden. (Abbildung 7-35)

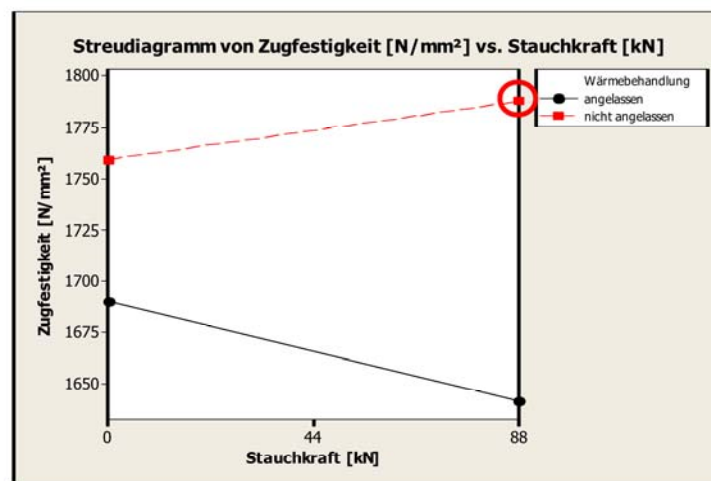


Abbildung 7-35: Streudiagramm - Vorversuch - Zugfestigkeit

Abbildung 7-36 zeigt die Würfeldiagramme für die Zugfestigkeit für sämtliche Parameterkonfigurationen.

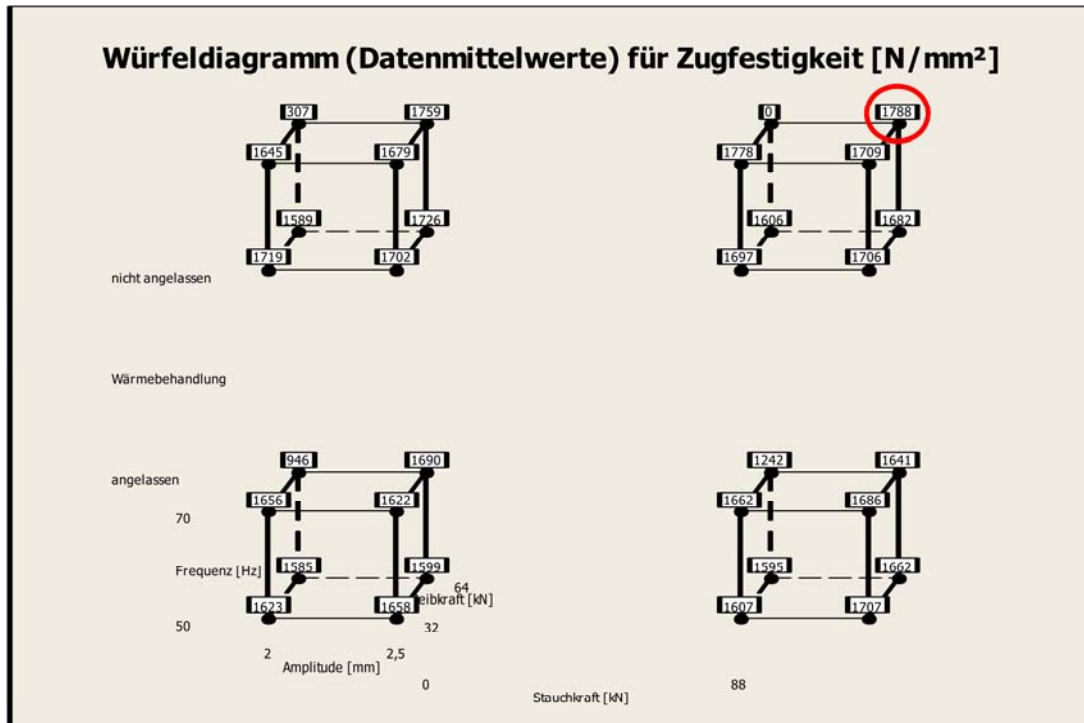


Abbildung 7-36: Würfeldiagramm - Vorversuch - Zugfestigkeit

## 7.7 Einfluss der Wärmeeinflusszone auf die Zugfestigkeit

Durch den Schweißvorgang entsteht an beiden Seiten der Schweißnaht eine weiche Zone. Diese Zone ist dadurch gekennzeichnet, dass die Härte ein Minimum erreicht. Es bestand die Vermutung, dass die Zugfestigkeit mit diesem Härteabfall in Zusammenhang steht. Aus diesem Grund wurde diese weiche Zone näher untersucht.

Im Projekt „Weiche Zone in der WEZ“ [42] wurde dieser Zusammenhang beschrieben. Demnach sollte die Zugfestigkeit mit der Breite der weichen Zone und deren Tiefe sinken. (Abbildung 7-37)  $X(SZ)$  beschreibt dabei die relative Dicke der weichen Zone. Dabei wird die Breite der weichen Zone durch den Probendurchmesser dividiert.  $S(SZ)$  wird durch Division der Härte in der weichen Zone mit der Härte im Grundwerkstoff errechnet und wird mit Stärke der weichen Zone beschrieben.  $UTS$  errechnet sich durch die Division von Zugfestigkeit der Probe mit der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs.

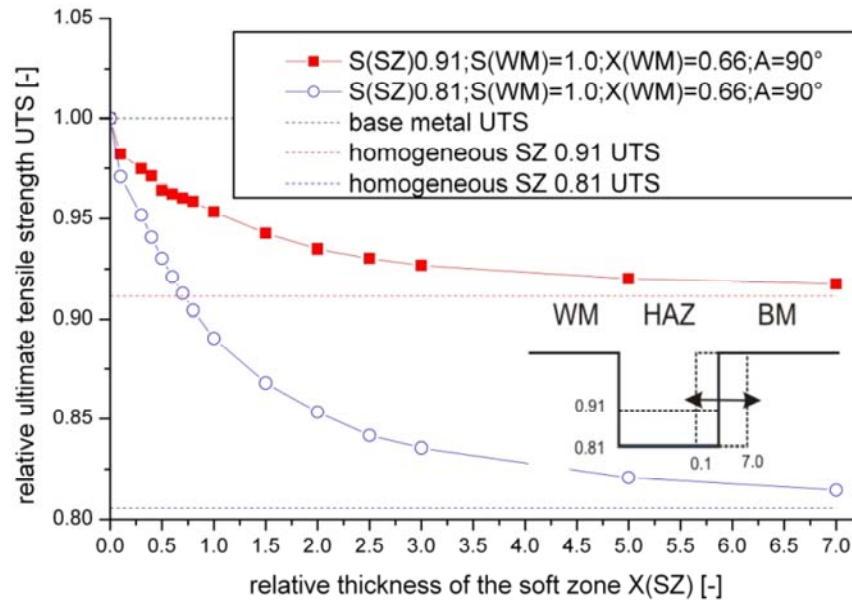


Abbildung 7-37: Einfluss der weichen Zone auf die Zugfestigkeit [42]

Nach dieser Vorgabe wurden die Proben untersucht, jedoch konnte kein Zusammenhang gefunden werden, da die Breite der weichen Zone sehr schmal ist. Deshalb kann die weiche Zone nicht als ausschlaggebendes Kriterium für die Unterschiede in den Zugfestigkeiten herangezogen werden. Die Werte für  $X(SZ)$  liegen zwischen 0,1 und 0,6. In Abbildung 7-37 ist dies der linke Bereich, bei welchem die Unterschiede in den Zugfestigkeiten noch nicht sehr groß sind. Die Werte für  $S(SZ)$  liegen etwa zwischen 0,75 und 0,90. Dies entspricht etwa den beiden dargestellten Kurven, weshalb ein Vergleich angestellt werden konnte.

## 7.8 Wärmeeinflusszone

### 7.8.1 Wärmeeinflusszone links

Hier wird die minimale Härte der „Wärmeeinflusszone links“ den Einstellparametern gegenübergestellt. Man erkennt in Abbildung 7-38, dass die Wärmebehandlung und die Frequenz als Haupteffekte signifikant sind.

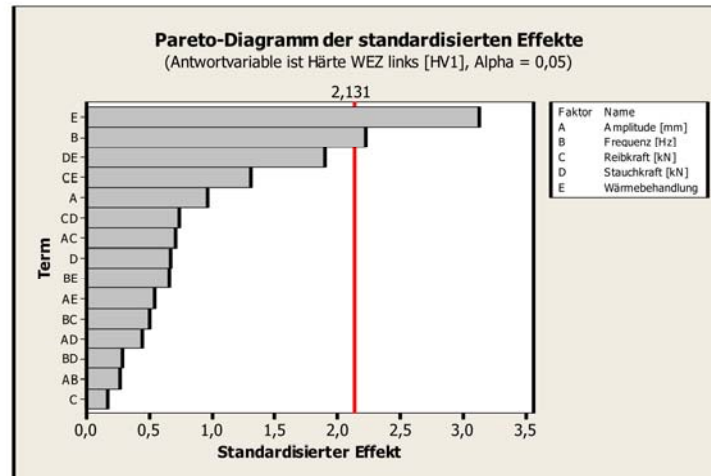


Abbildung 7-38: Pareto Diagramm - Vorversuch - WEZ links

In Abbildung 7-39 ist das 4 in 1 Diagramm dargestellt. Es sind keine Auffälligkeiten, welche gegen eine Durchführung der Auswertung sprechen, erkennbar. Die Messpunkte liegen auf der Geraden (links oben), die Messpunkte sind verteilt und es ist kein Verlauf erkennbar (rechts oben/unten) und die Verteilung entspricht annähernd einer Normalverteilung (links unten).

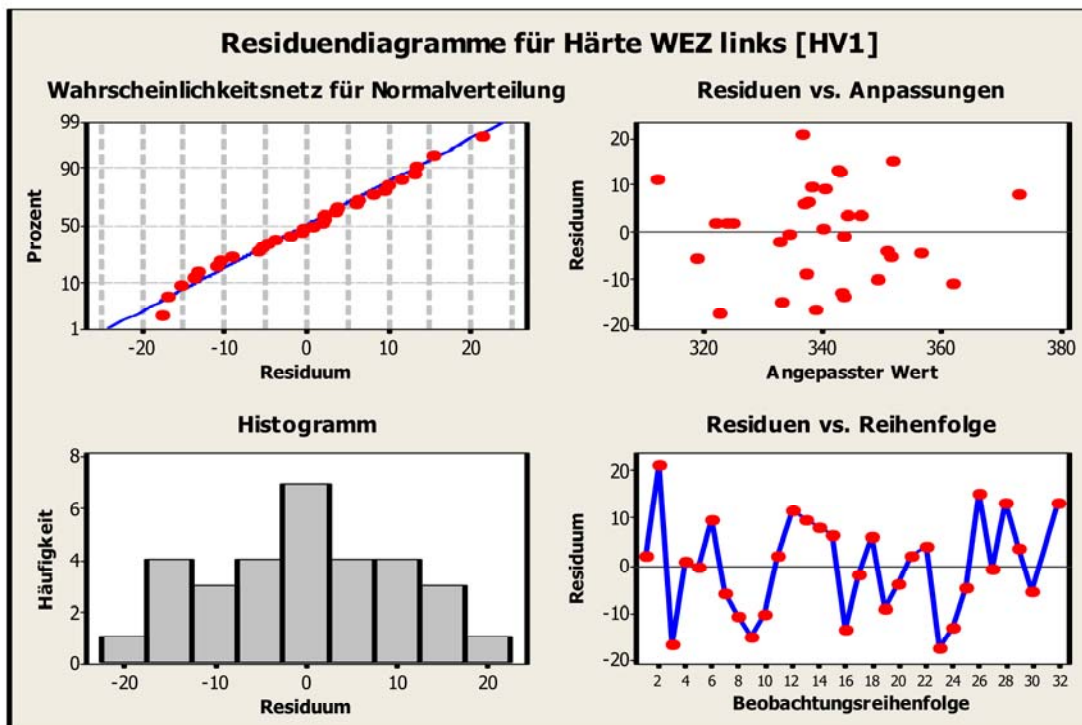


Abbildung 7-39: 4 in 1 Diagramm - Vorversuch - WEZ links

Die Darstellung der Haupteffekte (Abbildung 7-40) zeigt, dass die Härte der „WEZ links“ mit zunehmender Frequenz und nicht angelassenem Grundwerkstoff steigt.

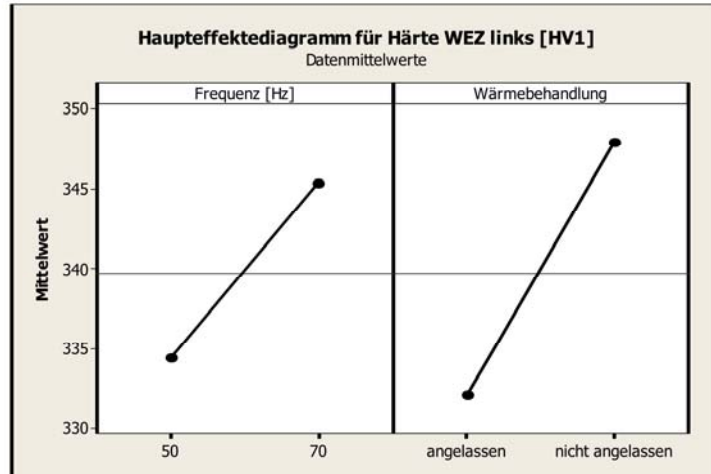


Abbildung 7-40: Haupteffekte - Vorversuch - WEZ links

Im Würfeldiagramm (Abbildung 7-41) sind alle Messwerte für die Härte „WEZ links“ eingetragen. Der höchste Härtewert (geringste Erweichung) wird bei einem hohem Power Input (Amplitude, Frequenz und Reibkraft hoch), bei nicht angelassenem Grundwerkstoff und bei einer aufgebrachtene Stauchkraft von 88 kN gefunden.

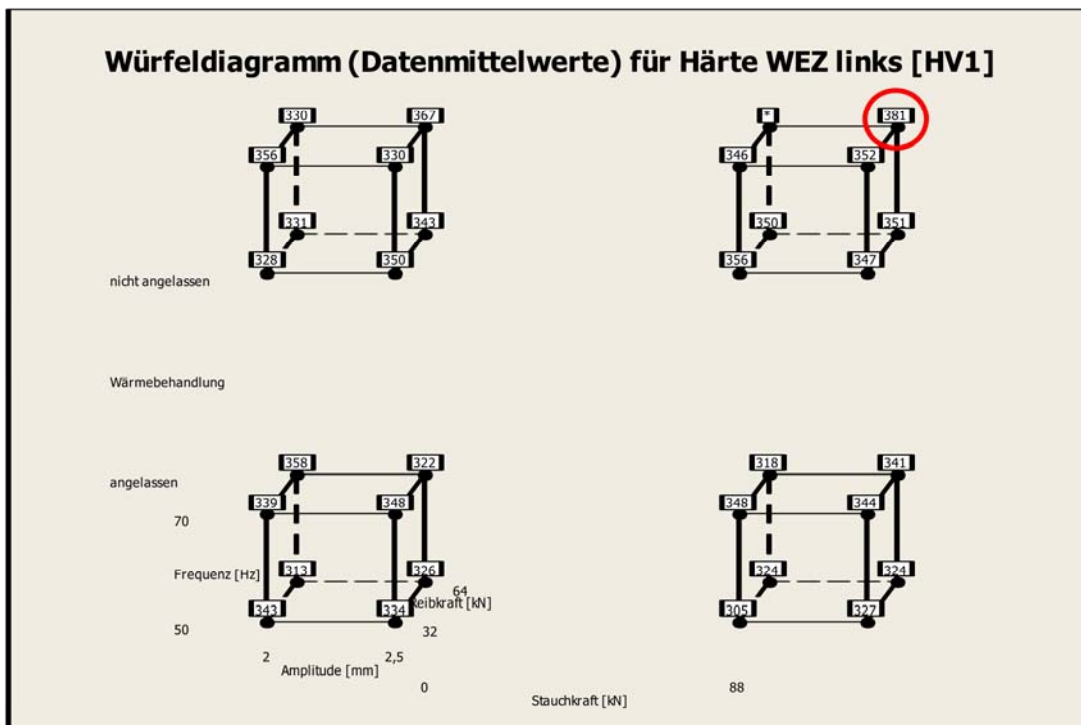


Abbildung 7-41: Würfeldiagramm - Vorversuch - WEZ links

## 7.8.2 Wärmeeinflusszone rechts

Die gleiche Untersuchung wird auch mit der Härte in der „WEZ rechts“ durchgeführt. Es sind die gleichen Ergebnisse zu erwarten. Abbildung 7-42 zeigt das Pareto Diagramm, bei welchem zwar der Haupteffekt der Wärmebehandlung als signifikantester Effekt bleibt, jedoch die Signifikanz der Frequenz wesentlich kleiner als vorhin ist. Dafür ist die Dreifachwechselwirkung ABD hier signifikant.

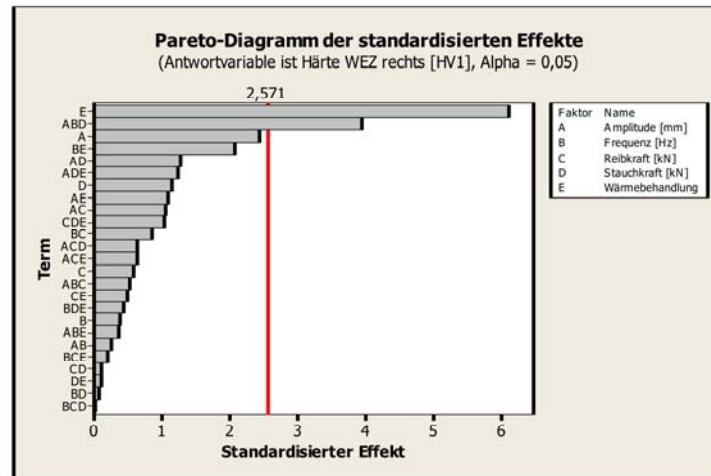


Abbildung 7-42: Pareto Diagramm - Vorversuch - WEZ rechts

Der Haupteffekt der Wärmebehandlung zeigt für die Härte in der WEZ rechts eine Härtesteigerung bei nicht angelassenem Grundwerkstoff. (Abbildung 7-43)

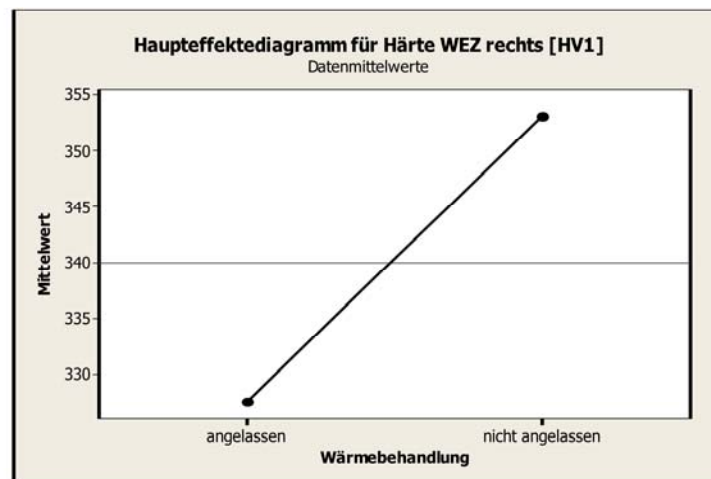


Abbildung 7-43: Haupteffekte - Vorversuch - WEZ rechts

Die Dreifachwechselwirkung ABD wird in Abbildung 7-44 gezeigt. Dabei werden wieder die Zweifachwechselwirkungen der drei Faktoren dargestellt. Erkennbar ist auch der Einfluss der Amplitude, welche bei 2,5 mm höhere Härtewerte in der „WEZ rechts“ zeigt als bei einer Amplitude von 2 mm. Des Weiteren scheint die Härte bei geringer Stauchkraft höher zu liegen.



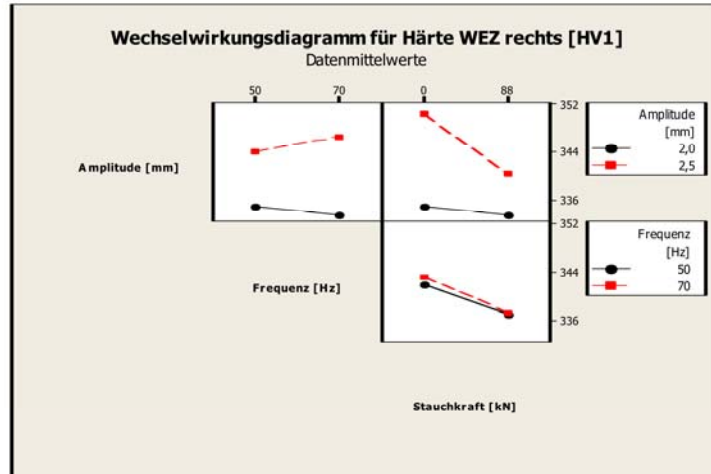


Abbildung 7-44: Wechselwirkungen - Vorversuch - WEZ rechts

Im Würfeldiagramm in Abbildung 7-45 sind die beiden höchsten Härtewerte für die „WEZ rechts“ eingetragen.

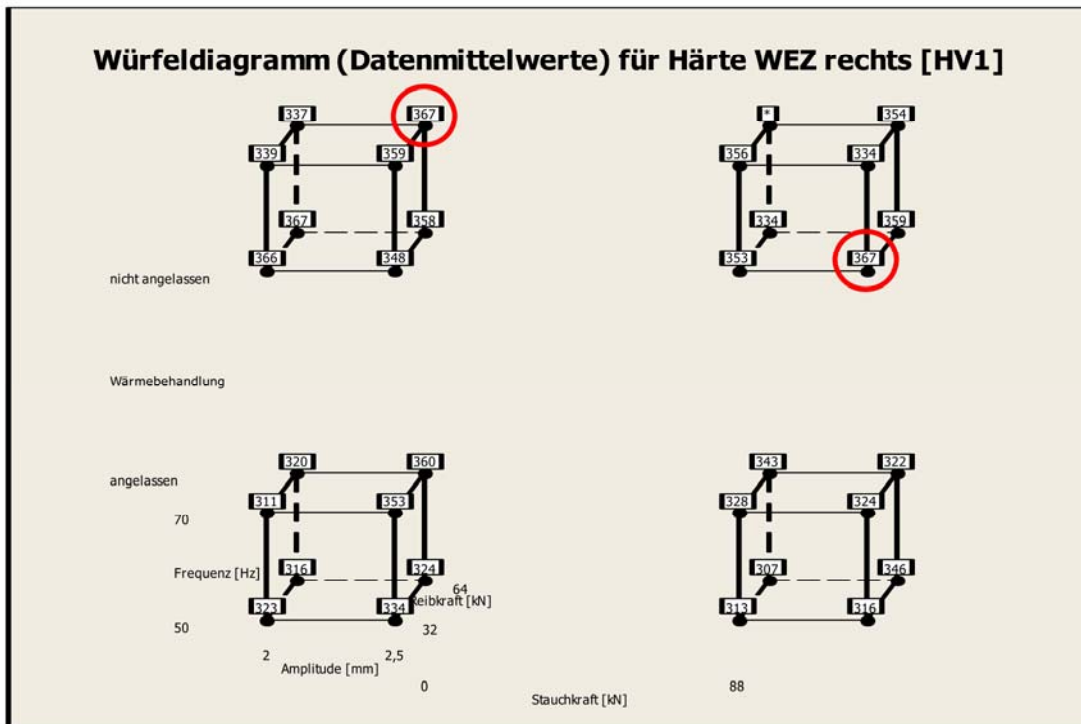


Abbildung 7-45: Würfeldiagramm - Vorversuch - WEZ rechts

Bei der Untersuchung der Härte der Wärmeeinflusszone links und rechts ist stets die Wärmebehandlung vor dem Schweißen signifikant. Ein nicht angelassener Grundwerkstoff weist eine geringere Erweichung der WEZ auf.

## 7.9 Zusammenfassung der Untersuchungen vom Vorversuch

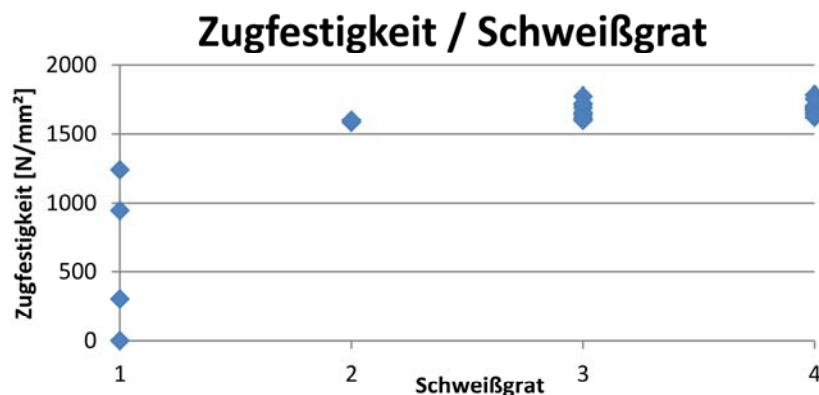
In nachstehender Tabelle 7-4 werden nun die Untersuchungsergebnisse zusammengefasst. Jeweils die besten Parameterkombinationen hinsichtlich der Zugfestigkeit, Schweißgrat und Reibzeit werden eingetragen. Man sieht, dass die Kombination mit hohen Einstellungen in jeder Bewertungsgruppe vertreten ist. Für das Erreichen einer hohen Zugfestigkeit ist zusätzlich eine hohe Stauchkraft von Vorteil. Ein nicht angelassener Grundwerkstoff hat zwar für die Reibzeit Nachteile, wirkt sich aber positiv auf die Zugfestigkeit aus, welche Priorität hat. Somit kann dies als Optimum für den Vorversuch ausgegeben werden.

**Tabelle 7-4: Vorversuch - Beste Parameterkombination**

Kriterium	a [mm]	f [Hz]	F <sub>R</sub> [kN]	St [kN]	Wärmevorbehandlung
Hohe Zugfestigkeit	2,5	70	64	88	Nicht angelassen
Bester Schweißgrat	2,5	70	64	-	-
	2,5	70	32	-	-
	2,5	50	32	-	-
Geringe Reibzeit	2,5	70	64	-	angelassen
Optimum	2,5	70	64	88	Nicht angelassen

Der Vorversuch zeigt, dass die einflussreichsten Parameter die Amplitude, die Frequenz und die Reibkraft sind. Im Hinblick auf die Schweißnahtbreite ist die Stauchkraft ebenfalls von Bedeutung. Keine Wärmebehandlung vor dem Schweißen ist, besonders bei hohen Power Inputs, für hohe Zugfestigkeitswerte günstig. Da die Wärmebehandlung im Allgemeinen nicht signifikant ist, wird dieser Faktor auf den besseren Wert festgelegt, weswegen im Hauptversuch ausschließlich Proben ohne vorheriger Wärmebehandlung geschweißt werden.

Ein Vergleich der Gratqualität mit der Zugfestigkeit zeigt ein erwartetes Resultat. Mit steigender Schweißgratqualität ist eine höhere Zugfestigkeit zu erreichen. Dies ist besonders bei Schweißgrat 1 und 2 zu beobachten, da hier der Schweißgrat entweder nicht oder nicht über der ganzen Querschnittsfläche entstanden ist und somit keine ausreichende Verbindung der Fügeteile gewährleistet werden kann. Von Schweißgrat 3 auf 4 ist keine wesentliche Veränderung der Zugfestigkeit zu beobachten. (Abbildung 7-46)



**Abbildung 7-46: Vorversuch - Zugfestigkeit / Schweißgrat**

## 8 Hauptversuch

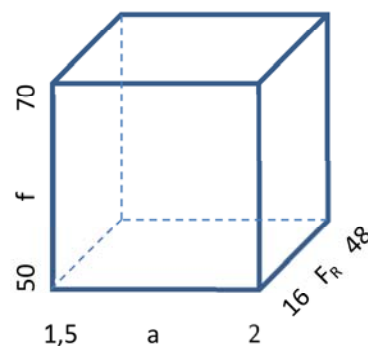
Die im Vorversuch als signifikant eingestuften Parameter werden nun im Hauptversuch näher untersucht. Dies sind die Amplitude, Reibkraft, Frequenz und Stauchkraft. Die Wärmebehandlung ist besonders für die Zugfestigkeit und den Schweißgrat nicht signifikant und wird in weiterer Folge nicht näher untersucht. Da ein nicht angelassener Grundwerkstoff die besseren Ergebnisse aufweist, werden im Hauptversuch ausschließlich solche Proben geschweißt.

Im Hauptversuch wird nach dem gleichem Auswertungsschema wie beim Vorversuch vorgegangen. Das Parameterfenster für den Hauptversuch wurde jedoch vergrößert und in zwei Versuchsreihen unterteilt. Da im Vorversuch die Amplitude als wichtigster Faktor ausgewiesen wurde, wurden diese zwei Versuchsreihen in eine Reihe mit hohen und eine mit niedrigen Amplituden unterteilt. Bei der Versuchsreihe mit niedrigen Amplituden wird ein  $2^3$  faktorieller Versuchsplan mit einer Amplitude von 1,5 bis 2 mm durchgeführt, wobei die Frequenz auf den Stufen 50 und 70 Hz und die Reibkraft von 16 und 48 kN variiert wird. Die Stauchkraft wird dabei auf 88 kN gehalten. Daraus ergibt sich ein Würfel mit 8 Eckpunkten und somit 8 Versuchen. (Tabelle 8-1, Abbildung 8-1)

### Versuchsplan mit niedrigen Einstellungen:

**Tabelle 8-1: Parameterfenster des Hauptversuchs mit niedrigen Einstellungen**

Parameter	Niedrig	Hoch
Amplitude [mm]	1,5	2
Frequenz [Hz]	50	70
Reibkraft [kN]	16	48
Stauchkraft [kN]	88	
Wärmebehandlung vor dem Schweißen	Nicht angelassen	

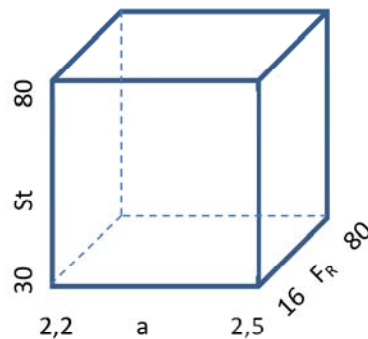


**Abbildung 8-1: Parameterwürfel - Hauptversuch - niedrige Einstellungen**

Die zweite Versuchsreihe des Hauptversuchs wird mit hohen Einstellungen für die Amplitude durchgeführt und wird somit als „Versuchsplan mit hohen Einstellungen“ bezeichnet. Das gewählte Parameterfenster ist in Tabelle 8-2 bzw. in Abbildung 8-2 zu sehen. Dabei wird die Amplitude von 2,2 bis 2,5 mm variiert, die Reibkraft von 16 bis 80 kN. Bei dieser Reihe wird aber die Frequenz konstant auf 70 Hz gehalten und die Stauchkraft auf den Stufen 30 und 80 kN getestet. Der Grundwerkstoff wurde vor dem Schweißen nicht wärmebehandelt.

**Versuchsplan mit hohen Einstellungen:**
**Tabelle 8-2: Parameterfenster des Hauptversuchs mit hohen Einstellungen**

Parameter	Niedrig	Hoch
Amplitude [mm]	2,2	2,5
Frequenz [Hz]	70	
Reibkraft [kN]	16	80
Stauchkraft [kN]	30	80
Wärmebehandlung vor dem Schweißen	Nicht angelassen	


**Abbildung 8-2: Parameterwürfel - Hauptversuch - hohe Einstellungen**

## 8.1 Versuchsreihe mit niedrigen Einstellungen

Wie auch bei den Vorversuchen wurde die Reihenfolge der Durchführung von Minitab 16 randomisiert, um zeitabhängige Abweichungen auszugleichen. (Tabelle 8-3) Untersucht werden wieder die Zugfestigkeit, der Schweißgrat, die Reibzeit und die Schweißnahtbreite in Abhängigkeit von den Parametereinstellungen.

**Tabelle 8-3: Reihenfolge des Hauptversuchs mit niedrigen Einstellungen (St=88 kN)**

Probe	Amplitude [mm]	Frequenz [Hz]	Reibkraft [kN]
1	1,5	70	48
2	2,0	70	48
3	1,5	50	48
4	1,5	70	16
5	1,5	50	16
6	2,0	50	48
7	2,0	50	16
8	2,0	70	16

### 8.1.1 Zugfestigkeit

Da hier nur drei Faktoren verändert werden, ist die höchst mögliche Wechselwirkung eine Dreifachwechselwirkung. Es treten also wesentlich weniger Effekte als beim Vorversuch, welcher aus 5 Faktoren bestand, auf. In Abbildung 8-3 sind alle Wechselwirkungen berücksichtigt. Man erkennt jedoch sofort, dass diese nicht untersucht werden müssen, da sie weit unter dem Signifikanzniveau liegen. Auch die zweifachen Wechselwirkungen erweisen sich als nicht signifikant und werden aus dem System genommen.

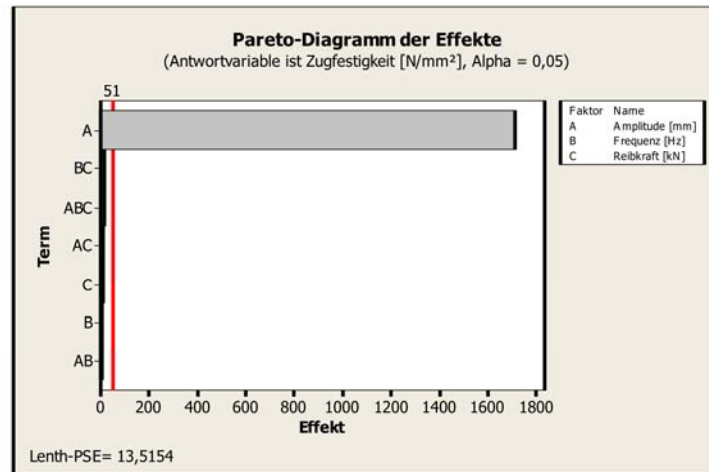


Abbildung 8-3: Pareto Diagramm – Hauptversuch – niedrige Einstellung - Zugfestigkeit

Die verbleibenden Effekte sind die Haupteffekte der Amplitude, der Reibkraft und der Frequenz, wobei nur die Amplitude eine Signifikanz aufweist. (Abbildung 8-4)

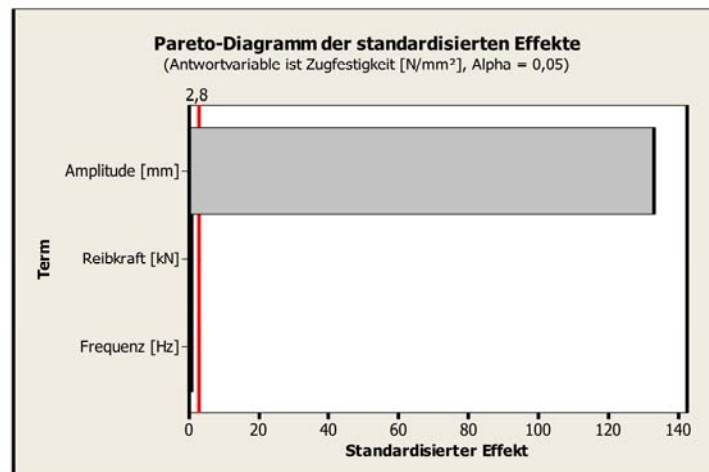
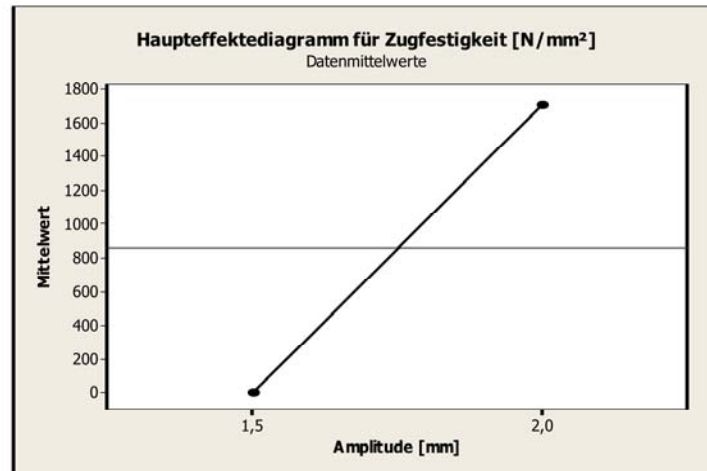


Abbildung 8-4: Pareto Diagramm – Hauptversuch – niedrige Einstellung - Zugfestigkeit

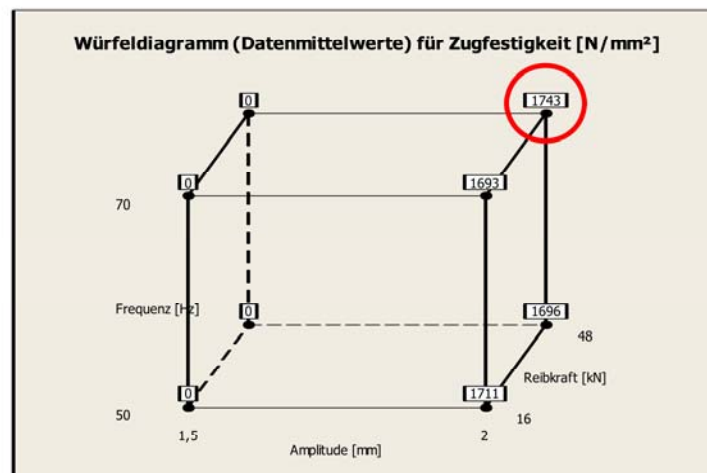
Da hier keine Wechselwirkungen signifikant sind, genügt zur Auswertung die Betrachtung der Haupteffekte. In diesem Fall wird der Haupteffekt der Amplitude in Abbildung 8-5 dargestellt.



**Abbildung 8-5: Haupteffekt – Hauptversuch – niedrige Einstellung - Zugfestigkeit**

Die Mittelwerte für die Zugfestigkeit ändern sich stark in Abhängigkeit der Amplitude. Bei 2 mm Amplitude sind gute Ergebnisse dokumentiert. Bei einer Amplitude von 1,5 mm ist eine Schweißung nicht mehr möglich. Die geschweißten Proben brachen bereits bei geringer Erschütterung (Transport) und konnten in der Zugprüfmaschine nicht mehr getestet werden. Daher wird für diese Proben eine Zugfestigkeit von 0 N/mm<sup>2</sup> festgelegt.

Im Würfeldiagramm sind die jeweiligen Zugfestigkeitswerte an den einzelnen Eckpunkten eingetragen. (Abbildung 8-6)



**Abbildung 8-6: Würfeldiagramm - Hauptversuch - niedrige Einstellung - Zugfestigkeit**

Die Amplitude wurde schon als der einflussreichste Parameter identifiziert. Reibkraft und Frequenz sind im Vergleich dazu nicht signifikant. Jedoch können diese zur Bestimmung eines Optimums in einem Konturdiagramm gegenübergestellt und mit der Zugfestigkeit verglichen werden. Zu erkennen ist, dass das beste Ergebnis bei einem hohen Power Input erreicht wurde. (Abbildung 8-7) Folglich ist das beste Ergebnis für die Zugfestigkeit bei hoher Amplitude, Reibkraft und Frequenz festgelegt. Da



bei diesen Untersuchungen nicht extrapoliert werden darf, gilt diese optimale Einstellung nur innerhalb der festgelegten Systemgrenzen.

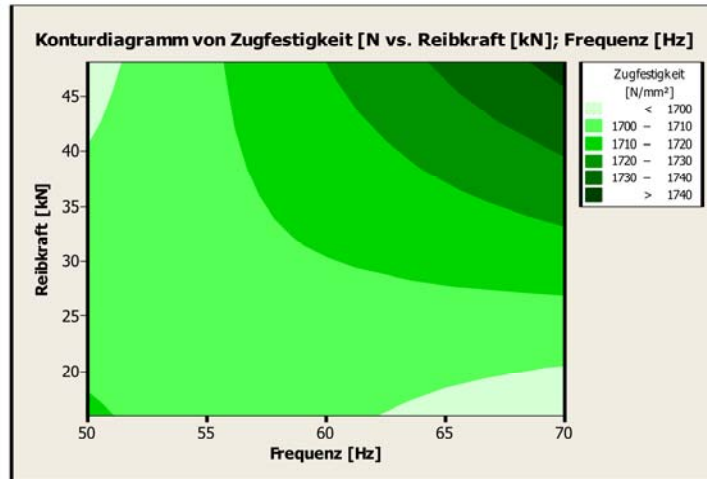


Abbildung 8-7: Konturdiagramm - Hauptversuch - niedrige Einstellung - Zugfestigkeit

### 8.1.2 Schweißgrat

Die Signifikanzuntersuchung für den Schweißgrat ergab, dass auch hier nur die Amplitude einen hohen Effekt ausübt. Die Haupteffekte für Frequenz und Reibkraft, sowie die Wechselwirkungen sind nicht signifikant. (Abbildung 8-8)

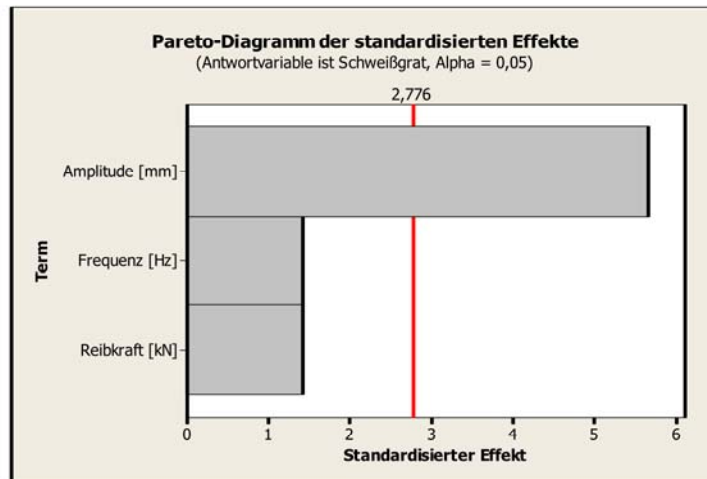


Abbildung 8-8: Pareto Diagramm - Hauptversuch - niedrige Einstellung - Schweißgrat

Da nur der Haupteffekt der Amplitude und keine Wechselwirkung signifikant ist, kann das Haupteffektdiagramm zur Beurteilung herangezogen werden. (Abbildung 8-9) Es macht deutlich, dass die Qualität des Schweißgrats hauptsächlich von der Amplitude abhängt. Bei einem Amplitudenwert von 1,5 mm wird ein mittlerer Schweißgrat von A (1) erreicht. Erhöht man die Amplitude jedoch auf 2 mm, so ist der erreichte Mittelwert C (3).

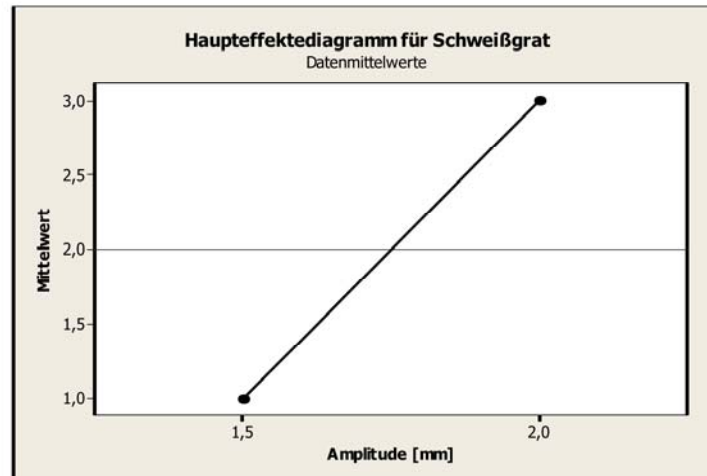


Abbildung 8-9: Haupteffekt - Hauptversuch - niedrige Einstellung - Schweißgrat

Reibkraft und Frequenz sind wegen des hohen Einflusses der Amplitude nicht signifikant, werden aber dennoch im Konturdiagramm gegenübergestellt. Dabei ist zu beachten, dass der Amplitudenwert in Abbildung 8-10 auf 2 mm gehalten wird. Bei dieser Einstellung ist der beste Schweißgrat mit niedriger Reibkraft (16 kN) und einer hohen Frequenz (70 Hz) entstanden.

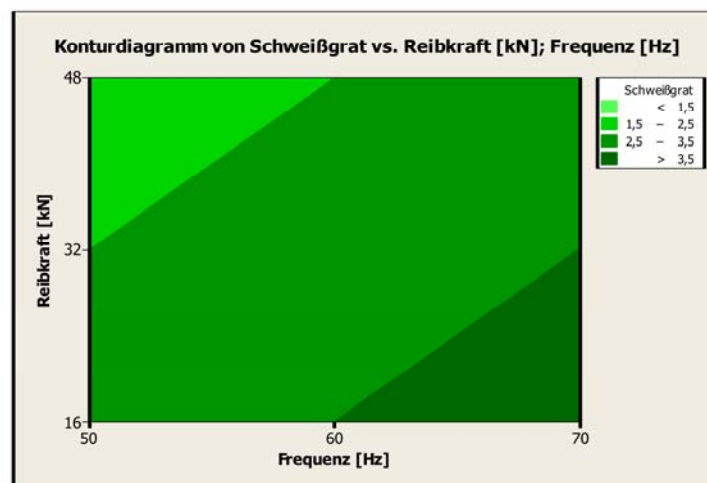


Abbildung 8-10: Konturdiagramm - Hauptversuch - niedrige Einstellung - Schweißgrat

Im Würfeldiagramm ist der maßgebende Einfluss der Amplitude ebenfalls ersichtlich. (Abbildung 8-11)

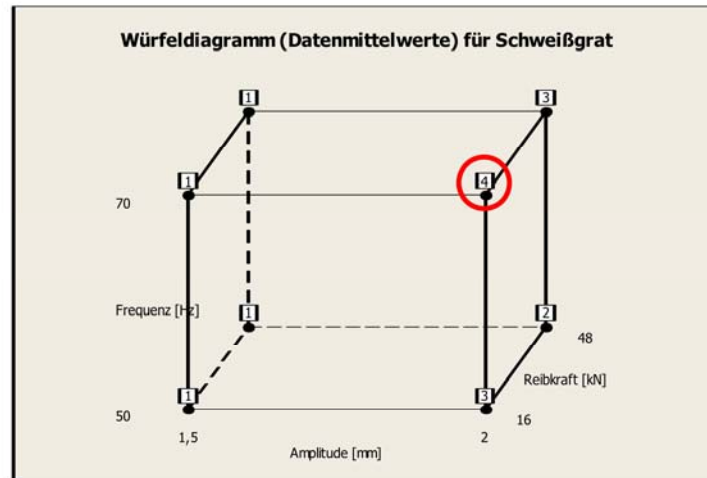


Abbildung 8-11: Würfeldiagramm - Hauptversuch - niedrige Einstellung - Schweißgrat

### 8.1.3 Reibzeit

Für die Signifikanzuntersuchung der Effekte für die Reibzeit wurden zu Beginn alle Faktoren eingebunden. Man erkennt, dass die Reibkraft, sowie deren Wechselwirkung mit der Amplitude oder der Frequenz den geringsten Effekt aufweisen. (Abbildung 8-12) Aus diesem Grund wurden diese Terme entfernt (Abbildung 8-13) und man gelangt zu dem Ergebnis, dass wie beim Schweißgrat die Amplitude den signifikantesten Effekt hervorruft. Der Effekt der Frequenz, sowie deren Wechselwirkung mit der Amplitude, liegen nur knapp unterhalb der Signifikanzgrenze und werden aus diesem Grund betrachtet.

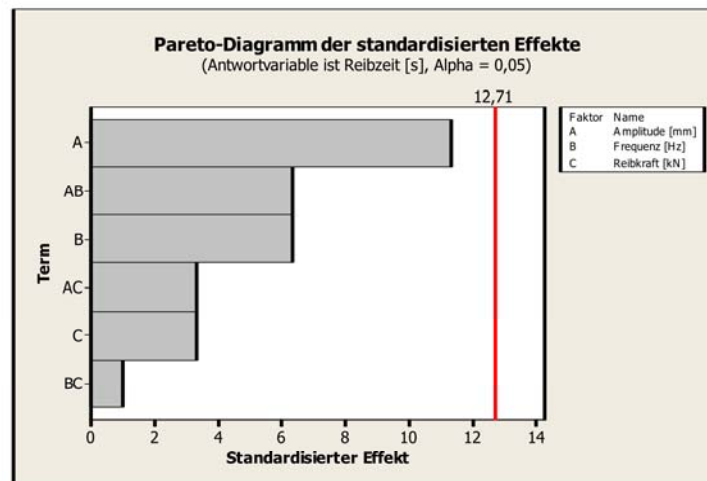
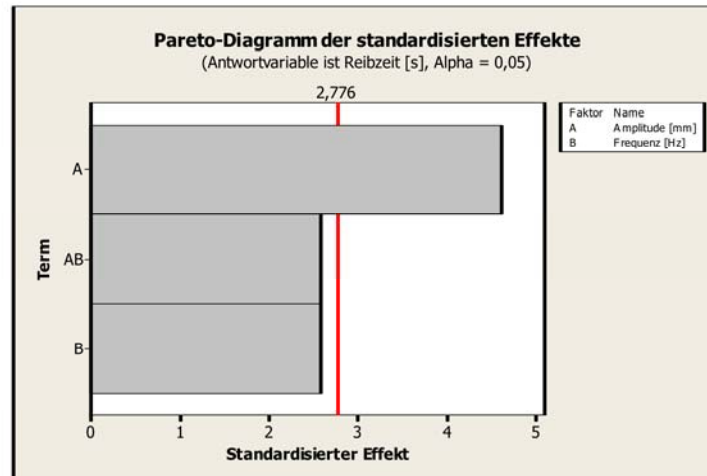
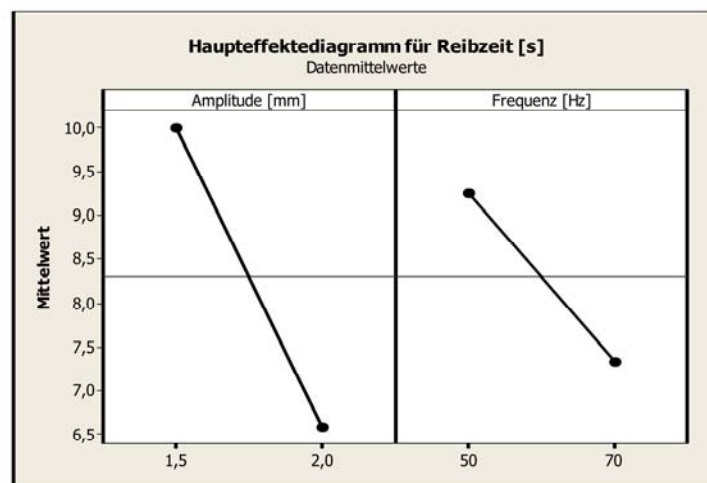


Abbildung 8-12: Pareto Diagramm - Hauptversuch - niedrige Einstellung - Reibzeit



**Abbildung 8-13: Pareto Diagramm - Hauptversuch - niedrige Einstellung - Reibzeit**

Die Darstellung der Haupteffekte (Abbildung 8-14) für die Amplitude und der Frequenz zeigt, dass jeweils bei der hohen Stufe eine kürzere Reibzeit erreicht wird. Da jedoch auch die Wechselwirkung einen erhöhten Effekt hervorruft, sollte anstatt der Haupteffekte deren Wechselwirkung betrachtet werden.



**Abbildung 8-14: Haupteffekt - Hauptversuch - niedrige Einstellung - Reibzeit**

Abbildung 8-15 macht deutlich, dass die Betrachtung der Wechselwirkung von Vorteil ist, da hier verdeutlicht wird, dass bei einer Amplitude von 1,5 mm die Frequenz keine Rolle spielt (es wird keine Verbindung hergestellt) und die Reibzeit bei 10 Sekunden bleibt. Bei 2 mm Amplitude ist jedoch eine starke Verkürzung der Reibzeit mit zunehmender Frequenz eingetreten. Dargestellt werden hier die Mittelwerte der Reibzeit für hohe und niedrige Reibkraft.

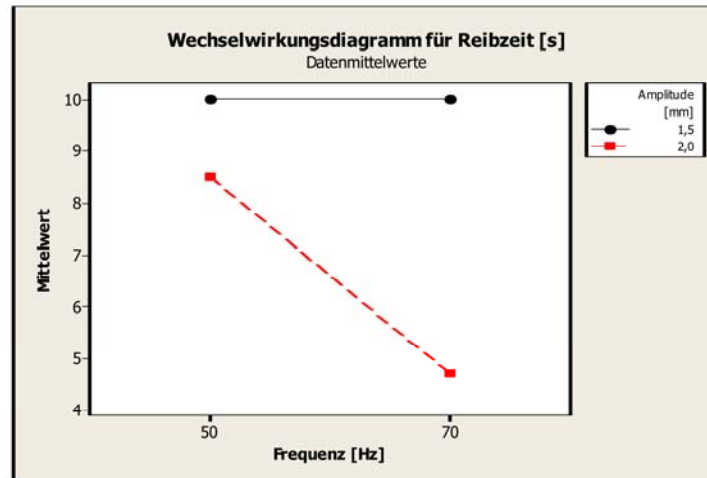


Abbildung 8-15: Wechselwirkung - Hauptversuch - niedrige Einstellung – Reibzeit

In Abbildung 8-16 ist das Würfeldiagramm, mit den Reibzeiten an jedem Versuchspunkt, dargestellt.

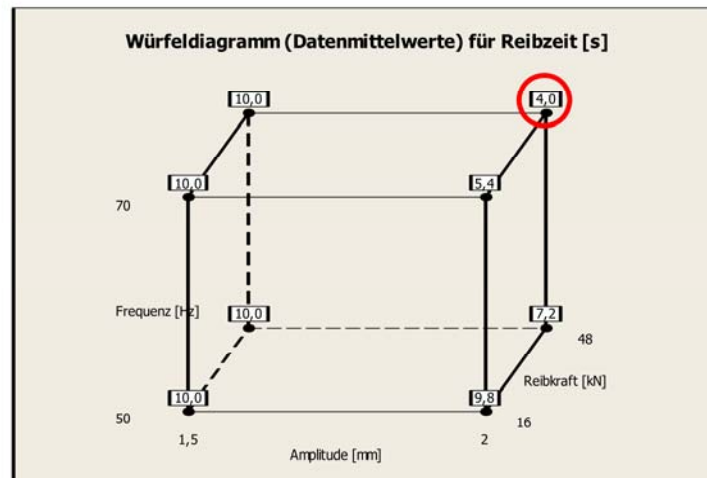


Abbildung 8-16: Würfeldiagramm - Hauptversuch - niedrige Einstellung – Reibzeit

## 8.2 Versuchsreihe mit hohen Einstellungen

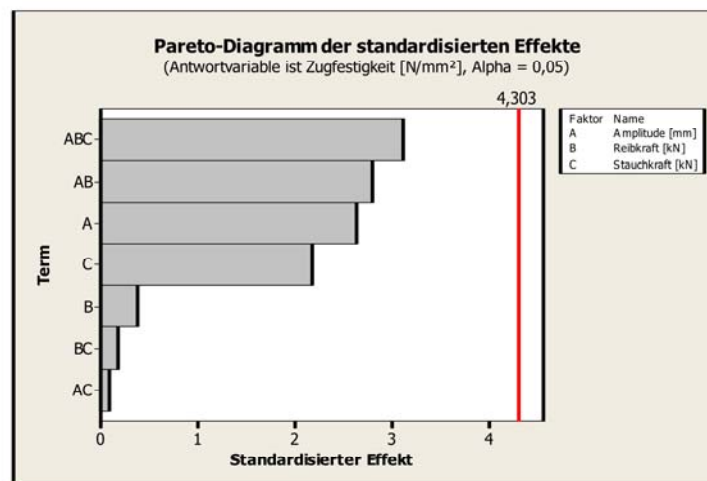
Der zweite Teil des Hauptversuches umfasst die Versuchsreihe mit hohen Einstellungen, speziell für die Amplitude. Die randomisierte Versuchsreihenfolge ist in Tabelle 8-4 dargestellt. Zusätzlich wurden Versuch 2 und 6 zweimal ausgeführt. Bei allen Versuchen wurden nicht angelassene Kettenhalbglieder bei 70 Hz verschweißt. Amplitude, Reibkraft und Stauchkraft wurden jeweils auf zwei Stufen variiert, womit man auf 8 Versuchspunkte kommt.

**Tabelle 8-4: Reihenfolge des Hauptversuchs mit hohen Einstellungen ( $f=70$  Hz)**

Probe	Amplitude [mm]	Reibkraft [kN]	Stauchkraft [kN]
1	2,2	80	80
2	2,5	80	80
3	2,2	80	30
4	2,2	16	80
5	2,2	16	30
6	2,5	80	30
7	2,5	16	30
8	2,5	16	80

### 8.2.1 Zugfestigkeit

In dieser Versuchsreihe wurden für die Zugfestigkeit keine signifikanten Effekte gefunden. Den größten Effekt hat jedoch die Wechselwirkung zwischen Amplitude, Reibkraft und Stauchkraft. (Abbildung 8-17)


**Abbildung 8-17: Pareto Diagramm - Hauptversuch - hohe Einstellung – Zugfestigkeit**

Obwohl kein Effekt signifikant war, wird dennoch der größte Effekt (Wechselwirkung ABC) in Abbildung 8-18 dargestellt. Dabei können wiederum nur die Zweifachwechselwirkungen dargestellt werden. Auffällig ist die starke Abweichung von der Parallelität der Geraden bei der Zweifachwechselwirkung von Amplitude und Reibkraft. Bei einer Reibkraft von 16 kN liegen die Zugfestigkeitswerte von der Einstellung 2,2 und 2,5 mm eng beieinander. Wird jedoch die Reibkraft auf 80 kN erhöht, so steigt die Zugfestigkeit bei 2,5 mm Amplitude und sinkt bei 2,2 mm Amplitude. Bei einer hohen Amplitude wirkt sich also eine Reibkraftherhöhung positiv auf die Zugfestigkeit aus, wobei bei einer geringeren Amplitude diese Erhöhung ein Sinken der Zugfestigkeit zur Folge hat. Ein Grund für diese geringe Zugfestigkeit könnte sein, dass sich die Probe nur noch elastisch verformt und somit keine ausreichende Relativbewegung an der Fügezone vorhanden ist. Eine hohe Stauchkraft ist bei beiden Amplituden bzw. Reibkräften von Vorteil. Das Optimum in diesem



Parameterfenster liegt somit bei den hohen Einstellwerten für die drei Faktoren. Auch im Würfeldiagramm (Abbildung 8-19) kann dies bestätigt werden.

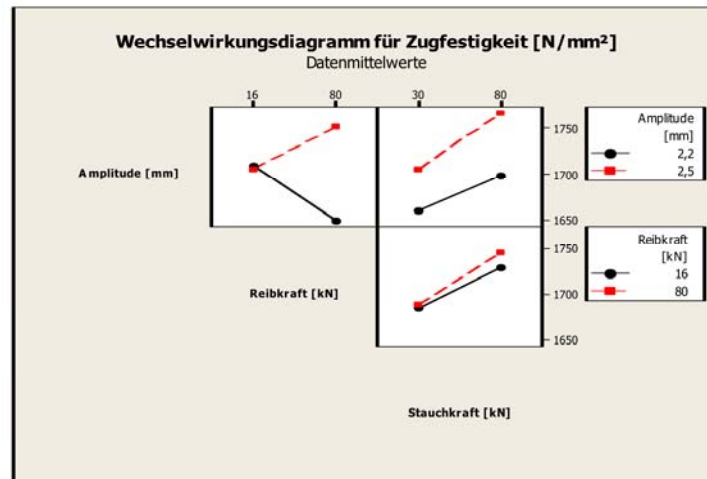


Abbildung 8-18: Wechselwirkung - Hauptversuch - hohe Einstellung - Zugfestigkeit

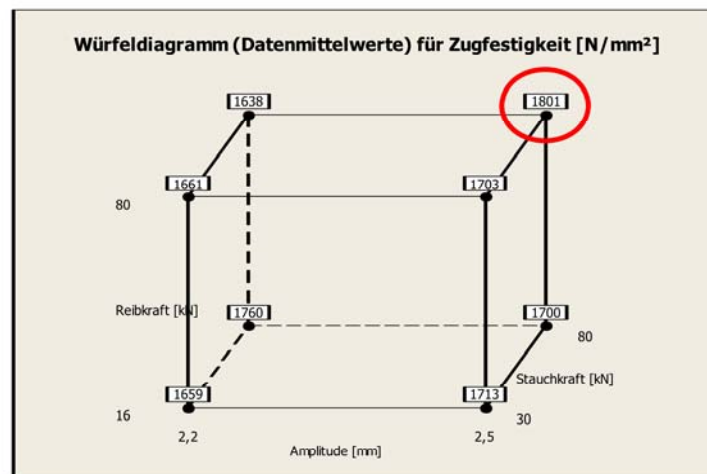
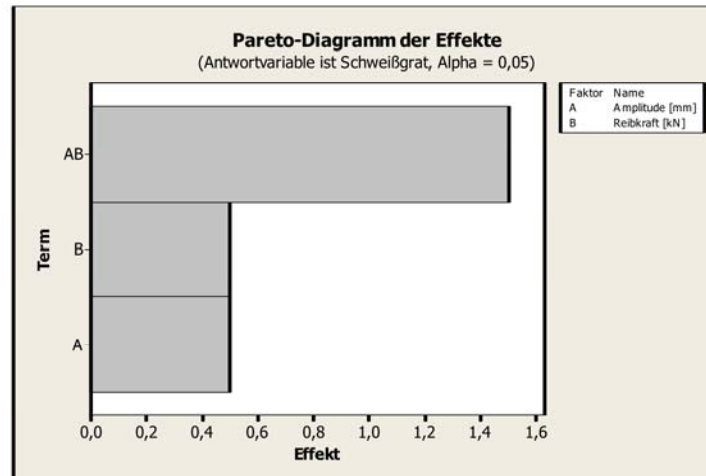


Abbildung 8-19: Würfeldiagramm - Hauptversuch - hohe Einstellung – Zugfestigkeit

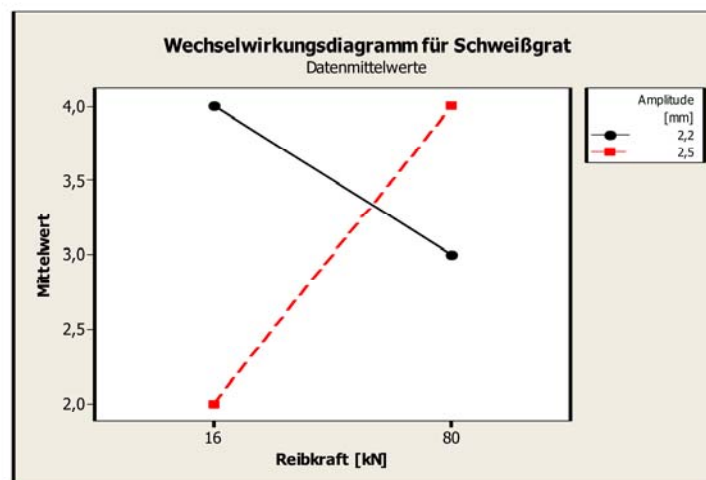
## 8.2.2 Schweißgrat

Bei der Untersuchung des Schweißgrats konnte keine Signifikanzlinie für die Effekte dargestellt werden, da der Standardfehler gleich Null ist. Da der Schweißgrat bei Veränderung der Stauchkraft konstant bleibt, besteht somit keine Differenz und somit keine Standardabweichung. Deshalb kann auch kein Vertrauensbereich (bzw. Signifikanzlinie) berechnet werden, welche die Beurteilung der Signifikanz der Effekte ermöglicht. In Abbildung 8-20 wird nicht der standardisierte Effekt, sondern der absolute Wert des nicht standardisierten Effekts angezeigt. Dennoch ist erkennbar, dass die Wechselwirkung zwischen Amplitude und Reibkraft den größten Effekt besitzt.



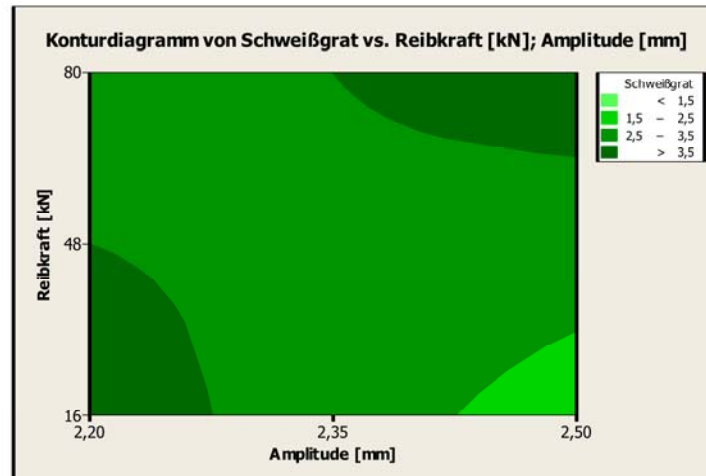
**Abbildung 8-20: Pareto Diagramm - Hauptversuch - hohe Einstellung – Schweißgrat**

Bei der Betrachtung des Wechselwirkungsdiagramms in Abbildung 8-21 fällt die große Abweichung der Parallelität der beiden Geraden auf. Sowohl bei geringer Reibkraft und kleiner Amplitude als auch bei hoher Reibkraft und großer Amplitude wird ein guter Schweißgrat erzeugt.



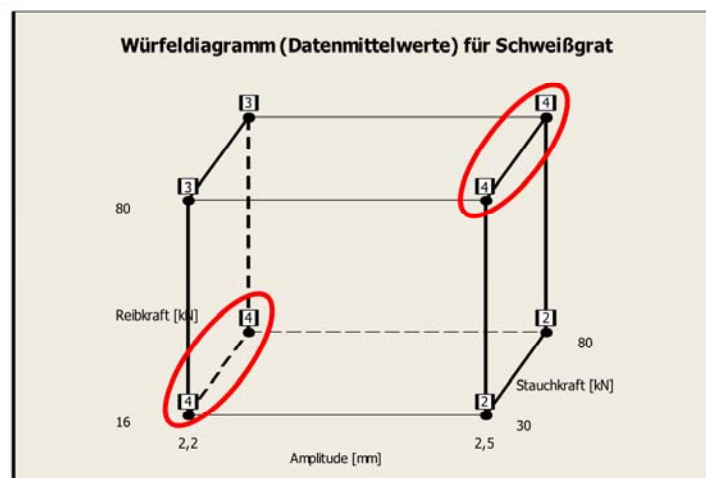
**Abbildung 8-21: Wechselwirkung - Hauptversuch - hohe Einstellung - Schweißgrat**

Im Konturdiagramm (Abbildung 8-22) ist dieser Zusammenhang noch einmal dargestellt. Das Verhältnis zwischen Reibkraft und Amplitude scheint hier für einen guten Schweißgrat wichtig zu sein. Ist dieses Verhältnis zu groß oder zu klein, so verschlechtert sich der Schweißgrat.



**Abbildung 8-22: Konturdiagramm - Hauptversuch - hohe Einstellung – Schweißgrat**

Im Würfeldiagramm (Abbildung 8-23) werden nochmal alle 8 Versuchsergebnisse dargestellt. Es ist hier zu erkennen, dass sich der Schweißgrat, wie oben erwähnt, mit der Stauchkraft nicht ändert. Die besten Ergebnisse wurden markiert.



**Abbildung 8-23: Würfeldiagramm - Hauptversuch - hohe Einstellung - Schweißgrat**

### 8.2.3 Reibzeit

Die Reibkraft ist hier signifikant und hat somit den größten Einfluss auf die Reibzeit. Aber auch die Amplitude und die Zweifachwechselwirkung zwischen Amplitude und Reibkraft zeigen eine hohe Signifikanz. Die Stauchkraft, welche keinen Einfluss auf die Reibzeit ausübt, hat somit auch keine Signifikanz. (Abbildung 8-24) In Abbildung 8-25 wurde die Stauchkraft und deren Wechselwirkungen aus dem System entfernt, da sie weder als Haupteffekt noch als Wechselwirkung signifikant war.

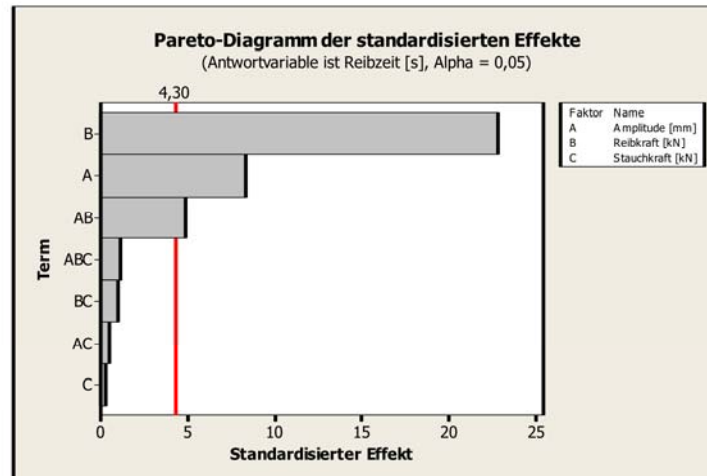


Abbildung 8-24: Pareto Diagramm - Hauptversuch - hohe Einstellung - Reibzeit

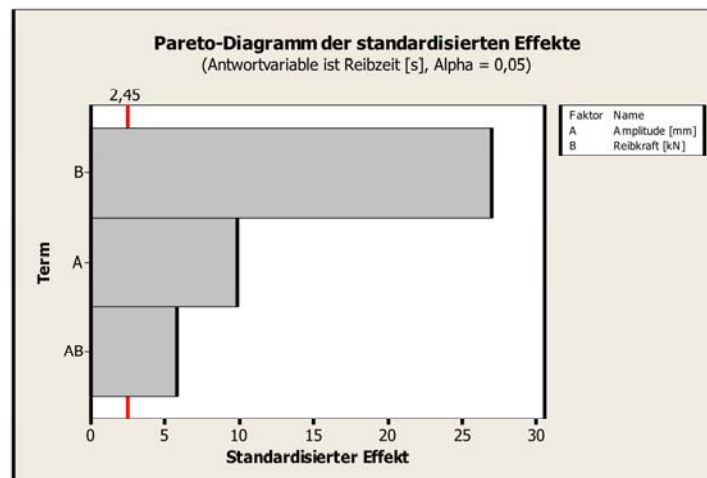


Abbildung 8-25: Pareto Diagramm - Hauptversuch - hohe Einstellung - Reibzeit

Verändert man die Reibkraft von der niedrigen auf die hohe Stufe, so ist der Mittelwert der Reibzeit wesentlich geringer. (Abbildung 8-26) Wird dabei noch die Amplitude von der niedrigen auf die hohe Stufe gesetzt, so ist die Reibzeitverminderung noch deutlicher.

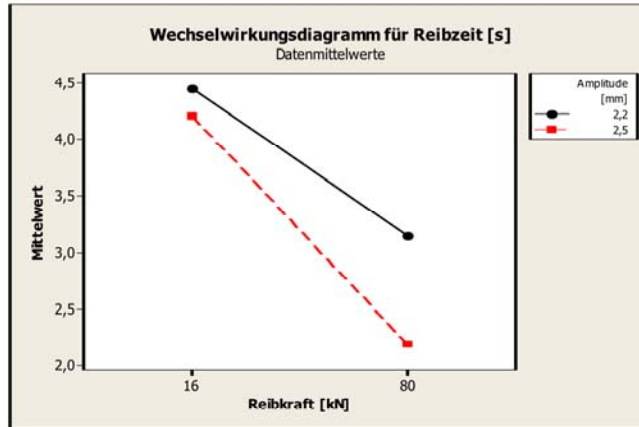


Abbildung 8-26: Wechselwirkung - Hauptversuch - hohe Einstellung - Reibzeit

Im Wirkungsflächendiagramm (Abbildung 8-27) ist der Verlauf dreidimensional dargestellt. Die kürzeste Reibzeit ist dabei markiert und befindet sich bei hoher Reibkraft und hoher Amplitude. Dies kann auch im Würfeldiagramm (Abbildung 8-28) beobachtet werden.

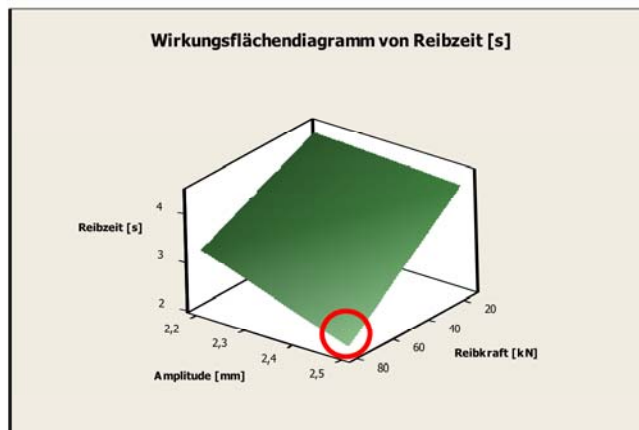


Abbildung 8-27: Wirkungsflächendiagramm - Hauptversuch - hohe Einstellung – Reibzeit

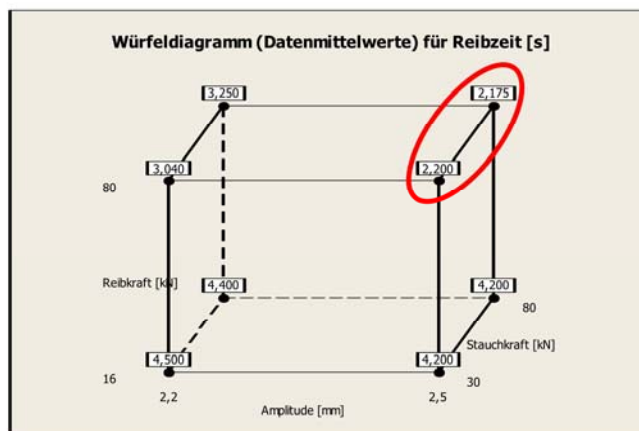


Abbildung 8-28: Würfeldiagramm - Hauptversuch - hohe Einstellung - Reibzeit

## 9 Versuche zum Power Input

Neben dem faktoriellen Versuchsplan werden Versuche zu einem konstanten Power Input durchgeführt. Aus den Vorversuchen ist ersichtlich, dass bei zwei Power Input Bereichen die Schweißung nur bedingt erfolgreich war. Dementsprechend wurden auch geringere Festigkeitswerte in den Zugversuchen gemessen. Im Hauptversuch soll nun diese Einstellung wiederholt werden und zusätzliche Versuche mit veränderten Parametern (Reibkraft, Frequenz, Amplitude) durchgeführt und ausgewertet werden. Diese Parameter werden jedoch so gewählt, dass der Power Input konstant bleibt, dabei wurden drei unterschiedliche Power Inputs untersucht.

Die Versuche zum Power Input wurden gemeinsam mit dem Hauptversuch durchgeführt. Daher wurden die drei Power Input Werte anhand des Vorversuches bestimmt. Die Schweißparameter des Vorversuches sind in den Tabellen Tabelle 9-1, Tabelle 9-2 und Tabelle 9-3 grau hinterlegt. Tabelle 9-1 zeigt die Parameterkonfigurationen für einen Power Input von  $40 \text{ W/mm}^2$ . Dieser Wert wurde ausgewählt, da die Qualitätskriterien, wie die Zugfestigkeit und der Schweißgrat, stark von den anderen Versuchen abweichen. Liegt der Power Input über oder unter diesem Wert, so ist eine höhere Qualität der Schweißverbindung erzielt worden. (Abbildung 9-1) Das gleiche Phänomen wurde bei einem Power Input von  $56 \text{ W/mm}^2$  festgestellt, (Tabelle 9-2) dabei war das Ergebnis erheblich schlechter.

Der dritte untersuchte Power Input wurde anhand anderer Kriterien gewählt. Hier wurde der Power Input von  $70 \text{ W/mm}^2$  verwendet, da bei diesem die besten Ergebnisse im Vorversuch erzielt wurden. Die Parameterkombinationen sind in Tabelle 9-3 zu finden. In diesen drei Tabellen wurden jeweils die Einstellungen vom Vorversuch grau hinterlegt. Die weiteren Kombinationen wurden so festgelegt, dass der Power Input konstant bleibt und sich die Parameter (Amplitude, Reibkraft, Frequenz) verändern.

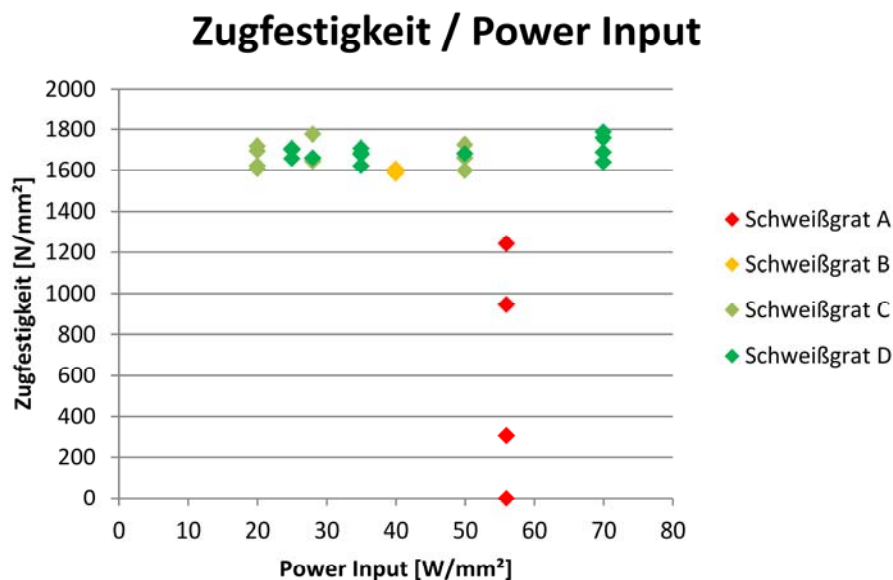


Abbildung 9-1: Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Power Input aus den Vorversuchen



**Tabelle 9-1: Versuche bei Power Input  $\approx 40 \text{ W/mm}^2$  (1. Zeile aus Vorversuch)**

a [mm]	f [Hz]	$F_R$ [kN]	St [kN]	Wärmebehandlung	PI [ $\text{W/mm}^2$ ]
2	50	64	88	Nicht angel.	40
2,5	40	64	88	Nicht angel.	40
1,5	67	64	88	Nicht angel.	40
2,5	50	51	88	Nicht angel.	40
1,5	50	85	88	Nicht angel.	40
2	40	80	88	Nicht angel.	40
2	70	48	88	Nicht angel.	42

**Tabelle 9-2: Versuche bei Power Input  $\approx 56 \text{ W/mm}^2$  (1. Zeile aus Vorversuch)**

a [mm]	f [Hz]	$F_R$ [kN]	St [kN]	Wärmebehandlung	PI [ $\text{W/mm}^2$ ]
2	70	64	88	Nicht angel.	56
2,5	56	64	88	Nicht angel.	56
1,5	93	64	88	Nicht angel.	56
2,5	70	51	88	Nicht angel.	56
2	56	80	88	Nicht angel.	56
2	93	48	88	Nicht angel.	56
2,2	50	80	88	Nicht angel.	55

**Tabelle 9-3: Versuche bei Power Input  $\approx 70 \text{ W/mm}^2$  (1. Zeile aus Vorversuch)**

a [mm]	f [Hz]	$F_R$ [kN]	St [kN]	Wärmebehandlung	PI [ $\text{W/mm}^2$ ]
2,5	70	64	88	Nicht angel.	70
2	88	64	88	Nicht angel.	70
2	66	85	88	Nicht angel.	70
2,5	56	80	88	Nicht angel.	70

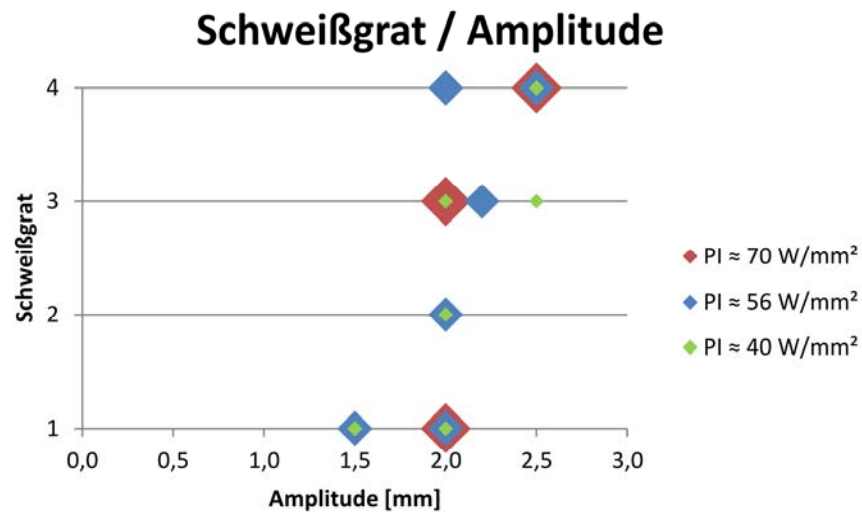
## 9.1 Schweißgrat in Abhängigkeit des Power Inputs

Bei der Untersuchung des Schweißgrats in Abhängigkeit des Power Inputs wurde festgestellt, dass der Power Input kein ausschlaggebendes Kriterium für den Erfolg einer Schweißung ist. Vielmehr ist die Amplitude der dominierende Faktor für die sich bildende Schweißgratqualität. Dies erscheint schlüssig, da der Effekt der Amplitude stets signifikant war. In Tabelle 9-4 sind vier Proben mit deren Parametern dargestellt, welche mit einem Power Input von  $56 \text{ W/mm}^2$  geschweißt wurden. Es ist deutlich erkennbar, dass mit zunehmender Amplitude die Schweißgratqualität steigt.

**Tabelle 9-4: Schweißgratqualität bei  $PI \approx 56 \text{ W/mm}^2$** 

a [mm]	1,5	2	2,2	2,5
$F_R$ [kN]	64	80	80	51
f [Hz]	93	56	50	70
Schweißgrat	A	B	C	D

In Abbildung 9-2 ist der Schweißgrat der Amplitude gegenübergestellt, dabei wird zwischen den drei gewählten Power Input Bereichen unterschieden. Die starke Abhängigkeit des Schweißgrates von der Amplitude ist deutlich zu erkennen. So sind die Versuche mit einer Amplitude von unter 2 mm nicht geglückt, wohingegen bei einer Amplitude von über 2 mm stets gute und sehr gute Ergebnisse mit Schweißgrat C und D erzielt wurden. Der unterschiedliche Power Input spielt dabei keine Rolle.


**Abbildung 9-2: Schweißgrat / Amplitude - Power Input**

Überprüft wurde auch die Erkenntnis von Vairis. Demnach soll es einen Power Input Wert geben, unter welchem keine erfolgreichen Schweißungen möglich sind. (Abbildung 9-3) Dieser minimale Power Input soll mit steigender Frequenz bei konstanter Amplitude steigen. [10] In Abbildung 9-4

sind der Power Input und die Frequenz bei einer Amplitude von 2 mm gegenübergestellt. Dabei sind die Datenpunkte nach dem Schweißgrat farblich unterteilt. Steigt die Frequenz, bei konstantem Power Input und konstanter Amplitude, so muss folglich die Reibkraft sinken, wobei die Schweißgratqualität steigt. Die Erkenntnisse aus den Diagrammen aus Abbildung 9-3 und Abbildung 9-4 scheinen sich nicht zu decken. Es muss jedoch beachtet werden, dass sich der Power Input sowohl im Wertebereich, als auch in der Berechnung unterscheidet.

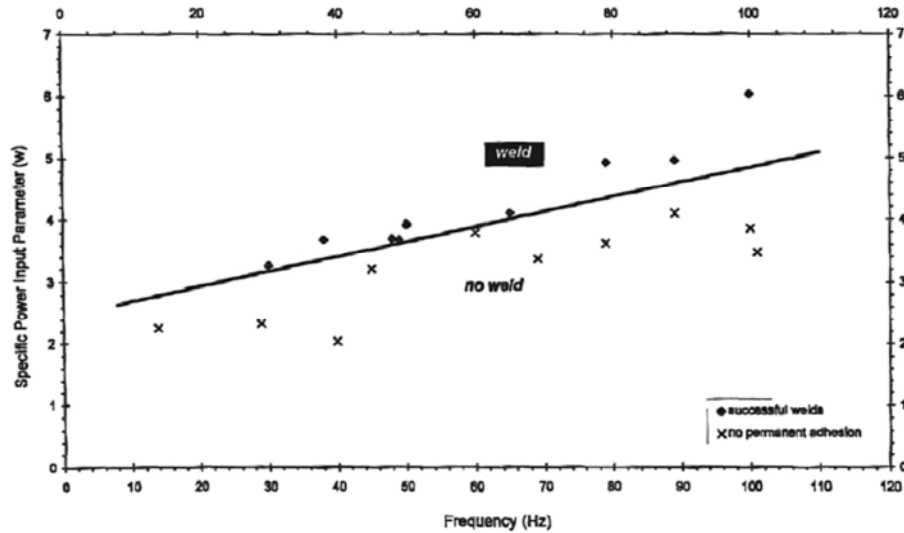


Abbildung 9-3: Power Input / Frequenz bei 0,92 mm Amplitude [10]

### Power Input / Frequenz bei 2 mm Amplitude

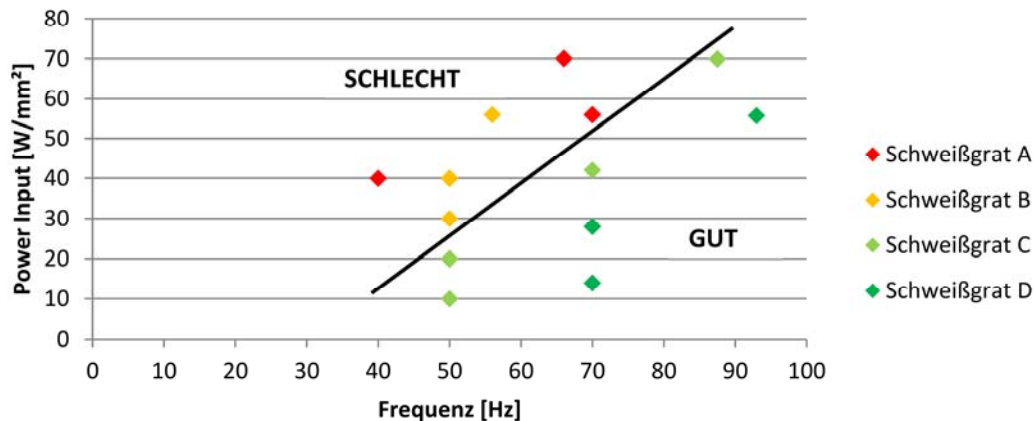


Abbildung 9-4: Power Input / Frequenz bei 2 mm Amplitude

In Abbildung 9-5 ist der Power Input durch die Reibkraft ersetzt worden. Da diese in einem direkten Verhältnis stehen, liegen die Datenpunkte an den gleichen Positionen. Man erkennt, dass eine Erhöhung der Frequenz oder Senken der Reibkraft zu besseren Schweißgraten führt.

## Reibkraft / Frequenz bei 2 mm Amplitude

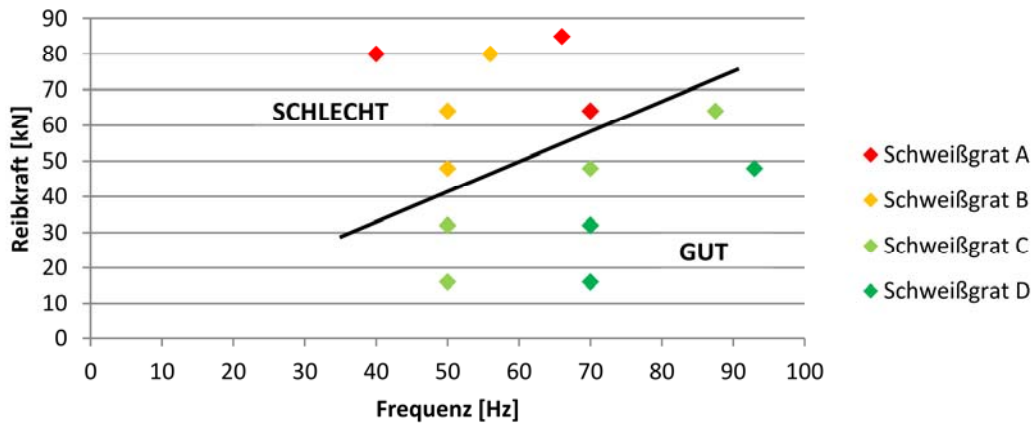


Abbildung 9-5: Reibkraft / Frequenz bei 2 mm Amplitude

Die Amplitude von 2 mm wurde gewählt, da sich hier die größten Änderungen ergaben. Vergleicht man dazu die Darstellung bei 2,5 mm (Abbildung 9-6) so sieht man, dass bei einer zu geringen Frequenz oder Reibkraft die Schweißgratqualität sinkt. Der hohe Einfluss der Amplitude und die starken Wechselwirkungen der Parameter führen zu diesem Ergebnis.

## Reibkraft / Frequenz bei 2,5 mm Amplitude

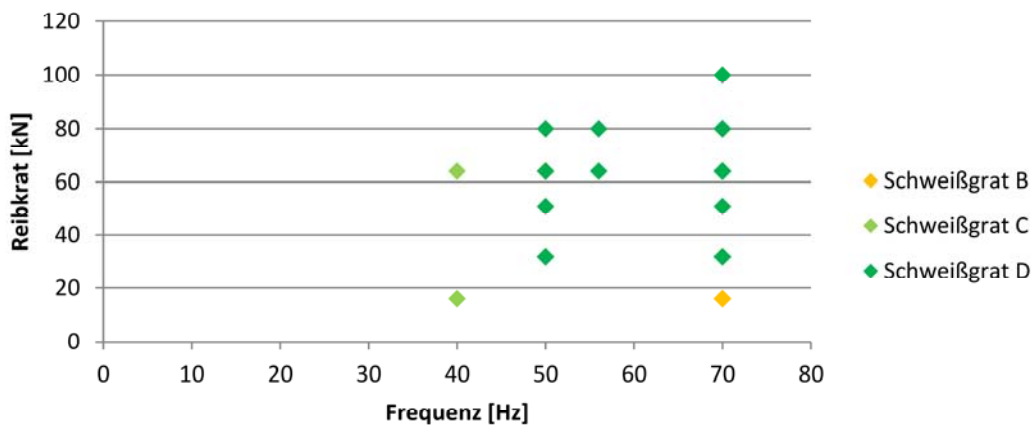


Abbildung 9-6: Reibkraft / Frequenz bei 2,5 mm Amplitude

Ein weiterer Zugang zur Festlegung eines geeigneten Arbeitsbereichs lässt sich durch die Betrachtung der spezifischen Wärmeeinbringung erreichen. Multipliziert man den spezifischen Power Input mit der benötigten Reibzeit, so gelangt man zur spezifischen Wärmeeinbringung. Abbildung 9-7 zeigt diese Wärmeeinbringung für jede Probe in Abhängigkeit der Frequenz.

### Spezifische Wärmeeinbringung / Frequenz

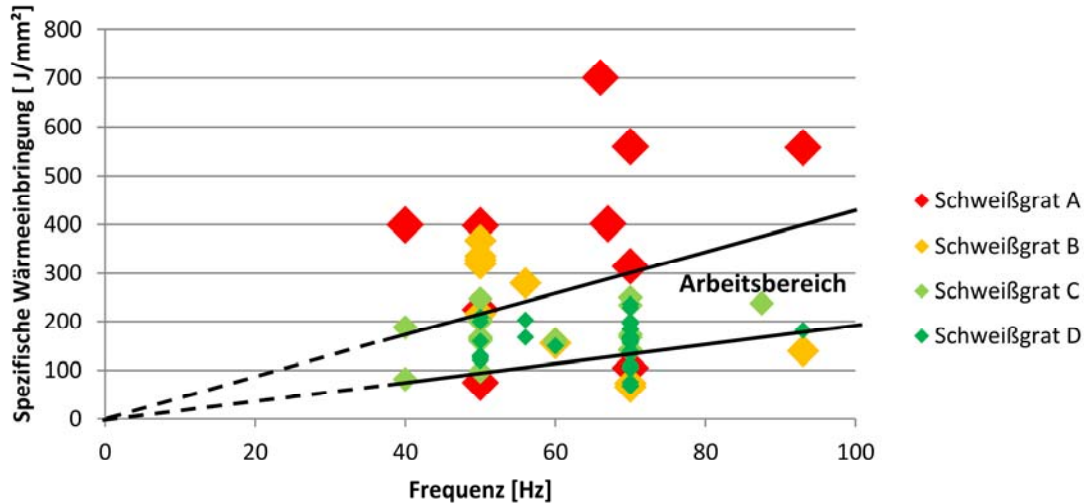


Abbildung 9-7: Spezifische Wärmeeinbringung / Frequenz

Entfernt man die Proben, welche mit einer Amplitude unter 2 mm geschweißt wurden, so sieht man, dass sich der Arbeitsbereich besser darstellen lässt. (Abbildung 9-8) Hier treten Schweißgrat C und D auf. Eine Ausnahme bildet der Versuch, welcher mit einer Amplitude von 2,5 mm und einer geringen Reibkraft von 16 kN geschweißt wurde.

### Spezifische Wärmeeinbringung / Frequenz

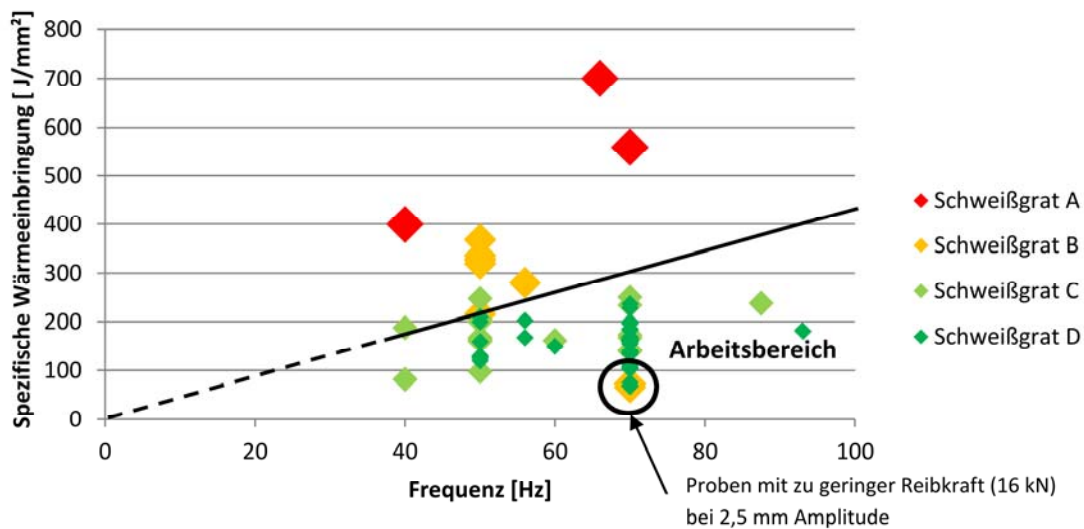


Abbildung 9-8: Spezifische Wärmeeinbringung / Frequenz ab 2 mm Amplitude

In Abbildung 9-9 ist die Wärmeeinbringung der Reibkraft gegenübergestellt. Der Arbeitsbereich enthält auch hier wieder die Proben, welche Schweißgrat C und D besitzen.

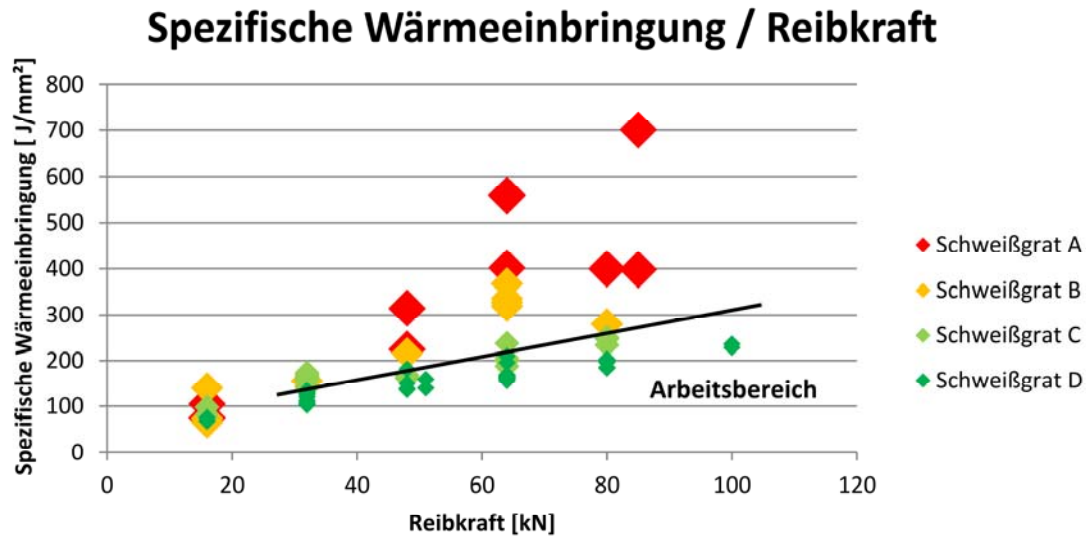


Abbildung 9-9: Spezifische Wärmeeinbringung / Reibkraft

## 9.2 Zugfestigkeit in Abhängigkeit des Power Inputs

In Abbildung 9-10 ist der Zusammenhang der Zugfestigkeit zum Power Input dargestellt. Man sieht, dass kein genereller Zusammenhang feststellbar ist. Sowohl bei einem hohen als auch bei einem geringen Power Input sind Zugfestigkeiten in jedem Bereich vertreten. Dieser weite Streubereich lässt sich wieder durch den starken Einfluss der Amplitude erklären. Bei Amplituden über 2 mm sind ausschließlich hohe Zugfestigkeitswerte erzielt worden.



## Zugfestigkeit / Power Input

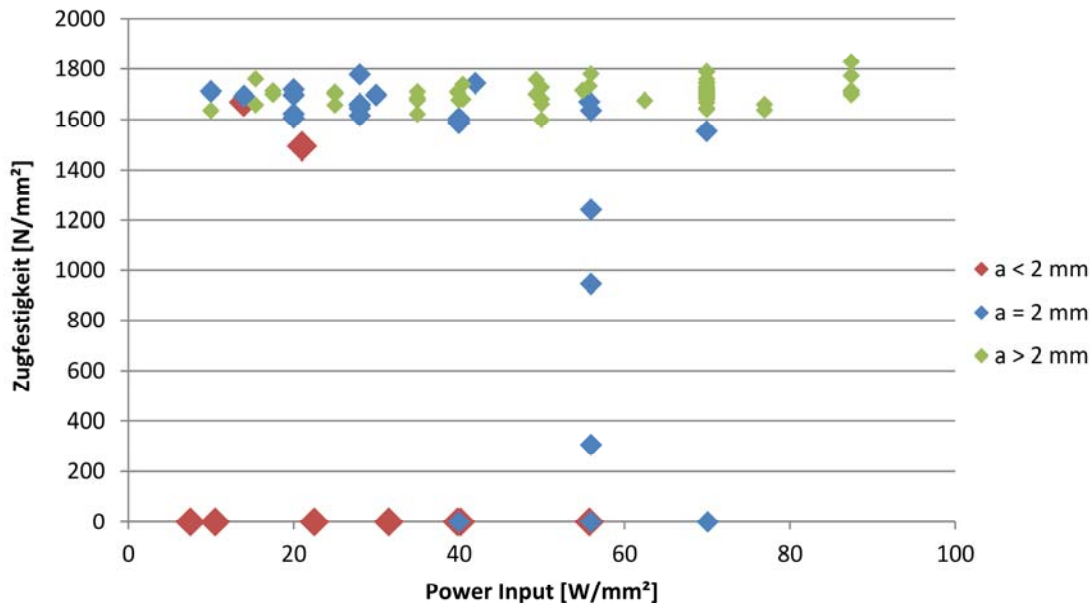


Abbildung 9-10: Zugfestigkeit / Power Input

In Tabelle 9-5 sind die Daten der Proben aufgelistet, welche eine Zugfestigkeit unter  $1600 \text{ N/mm}^2$  aufweisen. Es ist feststellbar, dass eine Amplitude unter  $2 \text{ mm}$  eine geringe Zugfestigkeit liefert. Bei den Proben mit einer Amplitude von  $2 \text{ mm}$  war die geringe Zugfestigkeit durch eine zu hohe Reibkraft verursacht worden. Man erkennt daher, dass die Reibkraft nur in Kombination mit der Amplitude erhöht werden darf.

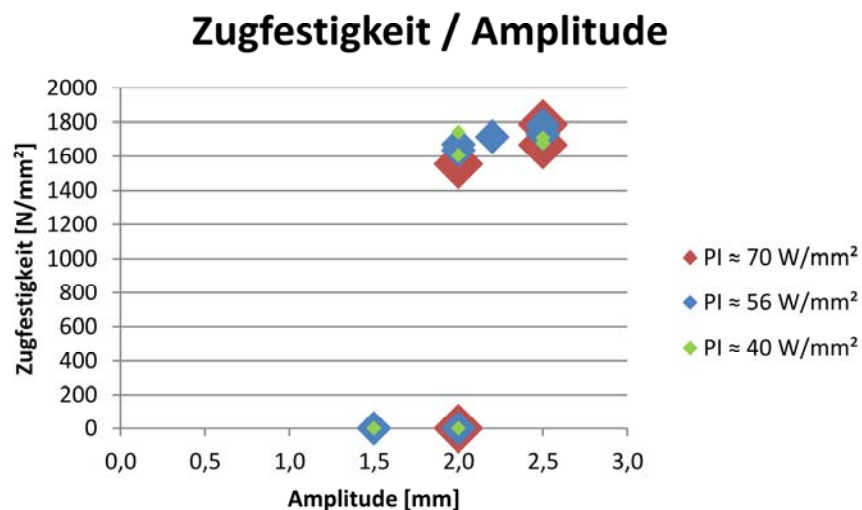
Betrachtet man den Schweißgrat dieser Proben, dann ist die geringe Zugfestigkeit ebenfalls zu erwarten. Ein Schweißgrat der Güte 4 wurde niemals erreicht, auch die Schweißzeiten liegen weit vom Optimum entfernt.

***Zusammenfassend kann gesagt werden, dass ein hoher Power Input nicht automatisch auf eine erfolgreiche Schweißung schließen lässt. Vielmehr muss die Wechselwirkung der Amplitude und der Reibkraft betrachtet werden. Bei geringer Amplitude beispielsweise, muss die Reibkraft gering gehalten werden. Erhöht man die Amplitude, kann auch die Reibkraft erhöht werden.***

**Tabelle 9-5: Proben mit einer Zugfestigkeit < 1600 N/mm<sup>2</sup>**

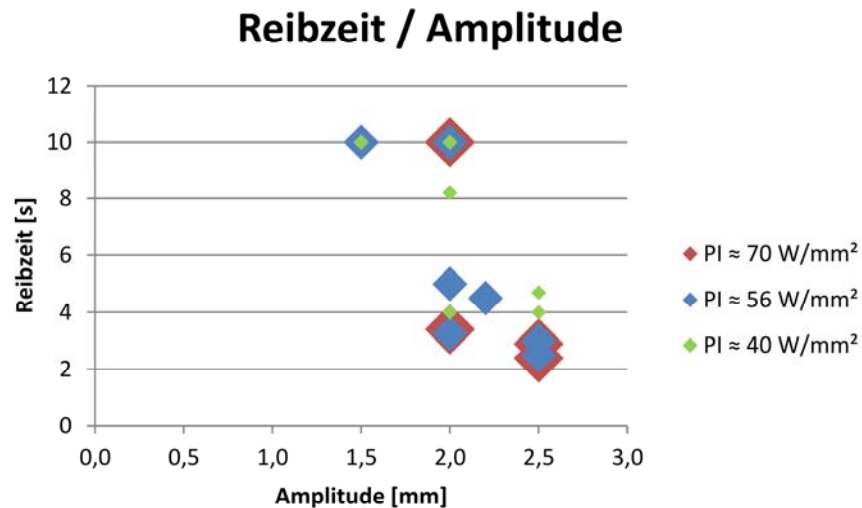
Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Schweißgrat	Reibzeit [s]	a [mm]	f [Hz]	F <sub>R</sub> [kN]	Stauchkraft [kN]	Power Input [W/mm <sup>2</sup> ]	Wärmebehandlung
0	1	10,0	1,5	70	48	88	31,5	Nicht ang.
1493	2	7,4	1,8	60	32	88	21,0	Nicht ang.
0	1	10,0	1,5	50	48	88	22,5	Nicht ang.
1495	3	7,4	1,8	60	32	88	21,0	Nicht ang.
0	1	10,0	1,5	70	16	88	10,5	Nicht ang.
0	1	10,0	1,5	50	16	88	7,5	Nicht ang.
0	1	10,0	1,5	67	64	88	40,2	Nicht ang.
0	1	10,0	1,5	50	85	88	39,8	Nicht ang.
0	1	10,0	2,0	40	80	88	40,0	Nicht ang.
0	1	10,0	1,5	93	64	88	55,8	Nicht ang.
1553	3	3,4	2,0	88	64	88	69,9	Nicht ang.
0	1	10,0	2,0	66	85	88	70,1	Nicht ang.
1595	2	8,4	2,0	50	64	88	40,0	Angel.
307	1	10,0	2,0	70	64	0	56,0	Nicht ang.
1589	2	8,0	2,0	50	64	0	40,0	Nicht ang.
946	1	10,0	2,0	70	64	0	56,0	Angel.
1599	3	4,1	2,5	50	64	0	50,0	Angel.
1585	2	9,2	2,0	50	64	0	40,0	Angel.
1242	1	10,0	2,0	70	64	88	56,0	Angel.

Auch für die Zugfestigkeit lässt sich beobachten, dass die höhere Amplitude Vorteile bei konstantem Power Input bringt. Auch hier kann kein wesentlicher Einfluss des Power Inputs beobachtet werden. Abbildung 9-11 stellt die Werte der Tabelle 9-1 bis Tabelle 9-3 dar.


**Abbildung 9-11: Zugfestigkeit / Amplitude - Power Input**

### 9.3 Reibzeit in Abhängigkeit des Power Inputs

Stellt man die Reibzeit der Amplitude gegenüber, so sieht man eine Verkürzung der Reibzeit bei steigender Amplitude. Weiters ist zu beobachten, dass bei hoher Amplitude und zunehmendem Power Input die Reibzeit weiter sinkt. (Abbildung 9-12)



**Abbildung 9-12: Reibzeit / Amplitude - Power Input**

Bei einer Amplitude von 2 mm streuen die Ergebnisse in einem weiten Bereich. Eine Erklärung lässt sich in Abbildung 9-13 finden. Hier wurde für die horizontale Achse das Verhältnis von Reibkraft zu Amplitude gewählt. Mit steigendem Verhältnis steigt auch die Reibzeit. Das bedeutet, dass eine hohe Reibkraft und eine niedrige Amplitude zu höheren Reibzeiten führen. Wohingegen die Reibzeit mit einer niedrigen Reibkraft bei hoher Amplitude gesenkt werden kann.

Stark abweichend ist der Versuch mit einem Power Input von 56 W/mm<sup>2</sup> bei einem Verhältnis von 32 kN/mm. Dieser hat die Parameter: Amplitude = 2 mm, Reibkraft = 64 kN und Frequenz = 70 Hz. Er erreichte eine Reibzeit von 10 Sekunden, wobei eine Reibzeit von etwa 4 s erwartet worden wäre. Da ein Messfehler vermutet wurde, wurde dieser Versuch wiederholt. Die Wiederholung ergab das gleiche Ergebnis, worauf ein Messfehler ausgeschlossen werden konnte.

Mit zunehmendem Power Input lässt sich bei gleichem Verhältnis von Reibkraft zu Amplitude die Reibzeit verkürzen. Dies bedeutet also, dass eine höhere Frequenz oder eine gleichmäßige Erhöhung der Reibkraft und der Amplitude zu einer kürzeren Reibzeit führt.

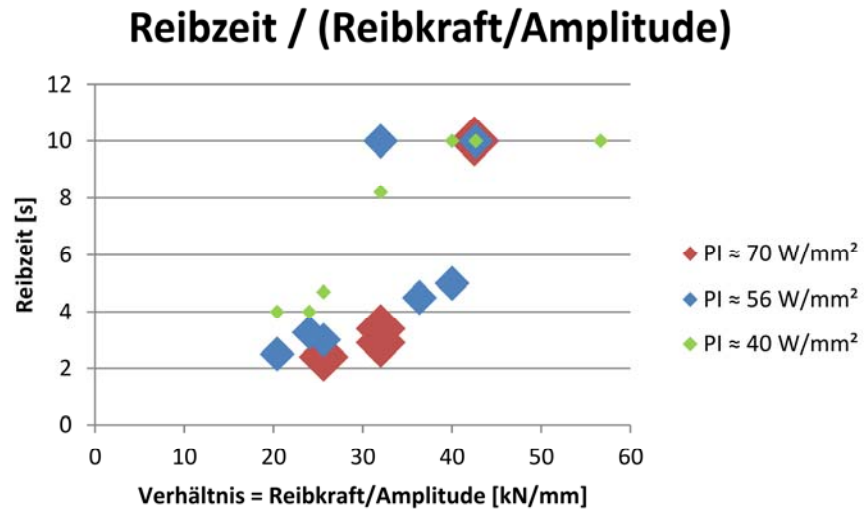
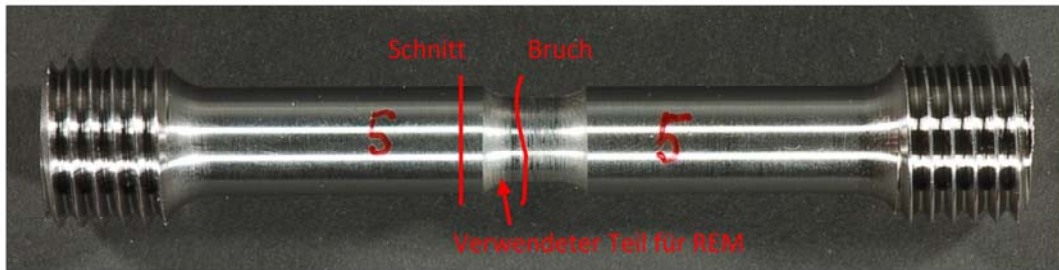


Abbildung 9-13: Reibzeit / Reibkraft/Amplitude – Power Input

## 10 Bruchflächenanalyse

Die durch den Zugversuch gebrochenen Proben wurden anschließend zur Untersuchung auf dem Rasterelektronenmikroskop (REM) vorbereitet. Dabei wurde eine Hälfte der gebrochenen Zugprobe auf eine Länge von 10 mm gekürzt, um sie in den Probenhalter des REMs zu montieren. (Abbildung 10-1) Diese Kürzung hat den Vorteil eine bessere Auflösung im REM zu erzielen.



**Abbildung 10-1: Bruchprobe für REM Untersuchung**

Untersucht wurden ausgewählte Proben des Vorversuchs und des Hauptversuchs. In Tabelle 10-2 sind die untersuchten Proben mit den Schweißparametern aufgelistet. Das Auswahlkriterium für die REM Untersuchung kann aus Tabelle 10-1 entnommen werden.

**Tabelle 10-1: REM Proben: Auswahlkriterien**

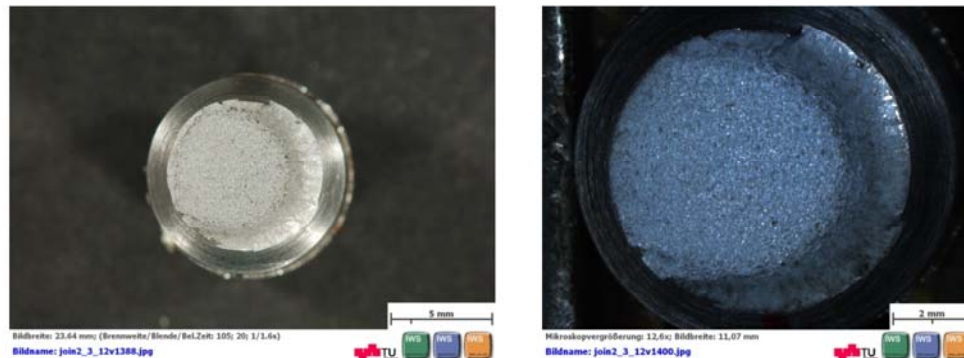
Versuchsreihe	Probe	Auswahlkriterium
Hauptversuch	13.1	Zugfestigkeit = 1829 N/mm <sup>2</sup> → beste erreichte Zugfestigkeit Reibzeit = 2,1 s → geringste Reibzeit Power Input = 87,4 W/mm <sup>2</sup> → höchster PI von Hauptversuch
Vorversuch	14	Zugfestigkeit=1788 N/mm <sup>2</sup> → zweithöchste Zugfestigkeit Einstellung für Bestätigungsversuche
Vorversuch	30	Zugfestigkeit = 1778 N/mm <sup>2</sup> → hohe Zugfestigkeit Bruch in der Wärmeeinflusszone
Hauptversuch	5	Zugfestigkeit = 1495 N/mm <sup>2</sup> → geringste Zugfestigkeit bei Grat C Bruch in der Schweißnaht
Vorversuch	11	Beste vor dem Schweißen angelassene Probe
Vorversuch	21	Schlechteste vor dem Schweißen angelassene Probe mit Grat C
Hauptversuch	18	Zugfestigkeit = 1699 N/mm <sup>2</sup> → gering gegenüber Probe HV 13.1 Reibzeit = 2,1 s → geringste Reibzeit Power Input = 87,4 W/mm <sup>2</sup> → höchster PI von Hauptversuch
Hauptversuch	9	Power Input = 10 W/mm <sup>2</sup> → geringer Power Input Reibzeit = 9,8 s → sehr hohe Reibzeit
Hauptversuch	26.1	Frequenz = 93 Hz → Höchste Frequenz Reibkraft = 16 kN → geringste Reibkraft Amplitude = 1,5 mm → geringste Amplitude
Vorversuch – 550°	14	Wärmebehandlung: nach dem Schweißen gehärtet und mit 550°C angelassen
Vorversuch – 200°	26	Wärmebehandlung: nach dem Schweißen gehärtet und mit 200°C angelassen



**Tabelle 10-2: REM Proben: Schweißparameter**

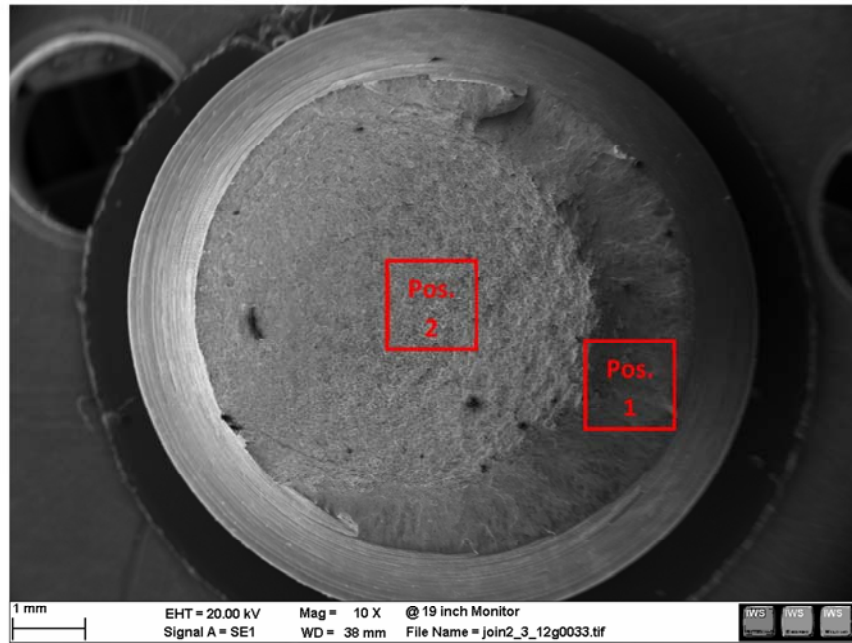
Versuchsreihe	Probe	a [mm]	f [Hz]	F <sub>R</sub> [kN]	St [kN]	Wärmebehandlung vor dem Schweißen
Hauptversuch	13.1	2,5	70	80	80	Nicht angelassen
Vorversuch	14	2,5	70	64	88	Nicht angelassen
Vorversuch	30	2,0	70	32	88	Nicht angelassen
Hauptversuch	5	1,8	60	32	88	Nicht angelassen
Vorversuch	11	2,5	50	32	88	Angelassen
Vorversuch	21	2,5	50	64	0	Angelassen
Hauptversuch	18	2,5	70	80	30	Nicht angelassen
Hauptversuch	9	2,0	50	16	88	Nicht angelassen
Hauptversuch	26.1	1,5	93	16	88	Nicht angelassen
Vorversuch – 550°	14	2,5	70	64	88	Nicht angelassen
Vorversuch – 200°	26	2,5	70	64	0	Nicht angelassen

Von den zur REM Untersuchung ausgewählten Proben wurden zuerst Makroaufnahmen und folglich Stereomikroskopbilder aufgenommen. In Abbildung 10-2 ist beispielhaft die Probe 14 des Vorversuchs dargestellt.


**Abbildung 10-2: Probe 14 (VV) - Makroaufnahme (links) und Stereomikroskopbild (rechts)**

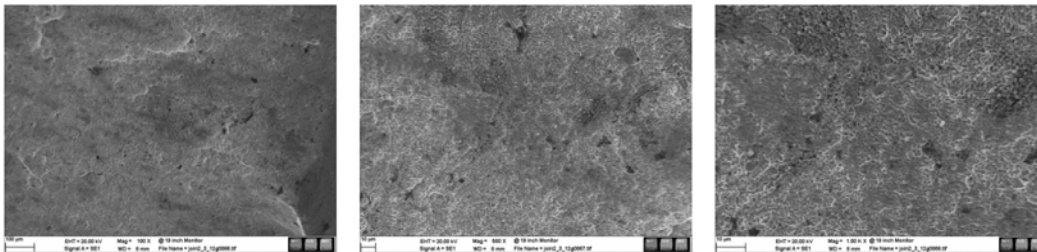
In Abbildung 10-3 ist die Probe im REM zu sehen. Dabei wurden an den eingezeichneten Positionen Aufnahmen mit einer Vergrößerung von 100, 500 und 1000 aufgenommen. Das Bruchaussehen weist einen typischen Teller-Tassen-Bruch auf. Dieser Teller-Tassen-Bruch ist repräsentativ für einen Mischbruch. In der Mitte der Probe ist ein Normalspannungsbruch zu erkennen, von welchem der Bruch ausgeht. Am Rand der Bruchfläche sind Scherlippen unter ca. 45° vorhanden. Diese Art von Bruch ist besonders bei duktilen Werkstoffen zu beobachten. [43]



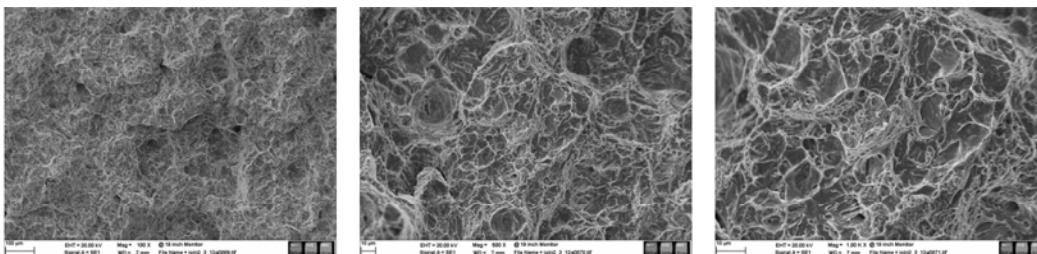


**Abbildung 10-3: Probe 14 VV - REM**

In Abbildung 10-4 und Abbildung 10-5 sind die Aufnahmen der Position 1 und 2 in den Vergrößerungen 100, 500 und 1000 dargestellt. Ein wesentlicher Unterschied zwischen Position 1 und 2 stellt die Größe der Strukturen dar. In Position 1 sind wesentlich kleinere Wabenstrukturen vorhanden. Position 2 zeigt das Bruchaussehen in der Mitte der Bruchfläche. Hier sind größere Waben und teils spröde Anteile vorhanden.



**Abbildung 10-4: Probe 14 VV - Position 1 – 100x (links), 500x (Mitte), 1000x (rechts)**



**Abbildung 10-5: Probe 14 VV- Position 2 – 100x (links), 500x (Mitte), 1000x (rechts)**

Beinahe alle Proben zeigen ein duktiler Bruchaussehen, wobei die Wabengröße variiert.

Bei den nach dem Schweißen wärmebehandelten Proben ist deutlich zu sehen, dass der Bereich des Normalspannungsbruchs eine kleinere Fläche aufweist. Dafür ist der Anteil der Scherlippenfläche stark erhöht. (Abbildung 10-6)

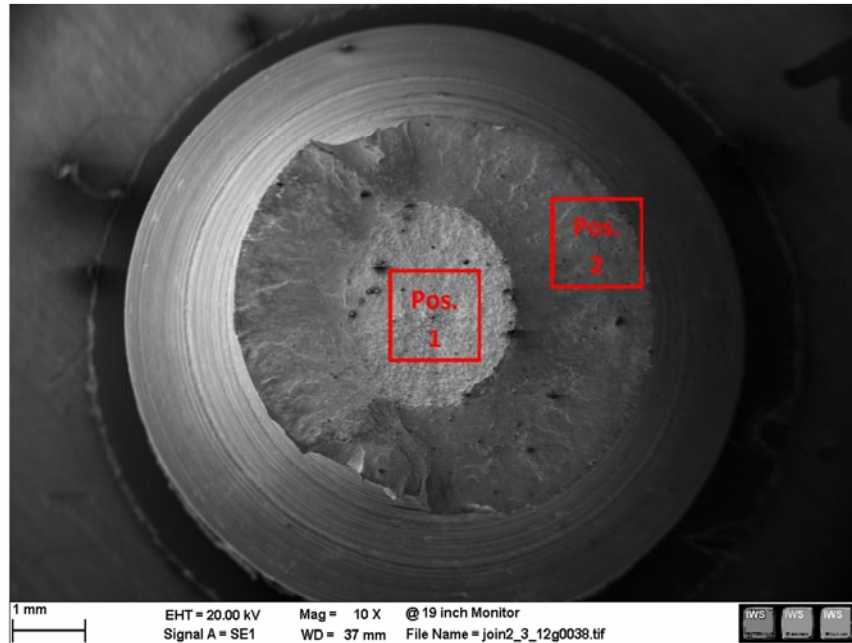


Abbildung 10-6: Probe 26 (VV mit 200° angel.) - REM

Auch bei dieser Probe sind sowohl bei Position 1 (Abbildung 10-7) und 2 (Abbildung 10-8) Waben erkennbar, welche auf einen duktilen Bruch hinweisen. Ebenfalls sind in der Position 1 deutlich größere Waben vorzufinden.

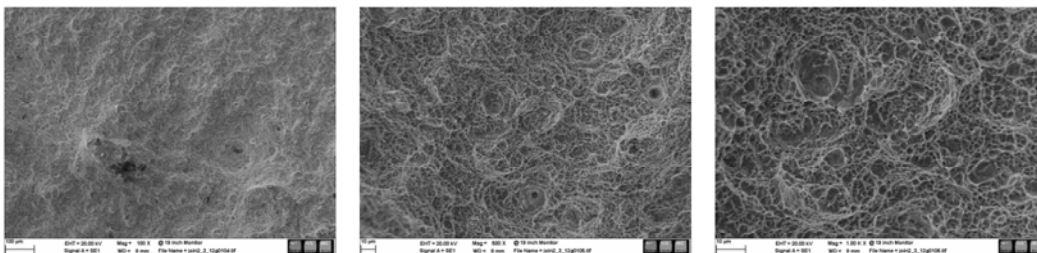


Abbildung 10-7: Probe 26 (VV angel.) - Position 1 – 100x (links), 500x (Mitte), 1000x (rechts)

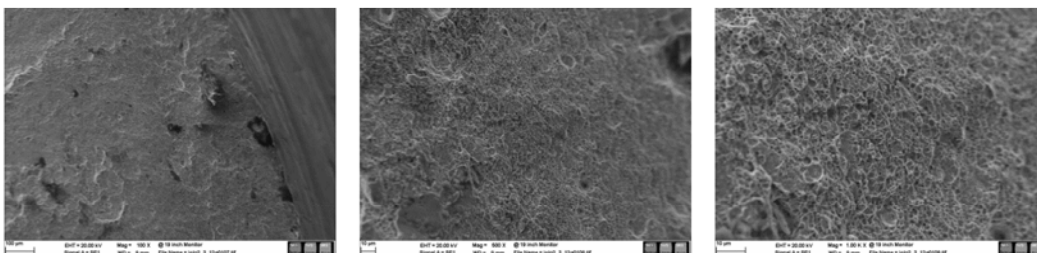
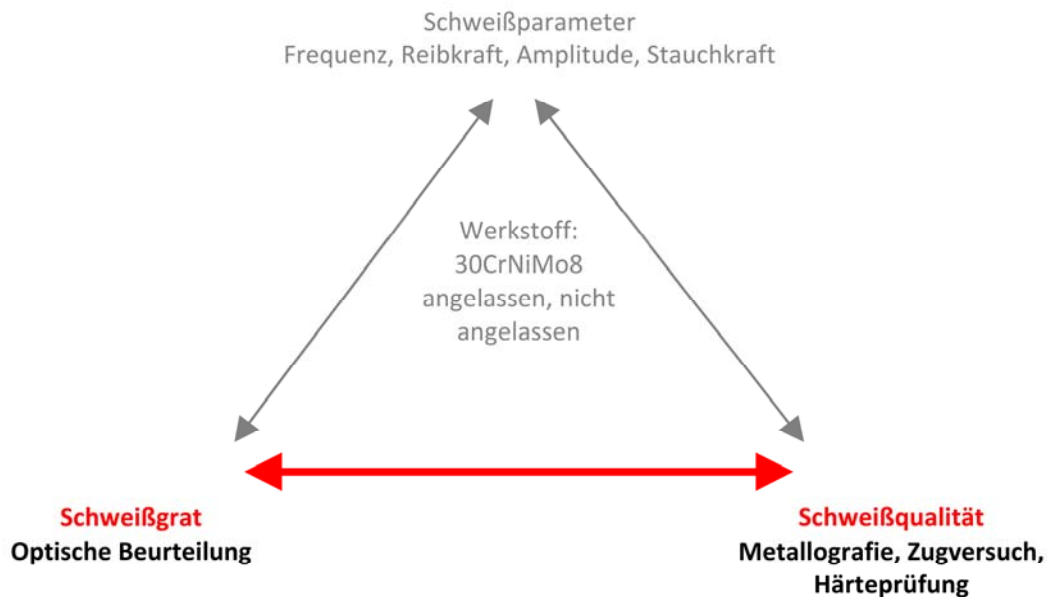


Abbildung 10-8: Probe 26 (VV angel.) - Position 2 – 100x (links), 500x (Mitte), 1000x (rechts)

## 11 Zusammenhang von Schweißgrat und Schweißqualität

In diesem Kapitel sollen die Zusammenhänge von Schweißgrat und Schweißqualität untersucht und dokumentiert werden. Die Zusammenhänge hinsichtlich der Parameter wurden in den Kapiteln „Vorversuch“ und „Hauptversuch“ schon ausführlich durchgeführt. Ebenfalls sollen die Reibzeit und die Schweißnahtbreite als zusätzliches Merkmal in den Betrachtungen einfließen. Die verwendeten Daten umfassen alle Proben des Vor- und Hauptversuchs.



Lässt sich ein direkter Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Schweißgrat feststellen, so ist die Qualitätskontrolle wesentlich einfacher, da der Schweißgrat optisch schnell bestimmt werden kann. In Abbildung 11-1 ist dieser Zusammenhang dargestellt. Dabei kann man feststellen, dass Schweißgrat A, welcher die schlechteste Qualität repräsentiert, auch deutlich geringere Zugfestigkeiten aufweist. Mit besser werdendem Schweißgrat steigt auch die Zugfestigkeit. Jedoch liegt hier eine gewisse Streuung vor, da viele Parameterkombinationen vertreten sind. Jedoch liegt der Mittelwert der erreichten Zugfestigkeiten bei Schweißgrat D deutlich über dem von Schweißgrat B. Die höchsten Zugfestigkeitswerte wurden ebenfalls bei Schweißgrat D erreicht. Die Schweißgratqualität lässt somit auf die Zugfestigkeit schließen.

### Zugfestigkeit / Schweißgrat

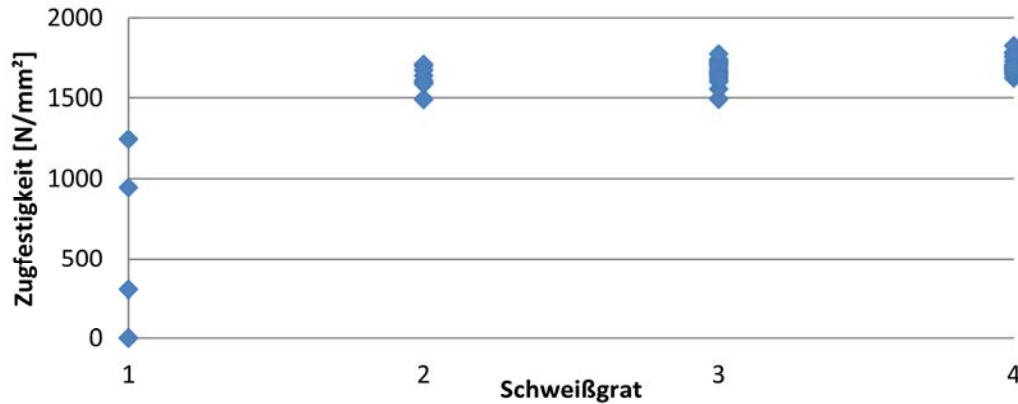


Abbildung 11-1: Zugfestigkeit / Schweißgrat

Im Hinblick auf den Härte-Schweißgrat-Vergleich konnte kein Zusammenhang festgestellt werden, da die Werte sehr stark streuen. (Abbildung 11-2)

### Härte / Schweißgrat für nicht angel. Proben

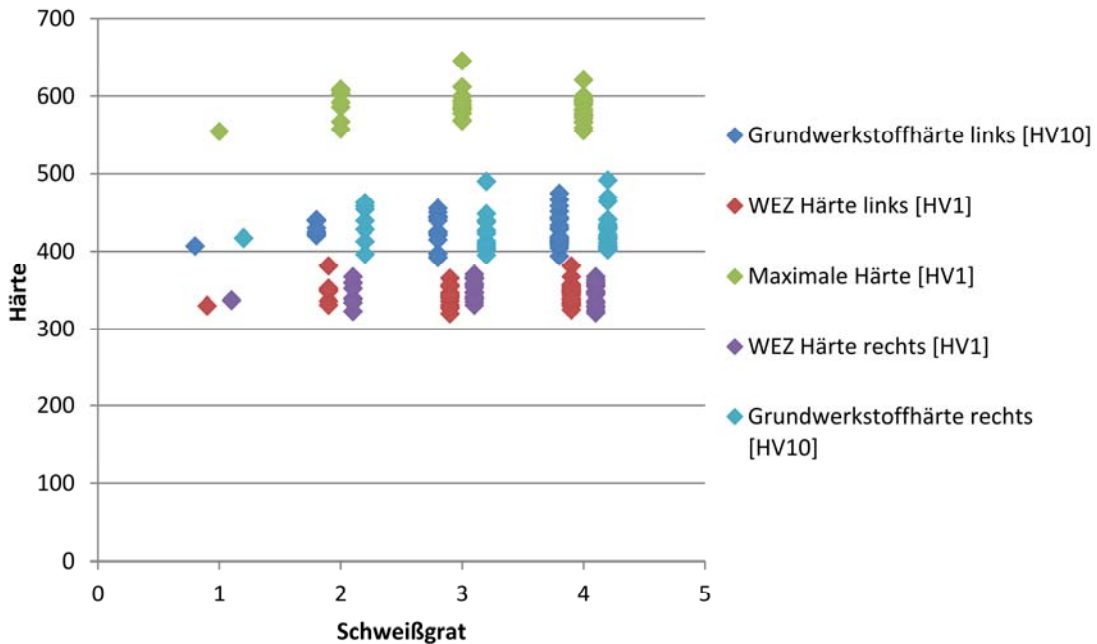


Abbildung 11-2: Härte / Schweißgrat für nicht angelassene Proben

In Abbildung 11-3 ist die Schweißnahtbreite dem Schweißgrat gegenübergestellt. Mit zunehmender Schweißgratqualität kann ein Sinken der Schweißnahtbreite von Schweißgrat B bis D beobachtet werden. Bei Schweißgrat A sind zum einen sehr große und zum anderen sehr kleine Schweißnahtbreiten gemessen worden, was zu einer hohen Streuung führt.



### Schweißnahtbreite / Schweißgrat

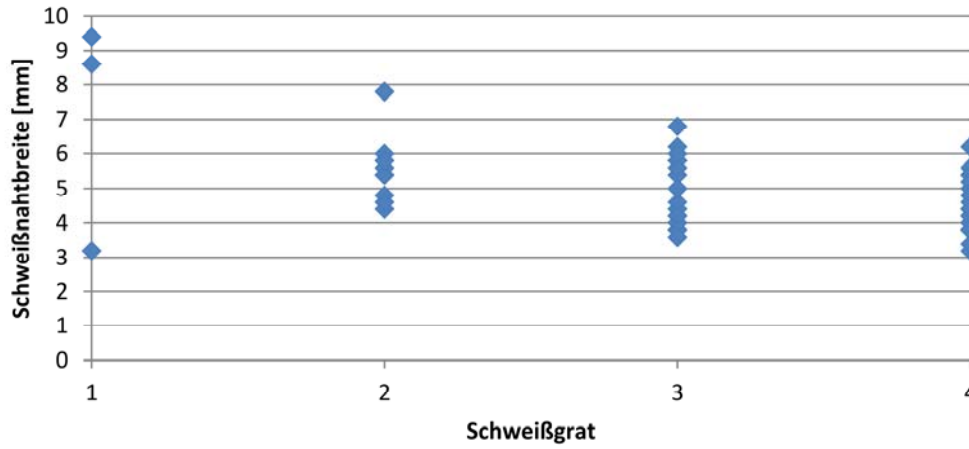


Abbildung 11-3: Schweißnahtbreite / Schweißgrat

Stellt man nun die Schweißnahtbreite der Reibzeit gegenüber, so ist in Abbildung 11-4 erkennbar, dass die Breite mit sinkender Reibzeit geringer wird.

### Schweißnahtbreite / Reibzeit

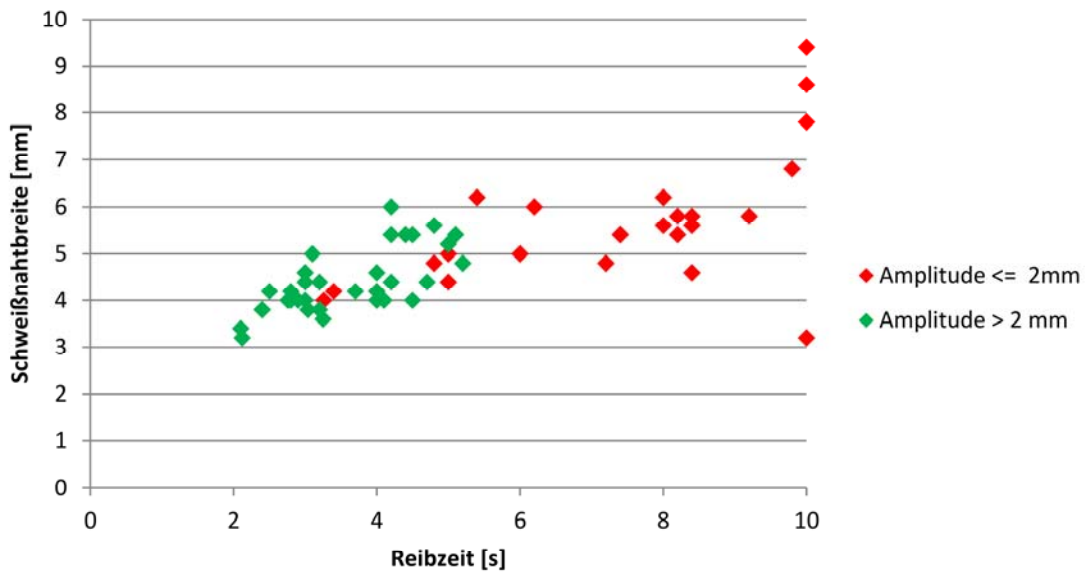


Abbildung 11-4: Schweißnahtbreite / Reibzeit

## 12 Zusammenhang von Reibzeit und Einstellparameter

In Abbildung 12-1 wird die Reibzeit der Reibgeschwindigkeit gegenübergestellt. Die Reibgeschwindigkeit errechnet sich durch die Multiplikation von  $4 \cdot a \cdot f$ , wobei dies die mittlere Reibgeschwindigkeit repräsentiert. Man sieht, dass mit zunehmender Reibgeschwindigkeit die Reibzeit abnimmt. Der beste Schweißgrat erreicht dabei die geringste Reibzeit. Schweißgrat D wird vor allem bei einer Amplitude von 2,5 mm erreicht, jedoch erreicht die Frequenz bei dieser Einstellung 70 Hz, welches das Einstellmaximum an der Reibmaschine ist. Dies führt zu einer mittleren Geschwindigkeit von 700 mm/s. Höhere Geschwindigkeiten können nur bei einer Amplitude von 2 mm erreicht werden, wobei die Frequenz bis zu 100 Hz erhöht werden kann und die Geschwindigkeit bis 800 mm/s realisiert werden könnte.

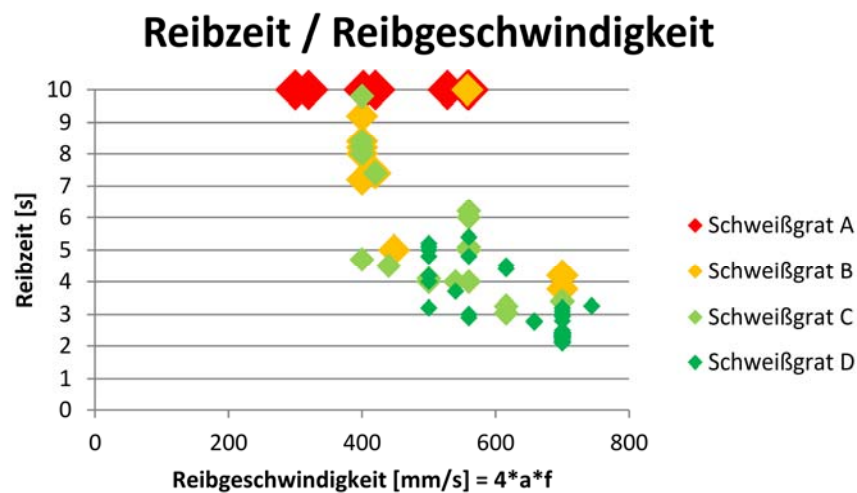


Abbildung 12-1: Reibzeit / Reibgeschwindigkeit

In Abbildung 12-2 ist der Arbeitsbereich in Abhängigkeit von Reibzeit und Reibdruck bei einer konstanten Schwingweite (Amplitude) von 1,8 mm dargestellt. Abbildung 12-3 zeigt den Arbeitsbereich in Abhängigkeit von Schwingweite und Reibdruck. Diese Darstellungen stammen von Nentwig [20]. Dabei wird bei zu geringen Reibdrücken eine Wirbelbildung beobachtet. Beim Rotationsreißschweißen kann keine Wirbelbildung stattfinden, da dort die Relativgeschwindigkeit konstant in eine Richtung aufgebracht wird. Beim Linearreißschweißen dagegen findet eine hin- und Herbewegung der Reibflächen statt. Bei geringen Reibdrücken wird das Material nicht gleichmäßig plastifiziert, sondern hin- und hergerollt. Dabei bilden sich Wirbel, welche durch den Rollvorgang Material aufnehmen. Durch den Reibdruck können diese nicht an Durchmesser gewinnen, sondern wachsen quer zur Schwingrichtung. Erst bei ausreichend hohem Reibdruck findet ein fließender Materialtransport statt, durch welche die Verunreinigungen aus der Schweißnaht transportiert werden. Bei zu hohem Reibdruck hingegen, liegt ein zu hoher Verformungsanteil vor. Dies führt zu einem Radiergummieffekt (Abbildung 12-4), bei welchem sich das zu verschweißende Bauteil, durch die wechselnde Reibrichtung, hin und her bewegt und die effektive Schwingweite vermindert. [20]



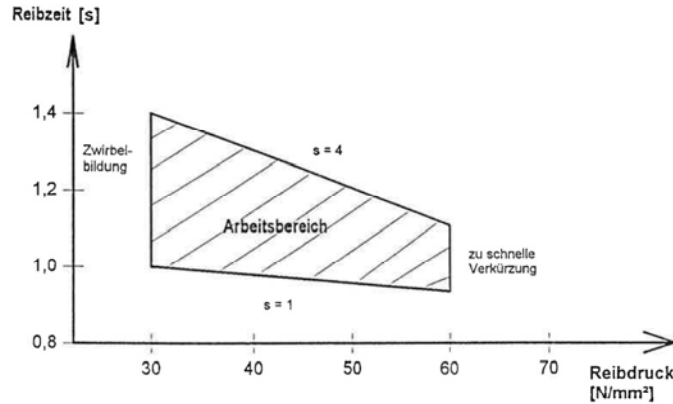


Abbildung 12-2: Arbeitsbereich in Abhängigkeit von Reibzeit und Reibdruck [20]

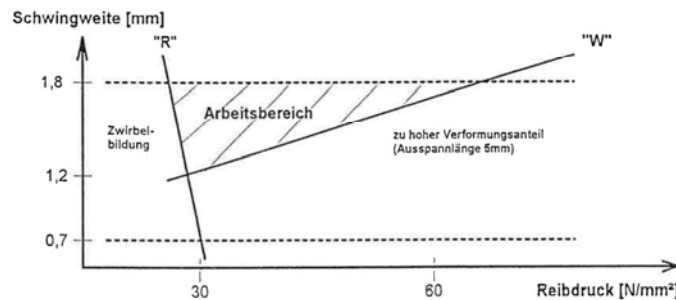


Abbildung 12-3: Arbeitsbereich in Abhängigkeit von Schwingweite und Reibdruck [20]

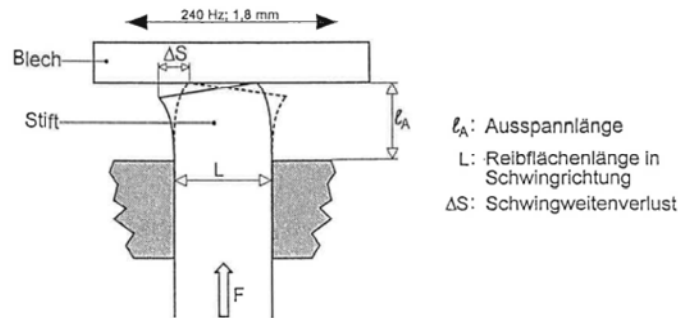


Abbildung 12-4: Radiergummieffekt [20]

Auch beim Linearreißschweißen der Kettenglieder wurde ein Arbeitsbereich gefunden. Dabei wird die Reibzeit der Reibkraft gegenübergestellt und mit dem bewerteten Schweißgrat in Abbildung 12-5 eingezeichnet. Der gefundene Arbeitsbereich enthält ausschließlich Schweißgratqualitäten von C und D. Ist die Reibkraft bei einer Amplitude von 2,5 mm zu gering, so entsteht ein schlechterer Schweißgrat. (1) Bei einer geringeren Amplitude von 2 bis 2,2 mm und einer geringen Reibkraft von 16 kN ist der Schweißgrat D entstanden. (2) Die Frequenz betrug bei beiden 70 Hz. Ist die Frequenz oder die Amplitude zu gering, so steigt die Reibzeit bei geringer Reibkraft stark an und die Schweißgratqualität nimmt ab. (3)

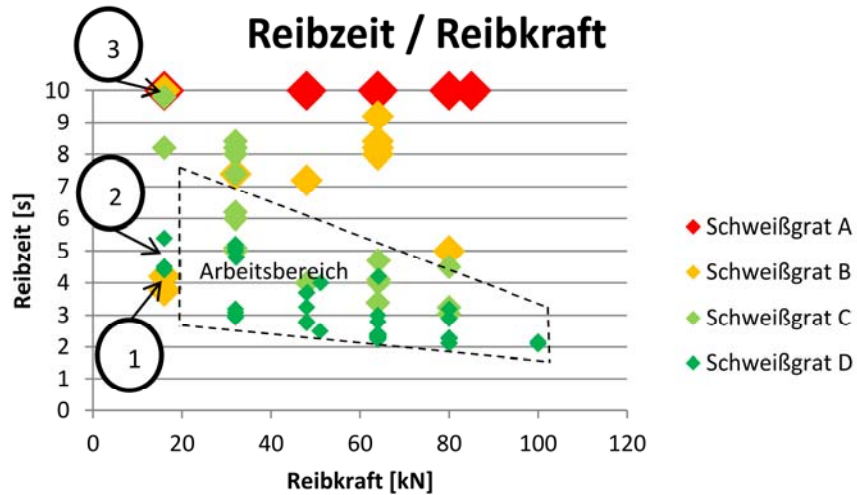


Abbildung 12-5: Reibzeit / Reibkraft

Die starke Abhängigkeit des Schweißgrats ist in Abbildung 12-6 klar ersichtlich. Bei einer Amplitude von 2,5 mm und einer Reibkraft über 16 kN konnte keine sehr gute Schweißgratqualität erzeugt werden. Mit abnehmender Amplitude wird die Qualität schlechter. Ist eine Amplitude von 1,5 mm erreicht, so kann keine gute Schweißnaht mehr erzeugt werden. Bei einer mittleren Amplitude von 2 mm ist feststellbar, dass die Qualität mit steigender Reibkraft abnimmt. Außerhalb des Arbeitsbereiches kann die Schweißung aufgrund von Zwirbelbildung oder des zu hohen Verformungsanteils misslingen.

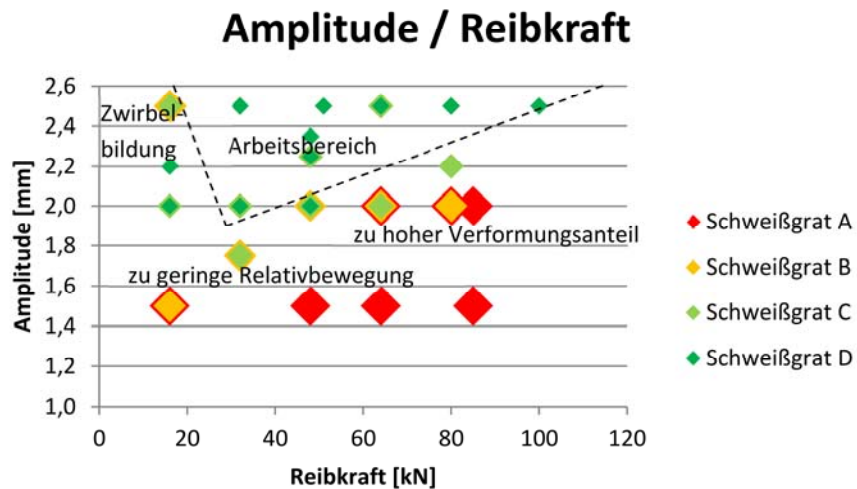


Abbildung 12-6: Amplitude / Reibkraft

## 13 Bestätigungsversuch

### 13.1 Auswahl der besten Parameterkombination für den Bestätigungsversuch

Für die Festlegung der besten Parameterkombination für den Bestätigungsversuch wurden die Ergebnisse auf die Zielgrößen vom Vor- und Hauptversuch gegenübergestellt. Die relevanten Zielgrößen waren die Zugfestigkeit, der Schweißgrat und die Reibzeit, welche in Folge näher betrachtet werden.

#### 13.1.1 Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit stellt ein wesentliches Kriterium für einen gelungenen Schweißversuch dar. Da die Amplitude durchgängig signifikant war, wird in Abbildung 13-1 die Zugfestigkeit mit der Amplitude gegenübergestellt. Zu erkennen ist, dass bei einer Amplitude von unter 2 mm geringere Zugfestigkeitswerte ermittelt wurden. Auch der Schweißgrat 4 wurde hier nie erreicht, worauf eine Amplitude von unter 2 mm als guter Parameter ausgeschlossen wird. Bei einer Amplitude von 2 mm ist das Ergebnis in Bezug auf die Zugfestigkeit und den Schweißgrat weit gestreut. In diesem Bereich wirken sich die anderen Faktoren wesentlich stärker auf das Ergebnis aus. Die besten Zugfestigkeitswerte und auch Schweißgratqualitäten wurden bei einer Amplitude über 2 mm erreicht. Die maximale Amplitude ist mit 2,5 mm begrenzt. Dieser Wert wurde für den Bestätigungsversuch festgelegt, da dies sowohl im Vorversuch als auch im Hauptversuch als gute Einstellung ermittelt wurde. Die Abbildung 13-1 zeigt auch, dass mit steigender Amplitude bessere Ergebnisse erzielt werden.

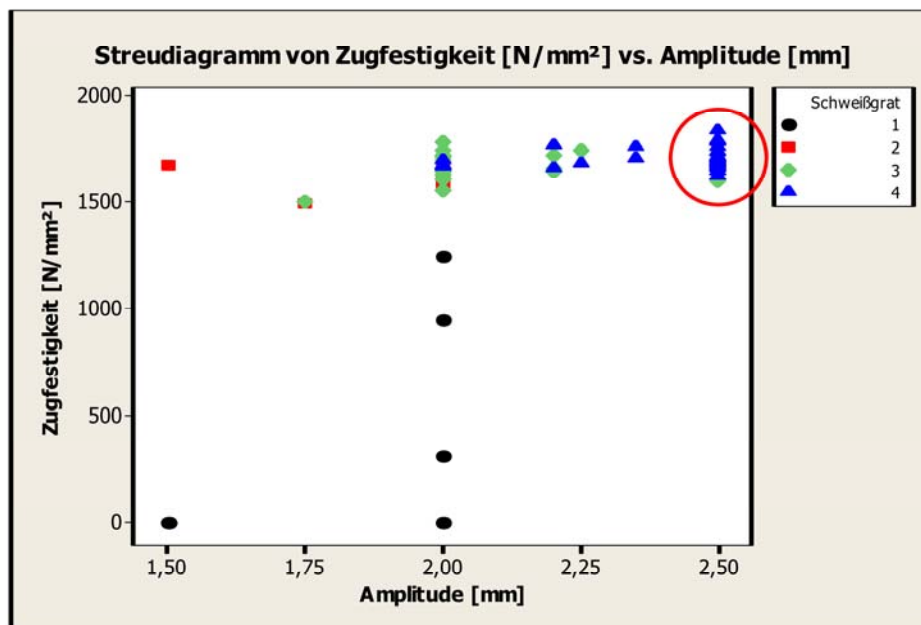
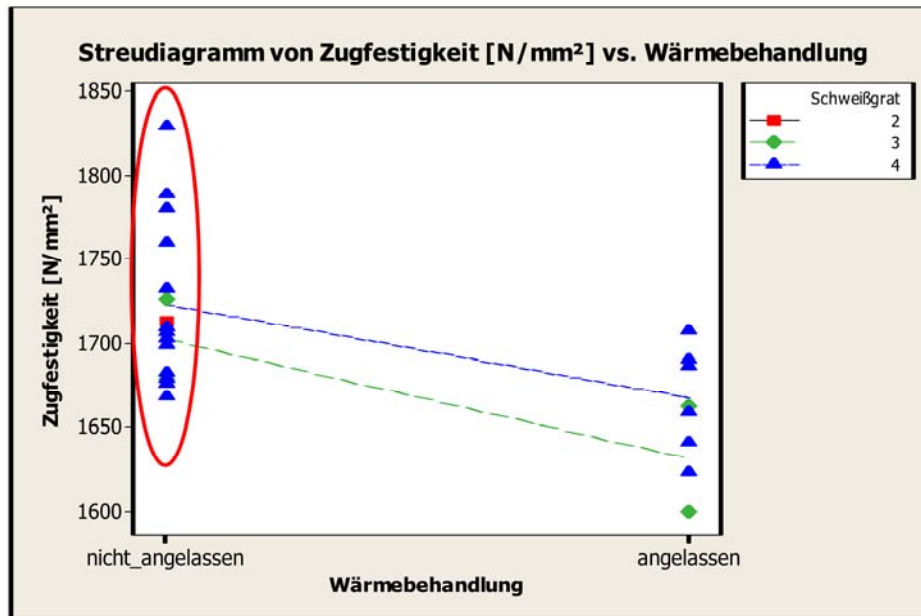


Abbildung 13-1: Streudiagramm - Zugfestigkeit

In Abbildung 13-1 ist eine gewisse Streuung zu beobachten, diese Streuung lässt sich im Wesentlichen auf den Anlasszustand der Proben zurückführen. In Abbildung 13-2 wird zwischen nicht angelassenem und angelassenem Zustand vor dem Schweißen unterschieden. Im nicht angelassenen Zustand vor dem Schweißen ist die mittlere Zugfestigkeit höher, weshalb dieser Zustand vorteilhaft ist.



**Abbildung 13-2: Streudiagramm - Wärmebehandlung**

Des Weiteren müssen nun die restlichen Parameter, wie Frequenz, Reibkraft und Stauchkraft festgelegt werden. In Abbildung 13-3 und Abbildung 13-4 werden alle Versuche mit einer Amplitude von 2,5 mm und nicht angelassenem Grundwerkstoff miteingeschlossen. Man sieht deutlich, dass der maximale Zugfestigkeitswert bei der höchsten Parameterkonfiguration und mit einer Stauchkraft von 80 kN erreicht wird. Vergleicht man diesen Wert aber mit jenem, bei einer Stauchkraft von 30 kN, so ist eine sehr hohe Differenz feststellbar. Bei einer etwas geringeren Einstellung der Reibkraft (64 kN) ist die Zugfestigkeit nur leicht geringer, jedoch ist die Abweichung bei veränderter Stauchkraft deutlich weniger.

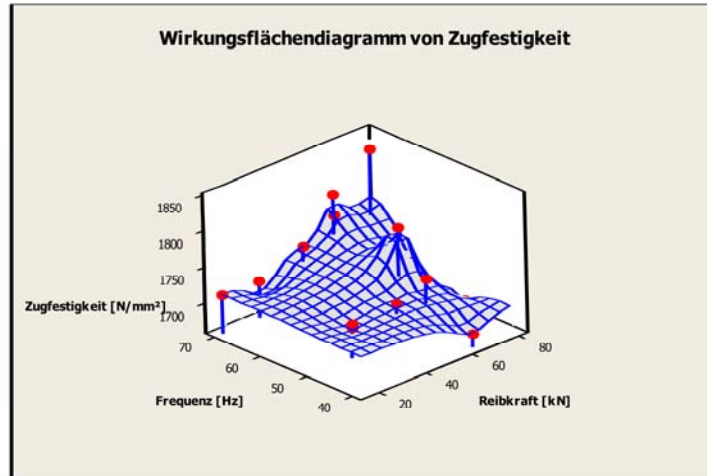


Abbildung 13-3: Wirkungsflächendiagramm - Zugfestigkeit

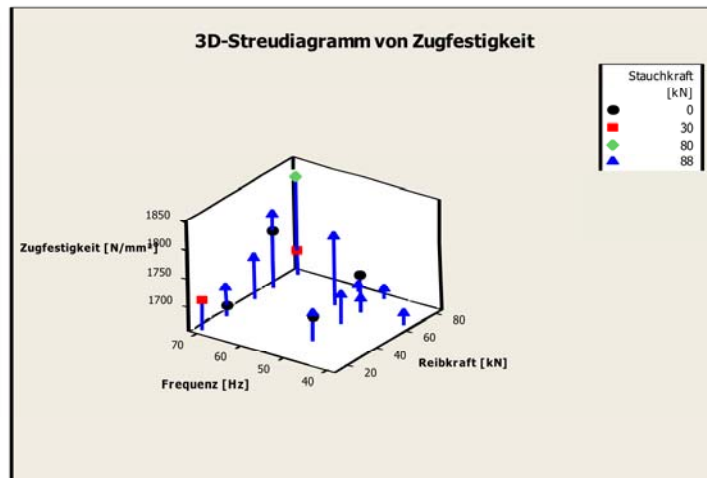


Abbildung 13-4: 3D Streudiagramm - Zugfestigkeit

Die günstigste Parameterkonfiguration im Hinblick auf die Zugfestigkeit führt zu den Werten, welche in Tabelle 13-1 enthalten sind:

Tabelle 13-1: Beste Parameter für Zugfestigkeit

Probe	a [mm]	f [Hz]	$F_R$ [kN]	St [kN]	Wärmebehandlung
14 (VV)	2,5	70	64	88	Nicht angelassen

### 13.1.2 Schweißgrat

In Abbildung 13-5 ist der Schweißgrat in Abhängigkeit der Amplitude, der Reibkraft und der Frequenz dargestellt. Man sieht, dass bei hoher Amplitude der beste Schweißgrat D erreicht wird. Sinkt die Amplitude, so sinkt auch die Schweißgratqualität. Reibkraft und Frequenz sind wenig ausschlaggebend für den Schweißgrat.

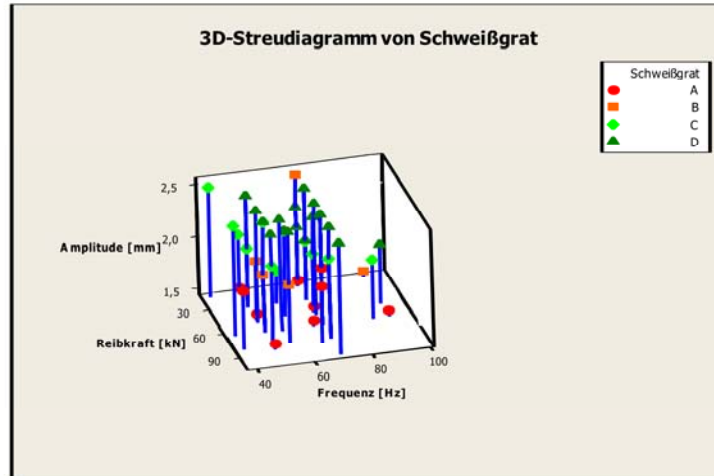


Abbildung 13-5: 3D-Streudiagramm - Schweißgrat

Die Probe 14 vom Vorversuch, welche auch bei der Zugfestigkeit gute Werte lieferte, zeigt auch hier eine gute Schweißgratqualität D. Somit spricht nichts gegen die Verwendung der in Tabelle 13-1 festgelegten Einstellung.

### 13.1.3 Reibzeit

Aus wirtschaftlichen Gründen empfiehlt sich auch die Betrachtung der Reibzeit. So ist eine geringe Reibzeit für den Prozess von Vorteil. Betrachtet man die Abbildung 13-6 so ist festzustellen, dass die Reibzeit bei einer hohen Amplitude, Frequenz und Reibkraft sinkt. Auch hier ist die Probe 14 bei den besten Ergebnissen vertreten. Mit einer höheren Reibkraft als 64 kN lassen sich zwar noch geringere Reibzeiten erzielen, jedoch besteht die Gefahr, dass das Verhältnis von Reibkraft/Amplitude zu hohe Werte annehmen könnte, was zu deutlich schlechteren Ergebnissen führen kann. Deshalb wird die Reibkraft bei 64 kN belassen, um im sicheren Bereich zu bleiben. Außerdem würde sich die Reibzeit bei einer Erhöhung der Reibkraft nur marginal verringern.

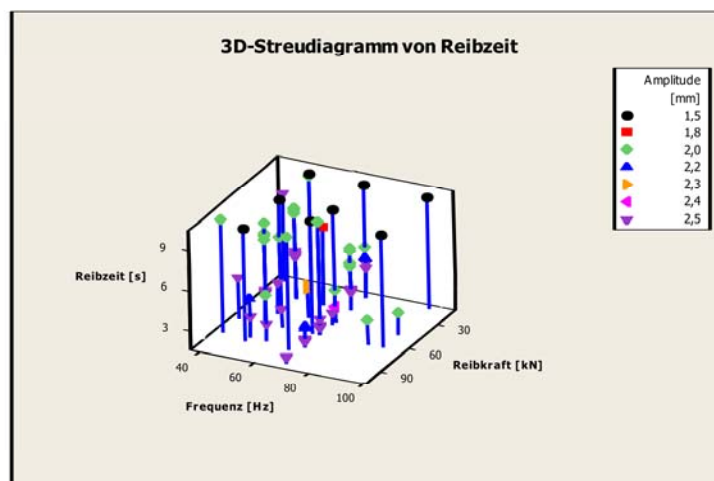


Abbildung 13-6: 3D-Streudiagramm - Reibzeit



### 13.1.4 Probe 14 vom Vorversuch

Die durch den Vorversuch und Hauptversuch gesammelten Erkenntnisse ergaben die besten Ergebnisse bei der Probe 14 des Vorversuchs. In Tabelle 13-2 sind die Parameter des Versuchs gelistet. Tabelle 13-3 zeigt die Messwerte der Probe.

**Tabelle 13-2: Probe 14 VV - Parameter**

Probennummer	14
Versuchsreihe	Vorversuch
Amplitude [mm]	2,5
Reibkraft [kN]	64
Frequenz [Hz]	70
Stauchkraft [kN]	88
Wärmebehandlung vor dem Schweißen	Nicht angelassen
Power Input [W/mm <sup>2</sup> ]	70

**Tabelle 13-3: Probe 14 VV - Messwerte**

Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	1788
Schweißgrat	D (4)
Reibzeit [s]	2,4
Grundwerkstoffhärte links [HV10]	443
Härte in der Wärmeeinflusszone links [HV1]	381
Maximale Härte [HV1]	592
Härte in der Wärmeeinflusszone rechts [HV1]	354
Grundwerkstoffhärte rechts [HV10]	411
Schweißnahtbreite [mm]	3,8

## 13.2 Durchführung des Bestätigungsversuches

Durch den Vor- und Hauptversuch wurden die optimalen Parameter gefunden. Tabelle 13-2 zeigt die Einstellwerte der Probe 14 des Vorversuchs. Diese Werte entsprechen den Parametern des Bestätigungsversuchs. Es wurden 15 Versuche mit den gleichen Einstellungen geschweißt. Anschließend wurden diese Proben auf Zugfestigkeit, Schweißgrat und Reibzeit untersucht, um die Streuung zu analysieren.

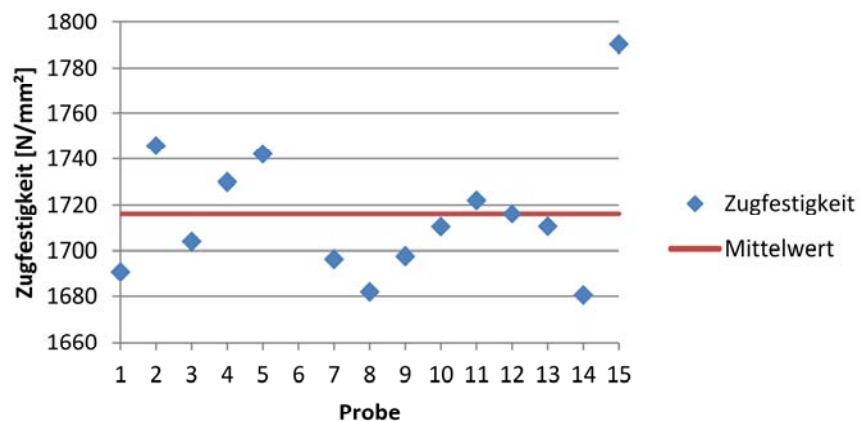
### 13.2.1 Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeitswerte des Bestätigungsversuches sind in Tabelle 13-4 gelistet. Der Mittelwert beträgt 1716 N/mm<sup>2</sup> und besitzt eine Standardabweichung von 29,5 N/mm<sup>2</sup>. Die Probe 6 wird hier nicht eingerechnet, da beim Zugversuch ein Fehler auftrat. Es verbleiben daher nur 14 Zugfestigkeitswerte zur Berechnung des Mittelwerts und der Standardabweichung. Die höchste erreichte Zugfestigkeit war bei Probe 15 und erreichte den Wert von 1790 N/mm<sup>2</sup>, wohingegen der niedrigste gültige Messwert bei 1681 N/mm<sup>2</sup> liegt. Der Unterschied beträgt ca. 6 %. In Abbildung 13-7 ist die Zugfestigkeit pro Probe in einem Diagramm dargestellt.

**Tabelle 13-4: Zugfestigkeitswerte des Bestätigungsversuchs**

Probe	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
1	1691
2	1746
3	1704
4	1730
5	1742
6	1647 (Messfehler)
7	1696
8	1682
9	1698
10	1710
11	1722
12	1716
13	1711
14	1681
15	1790

### Zugfestigkeit / Probe


**Abbildung 13-7: Zugfestigkeit / Probe - Bestätigungsversuch**
**Bruch der Probenaufnahme an der Zugprüfmaschine bei Probe 6 des BV:**

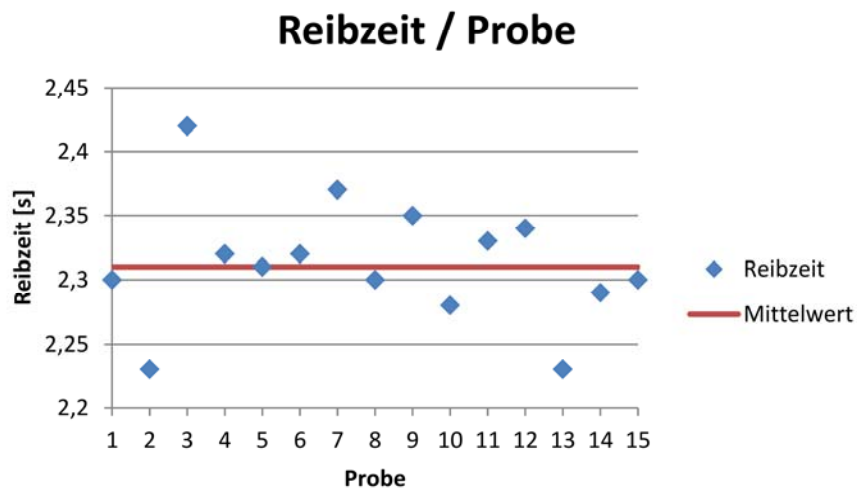
Beim Zugversuch der Probe 6 des Bestätigungsversuchs ist ein Fehler aufgetreten. Während des Zugversuches ist bei ca. 84 kN Zugkraft der obere Teil der Aufnahme für die Zugprobe an der Maschine gebrochen. Dabei zersplitterte der abgebrochene Teil in drei Stücke. Auch an der nicht gebrochenen Zugprobe sind Schäden entstanden. Die Probe 6 wurde nicht nocheinmal gezogen.

### 13.2.2 Reibzeit

Die Reibzeiten der 15 Versuche wurden aus den Schweißdiagrammen herausgelesen und sind in Tabelle 13-5 zusammengefasst. Dabei liegt die höchste Reibzeit bei 2,4 und die geringste bei 2,2 Sekunden. Der ermittelte Durchschnittswert beträgt 2,3 Sekunden mit einer Standardabweichung von 0,05 Sekunden. In Abbildung 13-8 ist die Reibzeit pro Probe in einem Diagramm dargestellt.

**Tabelle 13-5: Reibzeiten des Bestätigungsversuchs**

Probe	Reibzeit [s]
1	2,30
2	2,23
3	2,42
4	2,32
5	2,31
6	2,32
7	2,37
8	2,30
9	2,35
10	2,28
11	2,33
12	2,34
13	2,23
14	2,29
15	2,30



**Abbildung 13-8: Reibzeit / Probe - Bestätigungsversuch**

### 13.2.3 Schweißgrat

Alle Proben haben den Schweißgrat D. Der Schweißgrat ist über der ganzen Reibfläche entstanden und ist an den Gratenden verbunden. Es sind keine wesentlichen Unterschiede feststellbar. In Abbildung 13-9 sind die Proben 2 und 3 dargestellt. Probe 2 besitzt eine Reibzeit von 2,23 s und Probe 3 eine Reibzeit von 2,42 s. Diese Werte sind die oberen und unteren Extremwerte der Reibzeit. Der Schweißgrat ist jedoch konstant geblieben. Auch im Zusammenhang mit der Zugfestigkeit sind keine Auffälligkeiten am Schweißgrat zu erkennen.

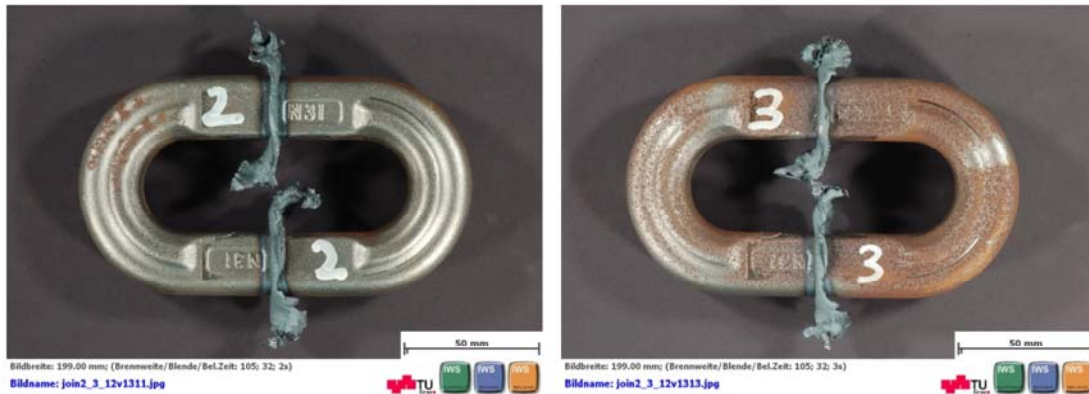


Abbildung 13-9: Schweißgrat des Bestätigungsversuchs – geringe/hohe Reibzeit

## 14 Wärmebehandlung nach dem Schweißen

Die zweite Hälfte der geschweißten Proben des Vorversuchs wurde dazu verwendet zwei verschiedene Wärmebehandlungen nach dem Schweißen zu untersuchen. Wie in Kapitel 5.6 „Nach dem Schweißen wärmebehandelte Proben“ (Seite: 67) beschrieben, wurden die Hälfte der Proben nach dem Härten mit 200 °C und die andere Hälfte mit 550 °C angelassen. Schweißzeit und Schweißgrat blieben daher gleich. Zugfestigkeit und metallografische Eigenschaften änderten sich dabei. Die Parameter und Zugfestigkeitswerte sind dabei in Tabelle 14-1 zu sehen.

**Tabelle 14-1: Nach dem Schweißen wärmebehandelte Proben**

WNBH	Zugfestigkeit			F <sub>R</sub>	f	a	St	Reibzeit	PI	Grat
	keine	200 °C ang.	550 °C ang.							
Probe	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	kN	Hz	mm	kN	s	W/mm <sup>2</sup>	-
1	1662	1803		64	50	2,5	88	4	49,96	3
2	1614		1304	64	70	2	0	11	55,95	2
3	1690	1848		64	70	2,5	0	2,4	69,94	4
4	1641		1312	64	70	2,5	88	2,4	69,94	4
5	1658	1857		32	50	2,5	0	5	24,98	4
6	1662		1299	32	70	2	88	4,8	27,98	4
7	1585	1745		64	50	2	0	9,2	39,96	2
8	1682	1863		64	50	2,5	88	4,2	49,96	4
9	1242	828		64	70	2	88	15	55,95	1
10	1656	1843		32	70	2	0	5	27,98	3
11	1707		1274	32	50	2,5	88	5,2	24,98	4
12	1595		1295	64	50	2	88	8,4	39,96	2
13	1702	1874		32	50	2,5	0	4,8	24,98	4
14	1788		1294	64	70	2,5	88	2,4	69,94	4
15	1686	1864		32	70	2,5	88	3	34,97	4
16	307		1088	64	70	2	0	10	55,95	1
17	1589	1892		64	50	2	0	8	39,96	2
18	1623		1307	32	50	2	0	8,4	19,98	3
19	1719		1278	32	50	2	0	8,2	19,98	3
20	1706		1286	32	50	2,5	88	5,1	24,98	4
21	1599		1298	64	50	2,5	0	4,1	49,96	3
22	1622		1309	32	70	2,5	0	3,2	34,97	4
23	1607	1690		32	50	2	88	8,4	19,98	3
24	1679		1289	32	70	2,5	0	3,2	34,97	4
25	1709	1861		32	70	2,5	88	3	34,97	4
26	-	1860		64	70	2,5	0	2,8	69,94	4
27	1726		1281	64	50	2,5	0	4	49,96	3
28	1697	1774		32	50	2	88	8	19,98	3
29	1606		1293	64	50	2	88	8,2	39,96	2

30	1778		1290	32	70	2	88	6	27,98	3
32	1645	1857		32	70	2	0	6,2	27,98	3
26b	1759			64	70	2,5	0		69,94	4
2b	946		873	64	70	2	0	10	55,95	1

Die Abbildung 14-1 zeigt den Unterschied der Zugfestigkeiten der drei unterschiedlichen Wärmebehandlungen nach dem Schweißen. Die Proben, welchen nach dem Schweißen nicht wärmebehandelt wurden, sind dabei in grün dargestellt. Sie erreichen eine maximale Zugfestigkeit von 1788 N/mm<sup>2</sup>. Proben, welche nach dem Schweißen gehärtet und mit 200 °C angelassen wurden, erreichen eine deutlich höhere Zugfestigkeit, welche bis 1892 N/mm<sup>2</sup> reicht. Umgekehrt ist es bei den Proben, welche nach dem Schweißen und Härten mit 550 °C angelassen wurden. Die maximal erreichte Zugfestigkeit liegt bei 1312 N/mm<sup>2</sup>, wobei aber die Streuung äußerst gering ist.

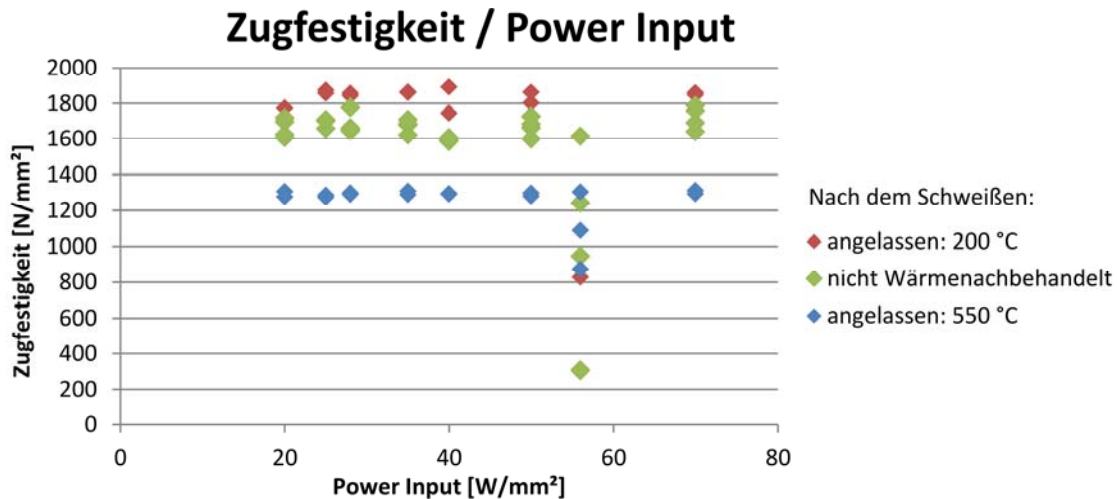


Abbildung 14-1: Zugfestigkeit / Power Input der drei Varianten

In Abbildung 14-2 sind die nach dem Schweißen wärmebehandelten Proben dargestellt. Dabei wird zwischen den vor dem Schweißen angelassenen und nicht angelassenen Proben farblich unterschieden.

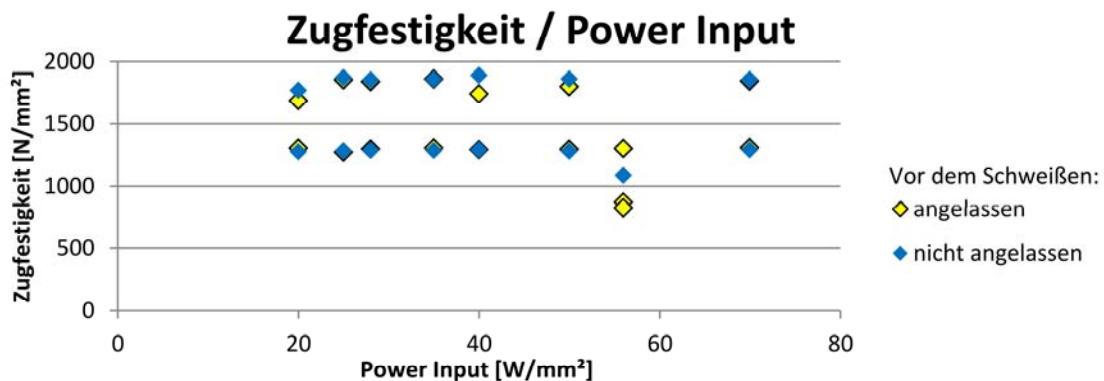


Abbildung 14-2: Zugfestigkeit / Power Input der wärmenachbehandelten Proben



## 15 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde eine Parameterstudie über das Linearreibschweißen von Kettengliedern mit dem Grundwerkstoff 30CrNiMo8 durchgeführt. Variierte Maschinenparameter waren dabei die Amplitude, die Reibkraft, die Stauchkraft und die Frequenz. Die Kettenglieder wurden dabei anhand ihres Anlasszustandes unterschieden; die Geometrie wurde nicht verändert. Die Versuche wurden bei der Firma pewag GmbH durchgeführt.

**Power Input:** Ein hoher Power Input lässt nicht automatisch auf eine erfolgreiche Schweißung schließen. Vielmehr muss die Wechselwirkung der Amplitude, und der Reibkraft betrachtet werden. Bei geringer Amplitude beispielsweise, muss die Reibkraft gering gehalten werden. Erhöht man die Amplitude kann auch die Reibkraft erhöht werden. Bei Versuchen mit hohem Power Input und Schweißgrat D, werden geringe Schweißnahtbreiten, kurze Reibzeiten und hohe Zugfestigkeiten gemessen.

**Reibzeit:** Die Reibzeit wird von der Amplitude, der Frequenz und der Reibkraft beeinflusst. Die Wärmeverbehandlung und die Stauchkraft spielen dabei keine wesentliche Rolle. Besonders ausschlaggebend ist die Amplitude. Wird die Amplitude erhöht, so sinkt die Reibzeit. Bei einer hohen Amplitude kann die Reibzeit mit der Erhöhung der Reibkraft und der Frequenz weiter gesenkt werden. Hier muss aber auch die Wechselwirkung dieser drei Parameter beachtet werden, welche signifikant ist. So bewirkt eine Erhöhung der Reibkraft bei geringer Amplitude eine Verlängerung der Reibzeit. Die besten Ergebnisse wurden bei hoher Amplitude, Reibkraft und Frequenz erreicht. Ein Zusammenhang der Reibzeit mit der Schweißgratqualität und der Zugfestigkeit konnte nachgewiesen werden. So lässt eine geringe Reibzeit auf eine gute Schweißgratqualität und hohe Zugfestigkeit schließen.

**Schweißgrat:** Der Schweißgrat wurde in vier Qualitätsstufen eingeteilt. Wobei A (1) die schlechteste und D (4) die beste Qualität beschreibt. Der Schweißgrat D kennzeichnet sich durch einen geschlossenen Schweißgrat, welcher über den gesamten Querschnitt gebildet ist. Genauso wie die Reibzeit, lässt sich auch der Schweißgrat nicht durch eine einfache Betrachtung der Parameter: Amplitude, Reibkraft und Frequenz erklären, sondern es sind deren Wechselwirkungen von Bedeutung. Stauchkraft und Wärmeverbehandlung spielen auch hier keine Rolle. Der besten Ergebnisse werden bei einer hohen Amplitude erreicht.

**Zugfestigkeit:** Auch die Zugfestigkeit lässt sich am besten mit diesen drei Parametern erklären. Amplitude, Reibkraft und Frequenz stehen auch hier in Wechselwirkung. So muss bei einer geringeren Amplitude auch die Reibkraft gesenkt werden, da sonst keine erfolgreiche Schweißung möglich ist. Schweißgrat, Reibzeit und Zugfestigkeit stehen in einem engen Zusammenhang. So ist bei einem guten Schweißgrat und geringer Reibzeit mit hohen Zugfestigkeiten zu rechnen. Die besten Ergebnisse werden bei einem hohen Power Input erzielt, wobei eine hohe Amplitude das wichtigste Kriterium ist.

**Bestätigungsversuch:** Das Linearreibschweißen ist ein sehr stabiler Prozess. Im Bestätigungsversuch wurden 15 Proben mit den gleichen Einstellungen geschweißt. Die Abweichungen bezüglich der Reibzeit und der Zugfestigkeit sind sehr gering. Auch der Schweißgrat war bei allen Proben mit D der Beste.

**Amplitude, Reibkraft:** Der Effekt der Amplitude war in Bezug auf die Zugfestigkeit, Schweißgrat und Reibzeit stets signifikant. Auch die Reibkraft stellte sich als wichtiger Faktor heraus. Dabei konnte beobachtet werden, dass das Verhältnis von Reibkraft zu Amplitude ausschlaggebend ist. Wird die Reibkraft erhöht, ohne dass die Amplitude erhöht wird, kann das zu einem Misslingen der Schweißverbindung führen. Werden jedoch Amplitude und Reibkraft gemeinsam erhöht, so können die Zielgrößen verbessert werden. Das bedeutet eine kürzere Reibzeit bei gleichzeitig besserem Schweißgrat und höheren Zugfestigkeitswerten.

## 16 Ausblick

Der nächste Schritt zur Untersuchung des Linearreibschweißprozesses könnte darin liegen, die Wechselwirkungen der Schweißparameter im Detail zu erforschen und die Parameterstudie auf weitere Werkstoffe zu erweitern. Auch die Auswirkung von Größe und Form der Querschnittsfläche auf die Qualität der Schweißverbindung kann in weiteren Studien untersucht werden.

Die Höhe der Amplitude war in dieser Arbeit signifikant, jedoch wurde diese nicht direkt an der Schweißstelle gemessen. Eine Messung der Amplitude direkt an dieser Stelle würde Aufschluss über die wahre Amplitude liefern. Besonders bei niedrigen Amplituden kann der wahre Wert deutlich unter dem Sollwert liegen. Im untersuchten Parameterbereich war besonders das Verhältnis von Amplitude zu Reibkraft wesentlich. Bei kleinen Amplituden konnte eine Schweißung nur mit geringen Reibkraftwerten durchgeführt werden. Bei steigender Reibkraft musste also auch die Amplitude steigen. Weitere Forschungen über dieses Reibkraft/Amplitude-Verhältnis und deren Zusammenhang mit der Frequenz könnten diesbezüglich durchgeführt werden.

Die Schweißanlage verursacht durch den Prozess eine starke Geräuschentwicklung. In nachfolgenden Arbeiten kann auf dieses Problem eingegangen werden.

Der durch den Reibprozess entstandene Schweißgrat bildet sich um die Fügestelle aus. Dieser muss nach dem Schweißvorgang entfernt werden. Dies sollte bei der Planung einer Serienfertigung berücksichtigt werden.

Erstrebenswert wäre eine mathematische Beschreibung der Auswirkung einer Veränderung der Schweißparameter auf die Zugfestigkeit, Schweißgrat oder die Reibzeit.

In dieser Arbeit wurden die Festigkeitseigenschaften über den Zugversuch bestimmt. In weiterer Folge wird aus den verbliebenen verschweißten Kettenhälften des Haupt- und Bestätigungsversuchs eine Kerbschlagbiegeprüfung durchgeführt.

## 17 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 3-1: REIBSCHWEIßVERFAHREN: ROTATIONS-, LINEAR- UND ORBITALREIBSCHWEIßEN [4] .....	16
ABBILDUNG 3-2: GESCHWINDIGKEITSPROFIL - ROTATIONSREIBSCHWEIßEN .....	17
ABBILDUNG 3-3: VERLAUF DER PROZESSGRÖßEN BEIM REIBSCHWEIßEN MIT KONTINUIERLICHEM ANTRIEB [6] .....	17
ABBILDUNG 3-4: VERLAUF DER PROZESSGRÖßEN BEIM REIBSCHWEIßEN MIT SCHWUNGRADANTRIEB [6].....	18
ABBILDUNG 3-5: PRINZIP DES ORBITALREIBSCHWEIßENS [7] .....	18
ABBILDUNG 3-6: BESCHREIBUNG DES LRS .....	19
ABBILDUNG 3-7: BLISK – LINEARREIBGESCHWEIßT [11] .....	20
ABBILDUNG 3-8: DARSTELLUNG DES LINEARREIBSCHWEIßPROZESSES [3] .....	20
ABBILDUNG 3-9: PROZESSPHASEN BEIM LRS [14] .....	21
ABBILDUNG 3-10: PHASEN DES LRS [11] .....	22
ABBILDUNG 3-11: BEREICHE IN DER SCHWEIßVERBINDUNG UNTER POLARISIERTEM LICHT [21] .....	30
ABBILDUNG 3-12: SCHWEIßNAHT - PROBE 14 VV .....	31
ABBILDUNG 3-13: HÄRTEMESSUNG - Ti6AL4V [22].....	31
ABBILDUNG 3-14: EINFLUSS DES REIBDRUCKS AUF BREITE DER SCHWEIßNAHT [24] .....	32
ABBILDUNG 3-15: SCHWEIßGRAT - Ti-6AL-4V [24] .....	33
ABBILDUNG 3-16: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES SCHWEIßGRATS [27] .....	33
ABBILDUNG 3-17: SCHWEIßGRAT A.....	34
ABBILDUNG 3-18: SCHWEIßGRAT B.....	34
ABBILDUNG 3-19: SCHWEIßGRAT C.....	35
ABBILDUNG 3-20: SCHWEIßGRAT D .....	35
ABBILDUNG 3-21: ZWECK FINES EXPERIMENTS [29] .....	36
ABBILDUNG 3-22: VERGLEICH: ONE-FACTOR-AT-A-TIME - VERSUCHSPLANUNG .....	37
ABBILDUNG 3-23: ANWENDUNG VON VOLLFAKTORIELLEN VERSUCHSPLÄNEN [32] .....	38
ABBILDUNG 3-24: VORGEHENSWEISE BEI DER STATISTISCHEN VERSUCHSMETHODIK [33] .....	38
ABBILDUNG 3-25: EINTEILUNG DER EINFLUSSGRÖßEN .....	40
ABBILDUNG 3-26: 2 <sup>2</sup> VOLLFAKTORIELLER VERSUCHSPLAN .....	41
ABBILDUNG 3-27: HAUPTEFFEKTE UND WECHSELWIRKUNGEN .....	42
ABBILDUNG 3-28: PARETO DIAGRAMM DER EFFEKTE .....	43
ABBILDUNG 3-29: WAHRSCHEINLICHKEITSNETZ DER EFFEKTE .....	44
ABBILDUNG 3-30: EFFEKTE DER FAKTOREN (HAUPTEFFEKTE) .....	44
ABBILDUNG 3-31: EFFEKTE DER WECHSELWIRKUNGEN .....	45
ABBILDUNG 3-32: 4 IN 1 DIAGRAMM .....	46
ABBILDUNG 3-33: WÜRFELDIAGRAMM .....	46
ABBILDUNG 4-1: EINGABEMASKE DER LRS-MASCHINE .....	48
ABBILDUNG 4-2: AXIALE VERKÜRZUNG - PROBE 14 (VV).....	50
ABBILDUNG 4-3: ISTKRAFT STAUCHZYLINDER - PROBE 14 (VV) .....	51
ABBILDUNG 4-4: AMPLITUDE - PROBE 14 (VV) .....	51
ABBILDUNG 4-5: ISTKRAFT PULS - PROBE 14 (VV).....	52
ABBILDUNG 4-6: KRAFT - AXIALE VERKÜRZUNG - PROBE 14 (VV).....	52
ABBILDUNG 4-7: KETTENHALBGLIEDER .....	53
ABBILDUNG 4-8: KETTENVOLLGLIEDER .....	53
ABBILDUNG 4-9: WICHTIGSTEN MABE (LINKS) & KETTE (RECHTS) .....	54
ABBILDUNG 5-1: SPIEGELREFLEXKAMERA NIKON D50 .....	55
ABBILDUNG 5-2: PROBENENTNAHME FÜR MIKROSKOPIE UND HÄRTEMESSUNG.....	56
ABBILDUNG 5-3: EINBETTMASCHINE STRUERS CITOPRESS-20 .....	56
ABBILDUNG 5-4: HAARTROCKNER (LINKS), SCHLEIFMASCHINE STRUERS (RECHTS) .....	57
ABBILDUNG 5-5: ULTRASCHALLREINIGER BANDELIN SONOREX RK 106S.....	57
ABBILDUNG 5-6: EINGEBETTETE PROBE NACH DEM ÄTZEN.....	58
ABBILDUNG 5-7: LICHTMIKROSKOP ZEISS OBSERVER.Z1M .....	58
ABBILDUNG 5-8: BEREICHE DER MIKROSKOPIE .....	59
ABBILDUNG 5-9: MIKROSKOPIE - POSITION 1 .....	59
ABBILDUNG 5-10: MIKROSKOPIE - POSITION 4 .....	59
ABBILDUNG 5-11: MIKROSKOPIE - POSITION 3 .....	59



ABBILDUNG 5-12: HÄRTEPRÜFMASCHINE EMCO-TEST M1C 010 .....	60
ABBILDUNG 5-13: HÄRTEMESSUNG MIT HV10.....	61
ABBILDUNG 5-14: HÄRTEMESSUNG MIT HV1.....	62
ABBILDUNG 5-15: BESTIMMUNG DER SCHWEIßNAHTBREITE .....	62
ABBILDUNG 5-16: ZUGPRÜFMASCHINE ZWICK/ROELL RMC 100 MIT EINGESPANNTER PROBE .....	63
ABBILDUNG 5-17: PROBENENTNAHME FÜR DEN ZUGVERSUCH .....	64
ABBILDUNG 5-18: ZUGPROBE NACH NORM DIN 50125 [37] .....	64
ABBILDUNG 5-19: RASTERELEKTRONENMIKROSKOP LEO 1450 VP .....	65
ABBILDUNG 5-20: STEREO MIKROSKOP DISCOVERY.V20 .....	65
ABBILDUNG 5-21: WECHSELWIRKUNG DER ELEKTRONEN MIT DER PROBE [38] .....	66
ABBILDUNG 5-22: KONTRASTENTSTEHUNG BEI SE [38] .....	66
ABBILDUNG 5-23: PROBENENTNAHME NACH DER WÄRMEBEHANDLUNG .....	67
ABBILDUNG 6-1: ZUGPROBE DES GRUNDWERKSTOFFS .....	69
ABBILDUNG 6-2: KRAFT-WEG-DIAGRAMM - GRUNDWERKSTOFF .....	69
ABBILDUNG 6-3: ZTU-SCHAUBILD FÜR KONTINUIERLICHE ABKÜHLUNG [40] .....	71
ABBILDUNG 6-4: WÄRMEBEHANDELTE PROBEN DES VORVERSUCHS.....	71
ABBILDUNG 6-5: GESCHWEIßTES KETTENGLIED.....	72
ABBILDUNG 6-6: TEMPERATUR - ZEIT VERLAUF BEIM VERGÜTEN [41] .....	73
ABBILDUNG 7-1: ISHIKAWA DIAGRAMM; ROT EINGEZEICHNET SIND DIE UNTERSUCHTEN PARAMETER .....	74
ABBILDUNG 7-2: PARETO DIAGRAMM - VORVERSUCH - SCHWEIßGRAT .....	77
ABBILDUNG 7-3: PARETO DIAGRAMM - VORVERSUCH – SCHWEIßGRAT .....	78
ABBILDUNG 7-4: WECHSELWIRKUNG - VORVERSUCH - SCHWEIßGRAT .....	78
ABBILDUNG 7-5: 3D-STREUDIAGRAMM - VORVERSUCH - SCHWEIßGRAT .....	79
ABBILDUNG 7-6: WÜRFELDIAGRAMM - VORVERSUCH – SCHWEIßGRAT .....	80
ABBILDUNG 7-7: WÜRFELDIAGRAMM - VORVERSUCH – SCHWEIßGRAT .....	80
ABBILDUNG 7-8: PARETO DIAGRAMM - VORVERSUCH - REIBZEIT .....	81
ABBILDUNG 7-9: PARETO DIAGRAMM - VORVERSUCH - REIBZEIT .....	81
ABBILDUNG 7-10: WECHSELWIRKUNG - VORVERSUCH - REIBZEIT.....	82
ABBILDUNG 7-11: 3D-STREUDIAGRAMM - VORVERSUCH - REIBZEIT .....	82
ABBILDUNG 7-12: WIRKUNGSFLÄCHENDIAGRAMM - VORVERSUCH - REIBZEIT .....	83
ABBILDUNG 7-13: KONTURDIAGRAMM - VORVERSUCH – REIBZEIT .....	83
ABBILDUNG 7-14: WECHSELWIRKUNG - VORVERSUCH – REIBZEIT .....	84
ABBILDUNG 7-15: WÜRFELDIAGRAMM - VORVERSUCH – REIBZEIT .....	84
ABBILDUNG 7-16: PARETO DIAGRAMM - VORVERSUCH - SCHWEIßNAHTBREITE.....	85
ABBILDUNG 7-17: PARETO DIAGRAMM - VORVERSUCH - SCHWEIßNAHTBREITE.....	85
ABBILDUNG 7-18: WECHSELWIRKUNG - VORVERSUCH – SCHWEIßNAHTBREITE .....	86
ABBILDUNG 7-19: WÜRFELDIAGRAMM - VORVERSUCH – SCHWEIßNAHTBREITE .....	87
ABBILDUNG 7-20: 3D-STREUDIAGRAMM - VORVERSUCH - SCHWEIßNAHTBREITE .....	87
ABBILDUNG 7-21: SCHWEIßNAHTBREITE / AMPLITUDE - VORVERSUCH.....	88
ABBILDUNG 7-22: SCHWEIßNAHTBREITE / FREQUENZ - VORVERSUCH .....	88
ABBILDUNG 7-23: SCHWEIßNAHTBREITE / REIBKRAFT - VORVERSUCH .....	89
ABBILDUNG 7-24: SCHWEIßNAHTBREITE / REIBZEIT - VORVERSUCH .....	89
ABBILDUNG 7-25: SCHWEIßNAHTBREITE / ZUGFESTIGKEIT - VORVERSUCH .....	90
ABBILDUNG 7-26: SCHWEIßNAHTBREITE / POWER INPUT – VORVERSUCH.....	90
ABBILDUNG 7-27: PARETO DIAGRAMM - VORVERSUCH – MAXIMALE HÄRTE .....	91
ABBILDUNG 7-28: WÜRFELDIAGRAMM - VORVERSUCH – MAXIMALE HÄRTE .....	91
ABBILDUNG 7-29: PARETO DIAGRAMM - VORVERSUCH - ZUGFESTIGKEIT.....	92
ABBILDUNG 7-30: PARETO DIAGRAMM - VORVERSUCH - ZUGFESTIGKEIT .....	93
ABBILDUNG 7-31: WAHRSCHEINLICHKEITSNETZ DER EFFEKTE - VORVERSUCH - ZUGFESTIGKEIT .....	93
ABBILDUNG 7-32: WECHSELWIRKUNG - VORVERSUCH - ZUGFESTIGKEIT .....	94
ABBILDUNG 7-33: WECHSELWIRKUNG - VORVERSUCH - ZUGFESTIGKEIT .....	94
ABBILDUNG 7-34: 3D-STREUDIAGRAMM - VORVERSUCH – ZUGFESTIGKEIT .....	95
ABBILDUNG 7-35: STREUDIAGRAMM - VORVERSUCH - ZUGFESTIGKEIT .....	95
ABBILDUNG 7-36: WÜRFELDIAGRAMM - VORVERSUCH - ZUGFESTIGKEIT .....	96
ABBILDUNG 7-37: EINFLUSS DER WEICHEN ZONE AUF DIE ZUGFESTIGKEIT [42] .....	97
ABBILDUNG 7-38: PARETO DIAGRAMM - VORVERSUCH - WEZ LINKS.....	98

ABBILDUNG 7-39: 4 IN 1 DIAGRAMM - VORVERSUCH - WEZ LINKS .....	98
ABBILDUNG 7-40: HAUPTEFFEKTE - VORVERSUCH - WEZ LINKS .....	99
ABBILDUNG 7-41: WÜRFELDIAGRAMM - VORVERSUCH - WEZ LINKS .....	99
ABBILDUNG 7-42: PARETO DIAGRAMM - VORVERSUCH - WEZ RECHTS .....	100
ABBILDUNG 7-43: HAUPTEFFEKTE - VORVERSUCH - WEZ RECHTS .....	100
ABBILDUNG 7-44: WECHSELWIRKUNGEN - VORVERSUCH - WEZ RECHTS .....	101
ABBILDUNG 7-45: WÜRFELDIAGRAMM - VORVERSUCH - WEZ RECHTS .....	101
ABBILDUNG 7-46: VORVERSUCH - ZUGFESTIGKEIT / SCHWEIßGRAT .....	102
ABBILDUNG 8-1: PARAMETERWÜRFEL - HAUPTVERSUCH - NIEDRIGE EINSTELLUNGEN .....	103
ABBILDUNG 8-2: PARAMETERWÜRFEL - HAUPTVERSUCH - HOHE EINSTELLUNGEN .....	104
ABBILDUNG 8-3: PARETO DIAGRAMM – HAUPTVERSUCH – NIEDRIGE EINSTELLUNG - ZUGFESTIGKEIT .....	105
ABBILDUNG 8-4: PARETO DIAGRAMM – HAUPTVERSUCH – NIEDRIGE EINSTELLUNG - ZUGFESTIGKEIT .....	105
ABBILDUNG 8-5: HAUPTEFFEKT – HAUPTVERSUCH – NIEDRIGE EINSTELLUNG - ZUGFESTIGKEIT .....	106
ABBILDUNG 8-6: WÜRFELDIAGRAMM - HAUPTVERSUCH - NIEDRIGE EINSTELLUNG - ZUGFESTIGKEIT .....	106
ABBILDUNG 8-7: KONTURDIAGRAMM - HAUPTVERSUCH - NIEDRIGE EINSTELLUNG - ZUGFESTIGKEIT .....	107
ABBILDUNG 8-8: PARETO DIAGRAMM - HAUPTVERSUCH - NIEDRIGE EINSTELLUNG - SCHWEIßGRAT .....	107
ABBILDUNG 8-9: HAUPTEFFEKT - HAUPTVERSUCH - NIEDRIGE EINSTELLUNG - SCHWEIßGRAT .....	108
ABBILDUNG 8-10: KONTURDIAGRAMM - HAUPTVERSUCH - NIEDRIGE EINSTELLUNG - SCHWEIßGRAT .....	108
ABBILDUNG 8-11: WÜRFELDIAGRAMM - HAUPTVERSUCH - NIEDRIGE EINSTELLUNG - SCHWEIßGRAT .....	109
ABBILDUNG 8-12: PARETO DIAGRAMM - HAUPTVERSUCH - NIEDRIGE EINSTELLUNG - REIBZEIT .....	109
ABBILDUNG 8-13: PARETO DIAGRAMM - HAUPTVERSUCH - NIEDRIGE EINSTELLUNG - REIBZEIT .....	110
ABBILDUNG 8-14: HAUPTEFFEKT - HAUPTVERSUCH - NIEDRIGE EINSTELLUNG - REIBZEIT .....	110
ABBILDUNG 8-15: WECHSELWIRKUNG - HAUPTVERSUCH - NIEDRIGE EINSTELLUNG – REIBZEIT .....	111
ABBILDUNG 8-16: WÜRFELDIAGRAMM - HAUPTVERSUCH - NIEDRIGE EINSTELLUNG – REIBZEIT .....	111
ABBILDUNG 8-17: PARETO DIAGRAMM - HAUPTVERSUCH - HOHE EINSTELLUNG – ZUGFESTIGKEIT .....	112
ABBILDUNG 8-18: WECHSELWIRKUNG - HAUPTVERSUCH - HOHE EINSTELLUNG - ZUGFESTIGKEIT .....	113
ABBILDUNG 8-19: WÜRFELDIAGRAMM - HAUPTVERSUCH - HOHE EINSTELLUNG – ZUGFESTIGKEIT .....	113
ABBILDUNG 8-20: PARETO DIAGRAMM - HAUPTVERSUCH - HOHE EINSTELLUNG – SCHWEIßGRAT .....	114
ABBILDUNG 8-21: WECHSELWIRKUNG - HAUPTVERSUCH - HOHE EINSTELLUNG - SCHWEIßGRAT .....	114
ABBILDUNG 8-22: KONTURDIAGRAMM - HAUPTVERSUCH - HOHE EINSTELLUNG – SCHWEIßGRAT .....	115
ABBILDUNG 8-23: WÜRFELDIAGRAMM - HAUPTVERSUCH - HOHE EINSTELLUNG - SCHWEIßGRAT .....	115
ABBILDUNG 8-24: PARETO DIAGRAMM - HAUPTVERSUCH - HOHE EINSTELLUNG - REIBZEIT .....	116
ABBILDUNG 8-25: PARETO DIAGRAMM - HAUPTVERSUCH - HOHE EINSTELLUNG - REIBZEIT .....	116
ABBILDUNG 8-26: WECHSELWIRKUNG - HAUPTVERSUCH - HOHE EINSTELLUNG - REIBZEIT .....	117
ABBILDUNG 8-27: WIRKUNGSFLÄCHENDIAGRAMM - HAUPTVERSUCH - HOHE EINSTELLUNG – REIBZEIT .....	117
ABBILDUNG 8-28: WÜRFELDIAGRAMM - HAUPTVERSUCH - HOHE EINSTELLUNG - REIBZEIT .....	117
ABBILDUNG 9-1: ZUSAMMENHANG ZWISCHEN ZUGFESTIGKEIT UND POWER INPUT AUS DEN VORVERSUCHEN .....	118
ABBILDUNG 9-2: SCHWEIßGRAT / AMPLITUDE - POWER INPUT .....	120
ABBILDUNG 9-3: POWER INPUT / FREQUENZ BEI 0,92 MM AMPLITUDE [10] .....	121
ABBILDUNG 9-4: POWER INPUT / FREQUENZ BEI 2 MM AMPLITUDE .....	121
ABBILDUNG 9-5: REIBKRAFT / FREQUENZ BEI 2 MM AMPLITUDE .....	122
ABBILDUNG 9-6: REIBKRAFT / FREQUENZ BEI 2,5 MM AMPLITUDE .....	122
ABBILDUNG 9-7: SPEZIFISCHE WÄRMEEINBRINGUNG / FREQUENZ .....	123
ABBILDUNG 9-8: SPEZIFISCHE WÄRMEEINBRINGUNG / FREQUENZ AB 2 MM AMPLITUDE .....	123
ABBILDUNG 9-9: SPEZIFISCHE WÄRMEEINBRINGUNG / REIBKRAFT .....	124
ABBILDUNG 9-10: ZUGFESTIGKEIT / POWER INPUT .....	125
ABBILDUNG 9-11: ZUGFESTIGKEIT / AMPLITUDE - POWER INPUT .....	126
ABBILDUNG 9-12: REIBZEIT / AMPLITUDE - POWER INPUT .....	127
ABBILDUNG 9-13: REIBZEIT / REIBKRAFT/AMPLITUDE – POWER INPUT .....	128
ABBILDUNG 10-1: BRUCHPROBE FÜR REM UNTERSUCHUNG .....	129
ABBILDUNG 10-2: PROBE 14 (VV) - MAKROAUFNAHME (LINKS) UND STEREOMIKROSKOPBILD (RECHTS) .....	130
ABBILDUNG 10-3: PROBE 14 VV - REM .....	131
ABBILDUNG 10-4: PROBE 14 VV - POSITION 1 – 100x (LINKS), 500x (MITTE), 1000x (RECHTS) .....	131
ABBILDUNG 10-5: PROBE 14 VV - POSITION 2 – 100x (LINKS), 500x (MITTE), 1000x (RECHTS) .....	131
ABBILDUNG 10-6: PROBE 26 (VV MIT 200° ANGEL.) - REM .....	132
ABBILDUNG 10-7: PROBE 26 (VV ANGEL.) - POSITION 1 – 100x (LINKS), 500x (MITTE), 1000x (RECHTS) .....	132



ABBILDUNG 10-8: PROBE 26 (VV ANGEL.) – POSITION 2 – 100X (LINKS), 500X (MITTE), 1000X (RECHTS).....	132
ABBILDUNG 11-1: ZUGFESTIGKEIT / SCHWEIßGRAT .....	134
ABBILDUNG 11-2: HÄRTE / SCHWEIßGRAT FÜR NICHT ANGELASSENE PROBEN .....	134
ABBILDUNG 11-3: SCHWEIßNAHTBREITE / SCHWEIßGRAT .....	135
ABBILDUNG 11-4: SCHWEIßNAHTBREIT / REIBZEIT .....	135
ABBILDUNG 12-1: REIBZEIT / REIBGESCHWINDIGKEIT .....	136
ABBILDUNG 12-2: ARBEITSBEREICH IN ABHÄNGIGKEIT VON REIBZEIT UND REIBDRUCK [20] .....	137
ABBILDUNG 12-3: ARBEITSBEREICH IN ABHÄNGIGKEIT VON SCHWINGWEITE UND REIBDRUCK [20].....	137
ABBILDUNG 12-4: RADIERGUMMIEFFEKT [20].....	137
ABBILDUNG 12-5: REIBZEIT / REIBKRAFT .....	138
ABBILDUNG 12-6: AMPLITUDE / REIBKRAFT .....	138
ABBILDUNG 13-1: STREUDIAGRAMM - ZUGFESTIGKEIT .....	139
ABBILDUNG 13-2: STREUDIAGRAMM - WÄRMEBEHANDLUNG .....	140
ABBILDUNG 13-3: WIRKUNGSFLÄCHENDIAGRAMM - ZUGFESTIGKEIT .....	141
ABBILDUNG 13-4: 3D STREUDIAGRAMM - ZUGFESTIGKEIT .....	141
ABBILDUNG 13-5: 3D-STREUDIAGRAMM - SCHWEIßGRAT .....	142
ABBILDUNG 13-6: 3D-STREUDIAGRAMM - REIBZEIT .....	142
ABBILDUNG 13-7: ZUGFESTIGKEIT / PROBE - BESTÄTIGUNGSVERSUCH .....	144
ABBILDUNG 13-8: REIBZEIT / PROBE - BESTÄTIGUNGSVERSUCH .....	145
ABBILDUNG 13-9: SCHWEIßGRAT DES BESTÄTIGUNGSVERSUCHS – GERINGE/HOHE REIBZEIT .....	146
ABBILDUNG 14-1: ZUGFESTIGKEIT / POWER INPUT DER DREI VARIANTEN.....	148
ABBILDUNG 14-2: ZUGFESTIGKEIT / POWER INPUT DER WÄRMENACHBEHANDELTEN PROBEN .....	148
ABBILDUNG 21-1: BEMÄßTES KETTENVOLLGLIED.....	160
ABBILDUNG 21-2: BEMÄßTES KETTENHALBGLIED .....	161
ABBILDUNG 21-3: EINGABEMASKE DER LRS-MASCHINE .....	167
ABBILDUNG 21-4: AXIALE VERKÜRZUNG - PROBE 14 (VV).....	167
ABBILDUNG 21-5: ISTKRAFT STAUCHZYLINDER - PROBE 14 (VV) .....	168
ABBILDUNG 21-6: AMPLITUDE - PROBE 14 (VV) .....	168
ABBILDUNG 21-7: ISTKRAFT PULS - PROBE 14 (VV).....	169
ABBILDUNG 21-8: KRAFT - WEG – DIAGRAMM VOM ZUGVERSUCH - PROBE 14 (VV) .....	169
ABBILDUNG 21-9: HÄRTEMESSUNG MIT HV10 - PROBE 14 (VV) .....	170
ABBILDUNG 21-10: HÄRTEMESSUNG MIT HV1 - PROBE 14 (VV) .....	170
ABBILDUNG 21-11: MIKROSKOPIE - PROBE 14 (VV) FÜR POSITIONEN 1-7 .....	171
ABBILDUNG 21-12: ÜBERSICHTSBILDER FÜR REM - PROBE 14 (VV) .....	172
ABBILDUNG 21-13: REM UNTERSUCHUNG - PROBE 14 (VV): OBEN: POSITION 1, UNTEN: POSITION 2 .....	172
ABBILDUNG 21-14: SCHWEIßGRAT - PROBE 14 (VV) .....	172

## 18 Tabellenverzeichnis

TABELLE 3-1: 2 <sup>3</sup> VOLLFAKTORIELLEN VERSUCHSPLANS.....	39
TABELLE 3-2: EFFEKTE UND ZIELGRÖßEN.....	41
TABELLE 4-1: PARAMETER DER PROBE 14 DES VORVERSUCHS .....	49
TABELLE 6-1: CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG [%] DES GRUNDWERKSTOFFES [40].....	68
TABELLE 6-2: MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN DES GRUNDWERKSTOFFES (VERGÜTET) [40] .....	68
TABELLE 6-3: PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN DES GRUNDWERKSTOFFES BEI 20°C [40] .....	70
TABELLE 6-4: WÄRMEAUDEHNUNG A [ $10^{-6} \text{ m/m.K}$ ] DES GRUNDWERKSTOFFES ZWISCHEN 20 °C UND 600 °C [40].....	70
TABELLE 6-5: ELASTIZITÄTSMODUL [ $10^3 \text{ N/MM}^2$ ] DES GRUNDWERKSTOFFES [40].....	70
TABELLE 7-1: PARAMETERFENSTER DES VORVERSUCHS .....	74
TABELLE 7-2: REIHENFOLGE DES VORVERSUCHS .....	76
TABELLE 7-3: BESTE EINSTELLUNGEN FÜR EINEN GUTEN SCHWEIßGRAT .....	79
TABELLE 7-4: VORVERSUCH - BESTE PARAMETERKOMBINATION.....	102
TABELLE 8-1: PARAMETERFENSTER DES HAUPTVERSUCHS MIT NIEDRIGEN EINSTELLUNGEN.....	103
TABELLE 8-2: PARAMETERFENSTER DES HAUPTVERSUCHS MIT HOHEN EINSTELLUNGEN .....	104
TABELLE 8-3: REIHENFOLGE DES HAUPTVERSUCHS MIT NIEDRIGEN EINSTELLUNGEN (ST=88 KN).....	104
TABELLE 8-4: REIHENFOLGE DES HAUPTVERSUCHS MIT HOHEN EINSTELLUNGEN (F=70 Hz) .....	112
TABELLE 9-1: VERSUCHE BEI POWER INPUT $\approx 40 \text{ W/MM}^2$ (1. ZEILE AUS VORVERSUCH) .....	119
TABELLE 9-2: VERSUCHE BEI POWER INPUT $\approx 56 \text{ W/MM}^2$ (1. ZEILE AUS VORVERSUCH) .....	119
TABELLE 9-3: VERSUCHE BEI POWER INPUT $\approx 70 \text{ W/MM}^2$ (1. ZEILE AUS VORVERSUCH) .....	119
TABELLE 9-4: SCHWEIßGRATQUALITÄT BEI PI $\approx 56 \text{ W/MM}^2$ .....	120
TABELLE 9-5: PROBEN MIT EINER ZUGFESTIGKEIT $< 1600 \text{ N/MM}^2$ .....	126
TABELLE 10-1: REM PROBEN: AUSWAHLKRITERIEN .....	129
TABELLE 10-2: REM PROBEN: SCHWEIßPARAMETER.....	130
TABELLE 13-1: BESTE PARAMETER FÜR ZUGFESTIGKEIT .....	141
TABELLE 13-2: PROBE 14 VV - PARAMETER.....	143
TABELLE 13-3: PROBE 14 VV - MESSWERTE .....	143
TABELLE 13-4: ZUGFESTIGKEITSWERTE DES BESTÄTIGUNGSVERSUCHS .....	144
TABELLE 13-5: REIBZEITEN DES BESTÄTIGUNGSVERSUCHS.....	145
TABELLE 14-1: NACH DEM SCHWEIßEN WÄRMEBEHANDELTE PROBEN.....	147

## 19 Formelverzeichnis

FORMEL 3-1: SPEZIFISCHER POWER INPUT PARAMETER (VAIRIS) [10] .....	25
FORMEL 3-2: EINHEITENGLEICHUNG ZUM POWER INPUT (VAIRIS) .....	25
FORMEL 3-3: POWER INPUT (VAIRIS UND FROST) [13] .....	25
FORMEL 3-4: POWER INPUT (WANJARA UND JHAZI) .....	26
FORMEL 3-5: SPEZIFISCHER POWER INPUT .....	27
FORMEL 3-6: SPEZIFISCHER POWER INPUT W .....	27
FORMEL 3-7: SPEZIFISCHER POWER INPUT .....	27
FORMEL 3-8: POWER INPUT (MA, LI UND YANG) .....	28
FORMEL 3-9: VERWENDETER MAXIMALER SPEZIFISCHER POWER INPUT .....	28
FORMEL 3-10: BERECHNUNG DER RESIDUEN .....	45
FORMEL 3-11: ARITHMETISCHER MITTELWERT .....	47
FORMEL 3-12: STANDARDABWEICHUNG EINER STICHPROBE.....	47
FORMEL 5-1: BERECHNUNG DER MITTLEREN DIAGONALE [36] .....	60
FORMEL 5-2: BESTIMMUNG DER HÄRTE NACH VICKERS [36] .....	60

## 20 Literaturverzeichnis

1. Mucic, K., N. Enzinger, and F. Fuchs, *Lineares Reibschweißen von Kettengliedern*, 2011: pewag Congress.
2. [http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/TU\\_Graz/Einrichtungen/Institute/Homepages/i3030/join4plus](http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/TU_Graz/Einrichtungen/Institute/Homepages/i3030/join4plus). *K-Projekt Network of Excellence for Joining Technologies JOIN4+*. [cited 2012 1.8.].
3. Bhamji, I., et al., *Linear friction welding of AISI 316L stainless steel*. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2010. 528(2): p. 680-690.
4. Frank, T. *Grundsatzuntersuchungen zum Orbitalreibschweißen des unlegierten Baustahls S355J2*. [http://www.raiser.de/download/innovationspreis/bewerber2011/frank\\_trommer.pdf](http://www.raiser.de/download/innovationspreis/bewerber2011/frank_trommer.pdf) [cited 2012 7.6.].
5. <http://www.slv-muenchen.de/aus-und-weiterbildung/schweissen/reibschweissen/>. [cited 2012 17.6.].
6. Dilthey, U., *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1: Schweiß- und Schneidtechnologien* 2006: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
7. <http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/faqs/process-faqs/faq-what-is-orbital-friction-welding/>. 1999 [cited 2012 17.6.].
8. Maalekian, M., et al., *Comparative analysis of heat generation in friction welding of steel bars*. Acta Materialia, 2008. 56(12): p. 2843-2855.
9. Addison, A. and P.L. Threadgill, *Initial studies of linear friction welding of a C-Mn steel*. Welding and Cutting 9, 2010. 6: p. 364-370.
10. Vairis, A., *High frequency linear friction welding*, in *Mechanical Engineering* 1997, University of Bristol, Faculty of Engineering: University of Bristol.
11. Bhamji, I., et al., *Solid state joining of metals by linear friction welding: a literature review*. Materials Science and Technology, 2011. 27(1): p. 2-12.
12. Mateo, A., et al., *Welding repair by linear friction in titanium alloys*. Materials Science and Technology, 2009. 25(7): p. 905-913.
13. Vairis, A. and M. Frost, *High frequency linear friction welding of a titanium alloy*. Wear, 1998. 217(1): p. 117-131.
14. Vairis, A. and M. Frost, *On the extrusion stage of linear friction welding of Ti6Al4V*. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 1999. 271(1-2): p. 477-484.
15. Ma, T.J., X. Chen, and W.Y. Li, *Effect of Process Parameters on Welding Variables during Linear Friction Welding of Ti-6Al-4V Alloy*. Advanced Materials Research, 2011. Advanced Manufacturing Technology: p. 979-983.
16. Wanjara, P. and M. Jahazi, *Linear friction welding of Ti-6Al-4V: Processing, microstructure, and mechanical-property inter-relationships*. Metallurgical and Materials Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science, 2005. 36A(8): p. 2149-2164.
17. Ma, T.J., W.Y. Li, and S.Y. Yang, *Impact toughness and fracture analysis of linear friction welded Ti-6Al-4V alloy joints*. Materials & Design, 2009. 30(6): p. 2128-2132.
18. Ma, T.J., et al., *Linear friction welding of Ti-6Al-4V alloy: Microstructure characterization*. Advanced Welding and Micro Joining / Packaging for the 21st Century, 2008. 580-582: p. 405-408.
19. Dalgaard, E., *Evolution of Microstructure, Microtexture and Mechanical Properties in Linear Friction Welded Titanium Alloys* 2011.
20. Nentwig, A., Appel, L., *Untersuchungen zum Linearreibschweißen von Metallen*. Schweißen und Schneiden, 1995. 8: p. 648-653.



21. Rotundo, F., et al., *Mechanical and microstructural characterization of 2124Al/25 vol.%SiC(p) joints obtained by linear friction welding (LFW)*. Composites Part a-Applied Science and Manufacturing, 2010. 41(9): p. 1028-1037.
22. Wanjara, P., et al., *Process Optimization for Linear Friction Welding of Ti6Al4V*. Trends in Welding Research, Proceedings, 2006: p. 855-860.
23. Sathiya, P., S. Aravindan, and A. Noorul Haq, *Effect of friction welding parameters on mechanical and metallurgical properties of ferritic stainless steel*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007. 31(11): p. 1076-1082.
24. Romero, J., et al., *Effect of the forging pressure on the microstructure and residual stress development in Ti-6Al-4V linear friction welds*. Acta Materialia, 2009. 57(18): p. 5582-5592.
25. Attallah, M.M., et al., *Influence of Linear Friction Welding Parameters on the Residual Stress Development in Ti-6246*. Trends in Welding Research, 2009: p. 751-757.
26. Bauer, C., *Investigations on linear friction welded chain links of 30CrNiMo8*, in *Institute for Material Science and Welding2011*, Graz University of Technology: Graz.
27. Li, W.Y., et al., *Effect of friction time on flash shape and axial shortening of linear friction welded 45 steel*. Materials Letters, 2008. 62(2): p. 293-296.
28. Kleppmann, W., *Taschenbuch Versuchsplanung2009*, München Wien: Carl Hanser Verlag.
29. [http://www.tqu-group.com/vorlesungen/VorlFrank/HS\\_3-02%20DoE-Philosophie.pdf](http://www.tqu-group.com/vorlesungen/VorlFrank/HS_3-02%20DoE-Philosophie.pdf). [cited 2012 18.6.].
30. <http://www.scribd.com/doc/38751993/Statistical-Design>. *Statistische Versuchsplanung*. [cited 2012 21.5.].
31. <http://www.ms.uni-bremen.de/download/StatVersuchsplanung.pdf>. *Eine Einführung in die Statistische Versuchsplanung*. 2001 [cited 2012 21.5.].
32. <http://www.versuchsmethodik.de/plaene/plaene.htm>. [cited 2012 17.6.].
33. [http://www.wzl.rwth-aachen.de/de/ebecb2e7d199a686c125736f00454c10/08\\_v\\_deu.pdf](http://www.wzl.rwth-aachen.de/de/ebecb2e7d199a686c125736f00454c10/08_v_deu.pdf). *Vorlesung Qualitätsmanagement*. 2008 [cited 2012 16.6.].
34. <http://www.imtek.de/content/pdf/public/2002/sfb570-2002.pdf>. *Eine Einführung in die statistische Versuchsplanung*. [cited 2012 21.5.].
35. Lichtenegger, E.J., *Statistische Versuchsplanung zur Optimierung der Parametrisierung von Klebprozessen*, in *Institut für Statistik2007*, Technische Universität Graz: Graz.
36. [http://de.wikipedia.org/wiki/H%C3%A4rte#H.C3.A4rtepr.C3.BCfung\\_nach\\_Vickers\\_.28HV.29](http://de.wikipedia.org/wiki/H%C3%A4rte#H.C3.A4rtepr.C3.BCfung_nach_Vickers_.28HV.29). [cited 2012 17.6.].
37. [http://www.tuv-akademie.at/fileadmin/dateien/T%C3%BCv\\_Shop/TUV\\_Werkstoffpruefung\\_Leseprobe.pdf](http://www.tuv-akademie.at/fileadmin/dateien/T%C3%BCv_Shop/TUV_Werkstoffpruefung_Leseprobe.pdf). *Werkstoffprüfung*. 2011 [cited 2012 16.6.].
38. [http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/Files/i5110/files/Lehre/Praktika/FP/Unterlagen\\_Prakt\\_Elektronenm.\\_WS\\_2011\\_12.pdf](http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/Files/i5110/files/Lehre/Praktika/FP/Unterlagen_Prakt_Elektronenm._WS_2011_12.pdf). [cited 2012 17.6.].
39. <http://www.uni-saarland.de/fak7/hartmann/cfn/rasterelektronen.php>. [cited 2012 17.6.].
40. [http://www.bohler-edelstahl.com/buag\\_frontend/download/grade/198/2/V145DE.pdf](http://www.bohler-edelstahl.com/buag_frontend/download/grade/198/2/V145DE.pdf). [cited 15.6.2012].
41. Bargel, H. and G. Schulze, *Werkstoffkunde*. Vol. 9. Auflage. 2005, Berlin: Springer.
42. Maurer W., W. Ernst, R. Rauch, S. Kapl, R. Vallant and N. Enzinger, Numerical simulation on the effect of HAZ softening on static tensile strength of HSLA steel welds, 10 th International Seminar: Numerical Analysis of Weldability, 2012
43. <http://comphys.ethz.ch/mediawiki/index.php/Metalle>. [cited 2012 16.6.].



## 21 Anhang

### 21.1 Fügeile

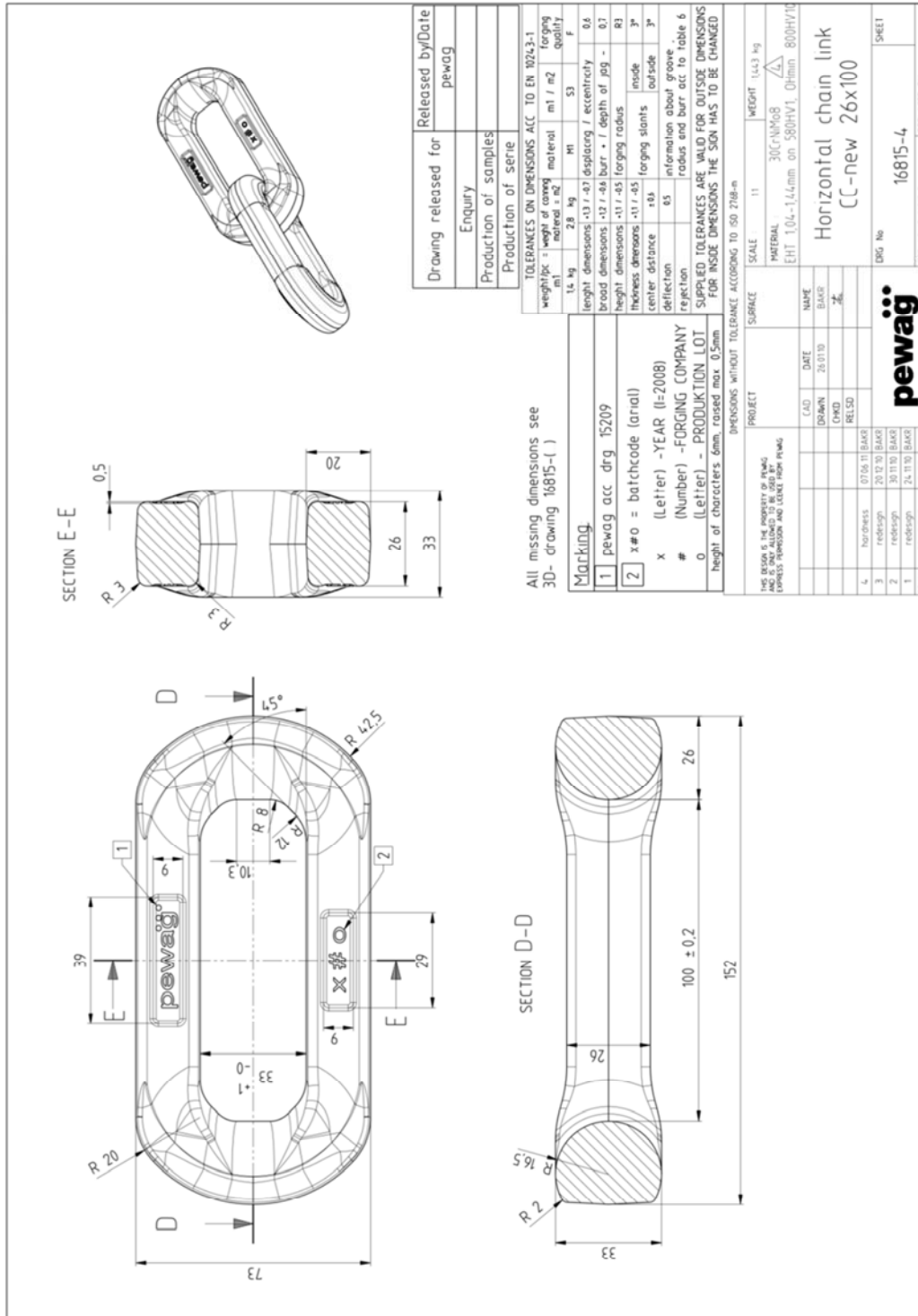


Abbildung 21-1: Bemaßtes Kettenvollglied

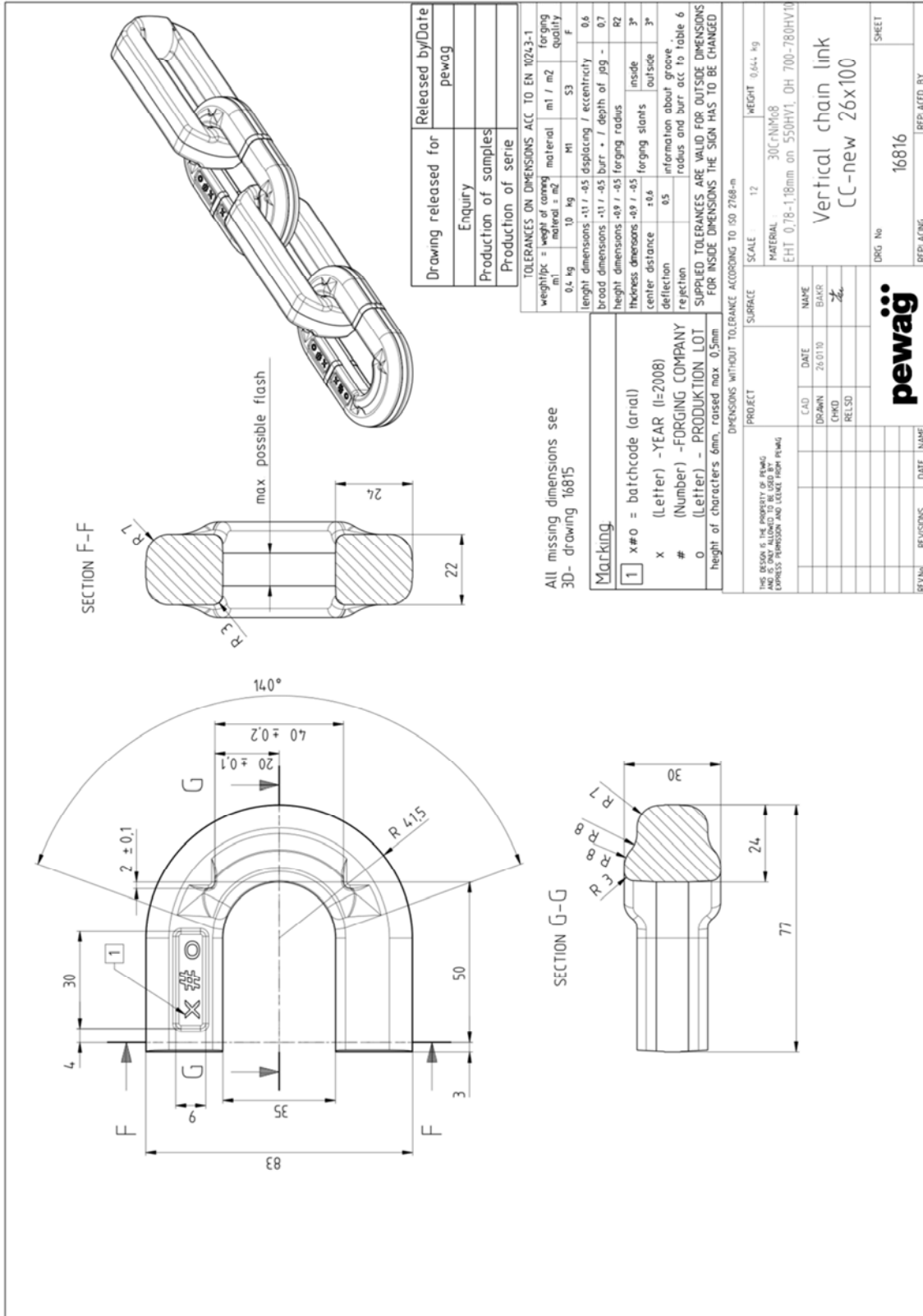


Abbildung 21-2: Bemaßtes Kettenhalbglied

## 21.2 Werkstoff: Datenblatt

**BÖHLER V145**



**BÖHLER V145**

VERGÜTUNGSSTAHL  
HEAT TREATABLE STEEL

**Eigenschaften**  
Cr-Ni-Mn legierter Vergütungsstahl für hohe Festigkeit und Zähigkeitseigenschaften bei großen Vergütungsunterschieden. Durch Mn-Gehalt senkrecht gegen Aislösversprödung.  
Alternative zum konventionell hergestellten BÖHLER V145 EXTRA ist BÖHLER V145 ISOEXTRA, produziert nach dem Elektroslag-Umschmelzverfahren (ESU).

**Properties**  
Cr-Ni-Mn steel for applications requiring high tensile and toughness values, in particular in large cross sections in the quenched and tempered condition. The manganese addition prevents the steel from being susceptible to temper brittleness. The alternative to conventionally melted BÖHLER V145 EXTRA is BÖHLER V145 ISOEXTRA, produced by the Electroslag remelting procedure (ESU).

**Verwendung**  
Bauteile mit hohen Vergütungsunterschieden bei sehr hohen Beanspruchungen im Flugzeugbau, Schwertführung und Maschinenbau, wie zum Beispiel Propellerwellen, Pleuelstangen, Getriebegehäuse, Kurbelwellen, Teile für Fahrzeugteile.  
Wichtiges Schweißstück, wie zum Beispiel Rotoren, Wellen, Saugbojen.  
Ihr wirtschaftlicher Einsatz bei höchster dynamischer Beanspruchung setzt allerdings voraus, dass man bei der Konstruktion der Bauteile auf deren Gestaltfestigkeit Rücksicht nimmt.

**Application**  
Highly stressed components with large cross sections for aircraft, aerospace and mechanical engineering, such as propeller shafts, connecting rods, gear shafts, crankshafts, landing gear components.  
Heavy forgings, such as rotors, shafts and discs.  
For economic performance under severe dynamic stresses, parts must be designed for optimum strength.

Chemische Zusammensetzung (Anhaltswerte in %) / Chemical composition (average %)						
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	NI
0,30	0,30	0,35	2,00	0,35	2,00	2,00

Normen		Standards	
EN / DIN	BS	AFNOR	UNI
< 1.6604 > LW	(B21600)	30C108	(DINrC108)
< 1.6590 >			
1.6590			
1.6586			
1.6586			
31C11M68			
<b>JIS</b>			
- S10M1			

**BÖHLER V145**

**BÖHLER V145**

**Wärmeformgebung**  
**Schneiden:**  
 1050 bis 850°C  
 Langsame Oberflächenkühlung

**Wärmebehandlung**  
**Normalglühen:**  
 850 bis 880°C (Luftabkühlung)

**Weichglühen:**  
 650 bis 700°C  
 Geeignete langsame Oberflächenkühlung.  
 Härten nach dem Weichglühen;  
**max. 248 HB.**

**Spannungsermüdung:**  
 In wärmebehandeltem Zustand ca. 30 bis 50°C unter der Arbeitstemperatur.  
 In geprüften Zustand 600 bis 650°C.  
 Halbdauer mindestens 1 Stunde.

**Härten:**  
 830 bis 860°C (Öl, Polymer)

**Anlassen:**  
 540 bis 660°C (Luftabkühlung)  
 Bei Anlassen soll unmittelbar nach dem Härten ein Weichglühen bei 650°C für 1 Stunde (oder für gleiche Halbdauer mindestens 1 Stunde (siehe Vergleichsdiagramm))

**Nitrieren:**  
 Gas- und Badnitrierung möglich.

**Hot forming**  
**Forging:**  
 1050 to 850°C (1900 to 1560°F)  
 Slow cooling in furnace

**Heat treatment**  
**Normalizing:**  
 850 to 880°C (1560 to 1610°F) / Air cooling

**Annealing:**  
 650 to 720°C (1235 to 1330°F)  
 Controlled, slow cooling in furnace.  
 Hardness after annealing:  
**max. 248 HB.**

**Stress relieving:**  
 In the quenched and tempered condition, approx. 30 - 50°C (85 to 120°F) below tempering temperature. In the annealed condition 600 to 650°C (1110 to 1200°F).  
 Holding time: 1 hour min.

**Hardening:**  
 830 to 860°C (1525 to 1580°F) (Oil, polymer)

**Tempering:**  
 540 to 660°C (1025 to 1220°F) / Air cooling  
 Tempering should immediately follow hardening.  
 Hold time: 1 hour min.  
 (refer to quench and temper chart)

**Nitriding:**  
 The steel joints both gas and bath nitrided.

**Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur**  
 Zustand: verzogen

**Mechanical properties at room temperature**  
 Condition: hardened and tempered

Durchmesser Diameter mm	Streckgrenze Yield strength N/mm <sup>2</sup> min.	Zugfestigkeit Tensile strength N/mm <sup>2</sup> min.	Dehnung A <sub>1</sub> Elongation A <sub>1</sub> % min.		Einsparung Reduction of area		Eichschicht Impact strength (ISO-V) J min.	
			L	Q	L	Q	L	Q
..	≤ 16	1250 - 1450	9	..	40	..	30	..
> 16	≤ 40	1250 - 1450	9	..	40	..	30	..
> 40	≤ 100	1100 - 1300	10	..	45	..	35	..
> 100	≤ 160	1000 - 1200	11	..	50	..	45	..
> 160	≤ 250	900 - 1100	12	..	50	..	45	..

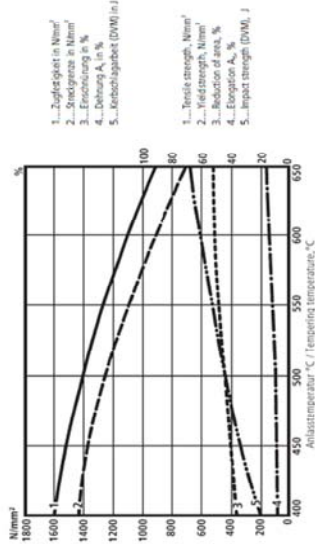
L = Länge, Q = Quer  
 Für andere Produkte oder Abmessungen sind die Werte zu vereinbaren.

**Schweißen**  
 Schwer schweißbar  
 Sollte für Schweißanwendungen nicht verwendet werden.  
 Sollte ein Schweißanwendung erforderlich sein, bitten wir Sie, die Richtlinien des Schweißzusatzwerkstoffherstellers zu beachten.

**Welding**  
 Poor weldability.  
 Should not be used for weldments.  
 If welding cannot be avoided, the instructions of the appropriate welding electrode manufacturer should be sought and followed.

**BÖHLER V145**

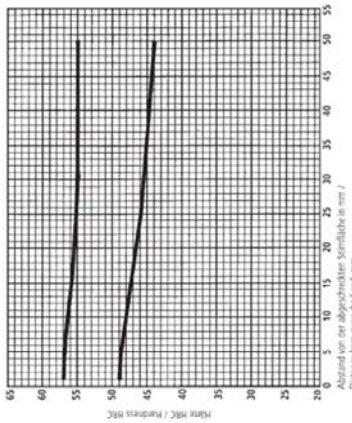
**Vergütungschaubild**  
 Härtemperatur: 850°C (1560°F)  
 Vergütungswärme: Ø 60 mm



1. Zugfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>
2. Streckgrenze in N/mm<sup>2</sup>
3. Erweichung in %
4. Dehnung A, in %
5. Kerbschlagarbeit (DVM) in J

1. Bruchfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>
2. Relativverlängerung in %
3. Reduktion der Querschnittsfläche, %
4. Energiefaktor A, %
5. Impact strength (DVM), J

**Stirnabschreckversuch**  
 Härtemperatur: 850°C

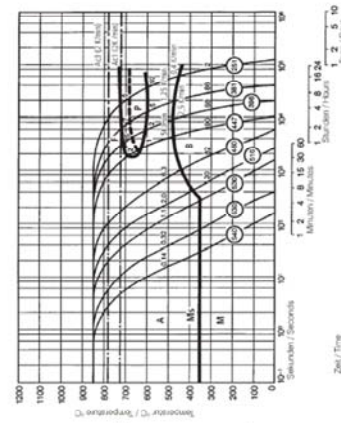


Abstand von der abgeschreckten Stirnfläche in mm / Distance from quenched end, mm

**BÖHLER V145**

**ZTU-Schaubild für kontinuierliche Abkühlung / Continuous cooling CCT curves**

Chemische Zusammensetzung (Abhärtwert in %) / Chemical composition (average %)					
C	Si	Mn	Cr	Mo	M
0,30	0,30	0,50	2,00	0,40	2,00



Austempering temperature: 850°C  
 Härtehart: 15 Mrkmin  
 ○ Härte in HV  
 1... 90 Gefügeanteile in %  
 0,14... 6,3 Abkühlungsparameter, d. h. Abkühlungsdistanz von 800°C bis 500°C in s x 10<sup>-2</sup>  
 5 Körne ... 0,4 Körne Abkühlungsgeschwindigkeit in Körne im Bereich von 800 - 500°C

Austempering temperature: 850°C (1560°F)  
 Holding time: 15 min min  
 ○ Vkörne hartfests  
 1... 90 phase percentages  
 0,14... 6,3 cooling parameter, i.e. duration of cooling from 800 to 500°C (1470 to 1560°F) in s x 10<sup>-2</sup>  
 5 Körne ... 0,4 Körne cooling rate in Körne in the 800 to 500°C (1470 to 1560°F) range

**Gefügemengenschaubild / Quantitative phase diagram**



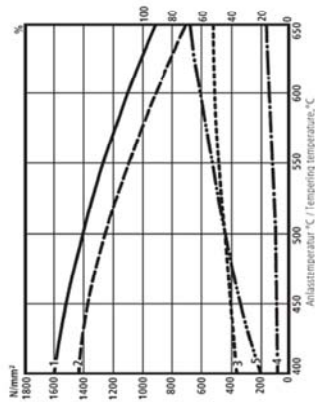
- A..... Austenit / Austenite
- B..... Bainit / Bainite
- M..... Martenit / Martensite
- P..... Perlit / Ferrite

- Wasserabkühlung / Water cooling
- Ölbadabkühlung / Oil cooling
- Luftabkühlung / Air cooling

- 1..... Weichrand / Edge or face
- 2..... Weichkern / Core
- 3..... Jominyprobe
- 3..... Jominy test

**BÖHLER V145**

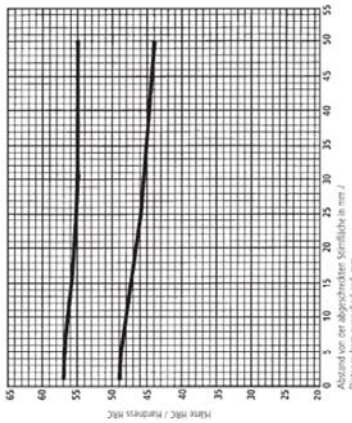
**Quench and temper chart**  
 Härtemperatur: 850°C (1560°F)  
 Quenched air: tempered cross section: Ø 60 mm



1. Zugfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>
2. Streckgrenze in N/mm<sup>2</sup>
3. Erweichung in %
4. Dehnung A, in %
5. Kerbschlagarbeit (DVM) in J

1. Bruchfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>
2. Relativverlängerung in %
3. Reduktion der Querschnittsfläche, %
4. Energiefaktor A, %
5. Impact strength (DVM), J

**Jominy end quench test**  
 Härtemperatur: 850°C (1560°F)



Abstand von der abgeschreckten Stirnfläche in mm / Distance from quenched end, mm



## BÖHLER V145

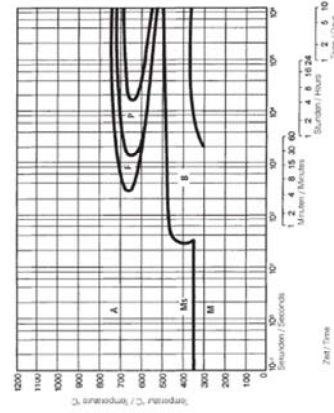
**Bohrer V145**  
(Wärmebehandlungszustand: weigert ca. 1000N/mm<sup>2</sup>, Rotweiss)

Bohrer mit Hartmetall		Schrittgeschwindigkeit, m/min	
Schneidfase mm	0,5 bis 1	1 bis 4	4 bis 8
Vorschub mm/U	0,1 bis 0,3	0,2 bis 0,4	0,3 bis 0,6
BOHLERIT-Hartmetalle	S810, S820	S810, S820, EB10	S820, EB20
ISO-Isorte	P10, P20, M10	P30, M20	P30, P40
Weichschneiden		Schrittgeschwindigkeit, m/min	
Standard 15 min	210 bis 150	160 bis 110	110 bis 80
Gekörnte Hartmetallwerkzeuge	150 bis 110	130 bis 85	90 bis 60
Standard 30 min			
Beschichtete Wendeschneidplatten			
Standard 15 min	bis 120	bis 100	bis 80
BOHLERIT 131	bis 140	bis 100	bis 80
BOHLERIT ROYAL 131	bis 140	bis 100	bis 80
Schneidplatt für gehärtete Hartmetallwerkzeuge	6 bis 12°	6 bis 12°	6 bis 12°
Freiwinkel	6 bis 8°	6 bis 8°	6 bis 8°
Neigungswinkel	0°	-4°	-4°
<b>Drehen mit Schweißbleistahl</b>			
Schneidfase mm	0,5	1	6
Vorschub mm/U	0,1	0,4	0,8
BOHLERIT-Isorte		5700 DN/150-4-3-10	
Schrittgeschwindigkeit, m/min		Schrittgeschwindigkeit, m/min	
Standard 60 min	30 bis 20	20 bis 15	18 bis 10
Spitzenwinkel	8°	8°	8°
Neigungswinkel	4°	4°	4°
<b>Fräsen mit Masseschleifen</b>			
Vorschub mm/U	bis 0,2	Schrittgeschwindigkeit, m/min	
		110 bis 60	70 bis 40
BOHLERIT-SHF 650 P25	150 bis 100	...	
BOHLERIT-SRAD 650 P40	100 bis 60	...	
BOHLERIT ROYAL 131 / 650 P35	130 bis 85	...	
<b>Bohren mit Hartmetall</b>			
Rechtsdrehender Bohrer	3 bis 8	8 bis 20	20 bis 40
Vorschub mm/U	0,02 bis 0,06	0,05 bis 0,12	0,12 bis 0,18
BOHLERIT-TSD-Hartmetalle	HE10X10	HE10X10	HE10X10
Schrittgeschwindigkeit, m/min		Schrittgeschwindigkeit, m/min	
Standard	50 bis 35	50 bis 35	50 bis 35
Spitzenwinkel	115 bis 120°	115 bis 120°	115 bis 120°
Freiwinkel	5°	5°	5°

## BÖHLER V145

**Chemische Zusammensetzung (Anhaltswerte in %)/(Chemical composition (average %))**

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
0,30	0,30	0,50	2,00	0,40	2,00



isothermisches ZTU-Schaubild /  
isothermal TTT curves

Austempering temperature: 850°C  
Holding time: 15 minutes  
Austempering temperature: 850°C (1560°F)  
Holding time: 15 minutes

## BÖHLER V145

Physikalische Eigenschaften	Physical properties
Dichte bei / Density at	20°C (68°F) ..... 7,85 ..... g/cm <sup>3</sup>
Wärmeleitfähigkeit bei / Thermal conductivity at	20°C (68°F) ..... 42,0 ..... W/(m·K)
Spezifische Wärme bei / Specific heat at	20°C (68°F) ..... 460 ..... J/(kg·K)
Spez. elektr. Widerstand bei / Electrical resistivity at	20°C (68°F) ..... 0,19 ..... Ohm·mm <sup>2</sup> /m
Elastizitätsmodul bei / Modulus of elasticity at	20°C (68°F) ..... 210 x 10 <sup>3</sup> ..... N/mm <sup>2</sup>

Wärmeausdehnung zwischen 20°C und ...°C, 10 <sup>-6</sup> m/(m·K) bei / Thermal expansion between 20°C (68°F) and ...°C (°F), 10 <sup>-6</sup> m/(m·K) at			
100°C (212°F)	300°C (572°F)	400°C (752°F)	600°C (1112°F)
11,1	12,1	12,9	13,5
			14,1

Härteanstiegtemperatur bei / Modulus of elasticity, 10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> at			
20°C (68°F)	100°C (212°F)	200°C (392°F)	300°C (572°F)
210	205	195	185
			175
			165
			...

Für Anwendungs- und Verarbeitungsrichtlinien, die in der Produktabrechnung nicht ausdrücklich erwähnt sind, ist in jedem Einzelfall Rücksprache zu halten.

As regards applications and processing steps that are not expressly mentioned in this product description, please contact the customer service in each individual case as required to consult us.

## BÖHLER V145

(Condition hardened and tempered, approx. 1000 N/mm<sup>2</sup>, average values)

Recommendation for machining	
<b>Turning with carbide tipped tools</b>	
depth of cut, mm	1 to 4
feed, mm/rev	0.2 to 0.4
BOHLER grade	SF10, SF20, EB10, EB20, SB30, SB40
ISO grade	P10, P20, M10, P30, M20, P40
cutting speed, m/min	
indexable carbide inserts	210 to 150
edge life 15 min	160 to 110
brazed carbide tipped tools	130 to 85
edge life 30 min	90 to 60
hardfaced/indexable carbide inserts	135 to 85
BOHLER grade	to 130
BOHLER ROYAL 121	to 140
BOHLER ROYAL 131	to 150
cutting angles for brazed carbide tipped tools	
rake angle	6 to 12°
clearance angle	6 to 8°
angle of inclination	-4°
<b>Turning with HSS tools</b>	
depth of cut, mm	0,5
feed, mm/rev	0,1
HSS grade	5700/DIN 510-4-3-10
cutting speed, m/min	
edge life 60 min	30 to 20
rake angle	14°
clearance angle	8°
angle of inclination	-4°
<b>Milling with carbide tipped cutters</b>	
feed, mm/tooth	to 0,2
cutting speed, m/min	
BOHLER SF10/SF20	150 to 100
BOHLER SB30/SB40	100 to 60
BOHLER ROYAL 131/60/135	130 to 85
...	
<b>Drilling with carbide tipped tools</b>	
drill diameter, mm	3 to 8
feed, mm/rev	0,02 to 0,05
BOHLER ISO grade	H810/K10
cutting speed, m/min	
top angle	50 to 35
clearance angle	115 to 100°
	5°
	9°

## 21.3 Probe 14 VV

Im Anschluss sind die Eingabemaske (Abbildung 21-3) und die Messprotokolle (Abbildung 21-4, Abbildung 21-5, Abbildung 21-6, Abbildung 21-7), welche die Software der Linearreißschweißmaschine für die Probe 14 des Vorversuchs erstellte, dargestellt.

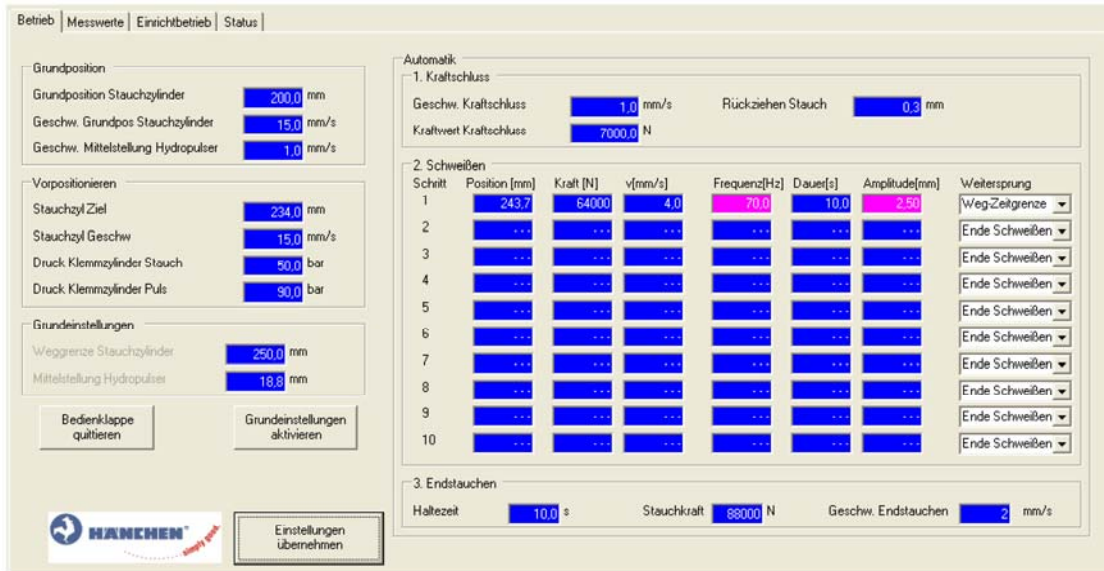


Abbildung 21-3: Eingabemaske der LRS-Maschine

## Axiale Verkürzung

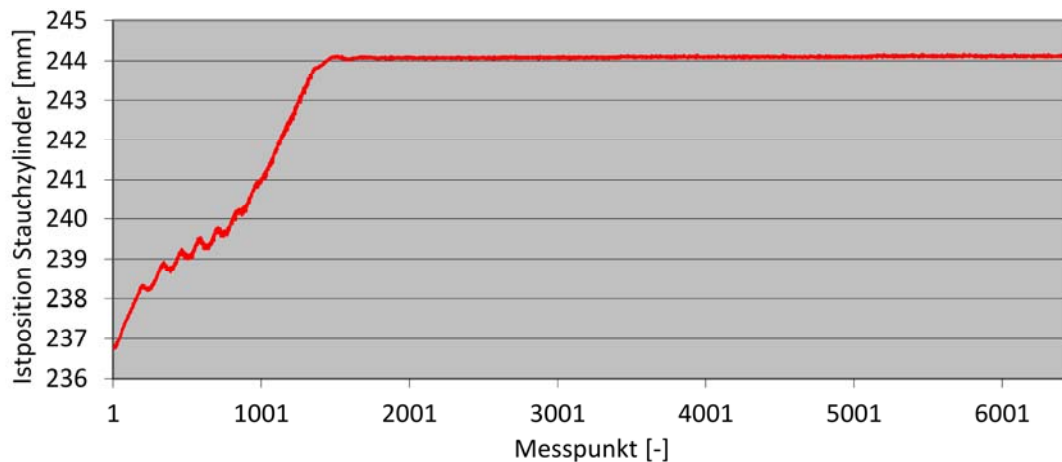


Abbildung 21-4: Axiale Verkürzung - Probe 14 (VV)

### Istkraft Stauchzylinder

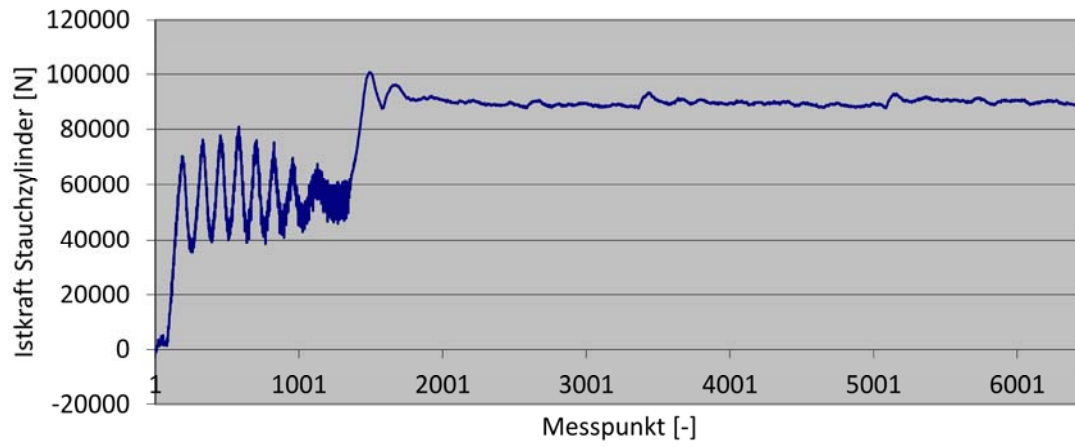


Abbildung 21-5: Istkraft Stauchzylinder - Probe 14 (VV)

### Amplitude

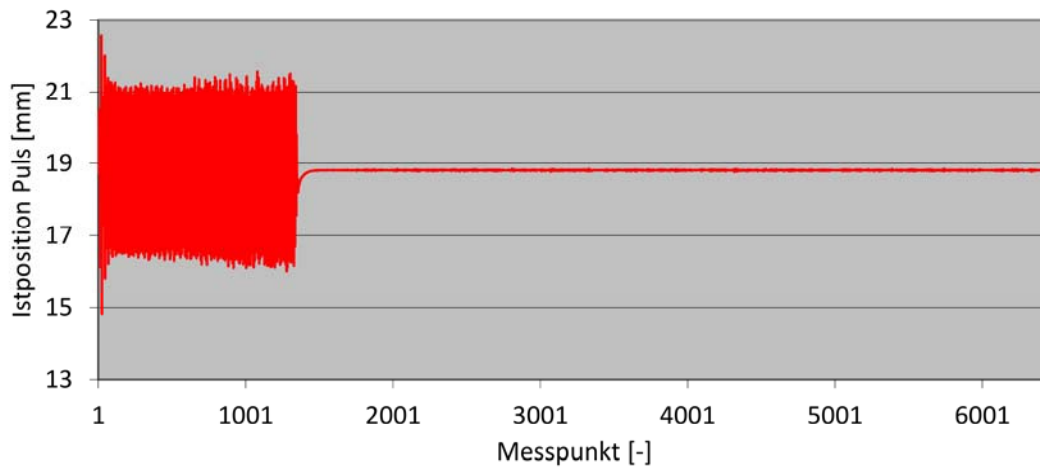


Abbildung 21-6: Amplitude - Probe 14 (VV)

## Istkraft Puls

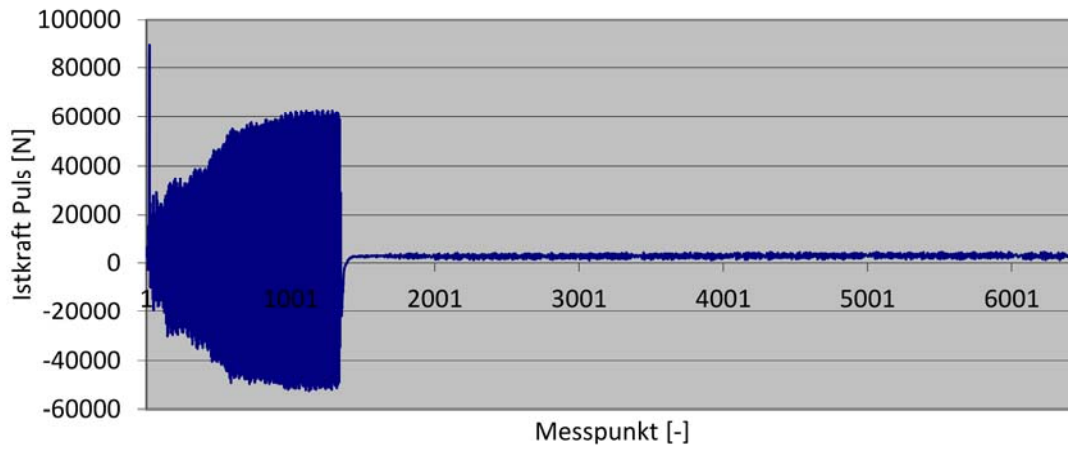


Abbildung 21-7: Istkraft Puls - Probe 14 (VV)

Die weiteren Abbildungen zeigen die Messkurve des Zugversuchs (Abbildung 21-8) und der Härtemessung (Abbildung 21-9, Abbildung 21-10).

## Kraft - Weg - Diagramm

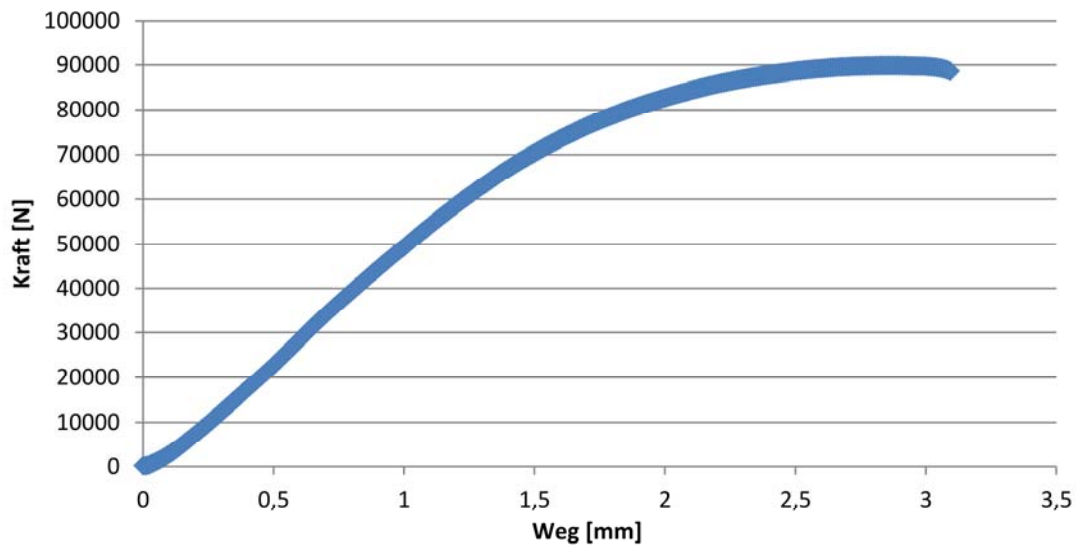


Abbildung 21-8: Kraft - Weg – Diagramm vom Zugversuch - Probe 14 (VV)



### Härtemessung mit HV10

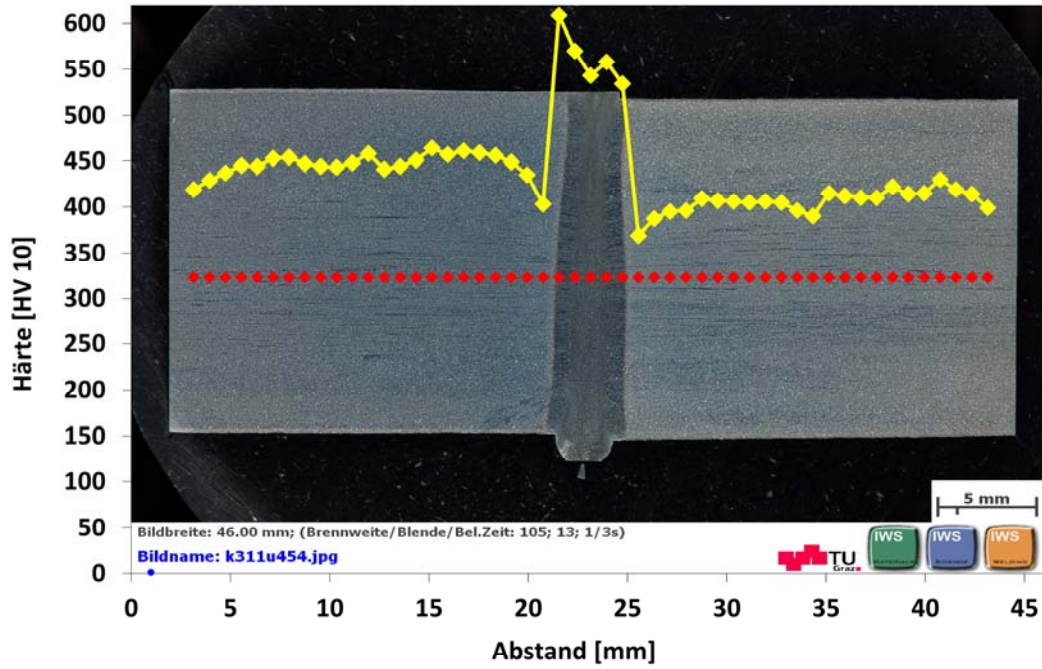


Abbildung 21-9: Härtemessung mit HV10 - Probe 14 (VV)

### Härtemessung mit HV1

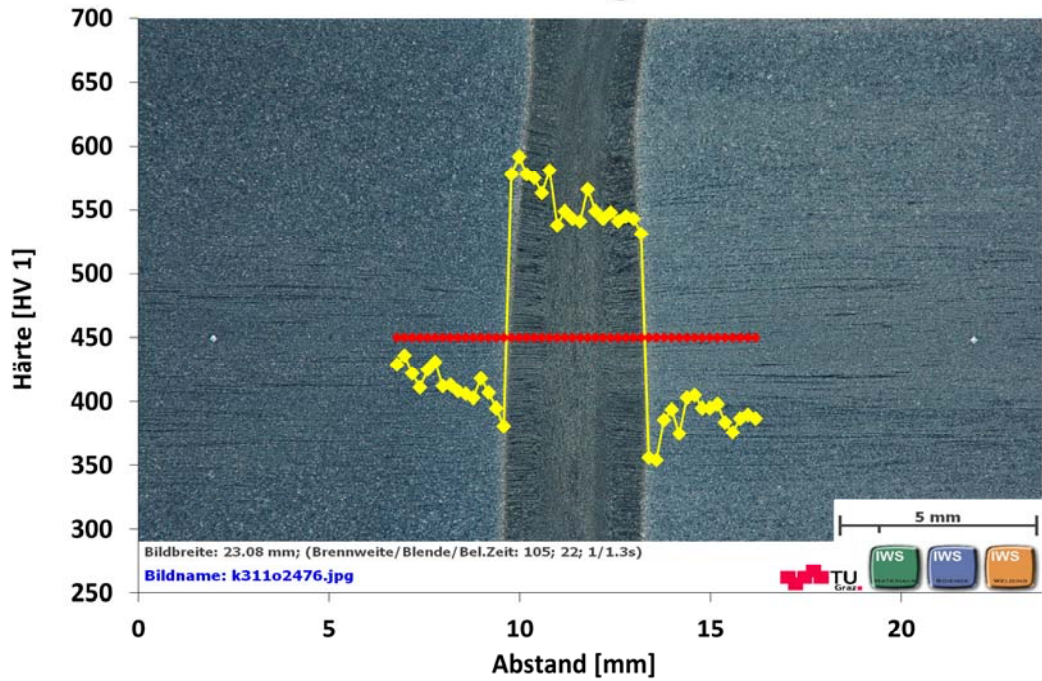
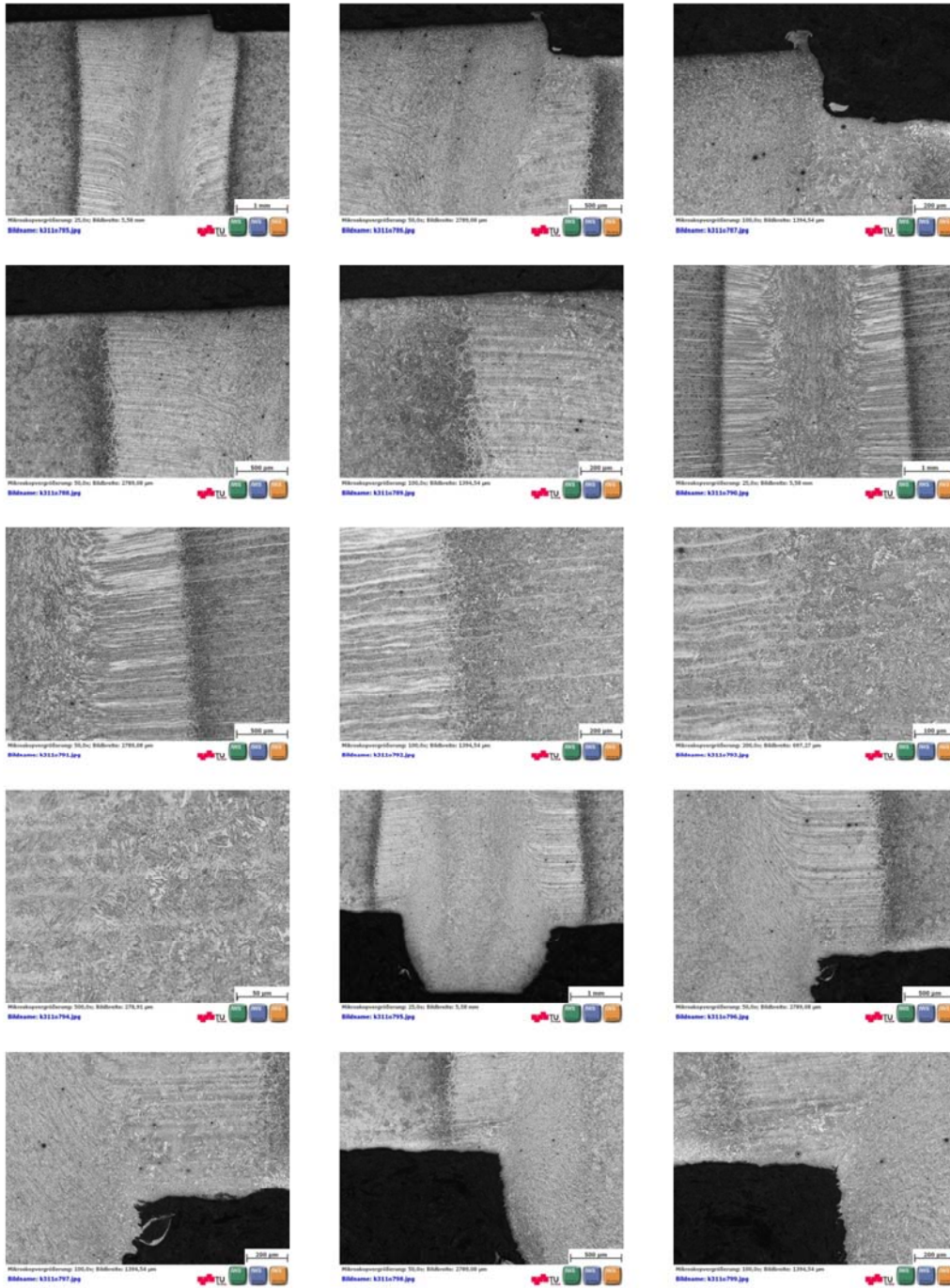


Abbildung 21-10: Härtemessung mit HV1 - Probe 14 (VV)

**Mikroskopie der Schweißnaht an charakteristischen Stellen (Abbildung 21-11):**



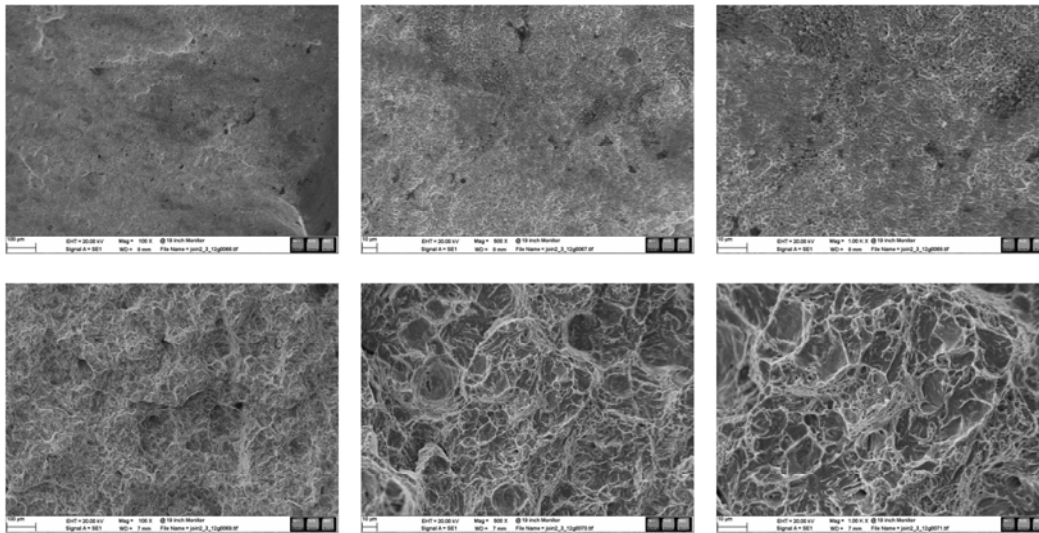
**Abbildung 21-11: Mikroskopie - Probe 14 (VV) für Positionen 1-7**



**Bruchflächenuntersuchung: Übersichtsbilder (Abbildung 21-12) und REM-Bilder (Abbildung 21-13) der Bruchfläche:**



**Abbildung 21-12: Übersichtsbilder für REM - Probe 14 (VV)**



**Abbildung 21-13: REM Untersuchung - Probe 14 (VV): oben: Position 1, unten: Position 2**

**Makroaufnahmen des geschweißten Kettengliedes mit Schweißgrat (Abbildung 21-14):**



**Abbildung 21-14: Schweißgrat - Probe 14 (VV)**