



Konstruktion  
und Festigkeit  
von Schiffen

**TUHH**  
*Technische Universität Hamburg-Harburg*

# Fatigue crack growth rate measurements in GL D36 grade welded structural steel

Masterarbeit

von

Josef Göpfrich  
aus Datteln

Matrikelnr.: 21155658

20.09.2017

Studienrichtung:   Produktentwicklung, Werkstoffe, Produktion (M. Sc.)  
Betreuer:            M. Sc. Moritz Braun  
Erstprüfer:         Prof. DSc. (Tech.) Sören Ehlers  
Zweitprüfer:        Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Düster

# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und unter ausschließlicher Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel erstellt zu haben.

Hamburg, 20.09.2017

Josef Göpfrich

# Abstract

In this master thesis, the differences in the crack growth behavior of welded and base material is investigated.

The direct current potential drop method is used to document the crack propagation. The material are tested using middle tension samples. The test is carried out with cyclic loading, a force ratio of 0.1 and a frequeze of approximately 33 Hz.

Based on the test result a calibration curve is created using the Johnson formular. With the help of crack and strain gauges the calibriation curve is validated. It is shown that the Johnson formular generates an accurated description of the crack propagation. The calibration curve gives an electric current independent comparision of crack propagation and voltage drop.

The conducted work in this thesis has shown that the welded material has a higher crack resistance, then the base material. The difference is especially apparent for low stress intensity factor.

The findings in this thesis can be used to investigated welded and base material at low temperatures.

# Kurzzusammenfassung

Im Laufe der vorliegenden Arbeit werden die Unterschiede des Risswachstumsverhalten von geschweißten Proben und Grundmaterial untersucht.

Als Messmethoden für die Untersuchung des Rissfortschrittes dient die Direct Current Potential Drop-Methode, Dehnmessstreifen und Rastlinien. Die Materialien werden in Form von Middle Tension-Proben bei verschiedenen Lastniveaus mit einem Kraftverhältnis von 0,1 und einer Frequenz von 33 Hz zyklische belastet. Auf Grundlage der Testergebnisse wird die Direct Current Potential Drop mit der Johnson-Formel kalibriert und anschließend mit den Ergebnissen der Dehnmessstreifen und Rastlinien verglichen. Es hat sich gezeigt, dass die Johnson-Formel zuverlässig den Rissfortschritt darstellt.

Der Vergleich von geschweißten Proben und Grundmaterial ergibt, dass die geschweißten Proben einen höheren Widerstand gegen Risswachstum haben, als das Grundmaterial. Der Unterschied ist besonders signifikant bei kleinen Spannungsintensitätsfaktoren.

Die Ergebnisse dieser Thesis legen die Grundlage für die Untersuchung von geschweißten Proben und Grundmaterial bei niedrigen Temperaturen.

MASTER THESIS 2017

for

Josef Göpfrich

**Fatigue crack growth rate measurements  
in GL D36 grade welded structural steel**

The fatigue life of structures can be divided in two stages. While the crack initiation stages can occupy up to 90% of the lifetime of smooth specimen (Clark and Knott, 1975), the fatigue life of welded structures is generally propagation-dominated. Once a crack can be detected in a smooth specimen, the lifetime until final fracture is seemingly short. However, there is also a wide range of situations that are neither initiation- nor propagation-dominated. Such situations mainly cover structures with stress concentrations less severe than at welded joints. Thus, fatigue assessment and test methods vary significantly for those three cases.

When it comes to crack growth measurements in non-welded structures effects such as fatigue crack growth threshold and crack arrestability are of major interest (Alvaro et al., 2014). However, for welded structures, in which the majority of the fatigue life is governed by sub-critical crack growth, stage II and III of the crack growth curve are more important.

Since the temperature effect on fatigue properties of steel structures can easier be investigated by means of crack growth rate measurements than by SN fatigue tests, such tests will be a major part of the on-going research in our laboratory. For this purpose the crack growth rates in different welded and un-welded structures will be measured under changing conditions. Hence, this project is concerned with the calibration of fatigue crack growth rate measurements in such specimen at low temperatures. For this purpose, the direct current potential drop method will be applied.

- 1) Calibration of the direct current potential drop method for fatigue crack growth rate measurements of base material and welded notched middle tension specimen
- 2) Crack growth rate curves shall be measured on notched middle tension specimen based on the relevant industry standards
- 3) The test results shall be analysed regarding the effect of welding and be compared with published data

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

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

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

Theories and conclusions should be based on mathematical derivations and/or logic reasoning identifying the various steps in the deduction.

The candidate should utilise the existing possibilities for obtaining relevant literature.

#### **Thesis format**

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

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

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

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

The report shall be submitted in two copies:

- Signed by the candidate
- The text defining the scope included
- In bound volume(s)
- Drawings and/or computer prints, which cannot be bound should be organised in a separate folder.
- The report shall also be submitted in PDF along with essential input files for computer analysis, spread sheets, MATLAB files etc. in digital format.

#### **Ownership**

TUHH has the ownership of the thesis. Any use of the thesis has to be approved by TUHH (or external partner when this applies). The institute has the right to use the thesis as if a TUHH employee carried out the work, if nothing else has been agreed in advance.

**Thesis supervisors**  
Prof. Sören Ehlers (TUHH),  
Moritz Braun (TUHH)

**Deadline: 20.02.2017**

Hamburg, 20.08.2017

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Risswachstumsmessung mit elektrischem Spannungsabfalls . . . . .	3
2.1.1	Direct Current Potential Drop (DCPD) . . . . .	4
2.1.2	Alternating Current Potential Drop (ACPD) . . . . .	5
2.2	Kalibrierungskurve der DCPD . . . . .	6
2.2.1	Kalibrierungskurve mit Kraftverhältnis und Rastlinien . . . . .	6
2.2.2	Kalibrierungskurve mit DMS . . . . .	6
2.2.3	Analytische Kalibrierungskurve . . . . .	7
2.2.4	Numerische Kalibrierungskurve . . . . .	8
2.3	Probleme mit DCPD . . . . .	9
2.3.1	Thermoelektrischer Effekt . . . . .	9
2.3.2	Rissschließung . . . . .	10
2.3.3	Andere Probleme . . . . .	11
2.4	Mechanismen des Risswachstums . . . . .	12
2.4.1	Anfangsrisslänge . . . . .	12
2.4.2	Stufen des Risswachstums . . . . .	13
2.4.3	Risswachstumsrate und Spannungsintensitätsfaktor . . . . .	14
2.5	Methoden der Risswachstumsuntersuchung . . . . .	17
2.6	Einfluss der Temperatur auf das Risswachstum . . . . .	20
2.7	Einfluss von Schweißen auf das Risswachstum . . . . .	21
2.8	Decreasing K Methode . . . . .	24
2.9	Problemstellung . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Experimenteller Aufbau</b>	<b>26</b>
3.1	Probenherstellung . . . . .	26
3.1.1	Schweißprozess . . . . .	26
3.1.2	Herstellung der Proben . . . . .	28

3.1.3	Anbringung von elektrischen Bolzen . . . . .	29
3.1.4	DMS-Messstreifen . . . . .	29
3.2	Eingesetzte Prüf- und Messgeräte . . . . .	30
3.2.1	Zyklische Prüfmaschine . . . . .	30
3.2.2	Kühlkammer . . . . .	30
3.2.3	DCPD Messgerät . . . . .	31
3.2.4	DCPD Stromquelle . . . . .	31
3.3	Versuchsaufbau und Durchführung . . . . .	31
3.3.1	Versuchsaufbau . . . . .	31
3.3.2	Versuchsdurchführung . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>36</b>
4.1	Ergebnisse Teil 1 . . . . .	36
4.1.1	Ergebnisse Prüftemperatur . . . . .	37
4.1.2	Ergebnisse Prüfkraft . . . . .	37
4.1.3	Ergebnisse DCPD . . . . .	39
4.1.4	Ergebnisse der Rastlinien . . . . .	41
4.1.5	Ergebnisse DMS . . . . .	43
4.1.6	Korrektur von DMS und Rastlinien . . . . .	43
4.2	Ergebnisse Teil 2 . . . . .	44
4.2.1	Ergebnisse Prüfkraft . . . . .	44
4.2.2	Ergebnisse DCPD . . . . .	44
4.2.3	Ergebnisse DMS . . . . .	46
4.3	Bewertung des Stromflusses, der Prüftemperatur und der DCPD-Auflösung	50
4.4	Ergebnisse der Kalibrierungskurve der DCPD . . . . .	51
4.4.1	Erstellung der Kalibrierungskurven . . . . .	51
4.4.2	Kalibrierungskurve Rastlinie . . . . .	52
4.4.3	Kalibrierungskurve DMS . . . . .	53
4.4.4	Analytische Kalibrierungskurve: Johnson-Formel . . . . .	55
4.4.5	Vergleich der Kalibrierungskurven der drei Konfigurationen . . . . .	59
4.4.6	Vergleich Kalibrierungskurven von Grundmaterial und geschweißten Proben . . . . .	59
4.5	Auswertung des Spannungsintensitätsfaktors und der Risswachstumsrate .	62
4.5.1	Berechnung des Spannungsintensitätsfaktors und der Risswachstumsrate . . . . .	63
4.5.2	Paris Gesetz . . . . .	65

---

<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>67</b>
5.1	Ergebnisse des Paris Gesetzes im Vergleich zu anderer Literatur . . . . .	67
5.2	Vergleich Region I . . . . .	68
5.3	Vergleich Region II . . . . .	68
5.4	Beurteilung der Einflussfaktoren . . . . .	69
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>73</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	73
6.2	Ausblick . . . . .	74
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>75</b>
<b>A</b>	<b>Probengeometrie</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>Rissverläufe nach Johnson JS02 und JS20</b>	<b>B-1</b>
<b>C</b>	<b>Ergebnisse JS02 <i>decreasing K</i></b>	<b>C-1</b>
<b>D</b>	<b>Ergebnisse JS20 <i>increasing K</i></b>	<b>D-1</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	ACPD vs. DCPD . . . . .	3
2.2	Aufbau DCPD . . . . .	5
2.3	Aufbau DMS . . . . .	7
2.4	Gitter numerisches Modell . . . . .	8
2.5	Numerische Kalibrierungskurve der DCPD . . . . .	9
2.6	Ermittlung des thermoelektrischen Effektes . . . . .	10
2.7	Bestimmung von $\Delta K_{eff}$ . . . . .	11
2.8	Anfangsriss . . . . .	12
2.9	Risswachstum Stufen . . . . .	13
2.10	Risswachstum Stufe I und II . . . . .	14
2.11	Risswachstum Stufe II und III . . . . .	15
2.12	Risswachstum Stufen . . . . .	16
2.13	Stage A und Stage B des Risswachstums . . . . .	17
2.14	M(t) Probe Geometrie . . . . .	18
2.15	M(t) Probe Geometrie . . . . .	19
2.16	Einfluss von FDBT auf Materialeigenschaften . . . . .	21
2.17	Idealisierte Eigenspannung der Schweißnaht . . . . .	22
2.18	Gefüge Mehrlagenschweißen . . . . .	22
2.19	Vergleich von Grundmaterial- und geschweißten Proben bei unterschiedlichen R . . . . .	23
2.20	Typischer Verlauf von <i>decreasing K</i> Stufen . . . . .	25
3.1	X-Naht Geometrie . . . . .	27
3.2	Reihenfolge der Mehrlagenschweißung . . . . .	28
3.3	Aufgeklebte DMS . . . . .	30
3.4	Oberfläche <i>Autolog 3000</i> . . . . .	32
3.5	Probe mit Messkabeln . . . . .	32
3.6	Kraftverlauf der zwei Lastblöcke . . . . .	34

---

4.1	Prüf­temperatur der Probe JS01 . . . . .	37
4.2	Prüfkraft der Probe JS01 . . . . .	38
4.3	Referenzspannung der Probe JS01 . . . . .	39
4.4	Messspannung der Probe JS01 . . . . .	40
4.5	Bestimmung der Rastlinien nach ASTM E599 . . . . .	41
4.6	Rastlinien von Probe JS01 . . . . .	42
4.7	DMS-Verlauf über die Lastwechsel von Probe JS01 . . . . .	43
4.8	Korrektur der DMS Position . . . . .	44
4.9	Prüfkraft von Probe JS22 . . . . .	45
4.10	Messspannung der Probe JS22 . . . . .	46
4.11	Referenzspannung der Probe JS22 . . . . .	47
4.12	DMS-Verlauf über die Lastwechsel von Probe JS22 . . . . .	48
4.13	DMS und Prüfkraft . . . . .	49
4.14	Auflösung der DCPD . . . . .	51
4.15	Kalibrierungskurve der Rastlinie (GM) . . . . .	52
4.16	Kalibrierungskurve der Rastlinie (SP) . . . . .	53
4.17	Kalibrierungskurve der DMS (GM) . . . . .	54
4.18	Kalibrierungskurve der DMS (SP) . . . . .	55
4.19	Kalibrierungskurve der Johnson-Formel (GM) . . . . .	56
4.20	Kalibrierungskurve der Johnson-Formel (SP) . . . . .	57
4.21	Analytische Risslänge nach Johnson (JS01) . . . . .	58
4.22	Kalibrierungskurven Rastlinien, DMS und Johnson-Formel (GM) . . . . .	60
4.23	Kalibrierungskurven Rastlinien, DMS und Johnson-Formel (SP) . . . . .	61
4.24	Vergleich GM und SP . . . . .	62
4.25	Risslänge der Kalibrierungskurve (ohne $R = 0,5$ ) . . . . .	63
4.26	Bestimmung von $da/dN$ . . . . .	64
4.27	Vergleich Paris Gesetz GM und SP . . . . .	66
5.1	Benedettis Vergleich von Grundmaterial und geschweißten Proben . . . . .	70
5.2	Sowards Vergleich von Grundmaterial und geschweißten Proben . . . . .	71
5.3	Vergleich von Grundmaterial, CGHAZ und ICCGHAZ bei Raumtemperatur . . . . .	71
5.4	Links Vergleich von Grundmaterial und geschweißten Proben . . . . .	72
B.1	Analytische Risslänge nach Johnson JS02 . . . . .	B-1
B.2	Analytische Risslänge nach Johnson JS20 . . . . .	B-2
C.1	Prüf­temperatur JS02 . . . . .	C-1
C.2	Prüfkraft JS02 . . . . .	C-2

---

C.3	Messspannung JS02 . . . . .	C-2
C.4	Referenzspannung JS02 . . . . .	C-3
C.5	DMS-Verlauf JS02 . . . . .	C-3
D.1	Prüftemperatur JS20 . . . . .	D-1
D.2	Prüfkraft JS20 . . . . .	D-2
D.3	Messspannung JS20 . . . . .	D-2
D.4	DMS-Verlauf JS20 . . . . .	D-3

# Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich DCPD und ACPD . . . . .	5
2.2	Komponenten der Johnson-Formel . . . . .	7
2.3	Komponenten des Paris Gesetzes . . . . .	15
2.4	Grenzwerte des Paris Gesetzes . . . . .	16
2.5	Probengeometrie der M(t)-Proben . . . . .	19
3.1	Parameter Schweißprozess . . . . .	27
3.2	Versuche Teil 1: Laststufen . . . . .	33
3.3	Versuche Teil 2: Laststufen . . . . .	35
4.1	Übersicht Proben . . . . .	36
4.2	Kalibrierungskurven (GM) . . . . .	59
4.3	Kalibrierungskurven (SP) . . . . .	59
4.4	Paris Gesetz . . . . .	65
A.1	Probengeometrie der M(t)-Proben . . . . .	A-1



# Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen

## Formelzeichen

### Lateinische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$a$	mm	Risslänge
$a_0$	mm	Anfangsrisslänge
$a_1$	mm	Länge der Rastlinien bei 1/4 der Probenbreite
$a_2$	mm	Länge der Rastlinien bei 1/2 der Probenbreite
$a_3$	mm	Länge der Rastlinien bei 3/4 der Probenbreite
$a_{DMS-Kor}$	mm	Korrekturlänge DMS
$a_m$	mm	gemittelte Position der Rastlinien
$a_n$	mm	halbe Kerbenlänge
$a_r$	mm	Risslänge am Referenzpunkt
$a_{surf}$	mm	Position der Rastlinie an der Proben Oberfläche
$B$	mm	Probentiefe
$C$	m/MPa $\sqrt{m}$	Materialkonstante Paris Gesetz
$C_{DMS}$	m/MPa $\sqrt{m}$	Materialkonstante der DMS-Kurve
$C_{John}$	m/MPa $\sqrt{m}$	Materialkonstante der Johnson-Kurve
$da$	mm	Änderung der Risslänge
$dN$	Zyklus	Änderung der Lastwechselzahl
$da/dN$	mm/Zyklus	Risswachstumsrate
$dK$	MPa $\sqrt{m}$	Differenz der Spannungsintensitätsfaktoren

---

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$f_1$		Polynom 2. Grades Ausgleichsgerade
$f_2$		Polynom 1. Grades Ausgleichsgerade
$f_3$		Polynom 0. Grades Ausgleichsgerade
$I$	A	Messstrom
$I_{max}$	A	eingesetzter Messstrom
$J$	A	Stromfluss
$N$	Zyklus	Lastwechselzahl
$n$		Paris Exponent
$P_{max}$	kN	maximale Prüfkraft
$P_{min}$	kN	minimale Prüfkraft
$R$	$\Omega$	elektrischer Widerstand
$R$		Kraftverhältnis
$R_T$	$^{\circ}\text{C}$	Raumtemperatur
$T$	$^{\circ}\text{C}$	Prüftemperatur
$T_{27J}$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur bei der die Bruchenergie des Kerbschlag- biegeversuch $27J$ entspricht
$t_{8/5}$	$^{\circ}\text{C}$	Abkühlzeit
$U$	mV	Messspannung
$U_0$	mV	Anfangsriss Messspannung
$U_r$	mV	Messspannung am Referenzpunkt
$W$	mm	Probenbreite
$y$	mm	Abstand zwischen Riss und DCPD-Messpunkt
$y_c$	mm	Abstand zwischen Stromeinleitung und Kerbe
$y_v$	mm	Abstand zwischen Spannungsmessung und Kerbe

---

---

## Griechische Formelzeichen

---

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$\alpha$		Verhältnis Risslänge zur Probenbreite
$\Delta K$	MPa $\sqrt{\text{m}}$	Spannungsintensitätsfaktor
$\Delta K_{Jc}$	MPa $\sqrt{\text{m}}$	kritischer Spannungsintensitätsfaktor
$\Delta K_{eff}$	MPa $\sqrt{\text{m}}$	effektiver Spannungsintensitätsfaktor
$\Delta K_{Punkt1,2}$	MPa $\sqrt{\text{m}}$	Spannungsintensitätsfaktor zwischen zwei Messpunkten
$\Delta P$	kN	Spannungsschwingbreite
$\rho$	$\Omega$	elektrischer Widerstand
$\phi$	V	elektrisches Potential
$\sigma_{ys}$	MPa	Streckgrenze

---

---

## Abkürzungen

---

<b>Abk.</b>	<b>Bedeutung</b>
ACPD	Alternating Current Potential Drop
ASTM	American Society for Testing and Materials
C(t)	Compact Tension
CGHAZ	Coarse Grain Heat Affected Zone
DBTT	Charpy Ductile to Brittle Transition Temperature
DCPD	Direct Current Potential Drop
DMS	Dehnmessstreifen
FDBT	Fatigue Ductile Brittle Transition
FTT	Fatigue Transition Temperature
GM	Grundmaterial
ICCGHAZ	Intercritically Coarse Grained Heat Affected Zone
MAG	Metall-Aktiv-Gas
M(t)	Middle Tension
SP	geschweißte Proben
TUHH	Technische Universität Hamburg-Harburg
WEZ	Wärmeinflusszone

---

# 1 Einleitung

Mit dem Ende des zweiten Weltkrieges begann das Schweißen, das Nieten im Schiffbau zu ersetzen. Durch die weite Verbreitung von geschweißten Bauteilen wird das Problem des Risswachstums bald deutlich. Es stellte sich heraus, dass sich in Stahlstrukturen nach gewisser Zeit Risse bilden, welche, wenn sie zu groß werden, zum Versagen der Struktur führen. In den 1960er Jahren begann man mit der Untersuchung des Risswachstums, um die Lebensdauer der Strukturen zu erforschen. Es wird bald deutlich, dass durch Fehler in den Schweißnähten die meisten Risse im Material ihren Ursprung haben. Anfängliche Untersuchungen des Risswachstums fanden mit quasistatischen Zugmaschinen statt. Erst durch die Entwicklung der servogesteuerten Zugmaschine sind realistische Untersuchungen des Risswachstums möglich. [Gur06]

Laut des „Arctic Climate Impact Assessment“(ACIA) aus dem Jahr 2004 [IUI04] wird die Arktis spätestens im Sommer 2100 eisfrei sein. Durch den Rückgang des arktischen Eises ergeben sich für die Schifffahrt neue Schifffahrtsrouten, wie die Nordwestpassage [IUI04]. Zudem werden große Mengen von Öl und Gas, welche unter dem arktischen Eis liegen, frei gelegt.

Durch diese Entwicklung gewinnt die Untersuchung des Temperatureinflusses auf das Risswachstumsverhalten an Bedeutung, um die konstruktive Sicherheit von Schiffen im arktischen Meer zu gewährleisten.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Unterschied zwischen Grundmaterial (GM) und geschweißten Proben (SP) untersucht. Hierfür werden M(t)-Proben in zyklischen Versuchen getestet. Zudem wird mit Hilfe der DCPD der Rissfortschritt erfasst.

Ziel der Arbeit ist es das Risswachstumsverhalten von Grundmaterial und geschweißten Proben nach ASTM 647 [AST15] zu untersuchen und zu vergleichen. Zudem soll die Gültigkeit der *Direct Current Potential Drop*-Methode (DCPD) geprüft und eine Kalibrierungskurve der selbigen erstellt werden. Die Kalibrierungskurve dient dazu die DCPD Stromfluss unabhängig zu machen. Des Weiteren soll die Arbeit die Grundlage für die

Untersuchung des Risswachstumsverhalten von GM und SP bei niedrigen Temperaturen schaffen.

## 2 Theoretische Grundlagen

Das nachfolgende Kapitel erläutert die theoretischen Grundlagen, auf denen die Arbeit aufbaut. Es werden die Messungen des Risswachstums mit Hilfe des elektrischen Spannungsabfalls sowie mechanischen Mechanismen des Risswachstums erläutert. Abschließend wird der Einfluss von Temperaturveränderung und dem Schweißen auf das Risswachstumsverhalten vorgestellt.

### 2.1 Risswachstumsmessung mit elektrischem Spannungsabfalls

Zur Messung des Rissfortschritts können verschiedene Messverfahren angewendet werden. Eine mögliche Messverfahren ist die Messung des Spannungsabfalls (engl.: „Potential Drop“). Man unterscheidet hier zwischen DCPD (Direct Current Potential Drop) und ACPD (Alternating Current Potential Drop).

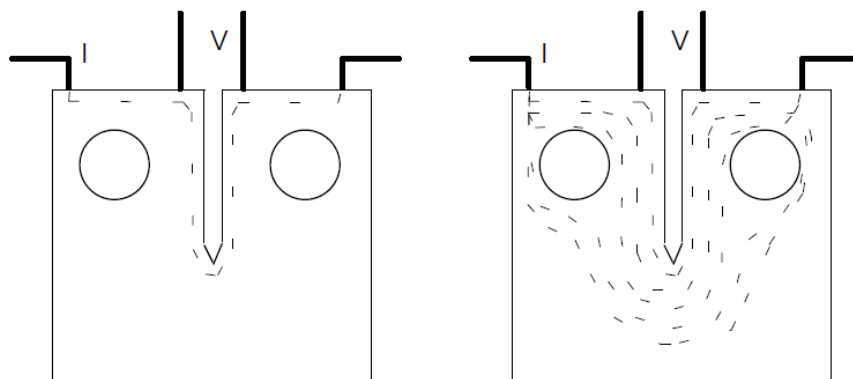


Abbildung 2.1: ACPD vs. DCPD (entn. Matelec LTD [Mat])

Für die Messmethoden wird auf der Probe Strom ( $I$ ) angelegt. Es wird die elektrische Spannung (DCPD) oder die Impedanz (ACPD) an der Oberfläche auf der Probe gemessen [Mat, CK75]. Durch Geometrie- oder Gefügeveränderungen verändert sich der elektrische Widerstand ( $R$ ) des Materials und damit die elektrische Spannung ( $U$ ) und die Impedanz. Die Werte können daher genutzt werden, um den Risswachstum zu messen, in dem während der Risswachstumsversuche die Änderung der Werte gemessen wird. In Abbildung 2.1 ist der Stromfluss der beiden Messmethoden gezeigt.

### 2.1.1 Direct Current Potential Drop (DCPD)

Die DCPD ist eine der am häufigsten eingesetzten Methode zur Untersuchung von Risswachstum [RGK71]. Das Verfahren zeichnet sich durch hohe Präzision und vielfältige Anwendungsgebiete aus [CK75].

Zur Umsetzung der DCPD wird an die Probe an vordefinierten Stellen konstanter Gleichstrom angelegt und die elektrische Spannung über die Probe gemessen. Durch das Risswachstums verringert sich der Querschnitt der Fläche durch den der Strom fließt, wodurch sich der elektrische Widerstand des Materials erhöht [CK75]. Wie durch das Ohmsche Gesetz beschrieben (siehe Gleichung 2.1), verändert sich die Spannung linear mit dem Widerstand bei konstantem Strom

$$U = I \cdot R \quad (2.1)$$

Das in dieser Arbeit getestete Material hat einen geringen elektrischen Widerstand, wodurch die Messspannung im mV-Bereich liegt. Daher ist die Verwendung von großen Strömen erforderlich, um eine genauere Messung des Spannungsabfalls zu gewährleisten. Der eingesetzte Messstrom liegt bei  $I_{max} = 20$  A. Der hohe Strom führt zu einer Erwärmung der Kabel, weshalb dickere Kabel verwendet werden müssen. Die Messkabel, welche den Spannungsabfall messen, werden so dünn wie möglich gewählt, um eine genaue Positionierung zu gewährleisten [AST15]. Zusätzlich muss die Temperatur der Probe gemessen, da sich der elektrische Widerstand der Probe abhängig von der Temperatur ändert. Eine Temperaturänderung könnte durch den Messstrom oder äußere Einflussfaktoren zustande kommen [Giu09]. Die DCPD Methode kann unter idealen Bedingungen eine Rissveränderung ( $\delta a$ ) von 0,013 mm erfassen [WB81].

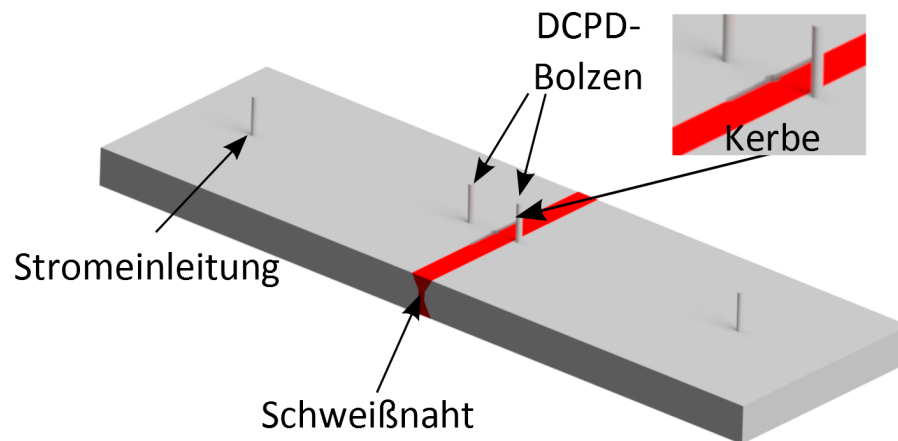


Abbildung 2.2: Aufbau DCPD

### 2.1.2 Alternating Current Potential Drop (ACPD)

Die ACPD verwendet im Gegensatz zur DCPD Wechselstrom. Der Strom ist mit 1 A deutlich geringer als beim DCPD. Zu dem ist die minimale Risslänge, die gemessen werden kann, mit  $\delta a=0,010$  mm geringer als die der DCPD [WB81]. Die Messmethode braucht geringer Ströme und ist präziser durch den Skin-Effekt [Nic06, Giu09]. Der Skin-Effekt bedeutet, dass Strom durch eine dünne Oberflächenschicht der Probe fließt. Auf Grund dieses Effektes kann ACPD für die Messung der Risstiefe eingesetzt werden [Mat]. Das Verfahren ist jedoch problematisch, wenn der elektrische Widerstand über die Probentiefe variiert [Nic06]. Daher wird das Verfahren für die vorliegende Arbeit nicht verwendet, weil eine Widerstandsveränderung in den geschweißten Proben nicht ausgeschlossen werden kann.

Die Tabelle 2.1 fasst die Eigenschaften der ACPD und DCPD noch einmal zusammen.

**Tabelle 2.1:** Vergleich DCPD und ACPD

	DCPD	ACPD
Stromstärke	30 A	1 A
Strom	Gleichstrom	Wechselstrom
Messparameter	elek. Spannung	Impedanz
Frequenz	niedrig Frequenz	niedrig bis hohe Frequenz
Testverfahren	Risswachstum	Schlagtest

## 2.2 Kalibrierungskurve der DCPD

Die DCPD zeichnet die relative Änderung des Stromflusses auf. Um die Änderung auf die tatsächliche Risslänge zu beziehen wird eine Kalibrierungskurve erstellt. Eine Kalibrierungskurve muss für jedes Material, jede Geometrie und jede Temperatur erzeugt werden. Die Kalibrierungskurve wird erstellt, indem die Spannung der DCPD bei verschiedenen Risslängen ermittelt wird. Anschließend werden die Ergebnisse in dimensionslose Variablen  $U/U_0$  (Messspannung/Referenzspannung) und  $a/W$  (Risslänge/Probenbreite) überführt. Diese Variablen machen die Ergebnisse unabhängig von der Stromstärke [HLP79, DNH15].

Die Kalibrierungskurve kann durch drei verschiedene Methoden ermittelt werden. Eine Möglichkeit besteht darin das Kraftverhältnis ( $R$ ) zu variieren, um Rastlinien zu erzeugen. Eine weitere Methode weist durch DMS den Risslängen die zugehörige Messspannung zu. Neben diesen beiden Methoden kann die Kalibrierungskurve mit Hilfe von analytischen und FEM Berechnungen bestimmt werden. Ziel der verschiedenen Methoden ist es, einen Zusammenhang zwischen der Risslänge und Spannung zu ermitteln.

### 2.2.1 Kalibrierungskurve mit Kraftverhältnis und Rastlinien

Zur Kalibrierung der DCPD mit Hilfe von Kraftverhältnissen ( $R$ ) wird  $R$  während des Versuches variiert.  $R$  wird in Gleichung 2.2 beschrieben.

$$R = \frac{P_{min}}{P_{max}} \quad (2.2)$$

Durch die Variation von  $R$  verändert sich die Schattierung der Rissoberfläche, indem dokumentiert wird, zu welchem Zeitpunkt das Kraftverhältnis geändert wird, kann mit Hilfe der Oberflächenschattierung die Risslänge der zugehörigen Spannung zugeordnet werden. Durch häufige Variation des Kraftverhältnisses können Rastlinien auf der Bruchfläche erzeugt werden. Anhand der Rastlinien können mehrere Referenzpunkte bestimmt werden.

### 2.2.2 Kalibrierungskurve mit DMS

Für die Kalibrierung mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen (DMS) werden diese auf die Probe aufgeklebt. Die DMS bestehen aus mehreren Litzen (siehe Abbildung 2.3), an

welchen mit einer Viertelbrücke Strom angelegt und die elektrische Spannung gemessen wird. Wenn der Riss unterhalb des DMS wächst, versagen die Litzen nacheinander. Durch die Veränderung der Spannung kann die Position des Risses bestimmt werden. Wie bei der Variation von  $R$  kann die Rissposition so einer Messspannung zugeordnet werden.



Abbildung 2.3: Aufbau DMS [DMS16]

### 2.2.3 Analytische Kalibrierungskurve

Neben der Kalibrierung mit Hilfe von Rastlinien und DMS gibt es die Möglichkeit, die Kalibrierungskurve analytische zu bestimmen. Der analytische Ansatz, auf dem die ASTM 647 [AST15] aufbaut, wird von H.H. Johnson et al. [HJ87] entwickelt und von Hellmann et al. [LH81] verbessert. Aus den Untersuchungen ergibt sich die sogenannte Johnson-Formel (siehe Gleichung 2.3). Die Komponenten der Johnson-Formel sind in Tabelle 2.2 aufgeführt.

$$\frac{U}{U_0} = \frac{\cosh^{-1}\left(\frac{\cosh(\pi y/2W)}{\cos(\pi a/2W)}\right)}{\cosh^{-1}\left(\frac{\cosh(\pi y/2W)}{\cos(\pi a_0/2W)}\right)} \quad (2.3)$$

Tabelle 2.2: Komponenten der Johnson-Formel

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$a$	mm	Risslänge
$a_0$	mm	Anfangsrisslänge
$a_r$	mm	Referenzrisslänge
$U$	V	Messspannung bei $a$
$U_0$	V	Messspannung bei $a_0$
$U_r$	V	Referenzmessspannung bei $a_r$
$W$	mm	Probenbreite

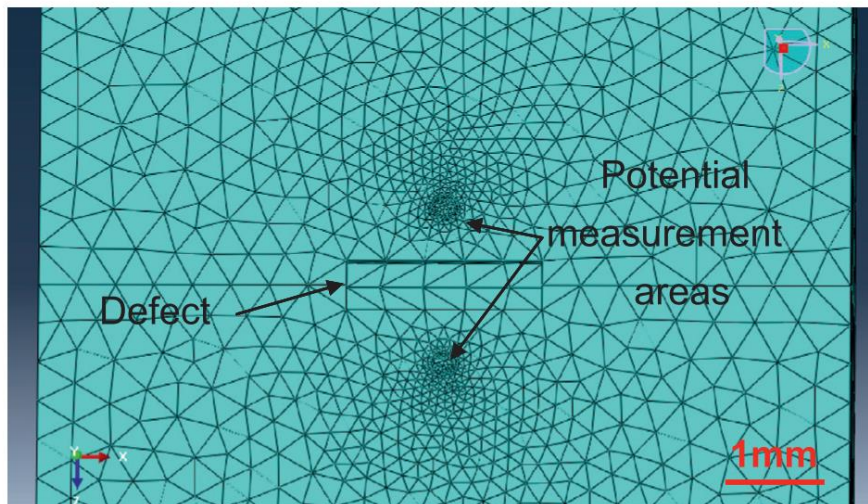
Es wird angenommen, dass die Dicke und Breite der Probe zwischen den Messpunkten gleich bleibt. Zur Bestimmung der Risslänge, mit Hilfe der Johnson-Formel, wird diese nach  $a$  umgestellt.

Für M(t) Proben gilt die Formel 2.4 aus der ASTM 647 [AST15]. Das  $a_r$  ist die Risslänge an einem Referenzpunkt und  $U_r$  ist die zugehörige Referenzspannung. Der Referenzpunkt kann mit Hilfe von Rastlinien oder DMS bestimmt werden. Die M(t)-Proben werden in Abschnitt 2.5 genauer erläutert.

$$a = \frac{W}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{\cosh(\pi y/2W)}{\cosh \left[ \left( \frac{U}{U_r} \right) \cosh^{-1} \left[ \frac{\cosh(\pi y/2W)}{\cos(\pi a_0/2W)} \right] \right]} \right) \quad (2.4)$$

$$\text{für } 0 \leq \frac{2a}{W} \leq 1$$

## 2.2.4 Numerische Kalibrierungskurve



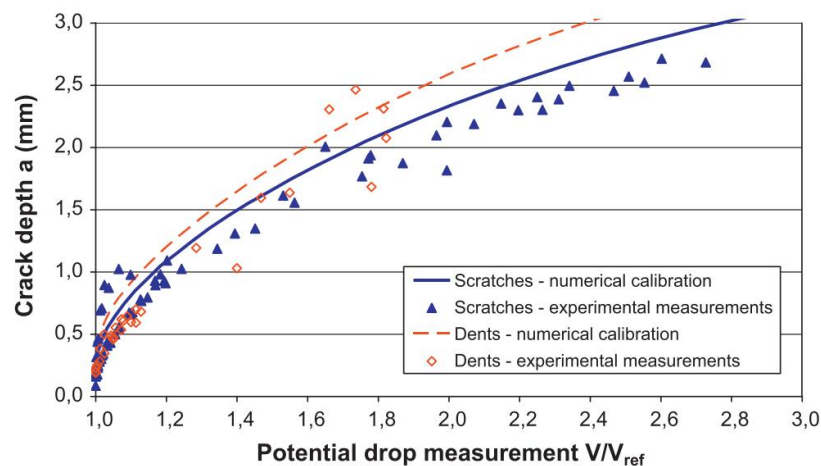
**Abbildung 2.4:** Gitter numerisches Modell (entn. Doremus et al. [DNH15])

Für die numerische Berechnung der Kalibrierungskurve gibt es verschiedene Ansätze. Doremus et al. [DNH15] berechnet die Kalibrierungskurve mit dem Ansatz, dass das elektrische Potential  $\phi$  stationär ist (siehe Gleichung 2.5).

$$J\rho = -\text{grad}(\phi) \quad (2.5)$$

$J$  ist der Stromfluss und  $\rho$  ist der elektrische Widerstand des Materials. Mit Hilfe eines Python Skriptes wird die Risslänge des numerischen Modelles verändert. Für jede neue Risslänge wird im Modell die elektrische Spannung berechnet und aus den Werten eine Kalibrierungskurve erstellt. Das Gitter des numerische Modells ist in Abbildung 2.4 gezeigt. [DNH15]

In Abbildung 2.5 sind die numerisch berechnete Kalibrierungskurve und die Ergebnisse des praktischen Versuches gezeigt. Der Vergleich zwischen numerischer Berechnung und den praktischen Versuchen macht deutlich, dass das Modell die Versuchsergebnisse gut widerspiegelt.



**Abbildung 2.5:** Numerische Kalibrierungskurve der DCPD (entn. Doremus et al. [DNH15])

## 2.3 Probleme mit DCPD

Die Messung des Risswachstums mit der DCPD beinhaltet einige Probleme, welche in nachfolgenden Abschnitten vorgestellt werden.

### 2.3.1 Thermoelektrischer Effekt

Durch den elektrischen Strom entsteht ein elektrisches Feld auf der Probe. Das elektrische Feld verändert den Widerstand der Probe [HJ87]. Auch bei abgeschaltetem Strom bleibt ein messbares Spannungsfeld auf der Probe bestehen. Dieses Phänomen tritt bei einigen

Metallen auf, sowie bei der Verbindung mehrerer unterschiedlicher Metalle [HJ87]. Durch unterschiedliche Materialien und Temperaturunterschiede im Material wird der Effekt verstärkt. Dieses Phänomen wird thermoelektrischer Effekt genannt.

Der thermoelektrische Effekt ist in dieser Arbeit zu berücksichtigen, da die Proben (Stahl) und die Stromkabel (Kupfer) aus unterschiedlichen Materialien bestehen. Um den thermoelektrischen Effekt zu eliminieren wird die Stromquelle vor Versuchsbeginn umgepolt [YKC16]. Durch die Differenz der Spannungen ( $V_1$  und  $V_2$ ) kann der thermoelektrische Effekt bestimmt werden. In Abbildung 2.6 ist schematisch dargestellt, wie die Spannung des thermoelektrischen Effektes ( $U_d$ ) bestimmt wird.  $U_d$  dient im Weiteren als Korrekturwert für die Messspannung.

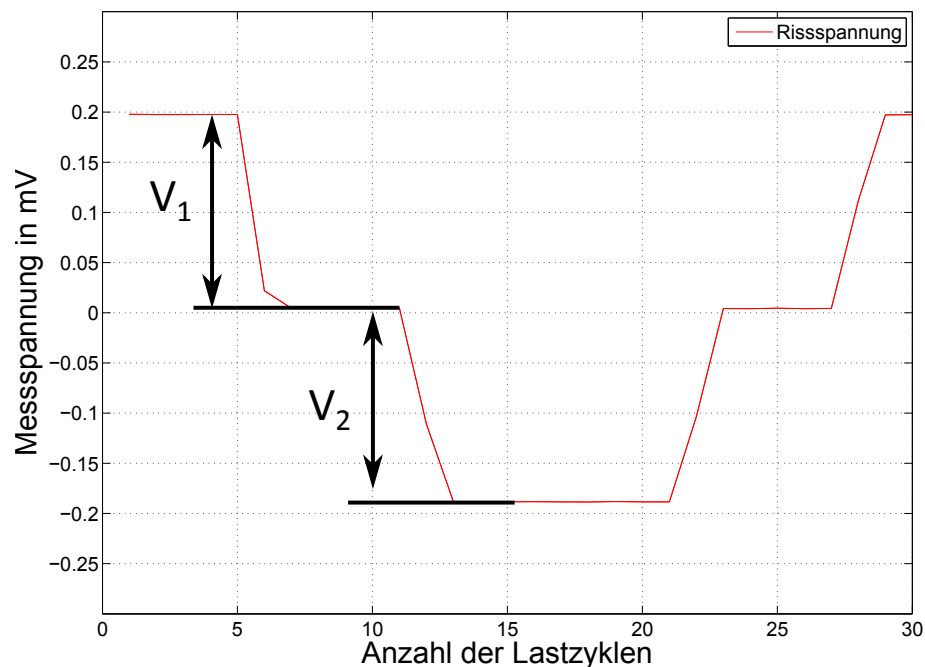
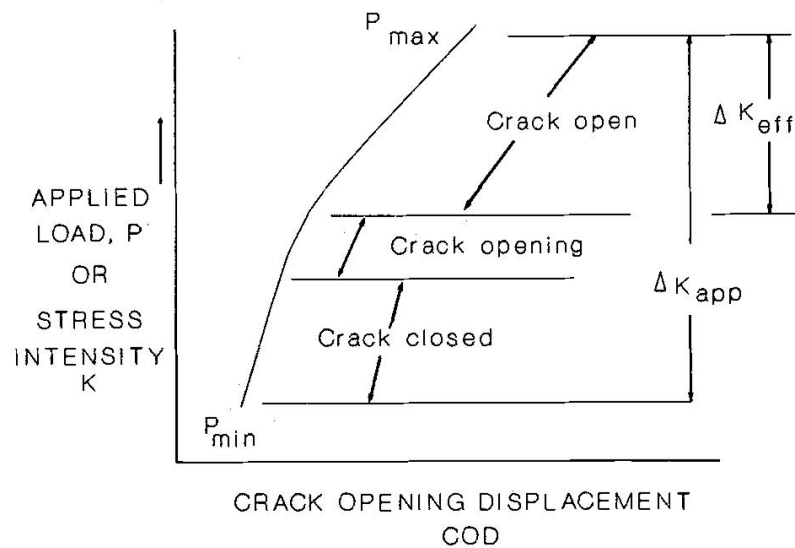


Abbildung 2.6: Ermittlung des thermoelektrischen Effektes

### 2.3.2 Risschließung

Neben dem thermoelektrischen Effekt kann das Ergebnis der DCPD durch Risschließung verfälscht werden. Durch das Schweißen entstehen Eigenspannungen im Material. Die Eigenspannung kann zu lokalen Druckspannungen führen, welche bewirken, dass der Riss unter Zugspannung geschlossen bleibt [Lin90]. Die Risschließung wird zudem auf die Plastizität des Materials zurückgeführt [Elb71]. Die erforderliche Kraft, um den Riss zu öffnen, wird Schließkraft genannt. Risswachstum tritt nur auf, wenn der Riss geöffnet ist. Solange

die Prüfkraft geringer ist als die Schließkraft tritt daher kein Risswachstum auf [Elb71]. Zudem wird die Messung der DCPD durch die nicht vollständige Rissöffnung verfälscht [AST15]. Um den Einfluss der Risschließung zu berücksichtigen haben verschiedene Autoren die Bestimmung den Spannungsintensitätsfaktor neu definiert [Lin90, Mil13]. Der effektive Spannungsintensitätsfaktor ( $\Delta K_{eff}$ ) berücksichtigt nur den offenen Riss. In Abbildung 2.7 ist die Bestimmung von  $\Delta K_{eff}$  dargestellt.



**Abbildung 2.7:** Bestimmung von  $\Delta K_{eff}$  (entn. Link et al. [Lin90])

Es gibt zwei Arten der Risschließung. Das vorübergehende Rissverschlussverhalten, welches mit der Risslänge abnimmt und das stabilisierte Rissverschlussverhalten, welches über die Risslänge konstant bleibt. Die Risschließung ist vor allem bei kurzen Risslängen relevant. [TBV17]

Der Einfluss der Risschließung kann minimiert werden, indem die untere Prüfkraft ( $P_{min}$ ) angehoben wird [Lin90, TBV17]. In der vorliegenden Arbeit wird daher  $R = 0,1$  gewählt.

### 2.3.3 Andere Probleme

Neben dem thermoelektrischen Effekt und der Risschließung kann durch Schwankungen im Stromfluss das Ergebnis der DCPD verfälscht werden. Um sicherzustellen, dass der

Stromfluss während des Versuches konstant bleibt, wird auf der Probe eine Referenzspannung ( $U_r$ ) gemessen. Wenn die Referenzspannung über den Versuch konstant bleibt, kann damit eine Stromschwankung ausgeschlossen werden [vHVW17].

## 2.4 Mechanismen des Risswachstums

Im nachfolgende Abschnitt werden die Mechanismen des Risswachstum erklärt. Es wird erläutert, wie Risswachstum entsteht und dieses untersucht wird. Risswachstum entwickelt sich durch Spannungskonzentrationen an Fehlern im Material, wie beispielsweise Poren und Leerstellen. Durch wiederholte Zugbelastung der Probe kommt es an diesen Stellen zu lokalem, irreversiblen Gleiten auf mikroskopischen Ebene [Mug09, MMK88]. Dieses Gleiten führt zum Risswachstum auf mikroskopischen Level. Das Risswachstum beginnt am größten Materialfehler im Bereich der größten Spannung.

### 2.4.1 Anfangsrisslänge

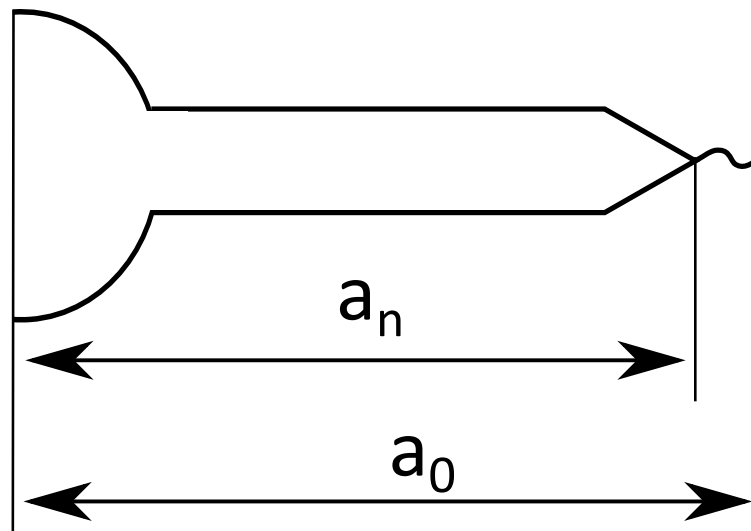


Abbildung 2.8: Anfangsriss

Um bei der Untersuchung des Risswachstums den Riss an einer bestimmten Stelle beginnen zu lassen, wird in die Probe maschinell eine Kerbe eingebracht. Laut ASTM wird empfohlen einen Anfangsriss in die Probe einzubringen [AST15], um auszuschließen, dass durch die maschinelle Kerbe die Geometrie der Risspitze beeinflusst wird. Zur Erzeugung des Anfangsrisses wird die Probe bis zu einer vordefinierten Risslänge belastet. Der eigentliche Versuch beginnt erst nach dem Erreichen der Anfangsrisslänge. Bei M(T)-Proben ist

eine Anfangsrisslänge von 0,5 mm [WV13] ausreichend. Um die Anfangsrisslänge ( $a_0$ ) zu berücksichtigen, werden die DMS-Messstreifen im Abstand 2 mm von der Kerbenspitze aufgeklebt. In Abbildung 2.8 ist der Anfangsriss und die Kerbenlänge ( $a_n$ ) gezeigt.

## 2.4.2 Stufen des Risswachstums

Das Risswachstum ist in drei Stufen aufgeteilt, welche sich durch die Rissmechanismen unterscheiden. In Abbildung 2.9 sind die Stufen des Risswachstums dargestellt.

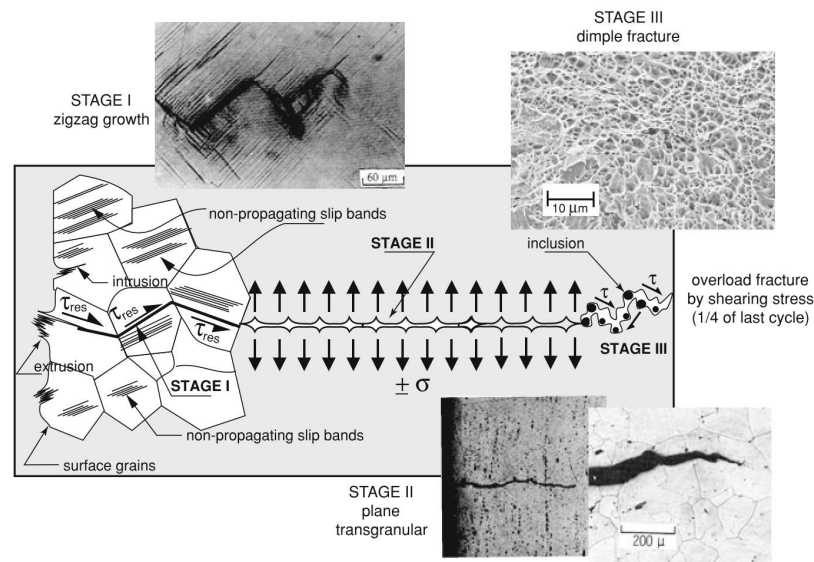
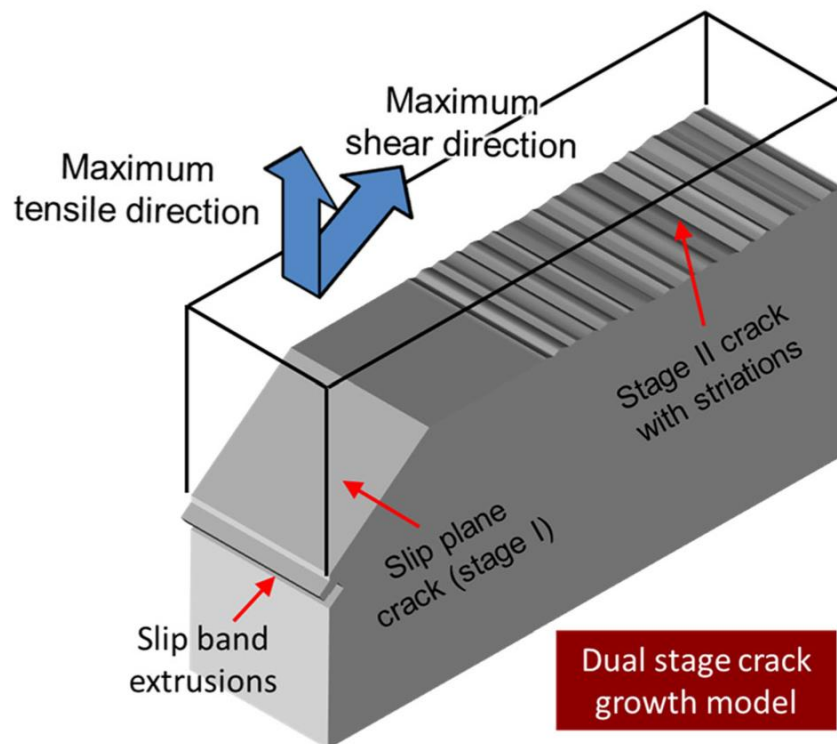


Abbildung 2.9: Risswachstum Stufen (entn. Milella et al. [Mil13])

In Stufe I ist das Risswachstum abhängig von der Mikrostruktur des Materials und wird von lokalen Scherspannungen dominiert. Der Riss wächst entlang der Korngrenzen und bildet zickzackförmige Mikrorisse [Mil13]. Die Länge der Stufe entspricht der Dimension eines Wirtskorns [For63]. Stufe I nimmt ca. 90 - 95 % der Lebensdauer des Materials ein. Durch die Einbringung von Kerben wird Stufe I deutlich verkürzt.

In Stufe II ordnet sich der Riss orthogonal zur Lastichtung an. In dieser Stufe findet das größte Risswachstum statt [Mil13, RKM03]. Mit zunehmender  $\Delta K$  wandelt sich der Riss in einen gemischten Rissmodus um und bildet Scherlippen aus (siehe Abbildung 5) [Sch74, Sch81]. In Stufe II wird das Risswachstum durch das Paris Gesetz beschrieben [PE63, PMW61]. Die einzelnen Komponenten des Paris Gesetzes wird in Abschnitt 2.4.3 genauer erläutert. Die Untersuchungen dieser Thesis werden sich hauptsächlich mit Stufe II beschäftigen.



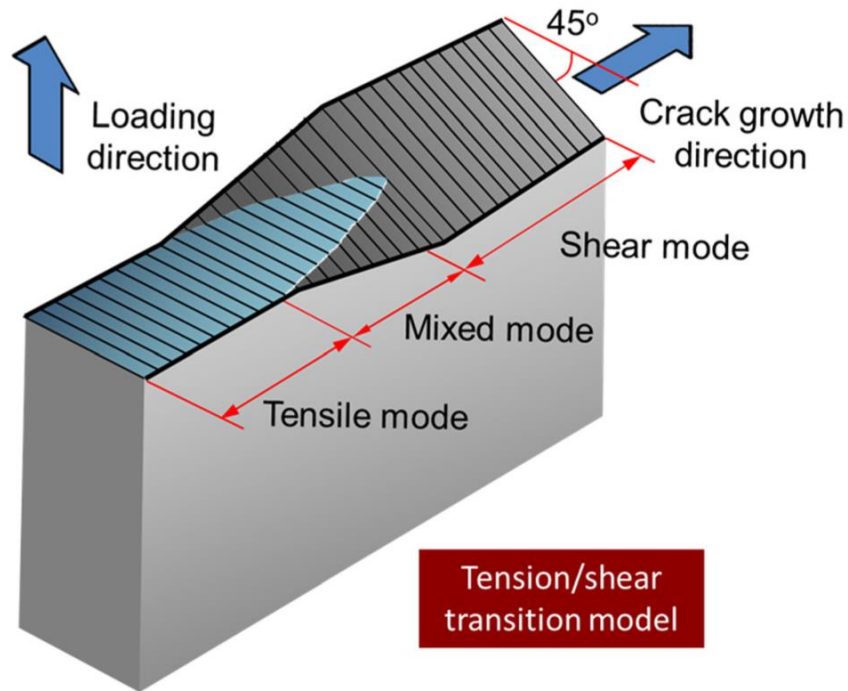
**Abbildung 2.10:** Risswachstum Stufe I und II (entn. Forsyth et al. [For63])

Kurz vor dem finalen Versagen in Stufe III neigt sich die Rissfläche um bis zu  $45^\circ$  (siehe Abbildung 2.11) [For63, Sch74]. Die Probe versagt in Stufe III meist durch einen Gewaltbruch.

### 2.4.3 Risswachstumsrate und Spannungsintensitätsfaktor

Der Zusammenhang zwischen Risswachstumsrate ( $da/dN$ ) und Spannungsintensitätsfaktor ( $\Delta K$ ) wird das erste Mal von Paris et al. beschrieben [Mil13]. Sie stellten das in Gleichung 2.6 beschriebene Paris Gesetz auf [PE63]. Laut ASTM 647 [AST15] wird  $\Delta K$  für M(t)-Proben mit Gleichung 2.7 berechnet ( $\Delta P = P_{max} - P_{min}$ ). Durch die logarithmische Darstellung von  $da/dN$  über  $\Delta K$  ist, wie in Abbildung 2.12 zu erkennen, dass der Verlauf in drei Regionen aufgeteilt werden kann.

$$da/dN = C(\Delta K)^n \quad (2.6)$$



**Abbildung 2.11:** Risswachstum Stufe II und III (entn. Forsyth et al. und Schijve et al. [For63, Sch74])

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B} \sqrt{\frac{\pi \cdot \alpha}{2W} \sec \frac{\pi \alpha}{2}} \quad (2.7)$$

**Tabelle 2.3:** Komponenten des Paris Gesetzes

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$da/dN$	m	Risswachstumsrate
$C$	$m/(MPa\sqrt{m})^n$	Materialkonstante
$n$	-	Paris-Exponent
$\Delta K$	$MPa\sqrt{m}$	Bereich des Spannungsintensitätsfaktors ( $\Delta K_{max} - \Delta K_{min}$ )

Region I ist die *Threshold*-Region, in der kein ersichtliches Risswachstum stattfindet. In dieser Region dominiert der Einfluss von Mikrostrukturen und mechanischen Eigenschaften. In Region II gilt das Paris Gesetz. Die Komponenten C und n sind Materialkonstanten. Wenn sie bekannt sind, kann durch Integration des Paris Gesetzes die Risslänge in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bestimmt werden. Der Verlauf des Graphen ist in

Region II linear. Sie Materialeigenschaften und die Mikrostrukturen haben hier auf den Verlauf kaum Einfluss. In der dritten Region ist  $\Delta K$  größer als der kritische Spannungsintensitätsfaktor ( $K_{Jc}$ ). Das Risswachstum in Region III ist instabil und das Material versagt.

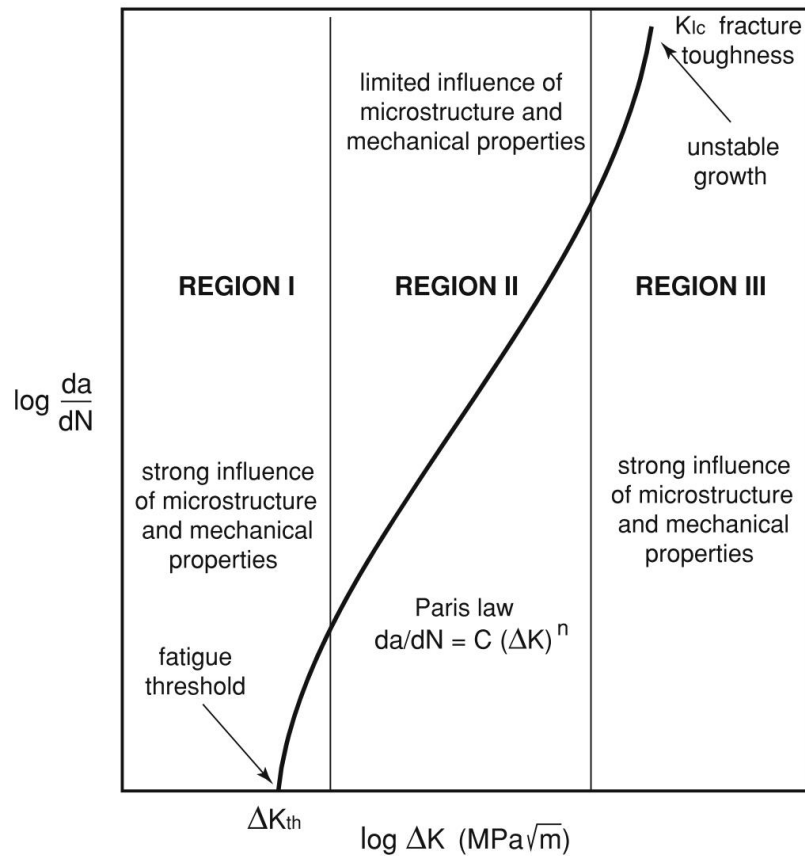


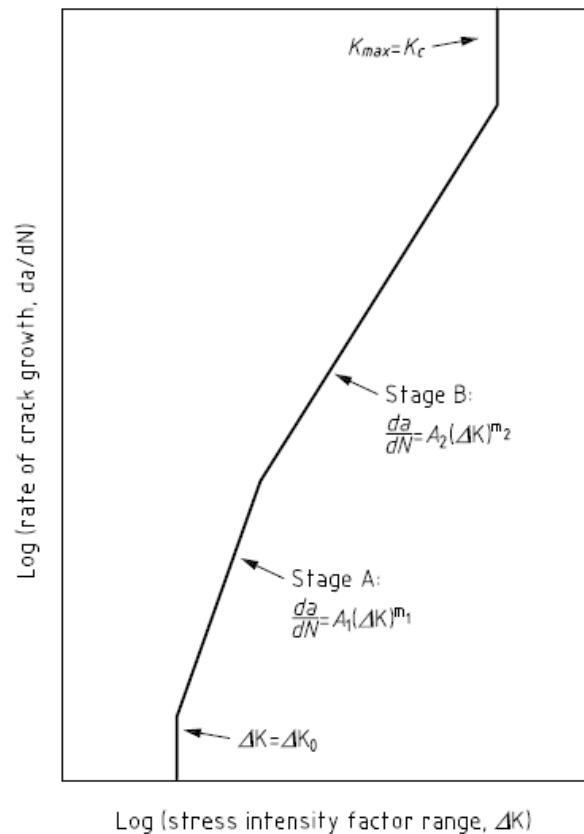
Abbildung 2.12: Risswachstum Stufen (entn. Milella et al. [Mil13])

### Gültigkeit des Paris Gesetzes

Tabelle 2.4: Grenzwerte des Paris Gesetzes

Bereich	C	n
	$\frac{mm/Zyklus}{MPa\sqrt{mm}^m}$	-
A	$1,21 \cdot 10^{-16}$	8,16
B	$3,39 \cdot 10^{-13}$	2,88

Die *British Standard Institution* gibt vor, dass das Paris Gesetz in den Regionen A und B (siehe Abbildung 2.13) die Grenzwerte aus Tabelle 2.4 nicht überschreiten darf. Die Richtwerte sind gültig für Materialien mit einer Streckgrenze  $\leq 700\text{MPa}$ , einer Prüftemperatur (T) unter  $100^\circ\text{C}$ , in nicht aggressiver Atmosphäre und bei einem  $R < 0,5$  [Bri05], und werden daher für die vorliegenden Versuche angewendet.



**Abbildung 2.13:** Stage A und Stage B des Risswachstums (entn. British Standards Bd. 7910 [Bri05])

## 2.5 Methoden der Risswachstumsuntersuchung

Der nachfolgende Abschnitt gibt Einblick in das verwendete Prüfverfahren. Zur Prüfung des Risswachstums werden vorwiegend drei Verfahren eingesetzt, die Middle Tension (M(t)), die Compact Tension (C(t)) und der 4-Punkt-Biegeversuch. In dieser Arbeit werden M(t) untersucht.

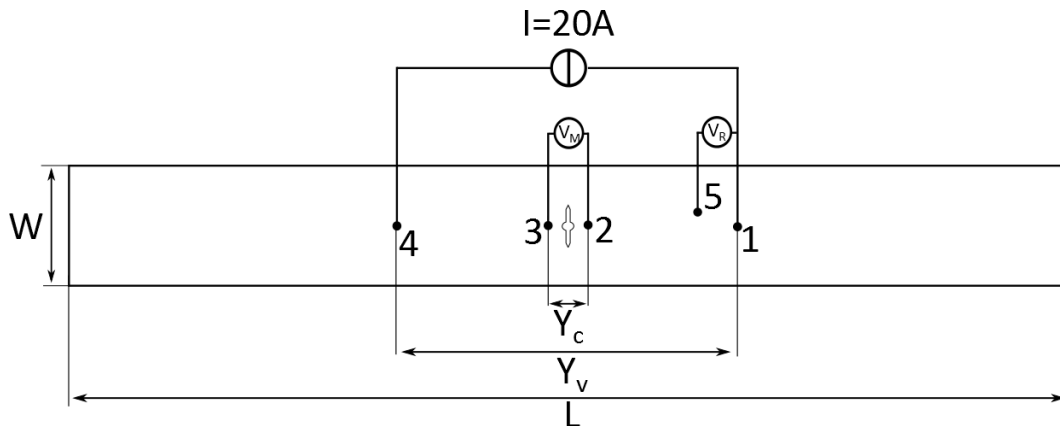


Abbildung 2.14: M(t) Probe Geometrie

### M(t) Proben

M(t)-Proben haben in der Mitte der Probe eine zentrierte Kerbe. Die Proben sind für Risswachstumsversuche im Zug- und Druckbereich geeignet [AST15]. Die Geometrie der verwendeten M(t)-Probe sind in Abbildung 2.14 und Abbildung 2.15 gezeigt. Die Geometriewerte sind in Tabelle 2.5 ausgeführt. Die verwendete Kerbe ist 17,5 mm lang und hat einen Bohrl Lochdurchmesser von 2 mm. Die Probengeometrien der einzelnen Proben sind in Anhang A aufgeführt.

In dieser Arbeit wird S355 Stahl genutzt. Die Streckgrenze von S355 ist  $\sigma_{ys}=388\text{MPa}$ . Aus der ASTM 647 geht hervor, dass die maximale Prüfkraft mit Gleichung 2.9 bestimmt werden kann, welche sich aus Gleichung 2.8 herleitet [AST15].

$$(W - 2a) \geq 1,25 \cdot \frac{P_{max}}{B \cdot \sigma_{ys}} \quad (2.8)$$

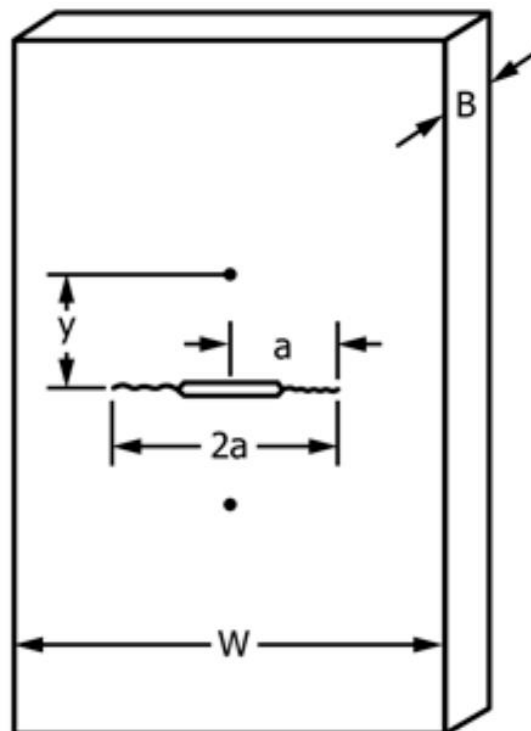
$$P_{max} \leq \frac{(W - 2a) \cdot B \cdot \sigma_{ys}}{1,25} \quad (2.9)$$

Aus den Geometriewerten ergibt sich eine maximale mögliche Prüfkraft von 131,9 kN.

$$P_{max} \leq \frac{(60 \text{ mm} - 17,5 \text{ mm}) \cdot 10 \text{ mm} \cdot 388 \text{ MPa}}{1,25} = 131,9 \text{ kN}$$

**Tabelle 2.5:** Probengeometrie der M(t)-Proben

Zeichen	Wert	Bedeutung
$2a_0$	17,5 mm	Kerbenlänge
$B$	10,0 mm	Probentiefe
$r$	2,0 mm	Radius Kerbenbohrung
$W$	60,0 mm	Probenbreite
$y_v$	6,0 mm	Abstand zwischen Spannungsmessung und Kerbe
$y_c$	75,0 mm	Abstand zwischen Stromeinleitung und Kerbe

**Abbildung 2.15:** M(t) Probe Geometrie (entn. ASTM 647:2015 [AST15])

## 2.6 Einfluss der Temperatur auf das Risswachstum

Im folgenden Abschnitt wird der Einfluss von niedriger Temperatur auf das Risswachstumsverhalten von Stahl dargestellt. Die Verringerung der Temperatur führt zu einem veränderten Bruchverhalten von Stahl. Die duktile Verformung nimmt ab und die Spröde nimmt zu [B. 83, Ant16]. Das spröde Bruchverhalten kann zu katastrophalen Versagen führen [WAM16].

### Bestimmung der Übergangstemperatur

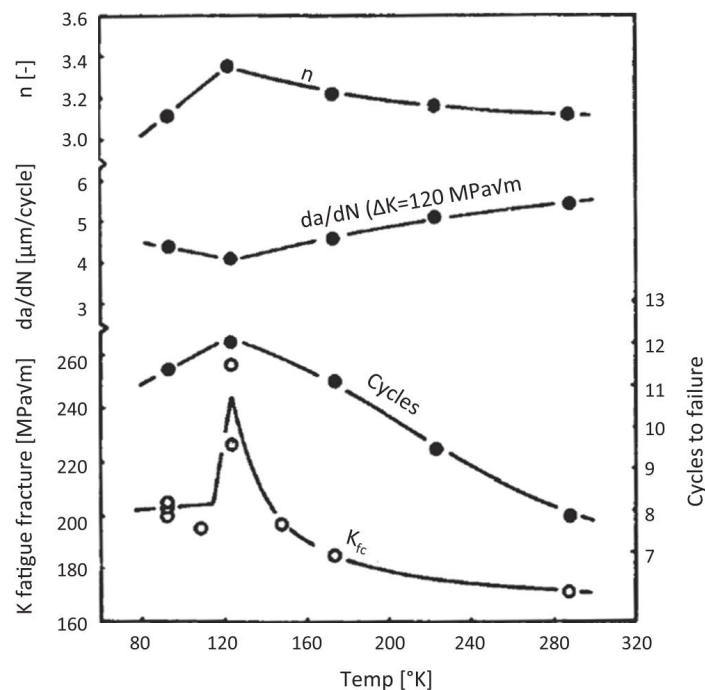
Um den Übergang von Sprödbbruch zu duktilem Bruch zu untersuchen, gibt es verschiedene Ansätze. Ziel der Untersuchung ist es eine Übergangstemperatur zu finden, bei welcher sich die Risseigenschaften ändern. Zwei Ansätze sind die „Fatigue Ductile Brittle Transition“ (FDBT) und die „Charpy Ductile to Brittle Transition Temperature“ (DBTT) [WAM16].

#### FDBT

Die FDBT-Methode wird bei zyklischen Risswachstumsversuchen angewendet. Sie ist für ferritische Stähle geeignet. Es wird die Übergangstemperatur von spröden zu duktilen Materialverhalten ermittelt, welches „Fatigue Transition Temperature“ (FTT) genannt wird. Es lässt sich beobachten, dass die Risswachstumsrate bei Erhöhung der Temperatur bis zum Erreichen der FTT zunimmt. Nach Erreichen der FTT nimmt bei weiterer Steigerung der Temperatur die Risswachstumsrate ab [N. 79]. Andere Materialeigenschaften, wie der Paris Exponent ( $n$ ), die Zahl der Zyklen bis zum Versagen und  $\Delta K$ , haben ebenfalls Extrema bei der FTT (siehe Abbildung 2.16) [WAM16]. Der Paris-Exponent zeigt unterhalb der FTT keinen Zusammenhang mit der weiteren Temperatursenkung [N. 79].

#### DBTT

Eine andere Möglichkeit den Einfluss der Temperatur zu ermitteln ist mit Hilfe des Kerbschlagbiegeversuchs. DBTT ist gleichbedeutend mit  $T_{27J}$ .  $T_{27J}$  beschreibt die Temperatur, bei der die Bruchenergie des Kerbschlagbiegeversuchs bei 27J liegt [WAM16].



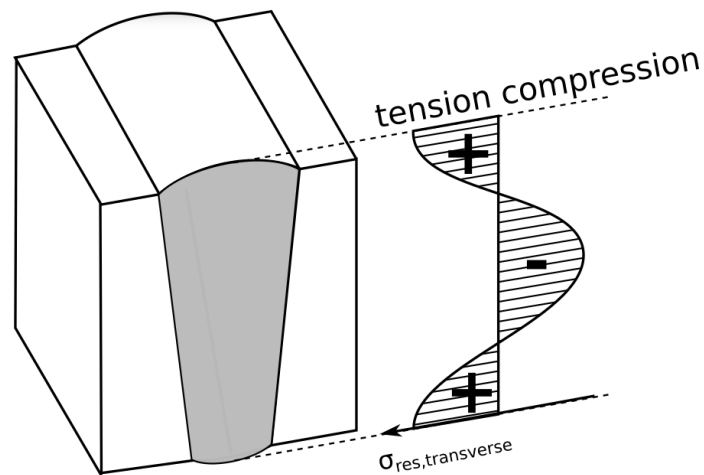
**Abbildung 2.16:** Einfluss von FDBT auf Materialeigenschaften (entn. Walters et al. [WAM16])

## 2.7 Einfluss von Schweißen auf das Risswachstum

Im nachfolgenden Abschnitt wird der Einfluss von Schweißnähten auf das Risswachstum vorgestellt. Für die Untersuchung des Risswachstums haben Schweißnähte eine große Bedeutung, da im Bereich der Wärmeeinflusszone der Schweißnaht der Rissursprung am wahrscheinlichsten ist [Ant16, Lin90]. Grund dafür ist die Wärmeeinbringung beim Schweißen, wodurch es zu Eigenspannungen und Fehlstellen im Material kommt, wie beispielsweise Lunker und Poren. In mehreren Untersuchungen wird daher das Risswachstumsverhalten von Grundmaterial (GM) und geschweißten Proben (SP) verglichen.

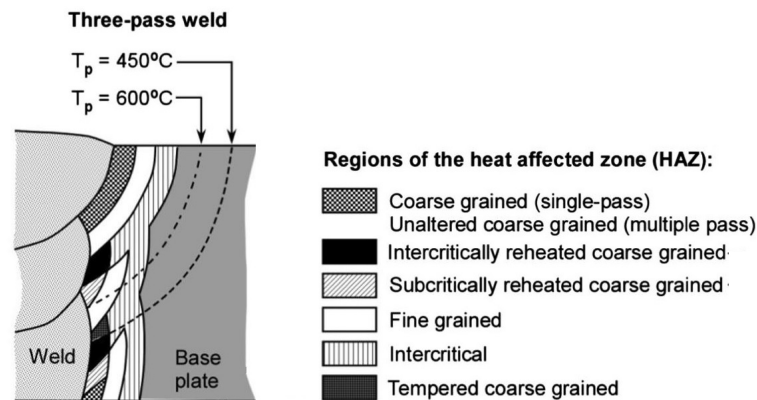
Um das Risswachstumsverhalten von Schweißnähten zu ermitteln, wird in vielen Untersuchungen das Schweißen simuliert. Die Simulation erfolgt in dem die Proben erhitzt und anschließend abgeschreckt werden [Ant16, Chu15]. Es wird zwischen zwei Arten der Schweißsimulation unterschieden, die „Coarse Grain Heat Affected Zone“(CGHAZ) und die „Intercritically Coarse Grained Heat Affected Zone“(ICCGHAZ).

Durch das Schweißen entsteht im Material Eigenspannung, welche sich idealerweise wie in Abbildung 2.17 verteilt. Im Randbereich entsteht so Zugspannung im Material und in der Mitte Druckspannungen [ZAB14]. Die in der Arbeit verwendeten Proben, werden durch



**Abbildung 2.17:** Idealisierte Eigenspannung der Schweißnaht (basierend auf Zerbst et al. [ZAB14])

Funkenerodieren zugeschnitten. Durch die Wärmeeinbringung des Funkenerodierens kann es sein, dass die Eigenspannung im Material verringert wird.



**Abbildung 2.18:** Gefüge Mehrlagenschweißen (entn. Zerbst et al. [ZAB14])

Die Schweißnaht und Wärmeinflusszone (WEZ) haben zudem ein anderes Gefüge als das Grundmaterial [ZAB14]. Das Gefüge der verwendeten Schweißnaht besteht zum größten Teil aus Bainit, mit geringem Ferrit- und Martensitanteilen [Fin17]. Die Gefüge innerhalb der Schweißnaht unterscheiden sich lokal, da die Schweißnaht im Mehrlagenverfahren geschweißt wird [ZAB14] (siehe Abbildung 2.18). In der Untersuchung der Gefüge der schweißsimulierten Proben kam Alvaro et al. [WAM16] zu der Erkenntnis, dass nur die ICCGHAZ Martensit aufweist.

Die einzelnen Gefüge zeichnen sich durch unterschiedliche Eigenschaften aus, Bainit ist feinkörnig und besitzt eine hohe Streckgrenze und Zähigkeit. Martensit hat hingegen eine hohe Härte und ist spröde [WDJ15].

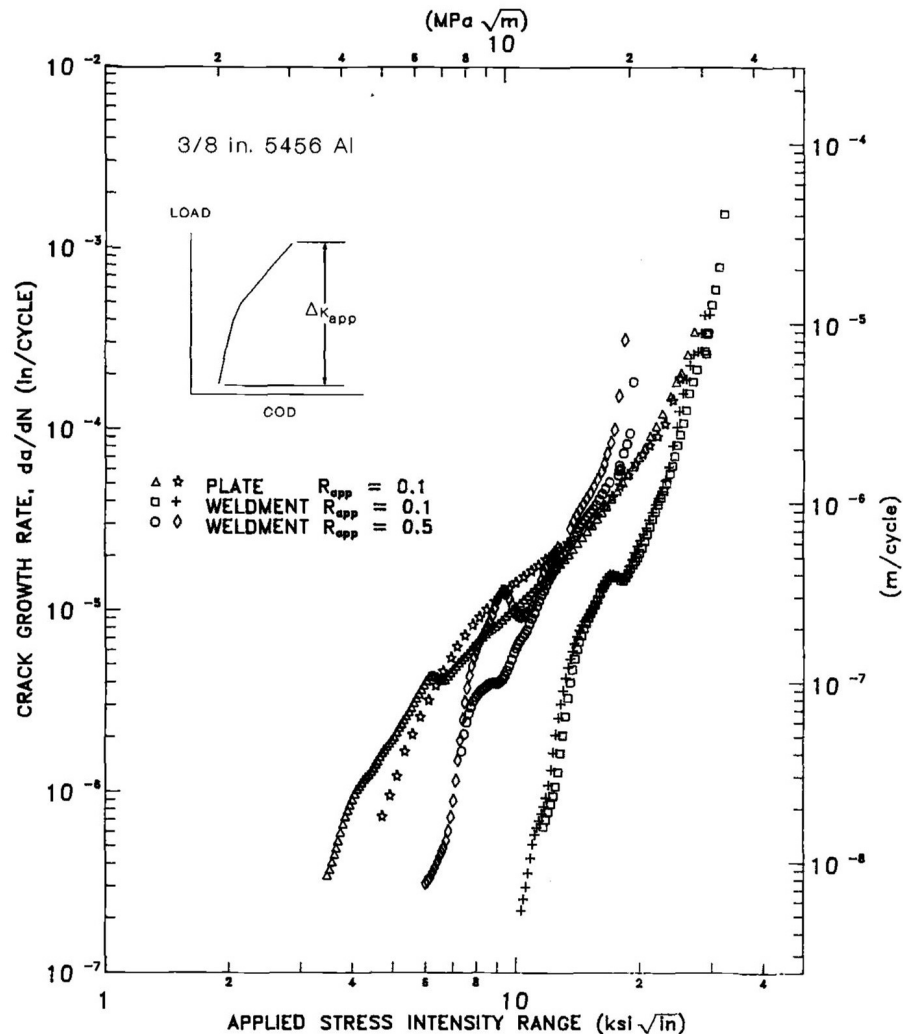


Abbildung 2.19: Vergleich von Grundmaterial- und geschweißten Proben bei unterschiedlichen  $R$  (entn. Link et al. [Lin90])

Der Vergleich von geschweißten Proben und Grundmaterial zeigt sich, dass geschweißte Proben einen höheren Widerstand gegen Risswachstum haben. Das Risswachstumsverhalten verschlechtert sich, wenn der Stahl thermisch behandelt wird. Der Stahl wird dafür beispielsweise spannungsarmgeglüht (stress relieved) [TLCS01].

Bei einem kleinen  $\Delta K$  zeigen Schweißproben einen sehr viel höheren Widerstand gegen Risswachstum, als das Grundmaterial. Dieses Verhalten ist vermutlich auf die höhere Streckgrenze des Gefüges in der Schweißzone zurückzuführen, da in Region I des Risswachstums die Mikrostrukturen dominieren. Das Gefüge verhindert so eine Rissöffnung,

wodurch kein Risswachstum stattfindet [LL12]. Ein ähnliches Verhalten kann beobachtet werden bei kleinem  $R$  Verhältnissen.

In Abbildung 2.19 ist  $da/dN$  über  $\Delta K$  aufgetragen. Man sieht, dass die Risswachstumsrate bei geschweißten Proben geringer ist als beim Grundmaterial.

## 2.8 Decreasing K Methode

Die *decreasing K*-Methode wird genutzt, um die Untergrenze des Risswachstum festzustellen. Die Methode ist in ASTM 647 beschrieben [AST15]. Laut der ASTM wird der Punkt ermittelt, bei dem die Risswachstumsrate kleiner als  $10^{-8}$  mm/Zyklus ist. Laut Walters et. al [WAM16] ist es ausreichend eine Risswachstumsrate von kleiner als  $10^{-7}$  mm/Zyklus zu erreichen und anschließend auf das  $\Delta K$  für  $10^{-8}$  mm/Zyklus zu interpolieren.

$$\Delta K = \Delta K_0 \cdot \exp[C(a - a_0)] \quad (2.10)$$

Zur Bestimmung der Untergrenze wird die Probe mit einer sich stufenweise verändernden Kraft belastet. Die Anfangslast kann frei gewählt werden. Die Lastrate ist mit  $R=0,1$  festgesetzt. Die Probe wird mit der Anfangslast belastet, bis eine vordefinierte Risslänge vorhanden ist, in den konkreten Versuchen  $a=11$  mm. Die Risslänge wird mit Hilfe eines DMS bestimmt. Wenn die definiert Risslänge erreicht ist, wird die Last bzw. das  $\Delta K$  reduziert. Das neue  $\Delta K$  wird mit Hilfe der Gleichung 2.10 bestimmt, wobei die Konstante ( $C$ ) mit der Gleichung 2.11 berechnet wird. Das  $C$  sollte so gewählt werden, dass das  $\Delta K$  nicht um mehr als 10 % gesenkt wird. Abbildung 2.20 zeigt den Verlauf einer typischen *decreasing K* -Kurve.[AST15]

$$C = \frac{1}{K} \cdot \frac{dK}{da} > -0.08 \text{ mm}^{-1} \quad (2.11)$$

Mit Hilfe des neuen  $\Delta K$  kann die neue Spannungsschwingbreite ( $\Delta P$ ) bestimmt werden (siehe Gleichung 2.12).

$$\Delta P = \frac{\Delta K \cdot B}{\sqrt{\frac{\pi \cdot a_0}{W^2} \cdot \frac{1}{\cos(\frac{\pi \cdot a_0}{W})}}} \quad (2.12)$$

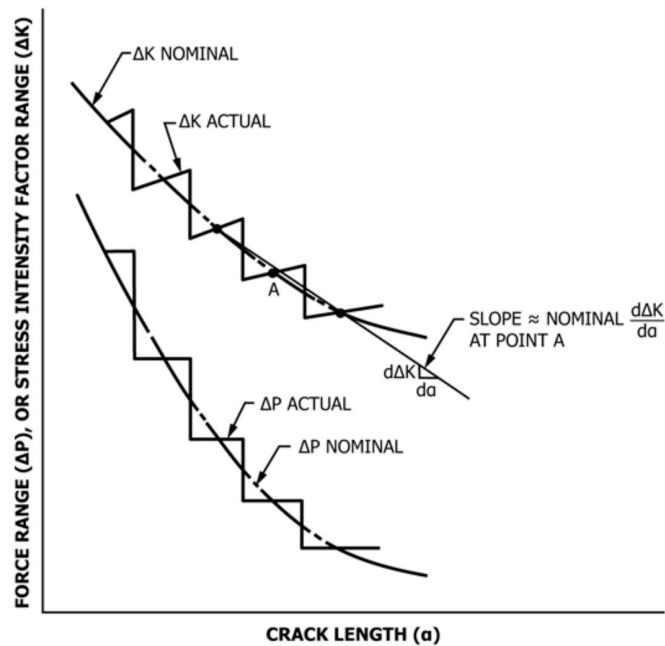


FIG. 2 Typical  $K$  Decreasing Test by Stepped Force Shedding

Abbildung 2.20: Typischer Verlauf von *decreasing K* Stufen (entn. ASTM 647:2015 [AST15])

## 2.9 Problemstellung

In mehreren vorangegangenen Arbeiten wird der Einfluss von Schweißnähten auf das Risswachstumsverhalten untersucht. Im Rahmen dieser Thesis soll die bestehende Literatur überprüft und erweitert werden.

Für die Untersuchung des Risswachstumsverhaltens werden Grundmaterial und geschweißte Proben in Form von  $M(t)$ -Proben getestet. Hierfür werden die Proben in einer Resonanzzugmaschine belastet. Der Rissfortschritt wird mit der DCPD-Methode erfasst. Für die Kalibrierung der DCPD werden DMS und Rastlinien verwendet. Die Thesis erarbeitet zwei Kalibrierungskurven der DCPD für das Grundmaterial und die geschweißten Proben. Zudem werden die Paris Konstanten aus der Gegenüberstellung von Risswachstumsrate gegen Spannungsintensitätsfaktor bestimmt. Die Ergebnisse der beiden Proben werden miteinander und mit Literaturwerten verglichen.

## **3 Experimenteller Aufbau**

Im folgenden Kapitel wird auf die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche eingegangen. Zu Beginn wird die Herstellung der Materialien sowie die Anbringung der Messmittel beschrieben. Im Weiteren werden die eingesetzten Prüf- und Messgeräte vorgestellt und abschließend der Versuchsablauf dargestellt.

### **3.1 Probenherstellung**

In diesem Abschnitt wird die Probenherstellung beschrieben. In der Arbeit werden geschweißte Proben und Proben aus Grundmaterial verwendet. Zu Beginn wird der Schweißprozess vorgestellt und anschließend die weiteren Herstellungsschritte.

#### **3.1.1 Schweißprozess**

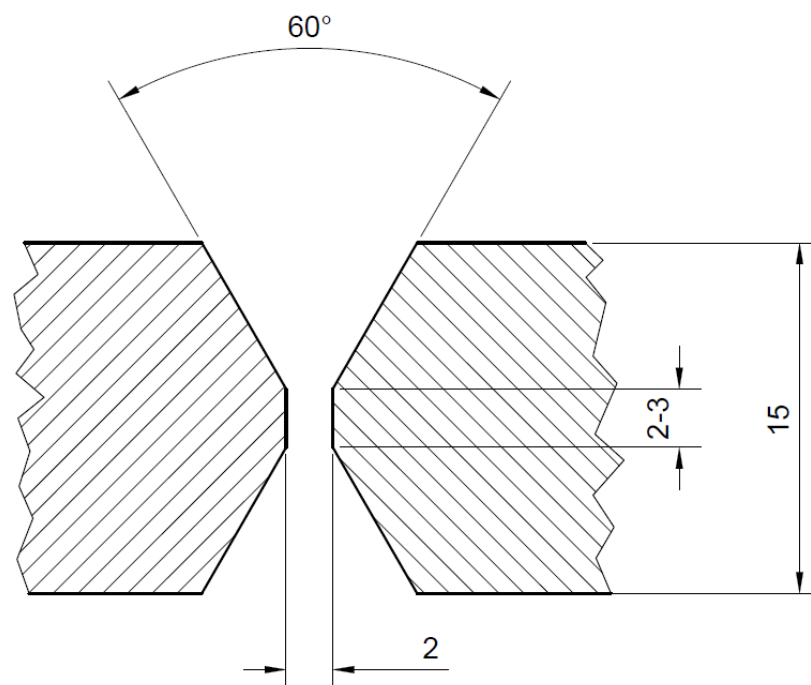
Im folgenden Abschnitt wird der Schweißprozess vorgestellt. Die Schweißverbindung wird im Metall-Aktiv-Gas-Schweißprozess (MAG) hergestellt. Die Schweißrichtung ist orthogonal zur Walzrichtung des Bleches. Die verschweißte Bleche haben eine Dicke von 15 mm und eine Breite und Höhe von 500 mm.

#### **Schweißprozess**

Die Parameter des Schweißprozesses sind in Tabelle 3.1 aufgeführt. Die Parameter werden in der Bachelorarbeit von Renken [Fin17] erarbeitet und sind hier übernommen.

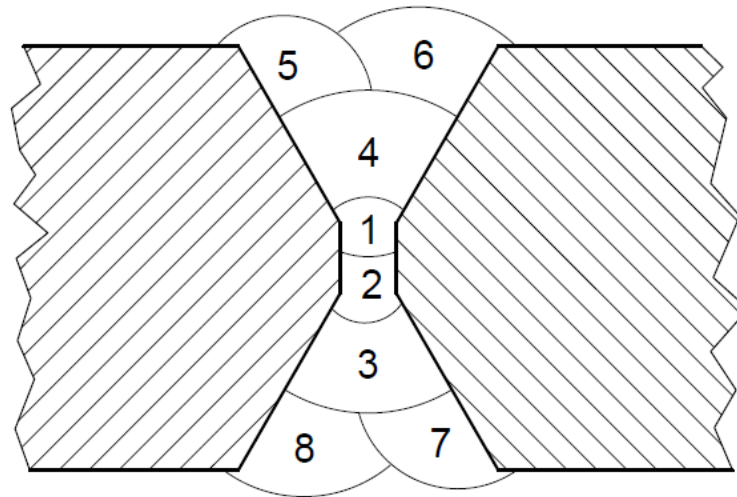
**Tabelle 3.1:** Parameter Schweißprozess (entn. Renken [Fin17])

Parameter	Wert
Schweißprozess	MAG
Schutzgas	MISON 18
Schweißdraht	OK AristoRod 12.50
Drahtdurchmesser	1 mm
Schweißstrom	220 A
Schweißspannung	24 V
Abkühlzeit ( $t_{8/5}$ )	14,3 Sek.
Schweißtemperatur	500°C
Schweißgeschwindigkeit	11,7- 11,8 cm/min
Gefüge Schweißnaht	3 % Martensit 18 % Ferrit 79 % Bainit

**Abbildung 3.1:** X-Naht Geometrie (entn. Renken [Fin17])

### Schweißnahtgeometrie

Die Schweißnaht wird auf Grund der Blechstärke als Mehrlagenschweißnaht gefertigt. Es wird eine X-Naht mit einem Öffnungswinkel von  $60^\circ$  verwendet. Die Geometrie ist in Abbildung 3.1 gezeigt.



**Abbildung 3.2:** Reihenfolge der Mehrlagenschweißung (entn. Renken [Fin17])

Die Schweißnaht wird insgesamt mit acht Schweißnähten gefertigt. In Abbildung 3.2 sind die einzelnen Schweißnähte gezeigt. Durch die abwechselnde Schweißreihenfolge von Oben nach Unten wird die WEZ gleichmäßig verteilt. Die Schweißnaht wird im später folgenden Fräsprozess gleichmäßig an Ober- und Unterseite abgefräst.

#### 3.1.2 Herstellung der Proben

Die nachfolgende Aufzählung gibt einen Überblick über die einzelnen Fertigungsschritte der Probenherstellung.

- Stahlplatten verschweißen (bei SP)
- Stahlplatte wird mit Funkenerodieren auf die richtige Breite geschnitten
- Fräsen auf eine Probendicke von 10 mm
- Ätzen der Probenoberfläche zum Platzieren der Referenzbohrung (bei SP)
- Referenzbohrung wird in Probe eingebracht
- Kerbenfertigung
- Vermessen der Probe

Die Kerben werden bei den geschweißten Proben, wie in Abbildung 2.2 gezeigt, platziert. Die Kerben der Grundmaterialproben werden mittig eingebracht.

### 3.1.3 Anbringung von elektrischen Bolzen

Für die DCPD-Messung werden auf die Proben 3 mm dicke Bolzen geschweißt. Für die Schweißung wird das Elektroschweißgerät *AS 1066* der *AS Schweißtechnik GmbH* verwendet. Auf die Probe werden fünf Bolzen aufgebracht. In Abbildung 2.9 ist die Position der Bolzen dargestellt. Über die beiden äußeren Bolzen wird Strom in die Probe geleitet. Über Bolzen 1 und 5 wird die Referenzspannung der Probe gemessen. Die für die DCPD benutzen Messspannungen werden über Bolzen 2 und 3 gemessen.

### 3.1.4 DMS-Messstreifen

Bei den eingesetzten DMS handelt es sich um FAC-5 Viertelbrücken der Firma *Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.* Die DMS-Messstreifen werden im Abstand von 2 mm zur Kerbenspitze aufgeklebt, um einen möglichst großen Messbereich abzudecken. Ein minimaler Abstand zur Kerbe von 0,5 mm wäre möglich [WV13]. Anschließend werden an die DMS Widerstände angebracht, um das Messsignal zu verstärken. In Abbildung 3.3 ist eine Probe mit aufgeklebten DMS gezeigt.

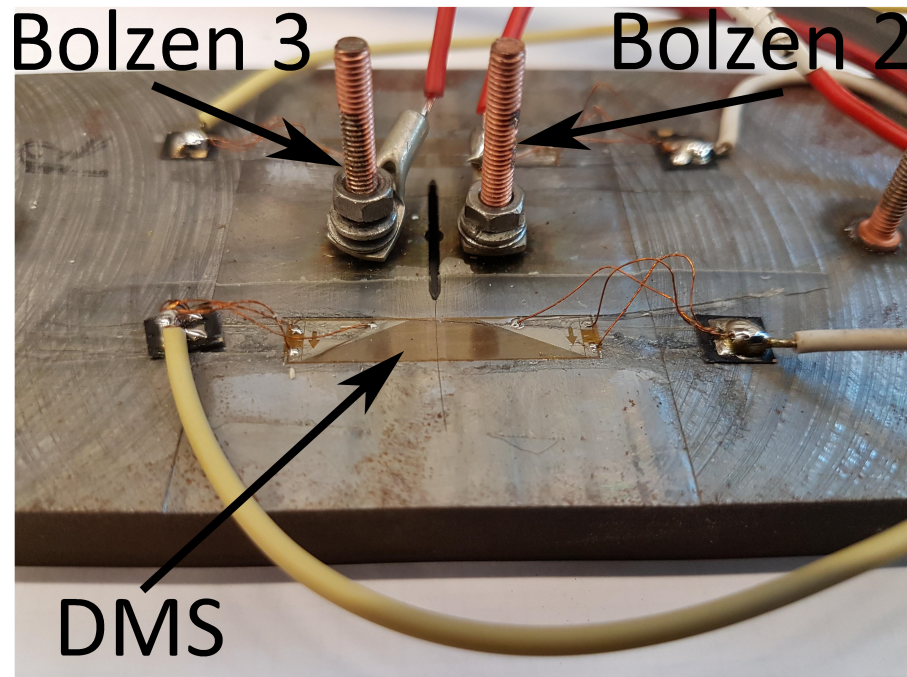


Abbildung 3.3: Aufgeklebte DMS

## 3.2 Eingesetzte Prüf- und Messgeräte

Zur Prüfung der Proben werden mehrere Mess- und Prüfgeräte eingesetzt. Die Geräte werden in der nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

### 3.2.1 Zyklische Prüfmaschine

Die Proben werden mit einem Resonanzpulver der Firma *Schenck* getestet. Die Einspannung erfolgt durch hydraulische Spannbacken, welche während der Versuche eine statische Spannkraft aufbringen. Die dynamische Kraft wird mit Hilfe einer Schwungfeder erzeugt, welche mit einer Frequenz von ca. 33 Hz schwingt. Als Steuerungssoftware wird *RUMUL TestLab* der Firma *Russenberger Prüfmaschinen AG* eingesetzt. Mit der Software wird die Prüfkraft variiert, um die Rastlinien zu erzeugen.

### 3.2.2 Kühlkammer

Zur Kühlung des Versuchsaufbaus bei Niedrigtemperaturversuchen wird eine Kühlkammer eingesetzt. Die Kühlkammer umschließt die Probe und die Spannbacken. Das Gewicht der Kammer wird durch einen Rahmen gehalten, damit der Versuch durch die Kammer nicht

beeinflusst wird. Die Kammer hat eine Klappe an der Vorderseite, mit einem Sichtfenster. Auf der Rückseite befindet sich eine Kabeldurchführung für die Messkabel.

Die Temperatur in der Kammer wird durch eine separate Bedieneinheit gesteuert. Diese misst mit einem Thermometer die Kammertemperatur. Die Kammertemperatur wird durch die Kammerheizung und den Stickstoffzufluss geregelt. Die Kammer ist für eine Temperatur von bis zu  $-180^{\circ}\text{C}$  ausgelegt.

### 3.2.3 DCPD Messgerät

Für die Bestimmung der elektrischen Spannungen der DCPD wird das Messgerät *Autolog 3000* von *Peekel Instruments* verwendet. Als Messsoftware wird *Autolog 3000* verwendet. Die beispielhafte Darstellung der Benutzeroberfläche der Messsoftware ist in Abbildung 3.4 gezeigt. Das Messgerät zeichnet mit 1 kHz Messdaten auf, um die Datenmenge zu verringern werden die Daten über zwei Sekunden gemittelt. Ausgenommen sind die DMS Daten, von welchen die Maximum über zwei Sekunden ermittelt wird.

### 3.2.4 DCPD Stromquelle

Bei der verwendeten Stromquelle handelt es sich um das Modell *PS3016-40 B* der Firma *Elektro-Automatik GmbH & Co.KG.*. Die Stromquelle verfügt über eine einstellbare Überspannungsabschaltung. Dieser stellt sicher, dass die Messkarten des Messgerätes vor hoher Spannung geschützt werden.

## 3.3 Versuchsaufbau und Durchführung

Im nachfolgenden Abschnitt wird der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung beschrieben.

### 3.3.1 Versuchsaufbau

Zu Beginn werden die Mess- und Stromkabel an der Probe angebracht (siehe Abbildung 3.5). Anschließend werden Messkabel an das Messgerät und Stromkabel an die Stromquelle angeschlossen.

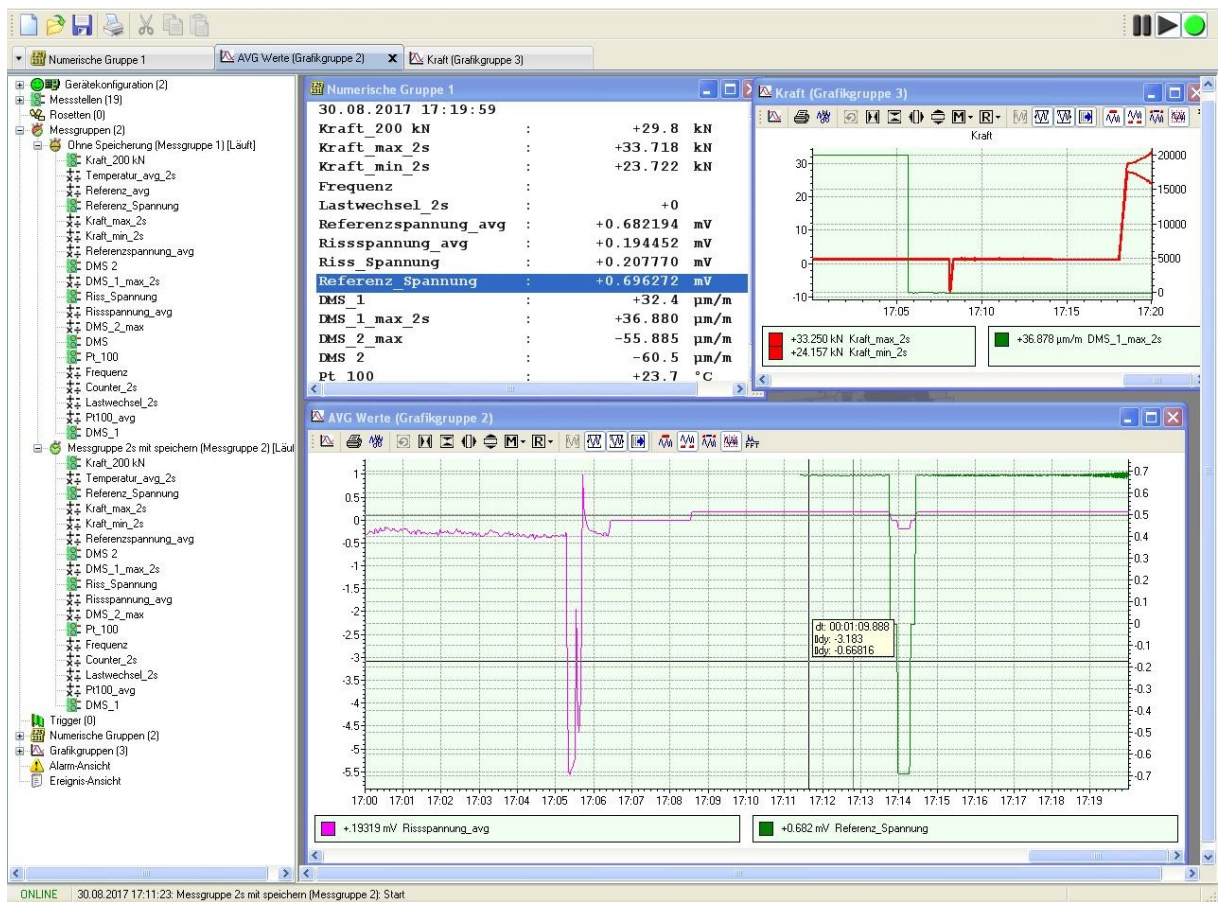


Abbildung 3.4: Oberfläche Autolog 3000

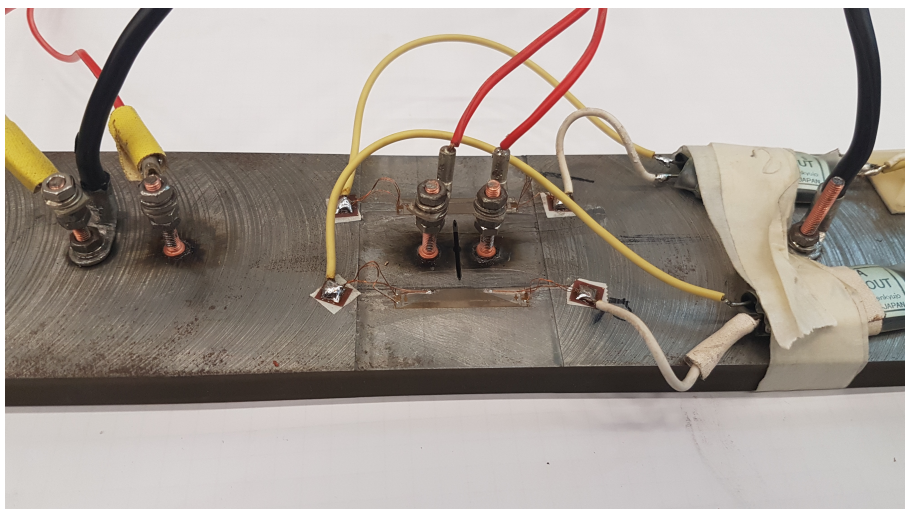


Abbildung 3.5: Probe mit Messkabeln

Die Probe wird in die Spannbacken der Prüfmaschine eingespannt. Zwischen die Probe und die Spannbacken werden Teflonplatten gelegt, um das System elektrisch zu isolieren. Die Probe wird mit Hilfe von Abstandshaltern in den Spannbacken ausgerichtet.

Nachdem die Probe eingespannt ist, wird die Messelektrik und die Stromquelle angeschaltet. Anschließend wird die Kühlkammer geschlossen und die Versuchstemperatur eingestellt. Wenn die Versuchstemperatur erreicht ist, wird die Stromquelle umgepolt um den in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen thermoelektrischen Effekt zu ermitteln.

### 3.3.2 Versuchsdurchführung

Im Laufe der Arbeit werden zwei Arten von Versuchen durchgeführt. Bei den ersten Versuchen werden die Proben bei konstantem  $\Delta P$  belastet. Im zweiten Teil der Versuche wird Probe nach der *decreasing K*- Methode getestet.

**Tabelle 3.2:** Versuche Teil 1: Laststufen

Probenart	Lastblöcke	$\Delta P$	R	statische Last	dynamische Last
GM	ungerade	45 kN	0,1	27,5 kN	22,5 kN
	gerade	25 kN	0,5	37,5 kN	12,5 kN
SP	ungerade	36 kN	0,1	22,0 kN	18,0 kN
	gerade	20 kN	0,5	30,0 kN	10,0 kN

#### Versuche Teil 1: konstante Last

Die Proben werden im ersten Teil der Versuche mit konstanten  $\Delta P$  geprüft. Die Proben werden hierfür in die Prüfmaschine eingespannt und bei einem  $\Delta P$  von 50,5 kN (Grundmaterial) bzw. bei einem  $\Delta P$  von 36 kN (geschweißte Proben) bis zum Versagen belastet. Zur Erfassung des Rissfortschrittes werden DMS und die DCPD eingesetzt. Für die Erzeugung von Rastlinien wird  $R$  wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, zwischen  $R=0,1$  und  $R=0,5$  variiert. Es werden 75.000 Lastwechsel bei  $R = 0,1$  und 20.000 Lastwechsel bei  $R = 0,5$  gefahren. Somit wird sichergestellt, dass genug Rastlinien vorhanden sind und die Rastlinien eine ausreichende Dicke haben. In Abbildung 3.6 ist ein beispielhafter Verlauf der Kraft gezeigt. Die Kraftblöcke der unterschiedlichen Proben sind in Tabelle 3.2 gezeigt.

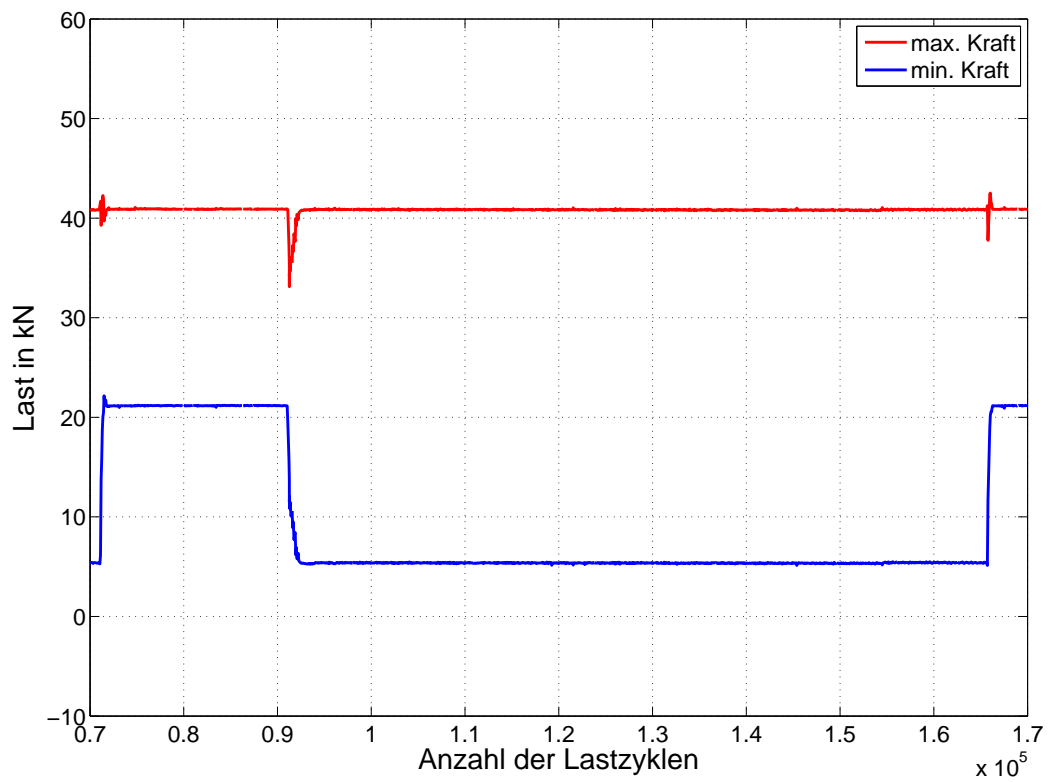


Abbildung 3.6: Kraftverlauf der zwei Lastblöcke

**Tabelle 3.3:** Versuche Teil 2: Laststufen

Laststufe	$\Delta P$	Anfangsrisslänge	R	statische Last	dynamische Last
1	45,00 kN	11,8 mm	0,1	27,50 kN	22,50 kN
2	44,10 kN	12,0 mm	0,1	26.95 kN	22.05 kN
3	42,38 kN	12,2 mm	0,1	25.89 kN	21.18 kN
4	40,00 kN	12,4 mm	0,1	24.39 kN	19.95 kN
5	36,84 kN	12,6 mm	0,1	22.51 kN	18.42 kN
6	33,00 kN	12,9 mm	0,1	20.16 kN	16.50 kN
7	29,27 kN	13,1 mm	0,1	17.71 kN	14.49 kN
8	24,94 kN	13,3 mm	0,1	15.24 kN	12.47 kN
9	21,02 kN	13,5 mm	0,1	12.86 kN	10.52 kN
10	17,42 kN	13,7 mm	0,1	10.63 kN	8.70 kN

### Versuche Teil 2: Decreasing K

Im zweiten Teil der Versuche werden die Proben im *decreasing K*-Verfahren getestet. Für die Bestimmung der Risslänge werden DMS und die DCPD genutzt. Zu Beginn des Versuches wird die Probe wie in Teil 1 der Versuche belastet, bis die erste Litze des DMS erreicht ist. Mit diesem Vorgehen wird der in Kapitel 2.4.1 beschriebene Anfangsriss erzeugt. Daraufhin wird, wie in Kapitel 2.8 beschrieben, die Last stufenweise reduziert. Die Last wird gesenkt, wenn zwei DMS versagt sind. Somit deckt jede Laststufe eine Risslänge von 0,2 mm ab. Die Last wird solange reduziert bis ein  $da/dN < 10^{-7}$  mm/Zyklus erreicht ist. Die stufenweisen Lastwechsel sind in Tabelle 3.3 dargestellt.

# 4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse von Teil 1 und Teil 2 der Versuche vorgestellt. Anschließend wird die Schwankung des Stromflusses der DCPD-Messung und der Temperatur beurteilt. Danach werden die Kalibrierungskurven verglichen und die Unterschiede erläutert. Daraufhin werden die Spannungsintensitätsfaktoren und Risswachstumsraten der unterschiedlichen Versuchskonfigurationen erarbeitet. Abschließend werden sie mit Hilfe der Johnson-Formel verglichen.

**Tabelle 4.1:** Übersicht Proben

Material	Prüftemperatur	Prüfverfahren	Probenbezeichnung	Messverfahren
GM	$R_t$	increasing	JS20	DMS, Rastlinien
	$R_t$	decreasing	JS22	DMS
SP	$R_t$	increasing	JS01	DMS, Rastlinien
	$R_t$	decreasing	JS02	DMS

In dieser Arbeit werden vom Grundmaterial und von den geschweißten Proben bei Raumtemperatur ( $R_t$ ) eine Probe bei konstanter  $\Delta P$  (increasing K) getestet und eine mit der *decreasing K* Methode. In Tabelle 4.1 sind die Proben mit der vollständigen Bezeichnung aufgelistet.

## 4.1 Ergebnisse Teil 1

Der folgenden Abschnitt behandelt die Ergebnisse des ersten Teils der Versuche. Zu Beginn werden die einzelnen Messparameter, wie Temperatur, Prüfkraft und Messspannung der DCPD, vorgestellt. Anschließend wird auf die Bestimmung der Referenzpunkte durch die Rastlinien und DMS eingegangen. Die Auswertung der Ergebnisse sind für alle Proben identische. Deswegen wird im Weiteren beispielhaft Probe JS01 vorgestellt.

### 4.1.1 Ergebnisse Prüftemperatur

In Abbildung 4.1 ist der Temperaturverlauf der Probe dargestellt. Der Versuch wird bei Raumtemperatur durchgeführt. Aus diesem Grund ist die Kühlkammer nicht geschlossen. Die Temperatur schwankt um  $0,2^{\circ}\text{C}$  während des Versuches.

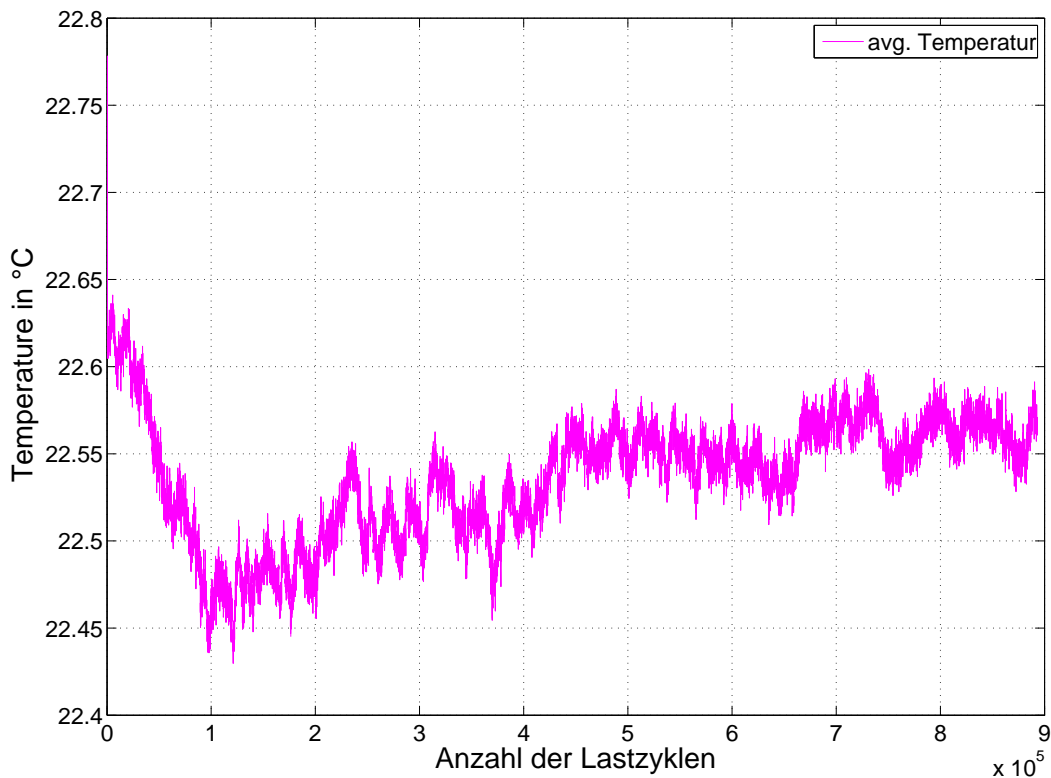


Abbildung 4.1: Prüftemperatur der Probe JS01

### 4.1.2 Ergebnisse Prüfkraft

Zur Erzeugung der Rastlinien ist zudem die Prüfkraft entscheidend. In Abbildung 4.2 ist der Kraftverlauf der Probe gezeigt. Man erkennt, dass bei dieser Probe 9 Rastlinien erzeugt werden. Die maximale Prüfkraft beträgt  $40,5\text{ kN}$ , dies entspricht ein Abweichung vom eingestellten  $P_{max}$  ( $40\text{ kN}$ ) von  $1\%$ . Die Abweichung liegt laut ASTM E647 [AST15] im erlaubten Rahmen von  $2\%$ .

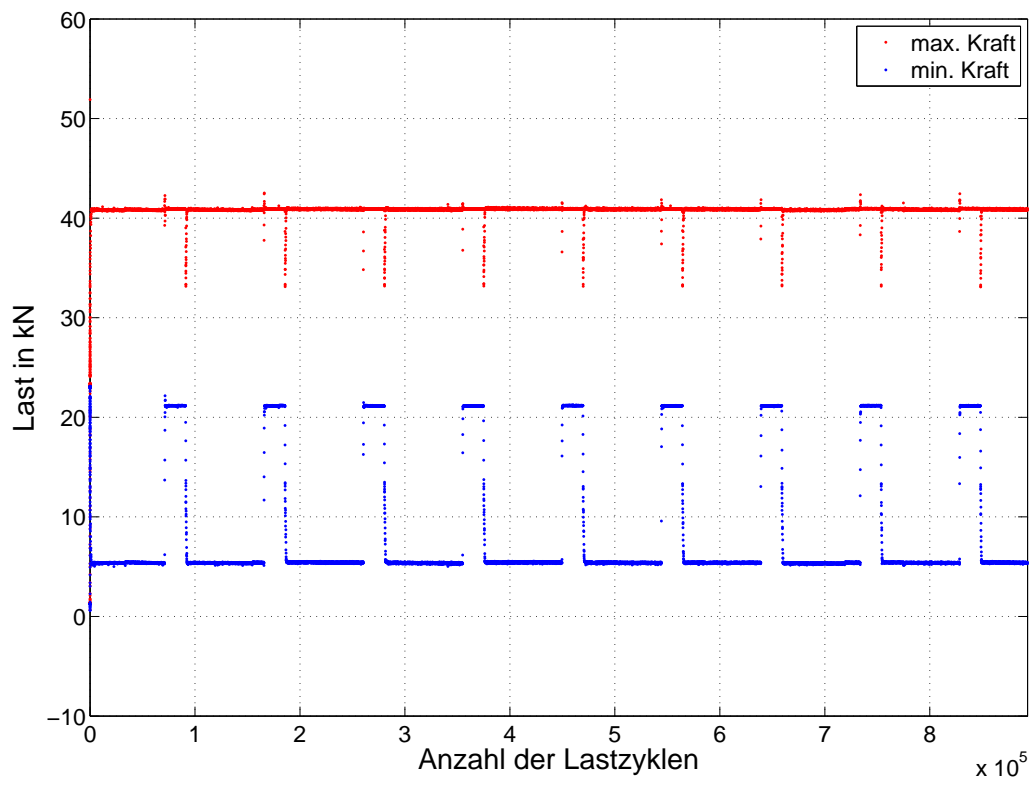
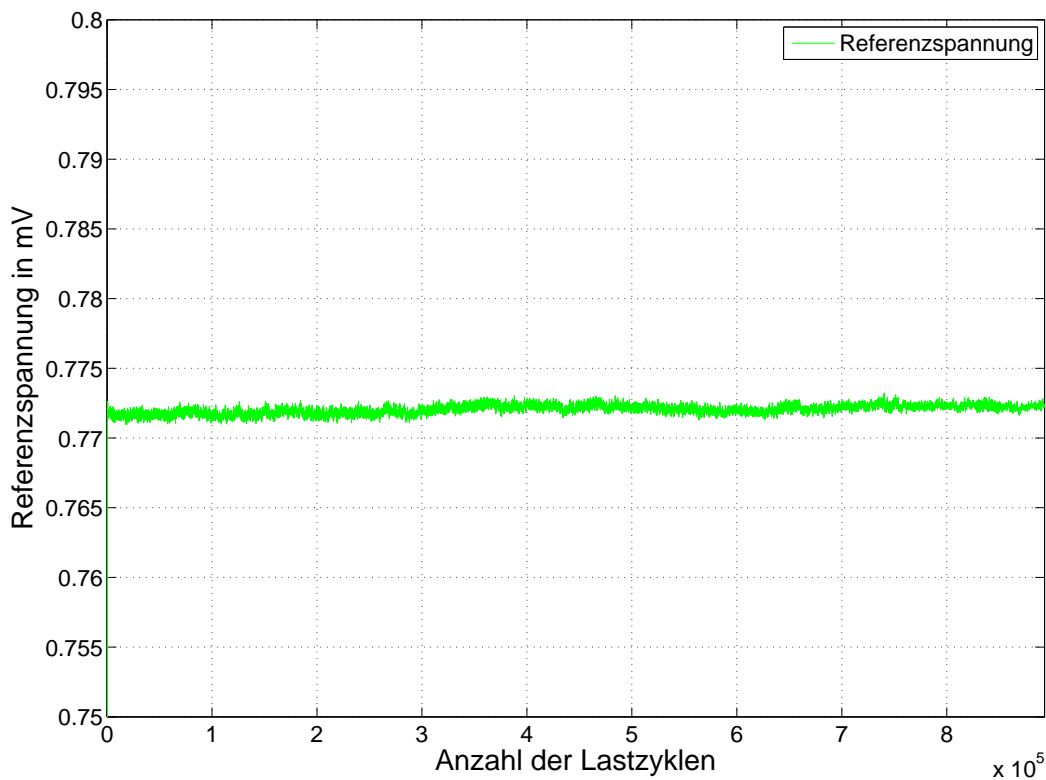


Abbildung 4.2: Prüfkraft der Probe JS01

### 4.1.3 Ergebnisse DCPD

Zur Bestimmung der DCPD wird, wie in Kapitel 2.1.1 erklärt, der Spannungsabfall über den Riss gemessen. Um sicher zustellen, dass Interferenzen des Messsystems ausgeschlossen werden können, wird auf der Probe eine Referenzspannung gemessen, wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben. Die Referenzspannung ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Sie schwankt während des Versuches in einem Bereich von 0,0015 mV. Um den thermoelektrischen Ef-



**Abbildung 4.3:** Referenzspannung der Probe JS01

fekt zu berücksichtigen, wird die Messspannung mit  $U_d$  addiert. In den nachfolgenden Ergebnissen wird die korrigierte Messspannung verwendet. Die gemessene Messspannung ist in Abbildung 4.4 gezeigt. Die Steigung der Messspannung nimmt mit Zunahme der Lastwechsel stetig zu. Im Bereich von  $R = 0,5$  sind Plateaus in der Messkurve zuerkennen, beispielsweise zwischen den Lastwechsel von 56.000 bis 58.000.

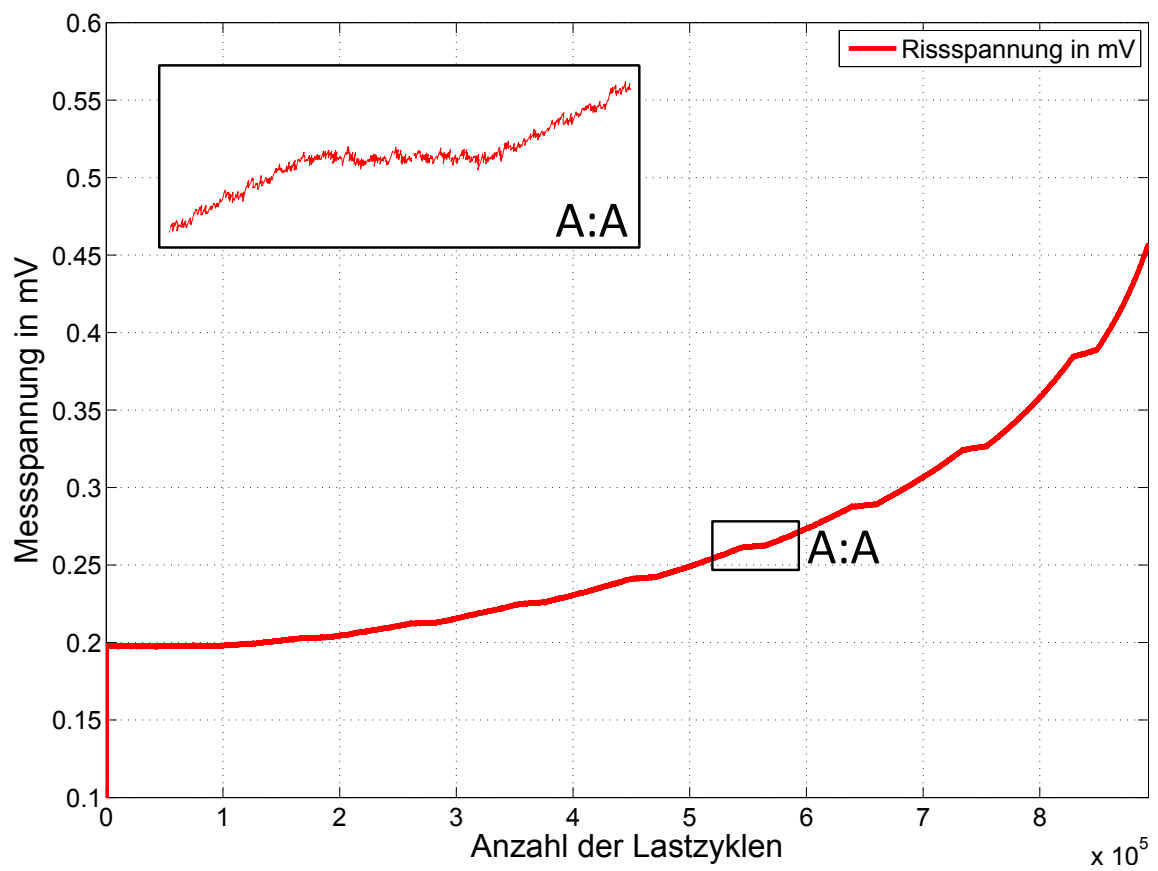
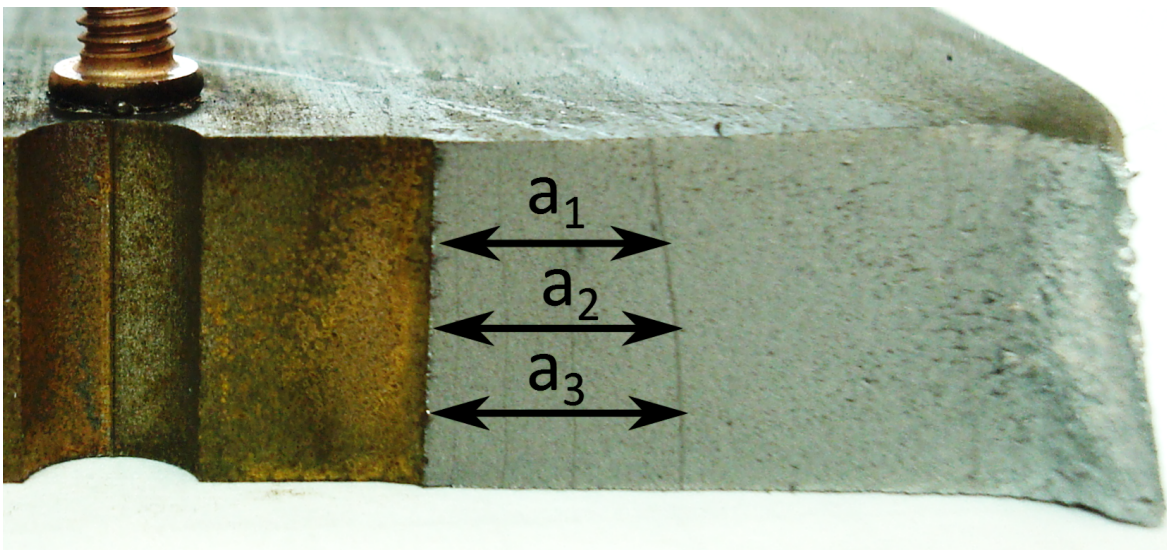


Abbildung 4.4: Messspannung der Probe JS01

#### 4.1.4 Ergebnisse der Rastlinien

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Ergebnissen beinhaltet die Ergebnisse der Rastlinien einige Probleme. Es hat sich gezeigt, dass bei vielen Proben die Rastlinien an der Oberseite der Probe schneller wachsen als auf der Unterseite. Dies ist vermutlich auf den Höhenversatz der Spannbacken zurückzuführen, welche Zug- und Druckspannung in die Probe einbringen. Daraus resultieren unterschiedlich große  $\Delta K$  über den Probenquerschnitt. Die Position der gekrümmten Rastlinien wird mit Hilfe der ASTM E599 [AST15] bestimmt. Für die Bestimmung der Position wird die Länge der Rastlinie an drei Stellen bestimmt, bei der Mitte ( $a_2$ ), an 1/4 ( $a_1$ ) und 3/4 ( $a_3$ ) der Rastlinie. Der Mittelwert der drei Positionen ergibt die gemittelte Position der Rastlinie ( $a_m$ ). In Abbildung 4.5 ist das Verfahren dargestellt.



**Abbildung 4.5:** Bestimmung der Rastlinien nach ASTM E599 [AST97]

Es wird für jede Rastlinie angewendet. Die zugehörige Messspannung und Lastwechselzahl der Rastlinie kann mit Hilfe des Kraftverhältnisses bestimmt werden. In Abbildung 4.6 sind die gemittelten Positionen der Rastlinien über die Lastwechselzahl aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die letzte Rastlinie sich anders als erwartet verhält. Durch die Biegespannung in der Probe verläuft sie sehr schräge, wodurch das Ergebnis der Positionsbestimmung verfälscht wird. Die Rastlinie wird daher in der Auswertung nicht berücksichtigt.

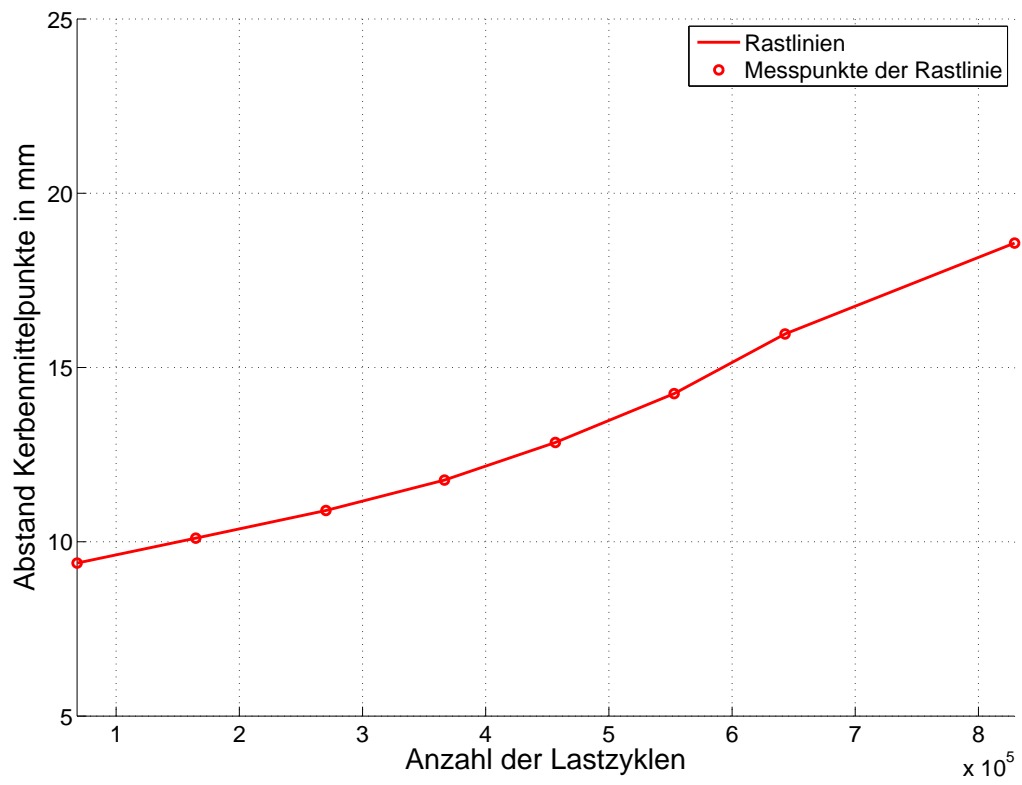


Abbildung 4.6: Rastlinien von Probe JS01

### 4.1.5 Ergebnisse DMS

Zur Auswertung der DMS wird der Spannungsverlauf der DMS über die Lastwechsel aufgetragen (siehe Abbildung 4.7). Der Verlauf der DMS zeigt einen stufenhaften Anstieg.

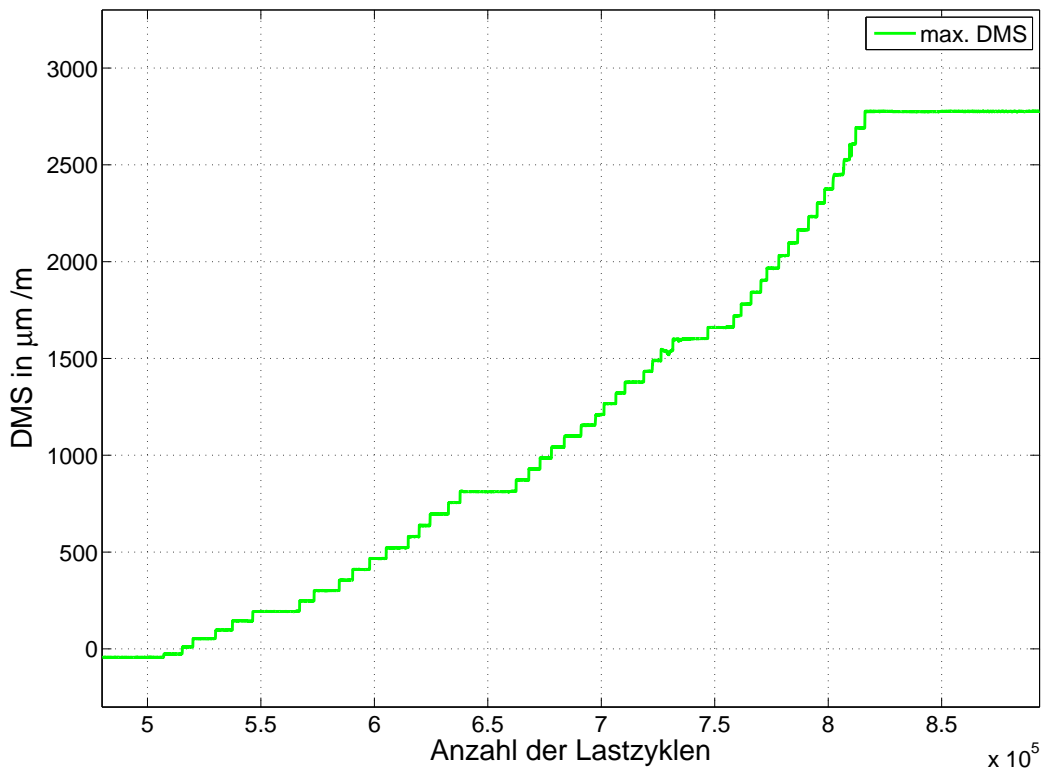


Abbildung 4.7: DMS-Verlauf über die Lastwechsel von Probe JS01

### 4.1.6 Korrektur von DMS und Rastlinien

Die DMS messen die Risslänge auf der Oberfläche der Probe. Da der Riss nicht gleichmäßig wächst, muss die Rissposition der DMS korrigiert werden. Die Korrektur erfolgt mit Hilfe der Rastlinien, indem bestimmt wird, wie weit die gemittelte Position der Rastlinie ( $a_m$ ) von der Position der Rastlinie an der Oberfläche ( $a_{surf}$ ) abweicht (siehe Abbildung 4.8). Mit Hilfe von Gleichung 4.1 wird der Korrekturwert für den DMS ( $a_{DMS-kor}$ ) bestimmt. Mit dem korrigierten DMS-Wert kann eine genauere Bestimmung der Kalibrierungskurve erfolgen.

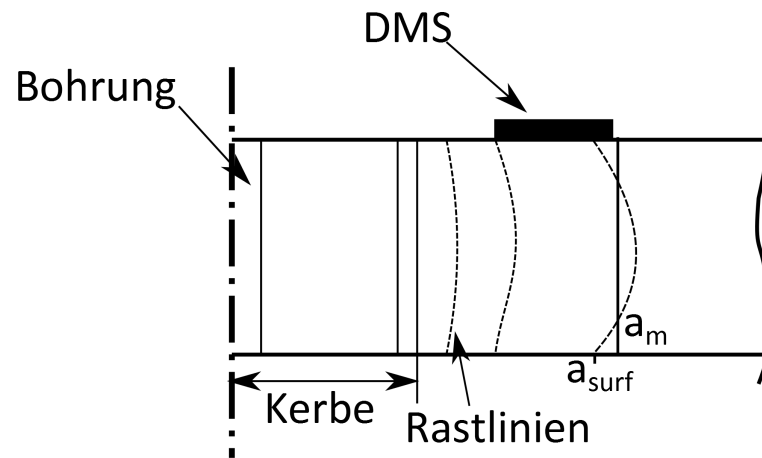


Abbildung 4.8: Korrektur der DMS Position

$$a_{DMS-kor} = a_{surf} - a_m \quad (4.1)$$

## 4.2 Ergebnisse Teil 2

Im zweiten Teil der Versuche werden Proben mit der *decreasing K* Methode getestet. Die Bestimmung der Prüftemperatur ist identisch mit der in Teil 1 und wird daher nicht erläutert. Außerdem wird nur eine Rastlinie erzeugt. Diese dient zur Bestimmung des Korrekturwertes der DMS. Beispielhaft werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse von Probe JS22 vorgestellt. Der Versuch beginnt erst mit dem Erreichen der Rissanfangslänge (inkl. Kerbe) von 11 mm.

### 4.2.1 Ergebnisse Prüfkraft

Die Prüfkraft wird stufenweise bis zu einer Lastwechselzahl von 750.000, abhängig von der Risslänge, verringert (siehe Abbildung 4.9). Man erkennt, dass mit Verringerung der Last die Lastwechselzahl pro Block zunimmt.

### 4.2.2 Ergebnisse DCPD

Die DCPD zeigt einen deutlichen Anstieg der Messspannung. Die Steigung der Messspannung nimmt mit Zunahme der Lastwechselzahl und Abnahme der Last ab (siehe Abbil-

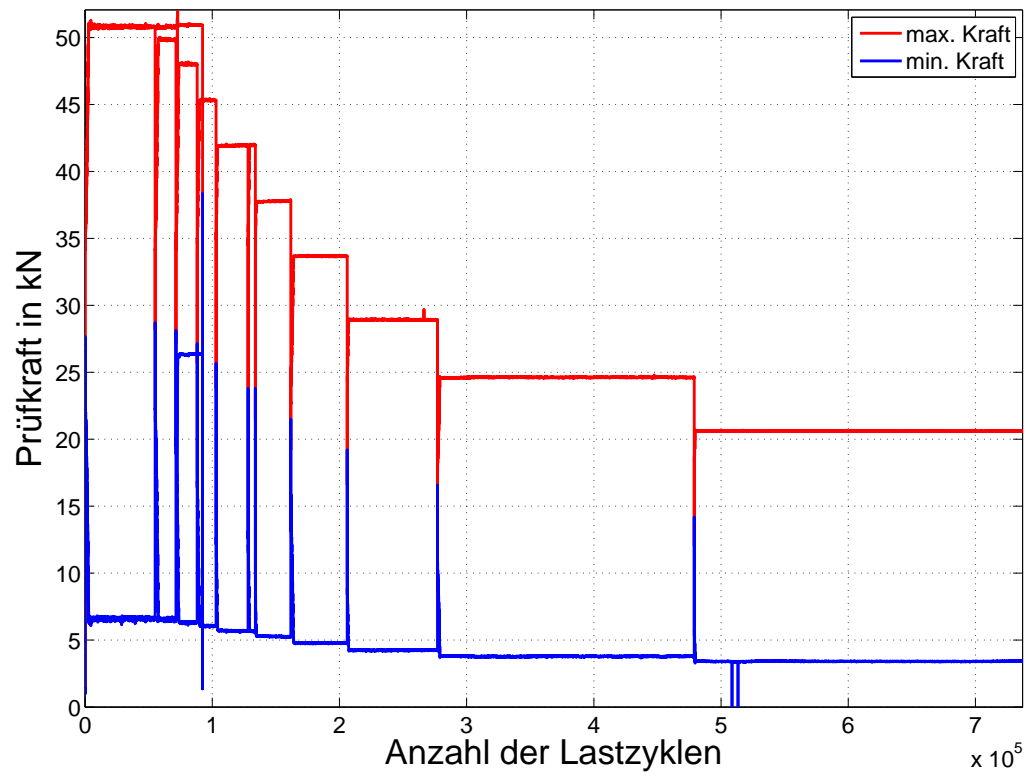


Abbildung 4.9: Prüfkraft von Probe JS22

dung 4.10). Die Referenzspannung schwankt, wie beim ersten Teil der Versuche über den gesamten Testverlauf um 0,0015 mV (siehe Abbildung 4.11).

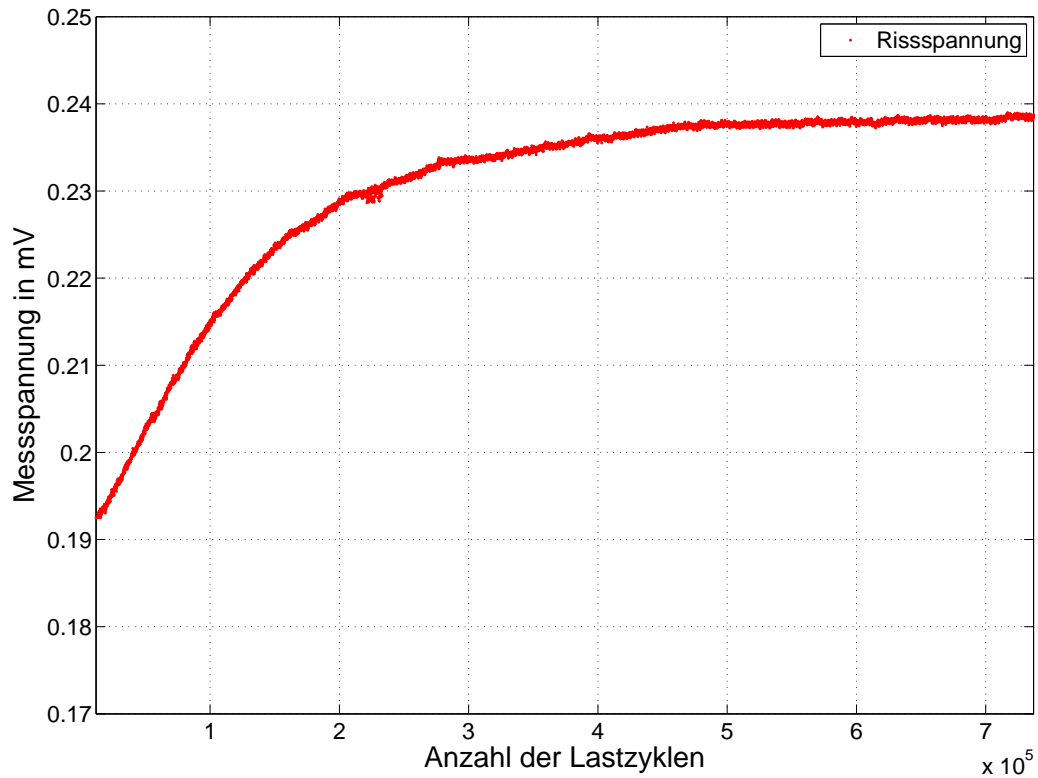


Abbildung 4.10: Messspannung der Probe JS22

### 4.2.3 Ergebnisse DMS

Die DMS zeigen einen ähnlichen Verlauf wie die Messspannung. Die Zeitspanne zwischen den einzelnen Litzen nehmen mit der Lastwechselzahl zu. Zudem ist zu erkennen, dass die erste Litze des DMS nach dem Umstellen der Prüfkraft deutlich schneller versagt, als die zweite (siehe Abbildung 4.13). Für die spätere Auswertung wird daher nur die zweite Litze genutzt, um den Einfluss der vorangegangenen Last zu minimieren.

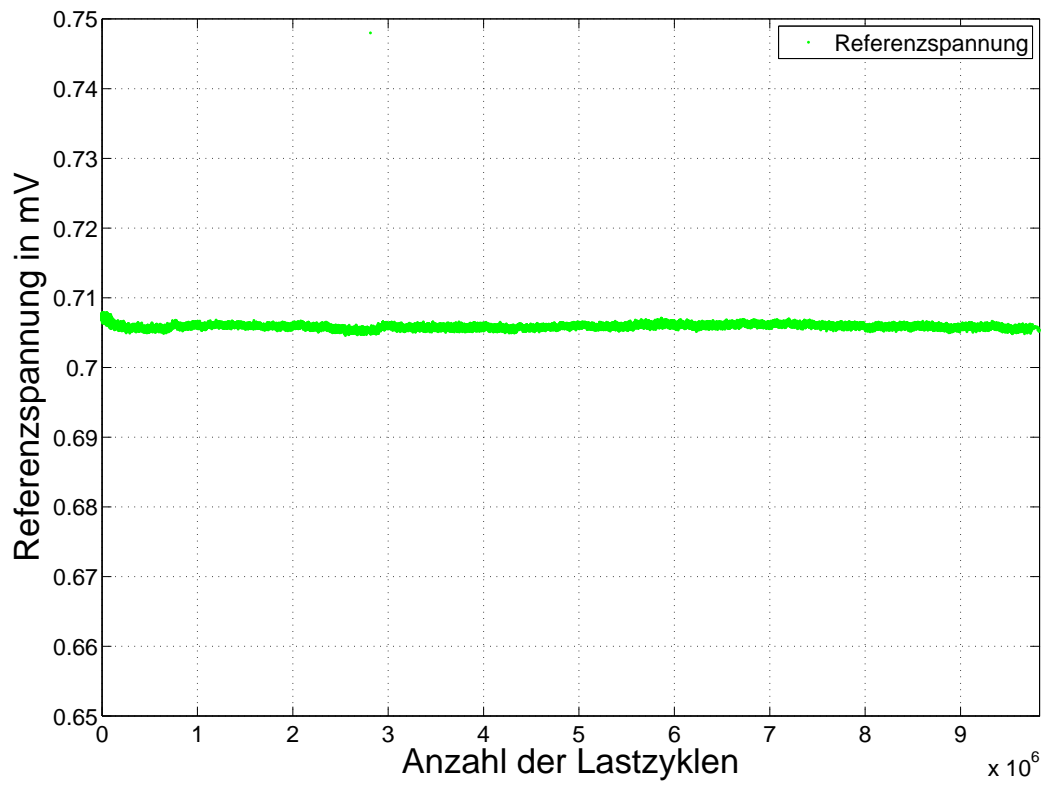


Abbildung 4.11: Referenzspannung der Probe JS22

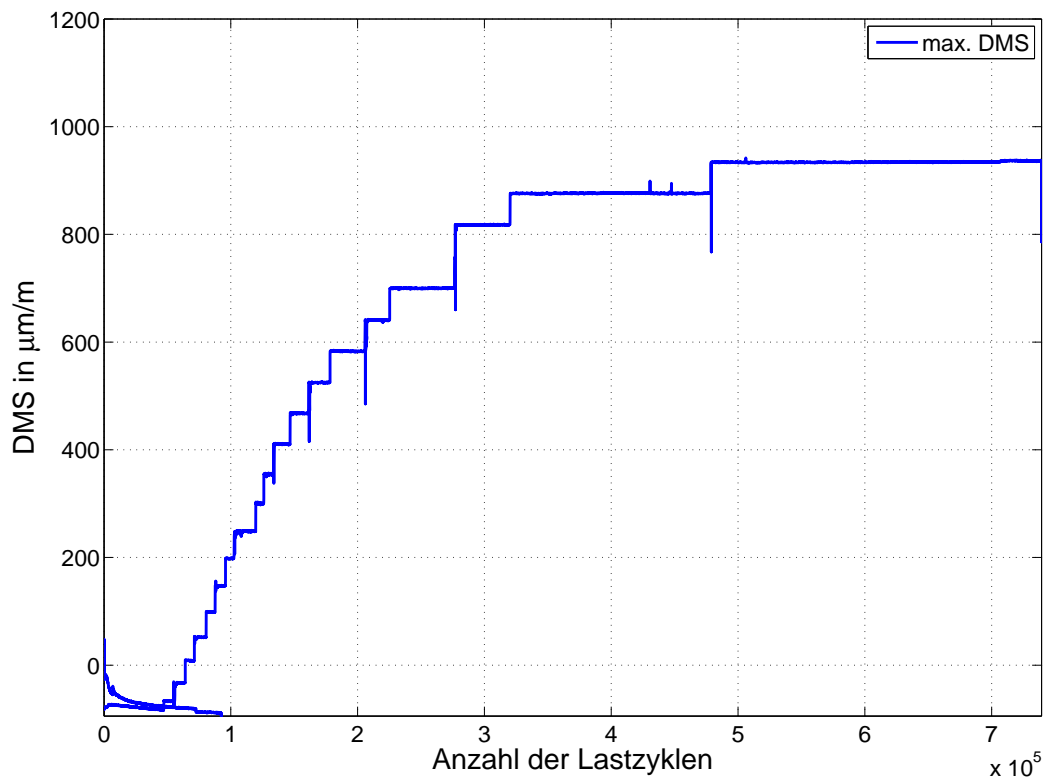


Abbildung 4.12: DMS-Verlauf über die Lastwechsel von Probe JS22

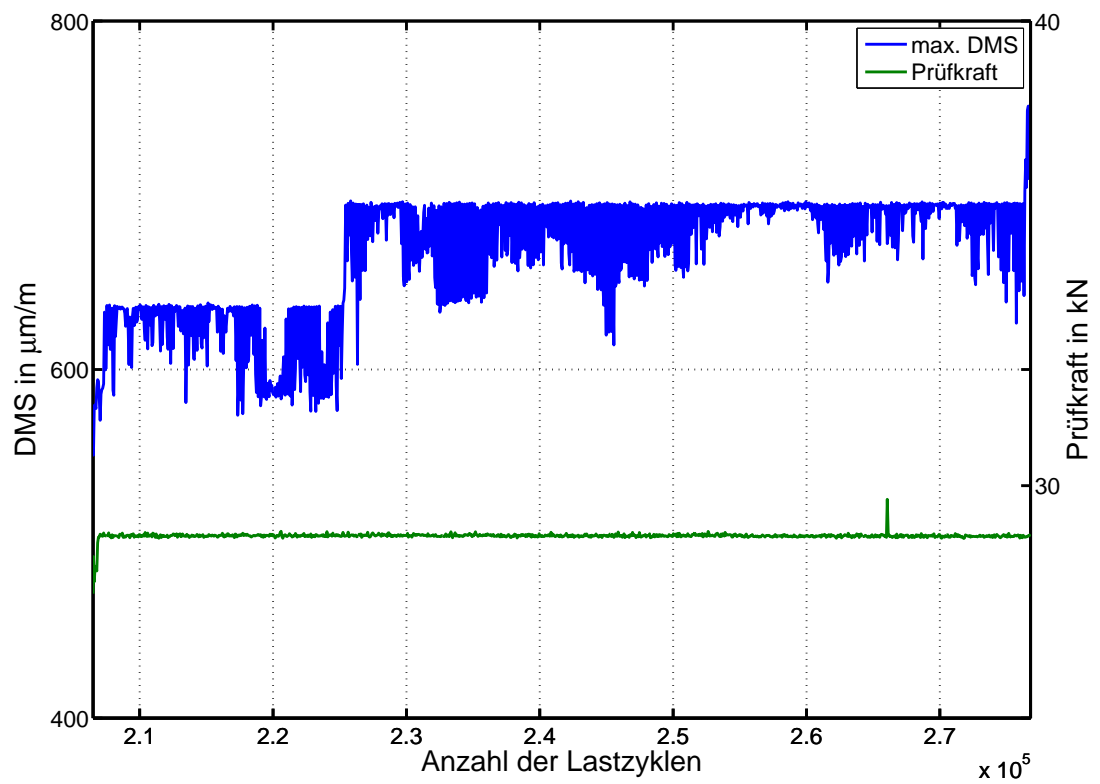


Abbildung 4.13: DMS und Prüfkraft

### 4.3 Bewertung des Stromflusses, der Prüftemperatur und der DCPD-Auflösung

In den anschließenden Abschnitten wird der Stromfluss, die Prüftemperatur und die DCPD-Auflösung bewertet.

#### **Stromfluss**

Anhand der in Kapitel 4.1.3 und 4.2.2 gezeigten Referenzspannung ist zu erkennen, dass der Stromfluss und die Messtechnik die Ergebnisse der Versuche nicht erheblich beeinflussen.

#### **Prüftemperatur**

Die Schwankung der Prüftemperatur ist mit  $0,2^{\circ}\text{C}$  so gering, dass eine Erwärmung der Proben durch äußere Einflüsse oder den Prüfstrom ausgeschlossen werden können.

#### **DCPD-Auflösung**

Die Untersuchung haben gezeigt, dass das System einen Bereich von  $a=0,03$  mm auflösen kann.

Die Auflösung wird ermittelt, indem die Rohdaten der Messspannung ohne Filter aufgezeichnet werden. Die Streuung der Daten wird bestimmt, indem eine Ausgleichsgerade durch die Datenpunkte gelegt wird und anschließend die Standardabweichungen der Messpunkte von der Geraden ermittelt werden. Der Mittelwert der Standardabweichung liegt bei  $0,015$  mm und der Median bei  $0,010$  mm. Die Auflösung wird als doppelter Mittelwert angenommen. Um sicherzustellen, dass die Auflösung ausreichend ist, wird diese mit den über 2 sek. gemittelten Werten verglichen. Wie in Abbildung 4.14 zu sehen schließt die Auflösung den größten Teil der gemittelten Messpunkte ein.

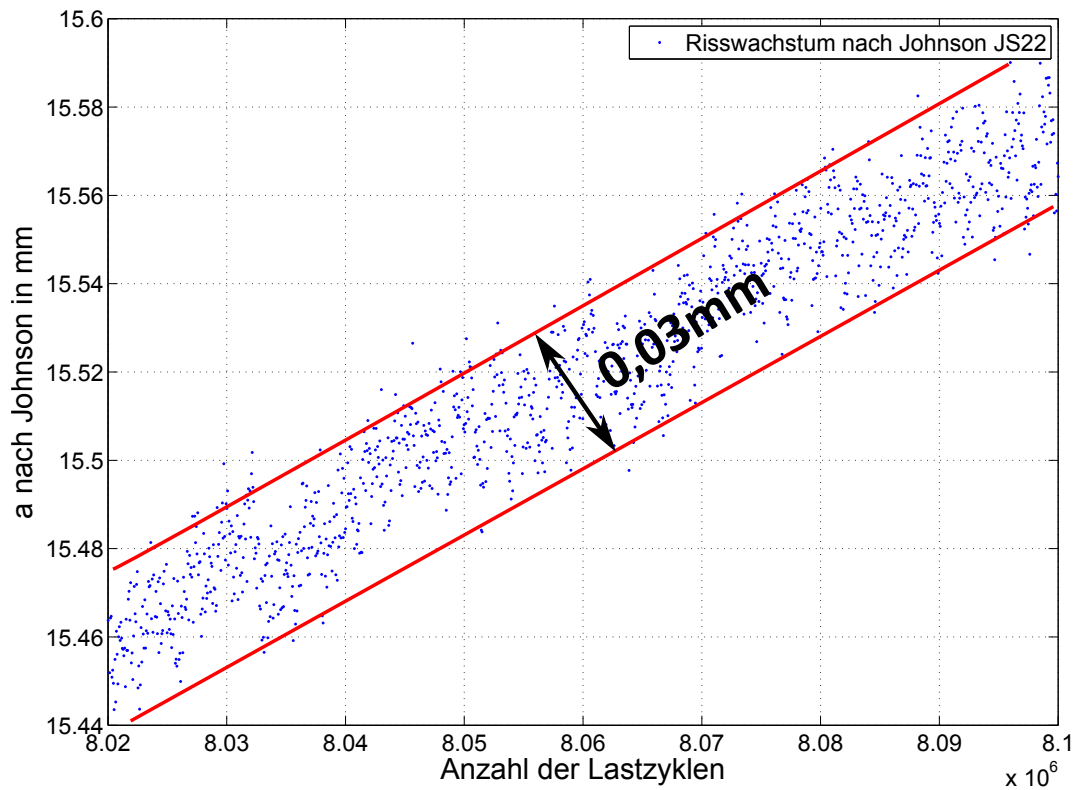


Abbildung 4.14: Auflösung der DCPD

## 4.4 Ergebnisse der Kalibrierungskurve der DCPD

Im nachfolgenden Kapitel werden, basierend auf den Ergebnissen der DMS und Rastlinien, die Kalibrierungskurven der DCPD erstellt. Zusätzlich werden analytische Kalibrierungskurven erstellt, auf Grundlage des in Kapitel 2.2.3 vorgestellten Verfahrens. Anschließend werden die Kalibrierungskurven der drei Konfiguration verglichen, um ihre Gültigkeit zu prüfen. Zudem werden die Unterschiede der Kalibrierungskurven der GM und SP erläutert

### 4.4.1 Erstellung der Kalibrierungskurven

Die Kalibrierungskurven werden erstellt, indem die Messpunkte der einzelnen Versuche der unterschiedlichen Konfigurationen in dimensionslose Variablen umgewandelt werden, indem  $2a$  auf  $W$  und  $U$  auf  $U_0$  bezogen wird. Anschließend wird eine Ausgleichsfunktion mit Polynom 2. Grades durch die gesamten Messpunkte einer Konfiguration gelegt.

In Gleichung 4.2 ist die allgemeine Form der Ausgleichsfunktion gezeigt. In dem konkreten Anwendungsfall ist  $y = 2a/W$  und  $x = U/U_0$ .

$$y = f_1 \cdot x^2 + f_2 \cdot x + f_3 \quad (4.2)$$

Die Polynome  $f_1$ ,  $f_2$  und  $f_3$  werden mit Gleichung 4.3, 4.4 und 4.5 berechnet, wobei  $x_i$  und  $y_i$  die Werte der einzelnen Messpunkte sind und  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  sind die Mittelwerte der Messpunkte.

$$f_1 = \frac{(y_i x_i^2 - \bar{y}_i \cdot x_i^2) \cdot (x_i^2 - (\bar{x}_i)^2) - (y_i x_i - \bar{y}_i \cdot \bar{x}_i) \cdot (x_i^3 - \bar{x}_i \cdot x_i^2)}{(x_i^4 - (\bar{x}_i)^4) \cdot (x_i^2 - \bar{x}_i^2) - ((x_i^3 - x_i \cdot \bar{x}_i^2)^2)} \quad (4.3)$$

$$f_2 = \frac{y_i x_i - \bar{y}_i \bar{x}_i - a \cdot (x_i^3 - \bar{x}_i x_i^2)}{x_i^2 - \bar{x}_i^2} \quad (4.4)$$

$$f_3 = \bar{y}_i - f_1 \cdot x_i^2 - \cdot - f_2 \bar{x}_i \quad (4.5)$$

#### 4.4.2 Kalibrierungskurve Rastlinie

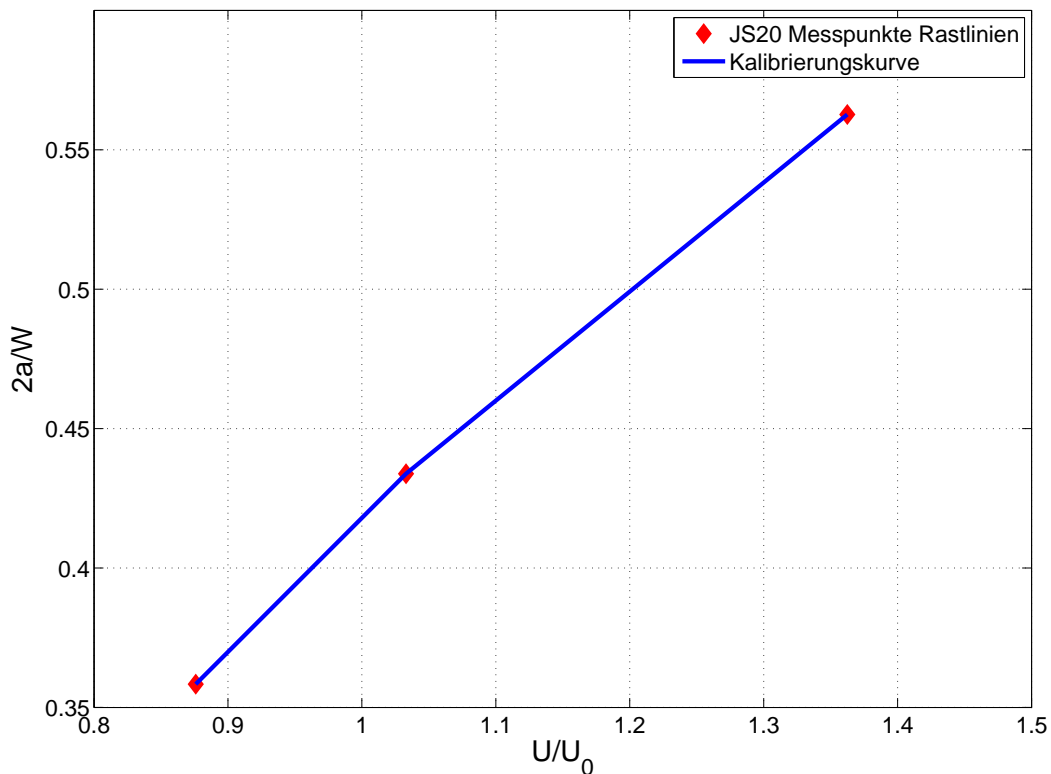


Abbildung 4.15: Kalibrierungskurve der Rastlinie (GM)

Die Kalibrierungskurve der Rastlinie ergibt sich aus den in Abschnitte 4.1.4 vorgestellten Referenzpunkten. Die errechneten Kalibrierungskurve der GM und SP sind in Abbildung 4.15 und 4.16 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Kalibrierungskurven alles Messpunkte schneiden und den Verlauf gut wiedergibt.

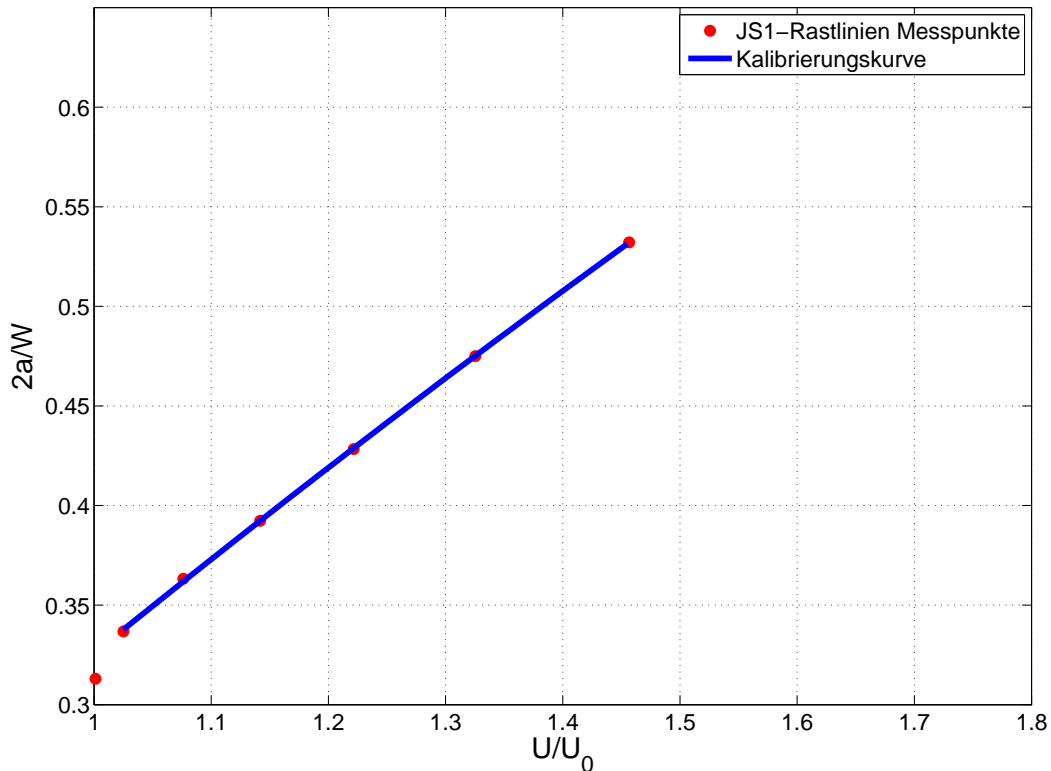


Abbildung 4.16: Kalibrierungskurve der Rastlinie (SP)

#### 4.4.3 Kalibrierungskurve DMS

Die Kalibrierungskurve der DMS für GM ist in Abbildung 4.17 gezeigt und für die SP in Abbildung 4.18. Bei der Kalibrierungskurve von Probe JS1 (SP) sind an einigen Stellen kleinere Ausreißer in den Referenzpunkten zu erkennen, beispielsweise bei  $U/U_0 = 1,33$ . Die Ausreißer entstehen beim Umschaltungen der Lastblöcke. Durch einen Bedienfehler wird die statische Last vor der dynamischen Last geändert, wodurch kurzzeitig ein  $P_{max}=48\text{kN}$  vorliegt. Durch die erhöhte Kraft kommt es beim Umschalten verstärkt zum Versagen von DMS. Für alle weiteren Versuch wird dieser Fehler behoben.

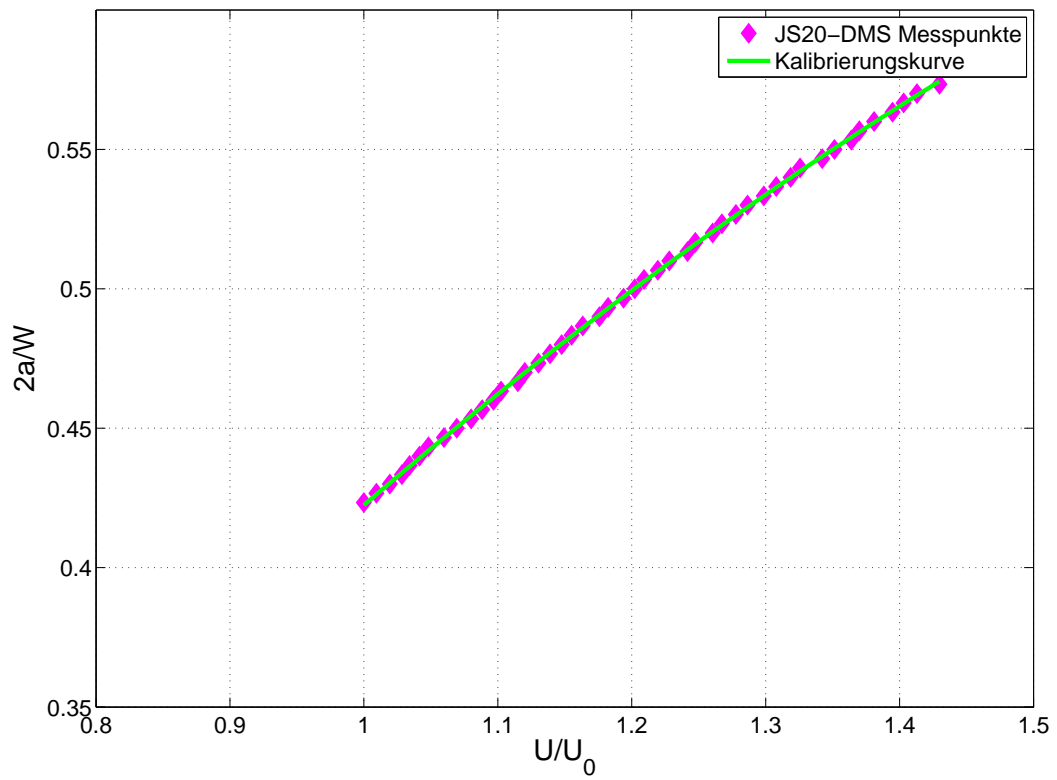


Abbildung 4.17: Kalibrierungskurve der DMS (GM)

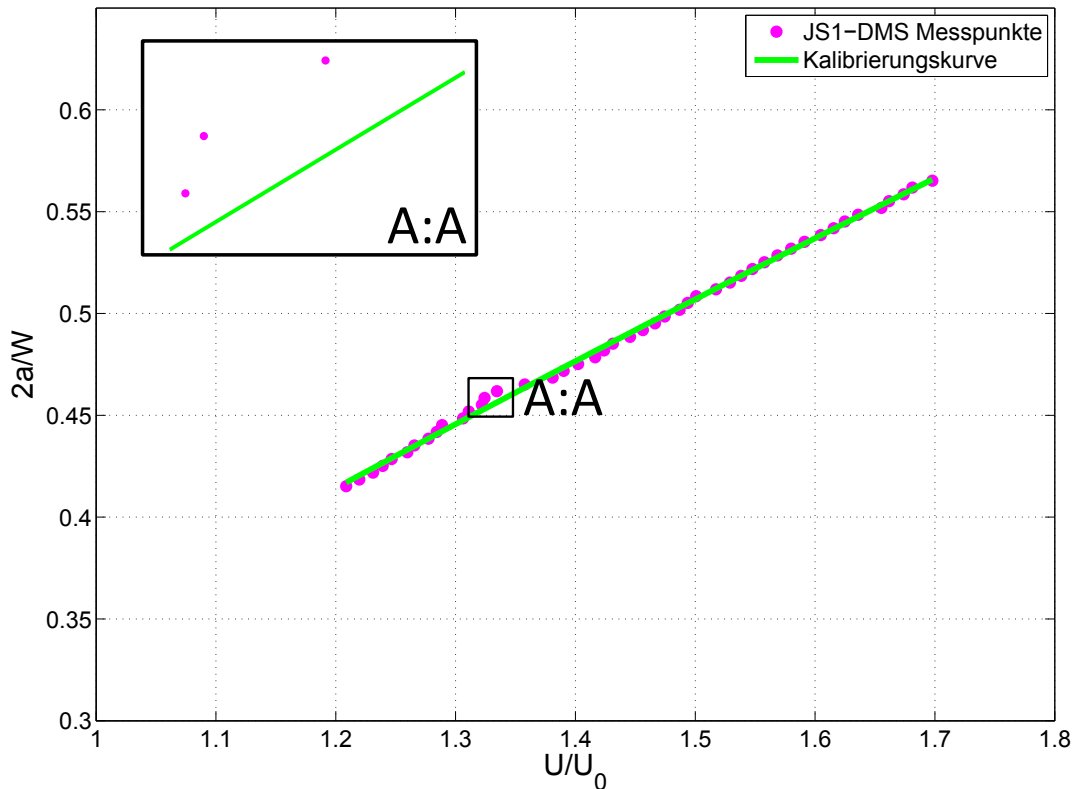


Abbildung 4.18: Kalibrierungskurve der DMS (SP)

#### 4.4.4 Analytische Kalibrierungskurve: Johnson-Formel

Die Bestimmung der analytischen Kalibrierungskurve wird im nachfolgenden beispielhaft für Probe JS01 durchgeführt. Die analytische Kalibrierungskurve wird mit der umgestellten Johnson-Formel berechnet (siehe Gleichung 2.4). Als  $U_r$  und  $a_r$  dient die Risslänge und Spannung an der ersten Rastlinie. Mit Gleichung 2.4 ergibt sich daraus, beispielhaft für Probe JS01:

$$a = \frac{60\text{mm}}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{\cosh(\pi y/120\text{mm})}{\cosh \left[ \left( \frac{U}{0,1975\text{mV}} \right) \cosh^{-1} \left[ \frac{\cosh(\pi y/120\text{mm})}{\cos(\pi \cdot 9,4\text{mm}/120\text{mm})} \right] \right]} \right)$$

Ähnlich wie bei den Kalibrierungskurven der Rastlinien und DMS werden die Ergebnisse der Johnson-Formel in dimensionslose Größen umgewandelt und anschließend eine Kalibrierungskurve erstellt. Die Kurven sind in Abbildung 4.19 und 4.20 gezeigt.

Der analytische Rissverlauf der Probe JS01 ist in Abbildung 4.21 gezeigt, die Darstellung der Risslänge der übrigen Proben befindet sich in Anhang B.

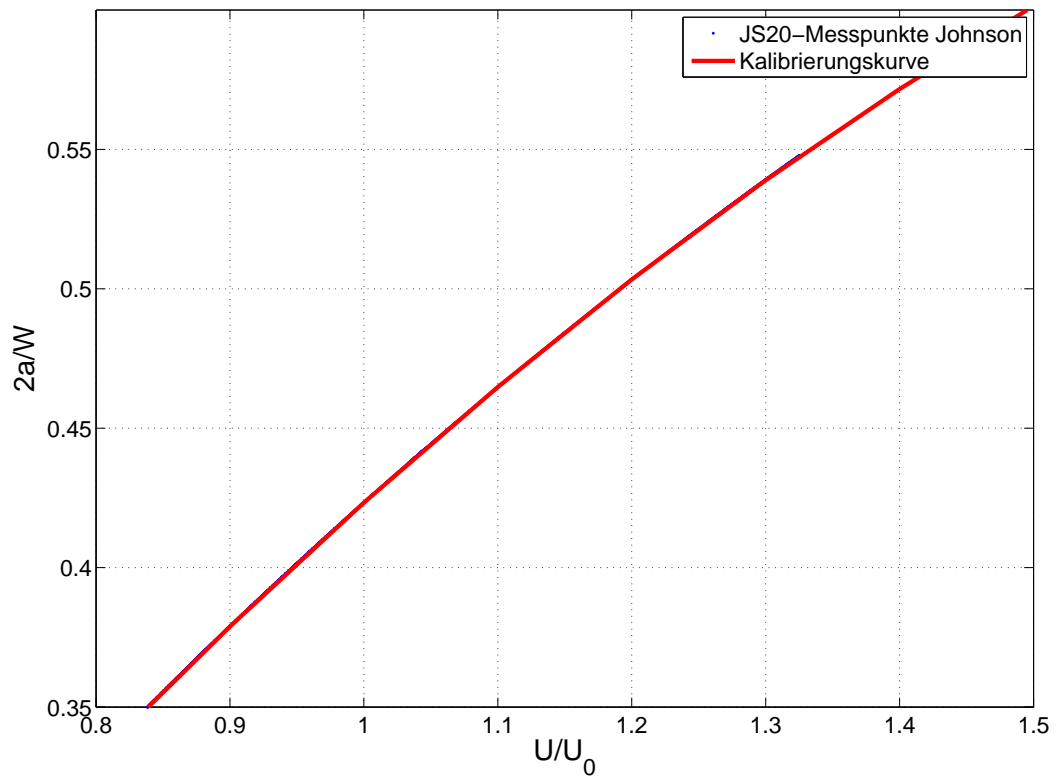


Abbildung 4.19: Kalibrierungskurve der Johnson-Formel (GM)

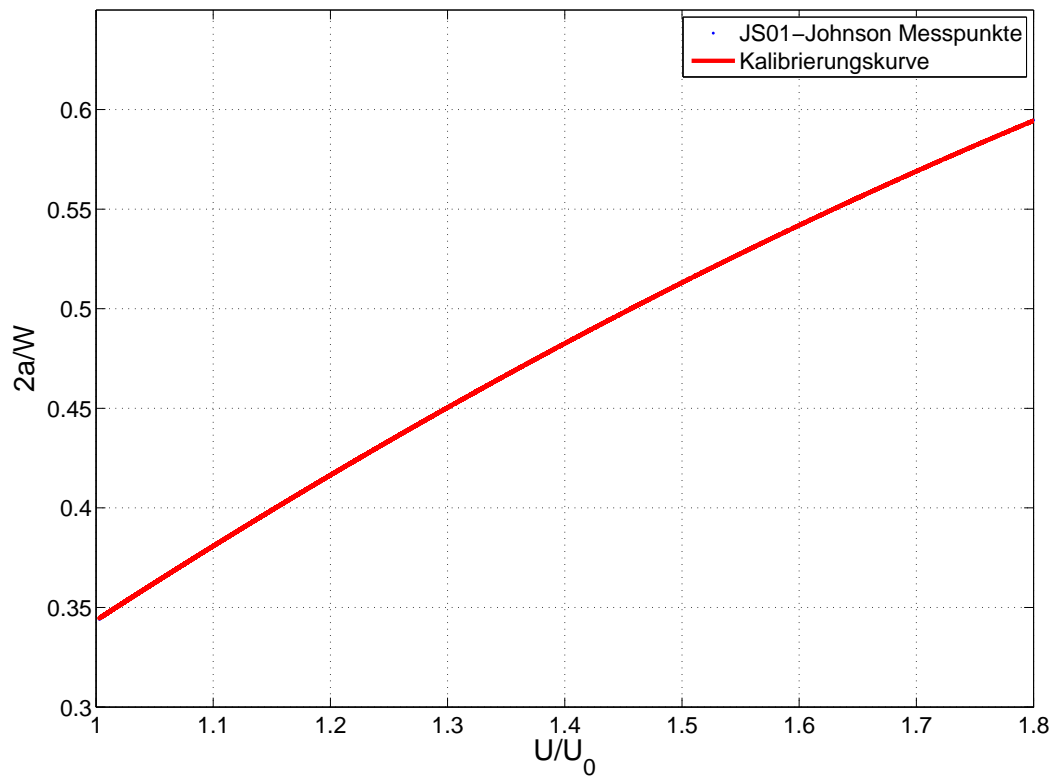


Abbildung 4.20: Kalibrierungskurve der Johnson-Formel (SP)

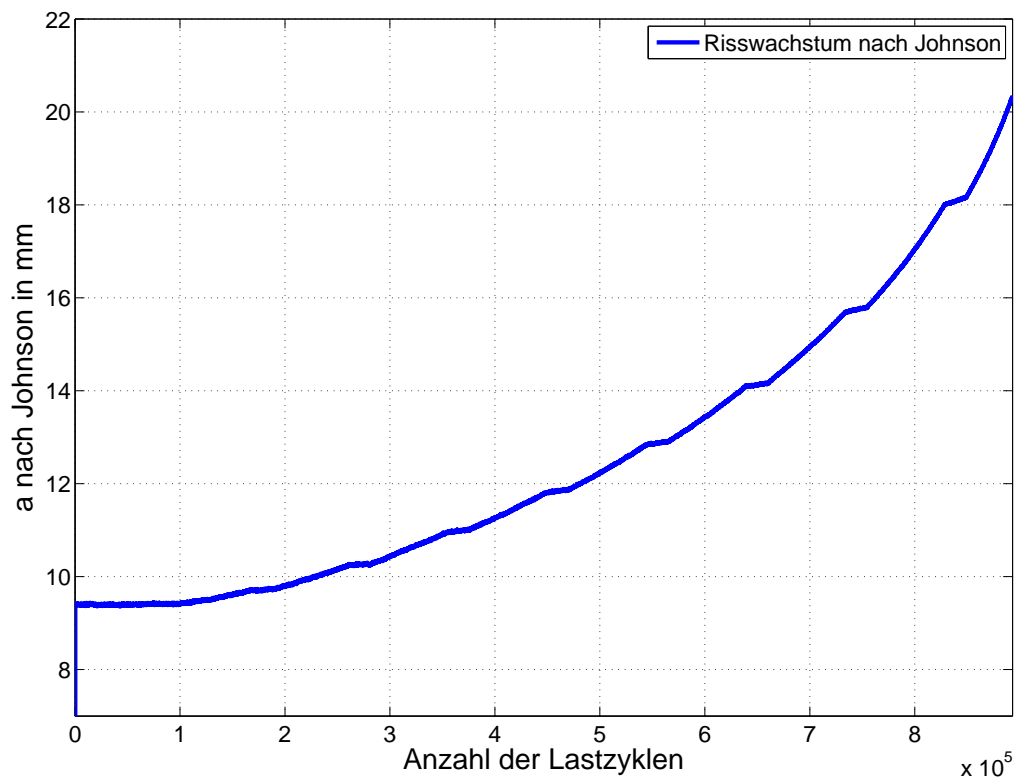


Abbildung 4.21: Analytische Risslänge nach Johnson (JS01)

#### 4.4.5 Vergleich der Kalibrierungskurven der drei Konfigurationen

Im nachfolgenden Kapitel werden die Kalibrierungskurven der drei Konfigurationen der GM- und SP-Proben verglichen. In Tabelle 4.2 und 4.3, sowie in Abbildung 4.22 und 4.23, sind die Abweichungen der Kurven dargestellt. Die errechneten Abweichungen in den Tabellen werden über den gesamten Verlauf der Kalibrierungskurven gemittelt.

**Tabelle 4.2:** Kalibrierungskurven (GM)

	gemittelte Abweichung				
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	Rast.	DMS
Johnson	-0,13	0,79	-0,16	0,82 %	1,15%

**Tabelle 4.3:** Kalibrierungskurven (SP)

	gemittelte Abweichung				
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	Rast.	DMS
Johnson	-0,09	0,55	-0,12	2,7 %	0,8 %

In Abbildung 4.22 ist zu erkennen, dass die Kalibrierungskurve der Johnson-Formel gut den Verlauf der anderen Kalibrierungskurven wiedergibt. Bei den geschweißten Proben haben die Kalibrierungskurve der Johnson-Formel und des DMS einen ähnlichen Verlauf. Die Kalibrierungskurve der Rastlinien weicht hingegen deutlich von den anderen ab. Die Abweichung ist auf die schrägen Rastlinien zurückzuführen, welche die Ergebnisse der Rastlinienpositionen verfälschen. Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Kalibrierungskurve der Johnson-Formel die anderen Kalibrierungskurven gut darstellt. Daher kann im weiteren mit dieser weiter gearbeitet werden.

#### 4.4.6 Vergleich Kalibrierungskurven von Grundmaterial und geschweißten Proben

Im Vergleich zeigen die Kalibrierungskurven der Grundmaterial und geschweißten Proben geringe Unterschiede auf (siehe Abbildung 4.24). Die Differenz der Steigungen könnte man eventuell auf die unterschiedlichen Leitfähigkeiten von geschweißten Proben im Vergleich

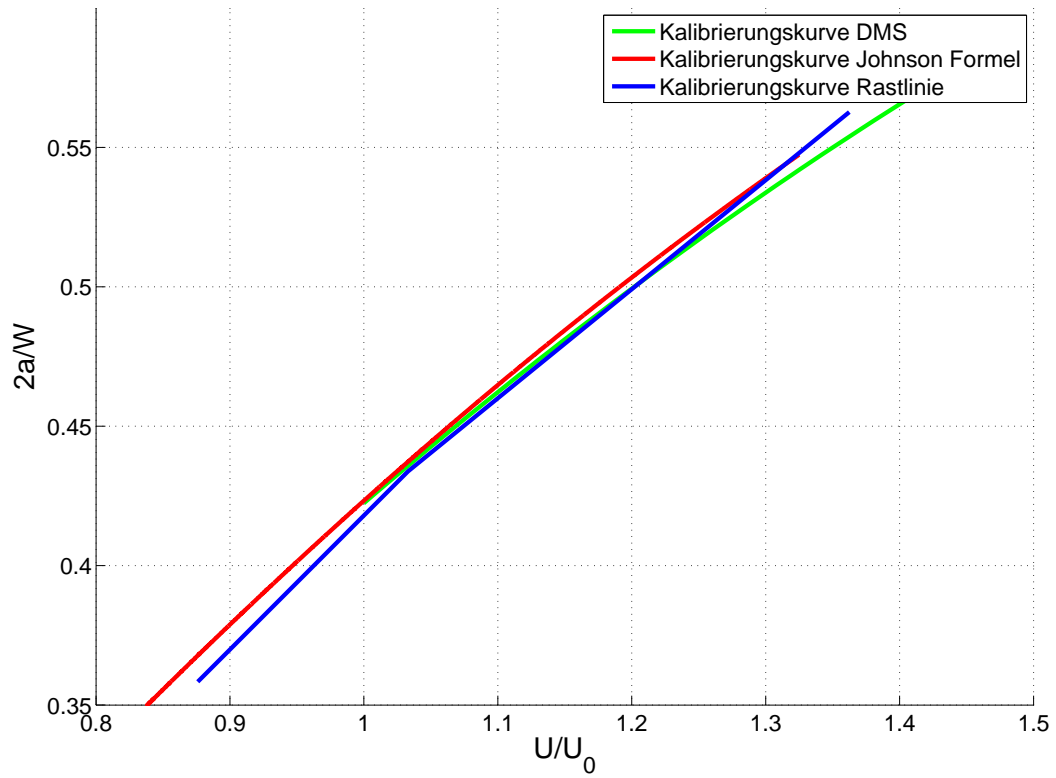


Abbildung 4.22: Kalibrierungskurven Rastlinien, DMS und Johnson-Formel (GM)

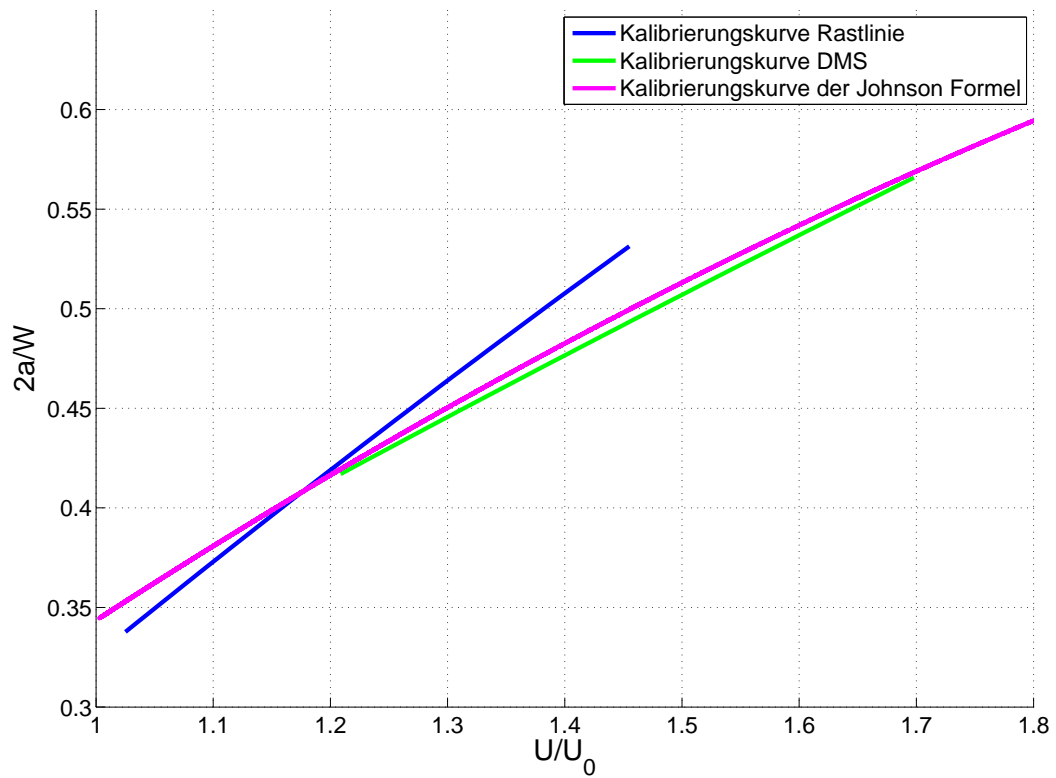


Abbildung 4.23: Kalibrierungskurven Rastlinien, DMS und Johnson-Formel (SP)

zum Grundmaterial zurückführen. Die unterschiedlichen Anfangspunkte sind unterschiedlichen Referenzpunkten geschuldet. Eine genauere Aussage zu der Leitfähigkeit der Proben kann auf Grund der geringen Probenzahl nicht getroffen werden.

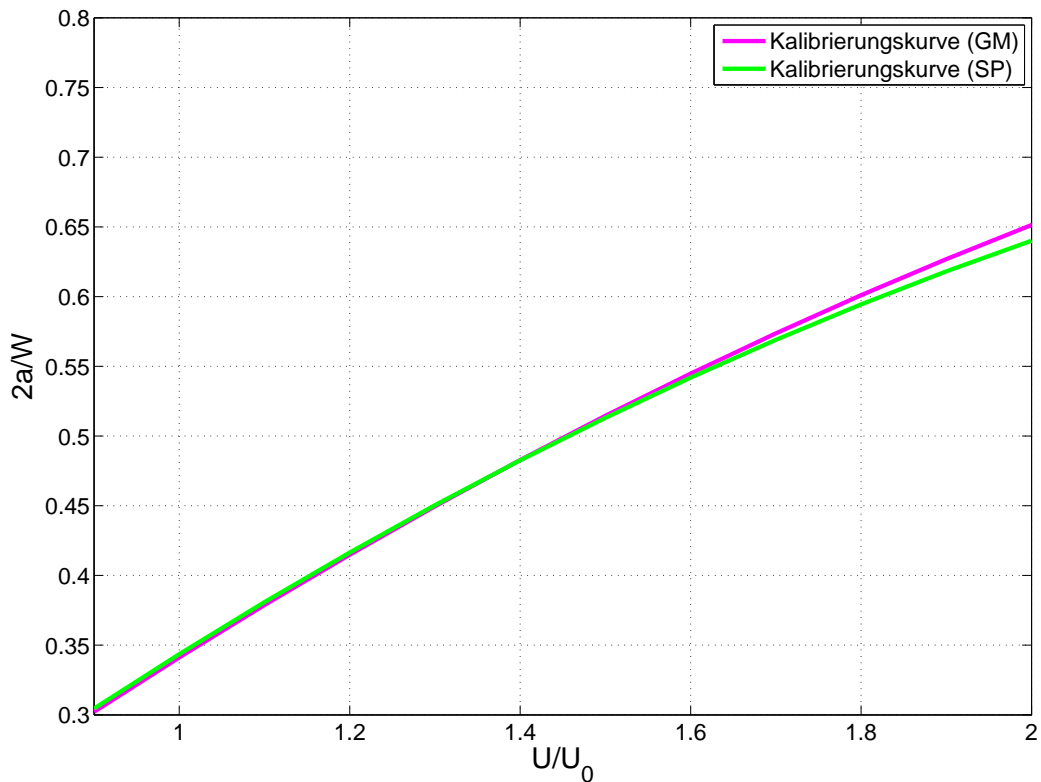


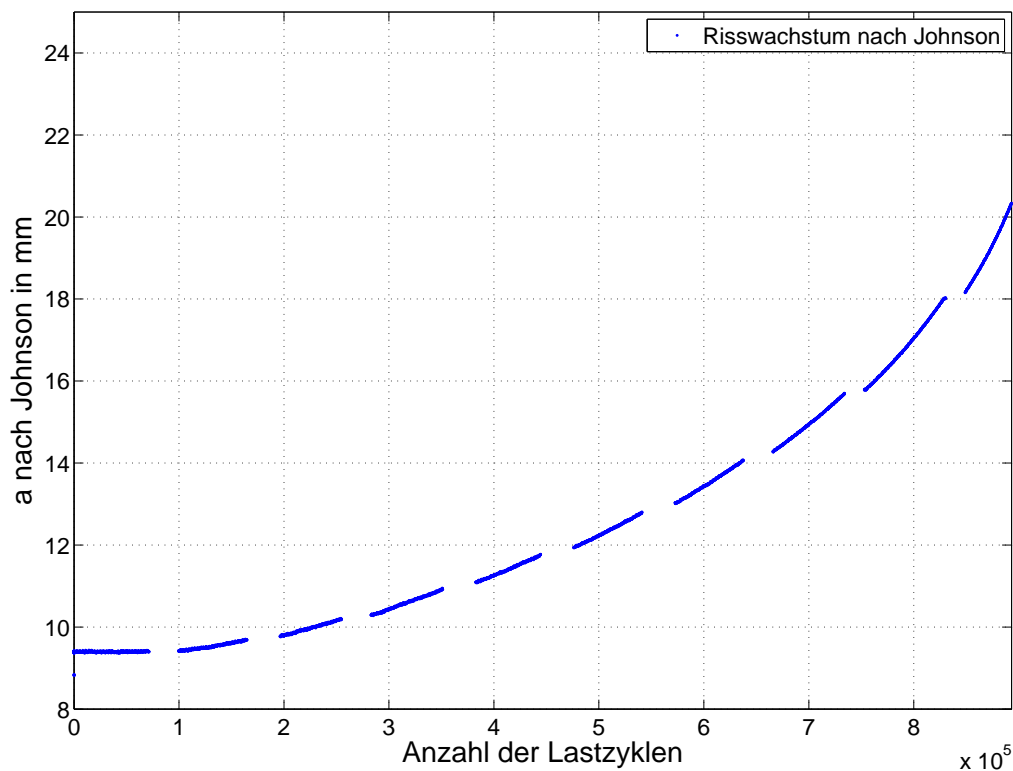
Abbildung 4.24: Vergleich GM und SP

## 4.5 Auswertung des Spannungsintensitätsfaktors und der Risswachstumsrate

Im nachfolgenden Kapitel wird der Spannungsintensitätsfaktor und die Risswachstumsrate basierend auf den Ergebnissen der Kalibrierungskurven ausgewertet. Zu Beginn wird erläutert wie die Werte anhand der Kalibrierungskurve bestimmt werden. Anschließend werden die Ergebnisse mit dem Paris Gesetz ausgewertet und mit den Entwurfsdaten der *British Standards Institution* verglichen.

### 4.5.1 Berechnung des Spannungsintensitätsfaktors und der Risswachstumsrate

Für die Auswertung werden die dimensionslosen Variablen der Kalibrierungskurven in dimensionsbehafteten Variablen umgerechnet, indem  $2a/W$  auf  $W$  bezogen wird und  $U/U_0$  auf  $U_0$ . Aus den Versuchsdaten können anschließend den Messspannungen die Lastwechselzahlen zugeordnet werden. Abschließend werden die Bereiche der Kurve entfernt, in dem  $R = 0,5$  ist, da in dieser Bereich nicht mit  $R = 0,1$  verglichen werden kann. Der resultierende Rissverlauf ist in Abbildung 4.25 gezeigt.



**Abbildung 4.25:** Risslänge der Kalibrierungskurve (ohne  $R = 0,5$ )

Aus dem Rissverlauf kann mit Gleichung 4.6  $da/dN$  bestimmt werden. Für diesen Zweck werden zwischen zwei aufeinander folgenden Messpunkten ( $i, i + 1$ )  $a$  und  $N$  bestimmt. Zu beachten ist, dass laut ASTM E647 [AST15] eine minimale Veränderung der Risslänge von  $da=0,25$  mm erforderlich ist. Eine schematische Bestimmung von  $da$  und  $dN$  für zwei Messpunkte ist in Abbildung 4.26 gezeigt.

$$da/dN = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (4.6)$$

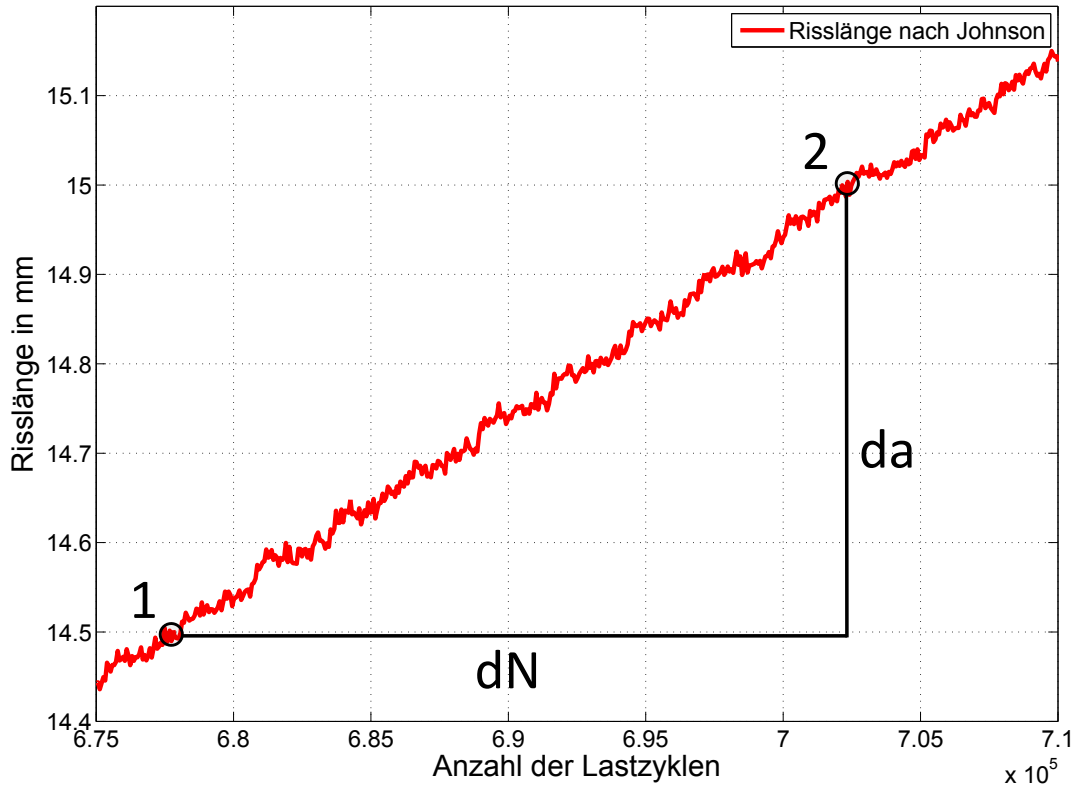


Abbildung 4.26: Bestimmung von  $da/dN$

$\Delta K$  wird mit Gleichung 2.7 bestimmt, wobei  $a$  die gemittelte Risslänge zwischen zwei Messpunkten ist. Beispielhaft ergibt sich daraus für Punkt 1 und 2:

$$a_{avg} = \frac{a_{Punkte1} + a_{Punkte2}}{2} = \frac{14,5 \text{ mm} + 15,0 \text{ mm}}{2} = 14,75 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \Delta K_{Punkt1,2} &= \frac{36 \text{ kN}}{10 \text{ mm}} \sqrt{\frac{\pi \cdot (2 \cdot 14,75 \text{ mm})/60 \text{ mm}}{2 \cdot 60 \text{ mm}} \text{sec} \frac{\pi \cdot (2 \cdot 14,75 \text{ mm})/60 \text{ mm}}{2}} \\ &= 15,26 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \end{aligned}$$

Die Ergebnisse der verschiedenen Messpunkte sind in Abbildung 4.27 gezeigt.

### 4.5.2 Paris Gesetz

Anhand der Ergebnisse des vorangegangenen Kapitels kann das Paris Gesetz für die vorliegenden Proben bestimmt werden. Die Komponenten des Gesetzes werden mit Hilfe einer Ausgleichsgeraden bestimmt und anschließend auf die logarithmische Skala umgerechnet. Die Ergebnisse des Paris Gesetzes sind in Tabelle 4.4 und Abbildung 4.27 gezeigt.

**Tabelle 4.4:** Paris Gesetz

	C	n
	$\frac{mm/Zyklus}{MPa\sqrt{mm}^m}$	-
geschweißte Proben	$1,745 \cdot 10^{-10}$	4,24
Grundmaterial Proben	$2,8113 \cdot 10^{-13}$	5.941

Der Vergleich von Grundmaterial und geschweißten Proben zeigt, dass die der geschweißten Proben einen größer Widerstand gegen Risswachstum zeigen, als die des Grundmaterials. In Bereichen von kleinem  $\Delta K$  ist der Unterschied besonders signifikant. Zu Beginn der Paris-Region (Region II) sind die Unterschiede nur minimal. Die geschweißten Proben haben, zudem ein größeren *Threshold*-Spannungsintensitätsfaktor, als das Grundmaterial. Das Verhalten ist konsistent mit den in Kapitel 2.7 vorgestellten Literaturwerten.

Die *British Standard Institution* gibt Entwurfswerte für das Paris Gesetz vor, wie in Abschnitt 2.4.3 dargestellt. Die Verläufe der GM- und SP-Proben liegen beide unterhalb der Werte von Stage A und B und sind somit zulässig.

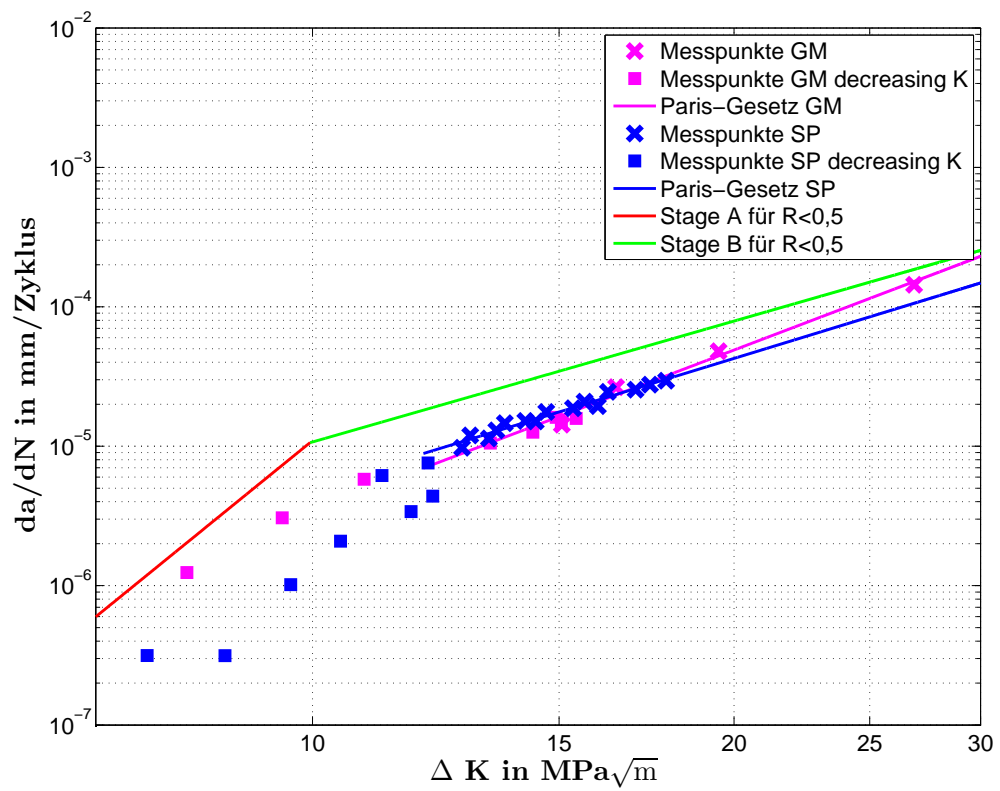


Abbildung 4.27: Vergleich Paris Gesetz GM und SP

# 5 Diskussion

Im Verlauf dieser Arbeit konnte mit Hilfe von praktischen Versuchen (siehe Kapitel 4) das Paris Gesetz für geschweißte Proben und Grundmaterialproben bestimmt werden (siehe Abschnitt 4.5.2). In diesem Kapitel werden die gewonnen Ergebnisse mit bestehenden Literaturwerten verglichen (siehe Abschnitt 5.1) und die Einflussfaktoren in Region I und II des Risswachstums diskutiert (siehe Abschnitt 5.2 und 5.3).

## 5.1 Ergebnisse des Paris Gesetzes im Vergleich zu anderer Literatur

Der nachfolgenden Abschnitt stellt die Auswertungen verschiedener Autoren vor und vergleicht diese mit der Auswertung der erarbeiteten Ergebnisse.

Benedetti et al. [BFS13] untersucht S355 Stahl. In seiner Auswertung kam er zu ähnlichen Ergebnissen, wie diese Arbeit (siehe Abbildung 5.1). Er stellte fest, dass der *Threshold*-Spannungsintensitätsfaktor von geschweißten Proben größer ist, als der des Grundmaterials. Bei großen  $\Delta K$  sind die Unterschiede hingegen minimal. Die bereits in Kapitel 2.7 erwähnte Untersuchung von Link et al. [Lin90] kommt zu einem ähnlichen Ergebnis (siehe Abbildung 5.4). Der Trend, dass geschweißte Proben einen höheren *Threshold*-Spannungsintensitätsfaktor haben, ist auch bei anderen Stählen zu beobachten, wie beispielsweise bei X80 Stahl in den Untersuchungen von Sowards et al. [SGHD15] (siehe Abbildung 5.2). Die Risswachstumsverläufe von X80 nähern sich ebenfalls bei hohem  $\Delta K$  an.

Schweißsimulierte Proben zeigen abhängig vom Simulationsverfahren unterschiedliches Risswachstumsverhalten. Das Risswachstumsverhalten von *CGHAZ*-Proben hat nur einen geringen Unterschied zu dem des Grundmaterials. Erst die *ICCGHAZ* zeigt einen erhöhten Einfluss. Die *ICCGHAZ* wird mehrmals erwärmt, um das Mehrlagenschweißen zu simulieren. Sie hat einen ähnlichen Risswachstumsverlauf, wie die geschweißten Proben

(siehe Abbildung 5.3) [Ant15]. Dieses Verhalten legt nahe, dass die *ICCGHAZ* einen höheren Einfluss auf das Risswachstumsverhalten von Schweißnähten hat, als die *CGHAZ*. Die Untersuchung von Alvaro et al. [Ant15] ergibt, dass das Gefüge der *ICCGHAZ* aus Martensit und Bainit besteht. Die *CGHAZ* besteht aus Bainit-, Ferrit- und Perlitgefüge. Das Gefüge der Schweißnaht der verwendeten Proben besteht, wie in Abschnitt 3.1.1 vorgestellt, aus Bainit (79 %), Ferrit (18 %) und Martensit (3 %).

## 5.2 Vergleich Region I

In Region I (*Threshold*-Region) dominieren, wie in Kapitel 2.4.2 erläutert, die Mikrostrukturen das Risswachstum [Mil13]. Der Einfluss des Gefüges auf das Risswachstumsverhalten lässt sich anhand der Untersuchungen von Alvaro et al. [Ant15] vermuten. Die *ICCGHAZ*-Proben haben ein ähnliches Gefüge, wie die geschweißten Proben dieser Arbeit. Beide zeigen ein annähernd gleiches Risswachstumsverhalten.

Andere Autoren legen die Vermutung nah, dass die Inhomogenität der Schweißnaht das Risswachstumsverhalten in Region I verbessert. Aus dieser Inhomogenität ergeben sich lokale Unterschiede in der Festigkeit und in dem Gefüge der Schweißnaht. Durch die Variation wird die Riss Spitze eingeschränkt und so das Risswachstum beeinflusst [KD93, RBN04]. Die Inhomogenität ist von vielen Einflussfaktoren abhängig, wie beispielsweise dem Ort der Kerbe, der Schweißnahtgeometrie und den Materialeigenschaften [RSF06]. Zerbst et al. [ZAB14] empfiehlt daher eine Verallgemeinerung der Einflüsse von Inhomogenität zu vermeiden.

## 5.3 Vergleich Region II

Region II (*Paris*-Region) wird durch das Paris Gesetz beschrieben, der Einfluss der Mikrostrukturen ist hier geringer, als in Region I [Mil13]. Ein weiterer Einflussfaktor in Region II ist die Eigenspannung des Materials [OSNK86]. Die vorgestellten Untersuchungen und die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass in Region II die Unterschiede des Risswachstumsverhaltens von geschweißten Proben und Grundmaterial kleiner werden. Es wird vermutet, dass die Eigenspannung durch das Funkenerodieren und den Schweißprozess in den verwendeten Proben reduziert wird.

## 5.4 Beurteilung der Einflussfaktoren

Die verschiedenen Einflussfaktoren auf das Risswachstum von geschweißten Proben machen eine eindeutige Aussage über die Ursache der unterschiedlichen Risswachstumsverhalten schwer möglich. Es wird vermutet, dass das Gefüge oder die Inhomogenität das Risswachstum in Region I beeinflussen. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass das Zusammenspiel von Inhomogenität und Gefüge der ausschlaggebende Einflussfaktor ist.

Die geringeren Unterschiede des Risswachstums in Region II legen nahe, dass die Eigenspannung der geschweißten Proben gering ist, da diese durch den Schweißprozess und das Funkenerodieren verringert werden. Die geringeren Unterschiede in Region II können auch auf die Einflussfaktoren in Region I zurückgeführt werden. Hier ist ebenfalls keine klare Aussage möglich.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass das Risswachstumsverhalten von geschweißten Proben von den zuvor beschriebenen Einflussfaktoren abhängig ist. Eine eindeutige Differenzierung des Einflusses der einzelnen Faktoren auf das Risswachstumsverhalten kann mit der durchgeführten Auswertung nicht vorgenommen werden. Es könnte jedoch ein eindeutiger Unterschied des Risswachstumsverhaltens in Region I zwischen geschweißten Proben und Grundmaterial ermittelt werden. In Region II werden hingegen, wie erwartet nur geringe Unterschiede des Verlaufs festgestellt. Die Untersuchungen von Bendetti et al. [BFS13], Link et al. [Lin90] und Alvaro et al. [Ant15] konnten in beiden Regionen erfolgreich rekonstruiert werden.

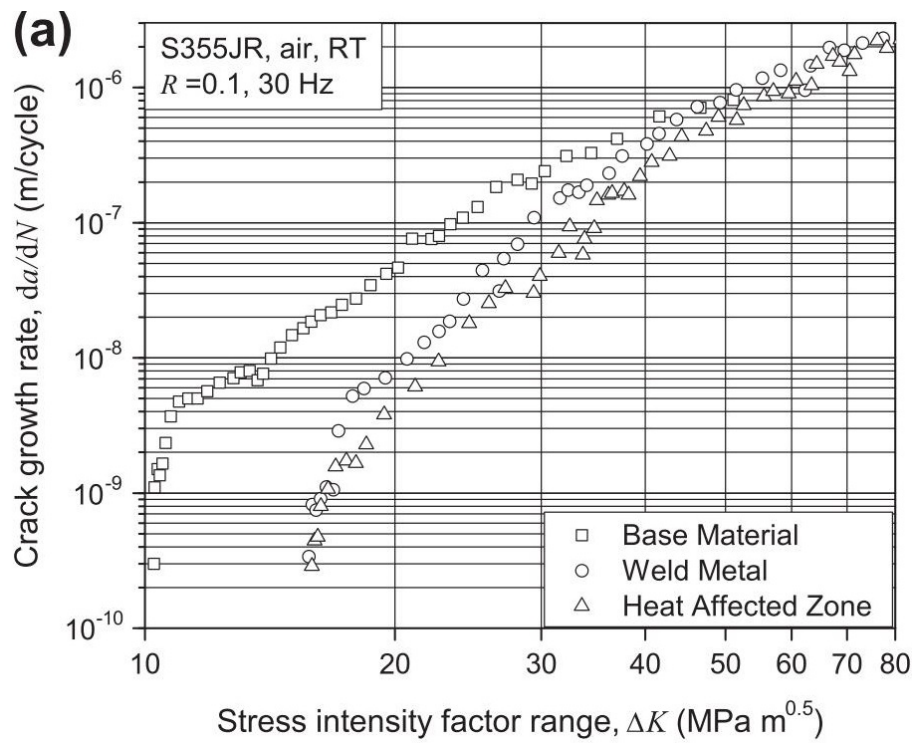


Abbildung 5.1: Vergleich von Grundmaterial und geschweißten Proben (entn. Benedetti et al. [BFS13])

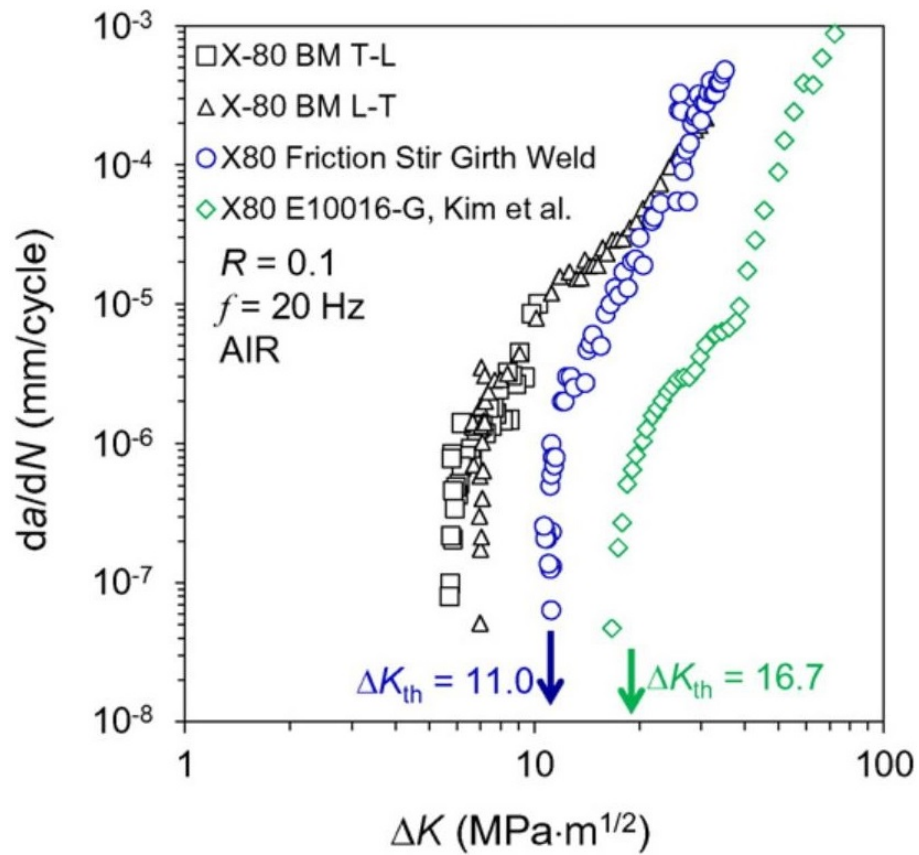


Abbildung 5.2: Vergleich von Grundmaterial und geschweißten Proben bei unterschiedlichen R (entn. Sowards et al. [SGHD15])

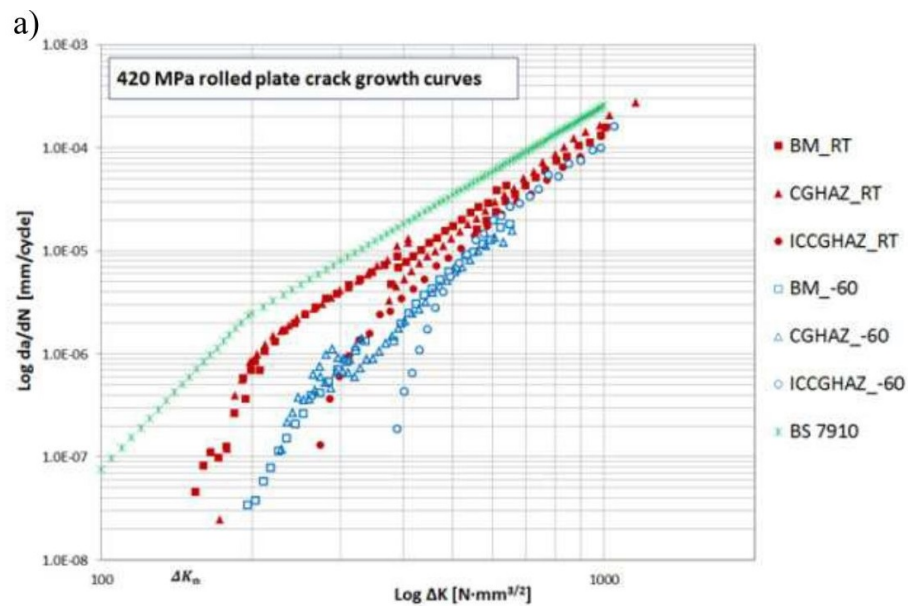


Abbildung 5.3: Vergleich von Grundmaterial (BM RT), CGHAZ (CGHAZ RT) und ICCGHAZ (ICCGHAZ RT) bei Raumtemperatur (entn. Alvaro et al. [Ant15])

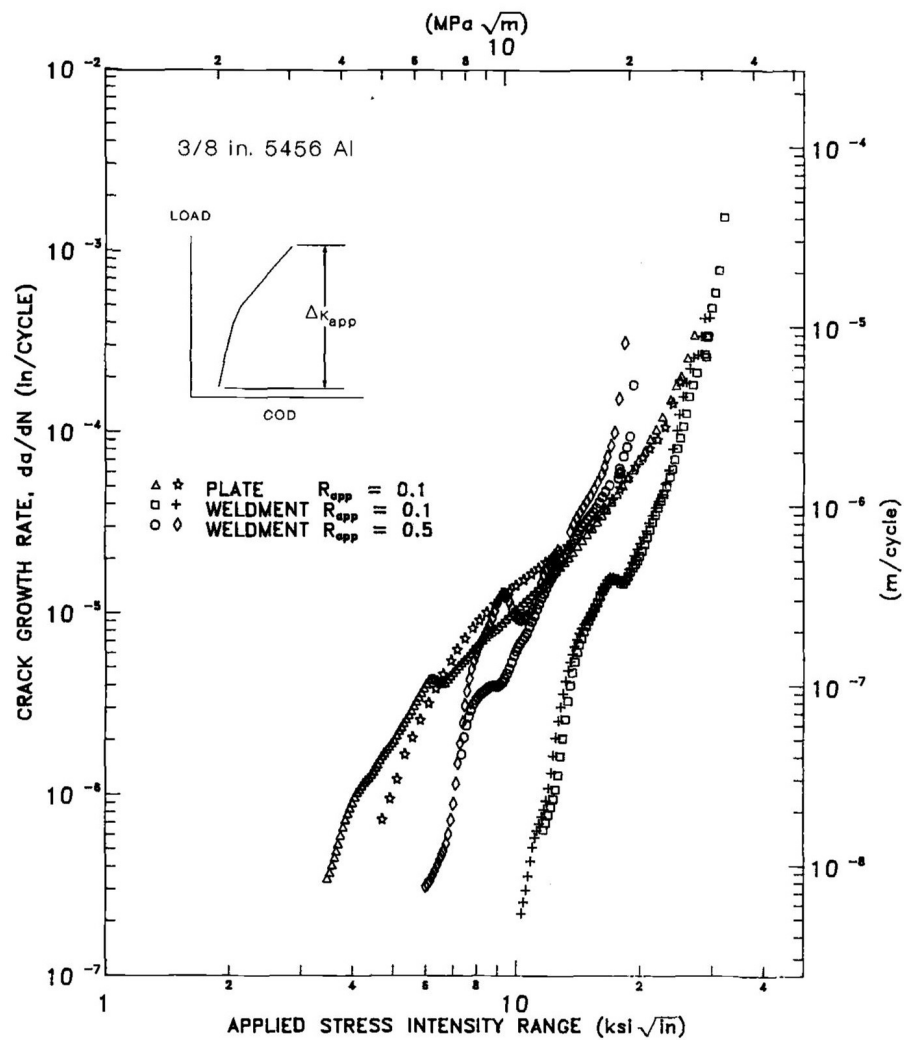


Abbildung 5.4: Vergleich von Grundmaterial und geschweißten Proben (entn. Link et al. [Lin90])

# 6 Fazit

Im anschließenden Abschnitt werden die Ergebnisse zusammengefasst und Verbesserungsvorschläge für zukünftige Arbeiten vorgestellt.

## 6.1 Zusammenfassung

Die neuen Anforderungen in der Schifffahrt, durch die Erschließung der arktischen See, machen die Untersuchung des Risswachstums von Schweißnähten im Niedrigtemperaturbereich erforderlich, um die konstruktive Sicherheit von Schiffen zu gewährleisten. Im Laufe der vorliegenden Arbeit werden die Unterschiede des Risswachstumsverhalten von geschweißten Proben und Grundmaterial untersucht, um das Risswachstum von Schweißnähten besser zu verstehen. Als Messmethoden für die Untersuchung des Rissfortschrittes dienen die DCPD, DMS und Rastlinien. Die Materialien werden in der Form von M(t)-Proben bei verschiedenen Lastniveaus mit einem Kraftverhältnis von 0,1 und einer Frequenz von ca. 33 Hz zyklisch belastet. Auf Grundlage der Testergebnisse wird die DCPD mit der Johnson-Formel kalibriert und anschließend mit den DMS und Rastlinien Ergebnissen verglichen. Es hat sich gezeigt, dass die Johnson-Formel zuverlässig den Rissfortschritt darstellt.

Der Vergleich von geschweißten Proben und Grundmaterial ergibt, dass die geschweißten Proben einen höheren Widerstand gegen Risswachstum haben, als das Grundmaterial. Der Unterschied ist besonders signifikant bei kleinen Spannungsintensitätsfaktoren. Das Verhalten ist vermutlich auf die höhere Festigkeit der Gefüge und die Inhomogenität der Schweißnaht zurückzuführen. Die Unterschiede der Proben sind konsistent mit den Ergebnissen von mehreren vorangegangenen Forschungsergebnissen. Die durchgeführte Arbeit legt die Grundlage für die weitere Untersuchungen der Proben bei niedrigen Prüftemperaturen.

## 6.2 Ausblick

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass an vielen Stellen Verbesserungen eingebracht werden können.

Die Risslänge kann mit Hilfe der Johnson-Formel präzise bestimmt werden. Daher ist es bei zukünftigen Untersuchungen nicht erforderlich eine große Anzahl von Rastlinien zu erzeugen. Drei Rastlinien sind ausreichend, um die DMS zu korrigieren und eine schräge Rissfront zu erkennen. Es wird empfohlen, das Lastniveau bei zukünftigen increasing K Untersuchungen zu erhöhen, um die Einflüsse von fehlerhaften Einspannungen zu minimieren. Damit kann zudem ungleichmäßiges Risswachstum verhindert werden. Hier muss beobachtet werden, ob durch die höhere Last der Einfluss von Mikrostrukturen verringert wird.

Durch die Einspannung wirkt zusätzliche Zug- und Druckspannung auf die Proben. Durch das Anbringen von Abstandhaltern können diese negativen Einflüsse minimiert werden. Für die praktische Umsetzung müsste hier vorerst der Höhenversatz der Spannbacken bestimmt werden.

Eine weitere Verbesserung könnte erzielt werden, indem die Rastlinien mit einer hochauflösenden Kamera mit Makroobjektiv fotografiert werden. Zudem ist es bei schrägen Rastlinien zu empfehlen, eine alternative Bestimmung der Rastlinienposition zur ASTM E399 [AST97] zu verwenden. Beispielsweise könnte die Position durch die Fläche zwischen Rastlinie und Kerbe bestimmt werden.

Durch die Maßnahmen könnten die Untersuchungen weiter verbessert werden, um das Risswachstumsverhalten bei niedrigen Temperaturen zuverlässiger zu bestimmen.

# Literaturverzeichnis

- [Ant15] ANTONIO ALVARO, ODD M. AKSELSEN, XIAOBO REN , ALEXANDER KANE (Hrsg.): *Fatigue Properties of a 420 MPa Structural Steel at Low Temperature*. Cupertino, Calif. : ISOPE, 2015. – ISBN 9781880653890
- [Ant16] ANTONIO ALVARO, ODD M. AKSELSEN, XIAOBO REN, BÅRD NYHUS: Fatigue Crack Growth of a 420 MPa Structural Steel Heat Affected Zone at Low Temperatures: Rhodes, Greece, June 26-July 1, 2016 : Volumes 1-4, 2016. In: *International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE) (2016)*
- [AST97] ASTM: *E399 Plain Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*. 1997
- [AST15] ASTM: *E647-15 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*
- [B. 83] B. I. VERKIN, N. M. GRINBERG, V. A. SERDYUK AND L. F. YAKOVENKO: Low Temperature Fatigue Fracture of Metals and Alloys. In: *Materials Science and Engineering*, (1983)
- [BFS13] BENEDETTI, M. ; FONTANARI, V. ; SANTUS, C.: Crack growth resistance of MAG butt-welded joints of S355JR construction steel. In: *Engineering Fracture Mechanics* 108 (2013), S. 305–315. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2013.01.019>. – DOI 10.1016 j.engfracmech.2013.01.019. – ISSN 00137944
- [Bri05] BRITISH STANDARDS INSTITUTION: *BSI British standards*. Bd. 7910: *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures: British standard BS 7910:2005*. [Stand:] 27. July 2005. London : BSI, British Standards Institution, 2005. – ISBN 978-0-580-45965-8
- [Chu15] CHUNG, Jin S. (Hrsg.): *Tensile Properties of 420 MPa Steel at Low Temperature: Gas hydrates and ocean mining - 2015 ; ISOPE-2015 Kona, Hawaii ; the 25th ISOPE conference anniversary ; conference proceedings ; the proceedings*

- of The Twenty Fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference ; Kona, Hawaii, USA, June 21 - 26, 2015 ; [including the 11th] Ocean Mining & Gas Hydrates Symposium, OMS-2015 (OMGH-2015)*. Cupertino, Calif. : ISOPE, 2015. – ISBN 9781880653890
- [CK75] CLARK, G. ; KNOTT, J. F.: Measurement of fatigue cracks in notched specimens by means of theoretical electrical potential calibrations. In: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 23 (1975), Nr. 4-5, S. 265–276. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-5096\(75\)90028-9](http://dx.doi.org/10.1016/0022-5096(75)90028-9). – DOI 10.1016/0022-5096(75)90028-9. – ISSN 00225096
- [DMS16] *Bild DMS*. [https://www.dms-technik.de/images/stories/dms-technik/dms-bilder/fac-serie/fac-5\\_zoom.png](https://www.dms-technik.de/images/stories/dms-technik/dms-bilder/fac-serie/fac-5_zoom.png). Version: 08.03.2016
- [DNH15] DOREMUS, L. ; NADOT, Y. ; HENAFF: Calibration of the potential drop method for monitoring small crack growth from surface anomalies – Crack front marking technique and finite element simulations. In: *International Journal of Fatigue* 70 (2015), S. 178–185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.09.003>. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2014.09.003. – ISSN 01421123
- [Elb71] ELBER, W.: The Significance of Fatigue Crack Closure. (1971), S. 230–230–13. <http://dx.doi.org/10.1520/STP26680S>. – DOI 10.1520/STP26680S. ISBN 978-0-8031-0031-2
- [Fin17] FINN RENKEN: *Zugversuchskalibrierung an geschweißten Proben*. Hamburg, Technische Universität Hamburg Harburg, Bachelorarbeit, 17.02.2017
- [For63] FORSYTH, P.J.E: Fatigue damage and crack growth in aluminium alloys. In: *Acta Metallurgica* 11 (1963), Nr. 7, S. 703–715. [http://dx.doi.org/10.1016/0001-6160\(63\)90008-7](http://dx.doi.org/10.1016/0001-6160(63)90008-7). – DOI 10.1016/0001-6160(63)90008-7. – ISSN 00016160
- [Giu09] GIUSEPPE SPOSITO: *ADVANCES IN POTENTIAL DROP TECHNIQUES FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING*. IMPERIAL COLLEGE LONDON, IMPERIAL COLLEGE LONDON, doctoral thesis, 2009
- [Gur06] GURNEY, Tim: *Cumulative damage of welded joints*. Boca Raton, Florida and Cambridge, England and s.l. : CRC Press, 2006 (Woodhead Publishing in materials). <http://www.sciencedirect.com/science/book/9781855739383>. – ISBN 9781855739383

- [HJ87] HARTMAN, G. A. ; JOHNSON, D. A.: D-c electric-potential method applied to thermal/mechanical fatigue crack growth. In: *Experimental Mechanics* 27 (1987), Nr. 1, S. 106–112. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02318872>. – DOI 10.1007/BF02318872. – ISSN 0014–4851
- [HLP79] HORSTMAN, R. T. ; LIEB, K. C. ; POWER: Optimization of the Electrical Potential Technique for Crack Growth Monitoring in Compact Test Pieces Using Finite Element Analysis. In: *Journal of Testing and Evaluation* 7 (1979), Nr. 4, S. 208. <http://dx.doi.org/10.1520/JTE11382J>. – DOI 10.1520/JTE11382J. – ISSN 00903973
- [IUI04] INSTITUTE OF THE NORTH (Hrsg.) ; U.S. ARCTIC RESEARCH COMMISSION (Hrsg.) ; INTERNATIONAL ARCTIC SCIENCE COMMITTEE (Hrsg.): *Arctic Marine Transport Workshop*. 2004
- [KD93] KIRK, Mark T. ; DODDS, Robert H.: The influence of weld strength mismatch on crack-tip constraint in single edge notch bend specimens. In: *International Journal of Fracture* 63 (1993), Nr. 4, S. 297–316. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00013040>. – DOI 10.1007/BF00013040. – ISSN 1573–2673
- [LH81] LIEB, K-H Schwalbe ; HELLMANN: Application of the Electrical Potential Method to Crack Length Measurements Using Johnson’s Formula. In: *Journal of Testing and Evaluation* 9 (1981), Nr. 3, S. 218. <http://dx.doi.org/10.1520/JTE11560J>. – DOI 10.1520/JTE11560J. – ISSN 00903973
- [Lin90] LINK, Linda R.: Fatigue Crack Growth of Weldments. (1990), S. 16–16–18. <http://dx.doi.org/10.1520/STP24088S>. – DOI 10.1520/STP24088S. ISBN 978–0–8031–1277–3
- [LL12] LAMMI, Christopher J. ; LADOS, Diana A.: Effects of Processing Residual Stresses on Fatigue Crack Growth Behavior of Structural Materials: Experimental Approaches and Microstructural Mechanisms. In: *Metallurgical and Materials Transactions A* 43 (2012), Nr. 1, S. 87–107. <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-011-0879-5>. – DOI 10.1007/s11661-011-0879-5. – ISSN 1543–1940
- [Mat] MATELEC LTD ; MATELEC LTD (Hrsg.): *The Potential Drop Technique & Its Use In Fatigue Testing*. [www.matelect.com](http://www.matelect.com)

- [Mil13] MILELLA, Pietro P.: *Fatigue and Corrosion in Metals*. Milano : Springer, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/978-88-470-2336-9>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-88-470-2336-9>. – ISBN 9788847023352
- [MMK88] MURAKAMI, Y. ; MURA, T. ; KOBAYASHI, M.: Change of Dislocation Structures and Macroscopic Conditions from Initial State to Fatigue Crack Nucleation. (1988), S. 39–39–25. <http://dx.doi.org/10.1520/STP23209S>. – DOI 10.1520/STP23209S. ISBN 978–0–8031–0925–4
- [Mug09] MUGHRABI, Hael: Cyclic Slip Irreversibilities and the Evolution of Fatigue Damage. In: *Metallurgical and Materials Transactions A* 40 (2009), Nr. 6, S. 1257–1279. <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-009-9839-8>. – DOI 10.1007/s11661-009-9839-8. – ISSN 1073–5623
- [N. 79] N. R. MOODY, W. W. GERBERICH: Fatigue Crack Propagation in Iron and Two Iron Binary Alloys at Low Temperatures. In: *Elsevier Sequois* 85 (25.6.1979), S. 1–22. [http://dx.doi.org/10.1016/S0079-8169\(08\)60447-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0079-8169(08)60447-X). – DOI 10.1016/S0079-8169(08)60447-X
- [Nic06] NICOLA BOWLER: Theory of four-point alternating current potential drop measurements on a metal half-space. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 39 (2006), Nr. 3, 584. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/39/3/024>. – DOI 10.1088/0022-3727/39/3/024. – ISSN 0022–3727
- [OSNK86] OHTA, Akihiko ; SOYA, Isao ; NISHIJIMA, Satoshi ; KOSUGE, Michio: Statistical evaluation of fatigue crack propagation properties including threshold stress intensity factor. In: *Engineering Fracture Mechanics* 24 (1986), Nr. 6, S. 789–802. [http://dx.doi.org/10.1016/0013-7944\(86\)90265-1](http://dx.doi.org/10.1016/0013-7944(86)90265-1). – DOI 10.1016/0013-7944(86)90265-1. – ISSN 00137944
- [PE63] PARIS, P. ; ERDOGAN, F.: A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. In: *Journal of Basic Engineering* 85 (1963), Nr. 4, S. 528. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3656900>. – DOI 10.1115/1.3656900. – ISSN 00219223
- [PMW61] PAUL PARIS ; MARIO P. GOMEZ ; WILLIAM E ANDERSON: A Rational Analytic Theory of Fatigue. (1961)
- [RBN04] RAVI, S. ; BALASUBRAMANIAN, V. ; NEMAT NASSER, S.: Effect of mis-match ratio (MMR) on fatigue crack growth behaviour of HSLA

- steel welds. In: *Engineering Failure Analysis* 11 (2004), Nr. 3, S. 413–428. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2003.05.013>. – DOI 10.1016/j.engfailanal.2003.05.013. – ISSN 13506307
- [RGK71] RITCHIE, R. O. ; GARRETT, G. G. ; KNOTT, J. P.: Crack-growth monitoring: Optimisation of the electrical potential technique using an analogue method. In: *International Journal of Fracture Mechanics* 7 (1971), Nr. 4. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00189118>. – DOI 10.1007/BF00189118. – ISSN 0020–7268
- [RKM03] RITCHIE, R. O. (Hrsg.) ; KARIHALOO, B. (Hrsg.) ; MILNE, Ian (Hrsg.): *Comprehensive Structural Integrity*. San Diego : Pergamon [Imprint] and Elsevier Science & Technology Books, July 2003. – ISBN 0080437494
- [RSF06] RADAJ, Dieter ; SONSINO, C.M ; FRICKE, Wolfgang: *Fatigue assessment of welded joints by local approaches*. Second ed. Cambridge : Woodhead, 2006. – ISBN 1845691881
- [Sch74] SCHIJVE, J.: Fatigue damage accumulation and incompatible crack front orientation. In: *Engineering Fracture Mechanics* 6 (1974), Nr. 2, S. 245–252. [http://dx.doi.org/10.1016/0013-7944\(74\)90022-8](http://dx.doi.org/10.1016/0013-7944(74)90022-8). – DOI 10.1016/0013-7944(74)90022-8. – ISSN 00137944
- [Sch81] SCHIJVE, J.: Shear lips on fatigue fractures in aluminium alloy sheet material. In: *Engineering Fracture Mechanics* 14 (1981), Nr. 4, S. 789–800. [http://dx.doi.org/10.1016/0013-7944\(81\)90091-6](http://dx.doi.org/10.1016/0013-7944(81)90091-6). – DOI 10.1016/0013-7944(81)90091-6. – ISSN 00137944
- [SGHD15] SOWARDS, Jeffrey W. ; GNÄUPEL-HEROLD, Thomas ; DAVID MCCOLSKEY: Characterization of mechanical properties, fatigue-crack propagation, and residual stresses in a microalloyed pipeline-steel friction-stir weld. In: *Materials & Design* 88 (2015), S. 632–642. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.049>. – DOI 10.1016/j.matdes.2015.09.049. – ISSN 02641275
- [TBV17] TCHOFFO NGOULA, D. ; BEIER, H.Th. ; VORMWALD, M.: Fatigue crack growth in cruciform welded joints: Influence of residual stresses and of the weld toe geometry. In: *International Journal of Fatigue* 101, Part 2 (2017), S. 253–262. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.09.020>. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2016.09.020. – ISSN 01421123

- [TLCS01] TSAY, L. W. ; LIU, C. C. ; CHAO, Y.-H. ; SHIEH, Y. H.: Fatigue crack propagation in 2.25 Cr–1.0Mo steel weldments in air and hydrogen. In: *Materials Science and Engineering: A* 299 (2001), Nr. 1-2, S. 16–26. [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01420-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01420-9). – DOI 10.1016/S0921-5093(00)01420-9. – ISSN 09215093
- [vHVW17] VAN MINNEBRUGGEN, Koen ; HERTELÉ, Stijn ; VERSTRAETE, Matthias A. ; WAELE, Wim de: Crack growth characterization in single-edge notched tension testing by means of direct current potential drop measurement. In: *International Journal of Pressure Vessels and Piping* (2017). <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.06.009>. – DOI 10.1016/j.ijpvp.2017.06.009. – ISSN 03080161
- [WAM16] WALTERS, Carey L. ; ALVARO, Antonio ; MALJAARS, Johan: The effect of low temperatures on the fatigue crack growth of S460 structural steel. In: *International Journal of Fatigue* 82 (2016), S. 110–118. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.03.007>. – DOI 10.1016/j.ijfatigue.2015.03.007. – ISSN 01421123
- [WB81] WEI, R. P. ; BRAZILL, R. L.: An Assessment of A-C and D-C Potential Systems for Monitoring Fatigue Crack Growth. Version:1981. <http://dx.doi.org/10.1520/STP33456S>. In: HUDAK, S. J. (Hrsg.) ; BUCCI, R. J. (Hrsg.): *Fatigue Crack Growth Measurement and Data Analysis*. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959 : ASTM International, 1981. – DOI 10.1520/STP33456S. – ISBN 978-0-8031-0717-5, S. 103–103–17
- [WDJ15] WEISSBACH, Wolfgang ; DAHMS, Michael ; JAROSCHEK, Christoph: *Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*. 19., vollst. überarb. u. erw. Aufl. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. – ISBN 3658039191
- [WV13] WALTERS, Carey L. ; VOORMEEREN, Lars O.: Minimum Fatigue Pre-Crack Extension for Fracture Testing. In: *Volume 6B: Materials and Fabrication*, ASME, 2013. – ISBN 978-0-7918-5571-3
- [YKC16] YOON, J. Y. ; KIM, Y. ; CHOI: On-Line Monitoring of Environment-Assisted Cracking in Nuclear Piping Using Array Probe Direct Current Potential Drop. In: *Journal of Nondestructive Evaluation* 35 (2016), Nr. 1, S. 1059. <http://dx.doi.org/10.1007/s10921-015-0330-8>. – DOI 10.1007/s10921-015-0330-8. – ISSN 0195-9298

- 
- [ZAB14] ZERBST, U. ; AINSWORTH, R. A. ; BEIER: Review on fracture and crack propagation in weldments – A fracture mechanics perspective. In: *Engineering Fracture Mechanics* 132 (2014), S. 200–276. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.05.012>. – DOI 10.1016/j.engfracmech.2014.05.012. – ISSN 00137944

# A Probengeometrie

**Tabelle A.1:** Probengeometrie der M(t)-Proben

Zeichen	JS01	JS02	JS20	JS22
$2a_0$	17,5 mm	17,5 mm	17,5 mm	17,5 mm
$B$	10,1 mm	10,5 mm	9,7 mm	9,7 mm
$r$	2,0 mm	2,0 mm	2,0 mm	2,0 mm
$W$	60,0 mm	60,0 mm	60,0 mm	60,0 mm
$y_v$	6,0 mm	6,0 mm	6,0 mm	6,0 mm
$y_c$	75,0 mm	75,0 mm	75,0 mm	75,0 mm

## B Rissverläufe nach Johnson JS02 und JS20

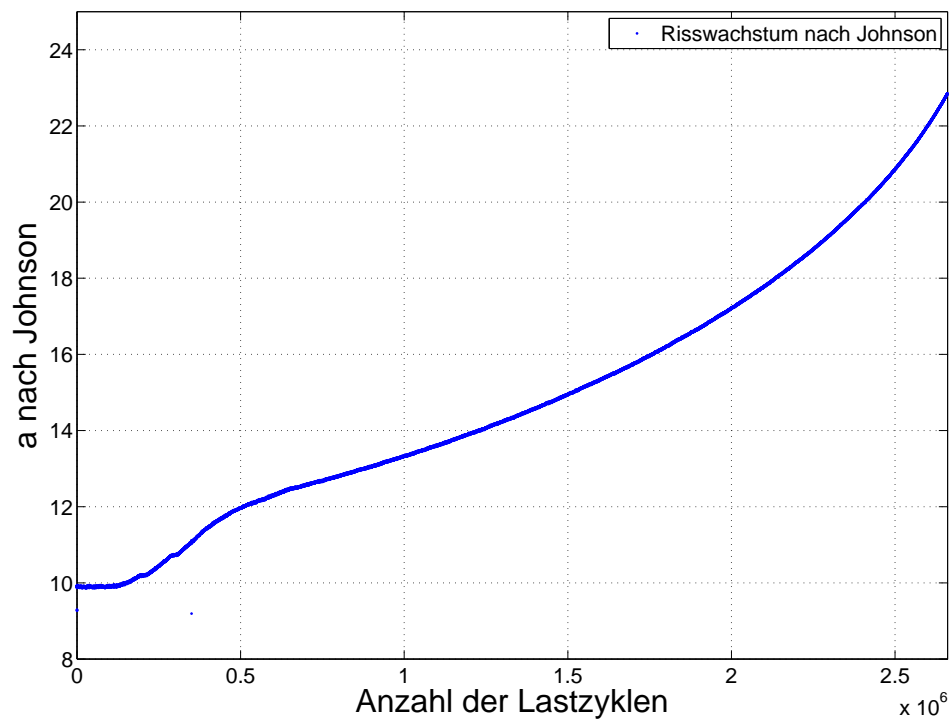


Abbildung B.1: Analytische Risslänge nach Johnson JS02

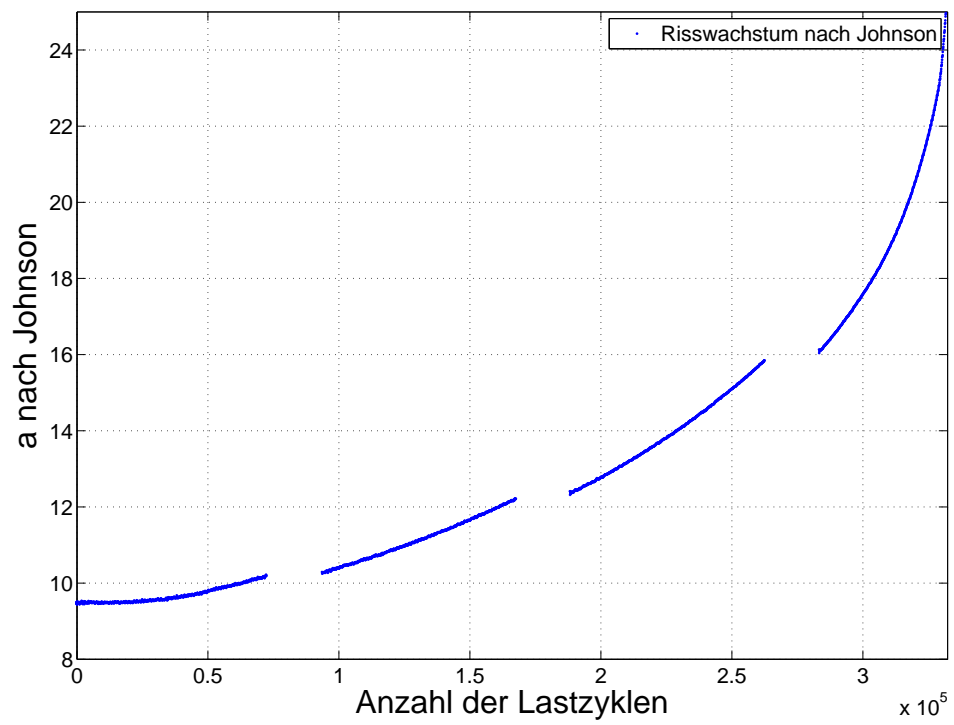


Abbildung B.2: Analytische Risslänge nach Johnson JS20

## C Ergebnisse JS02 *decreasing K*

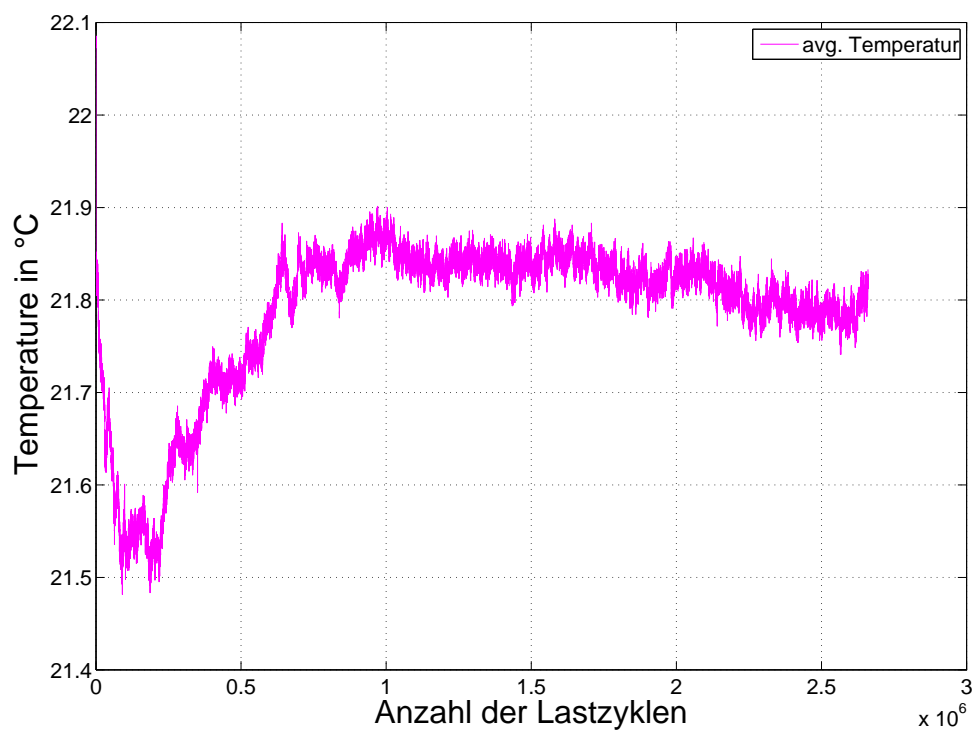


Abbildung C.1: Prüftemperatur JS02

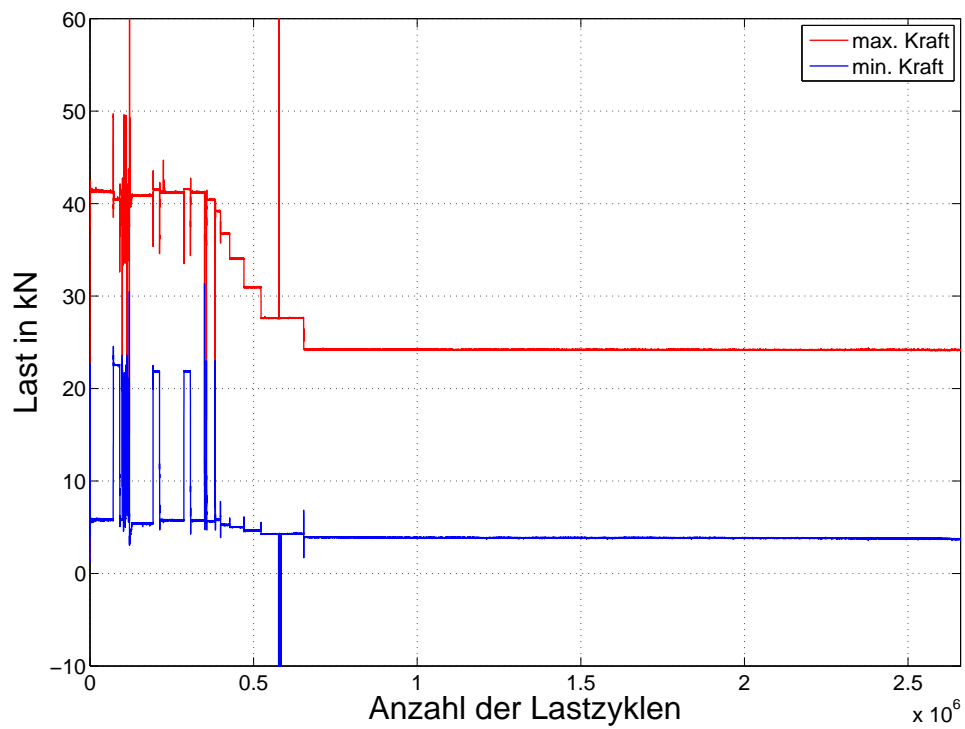


Abbildung C.2: Prüfkraft JS02

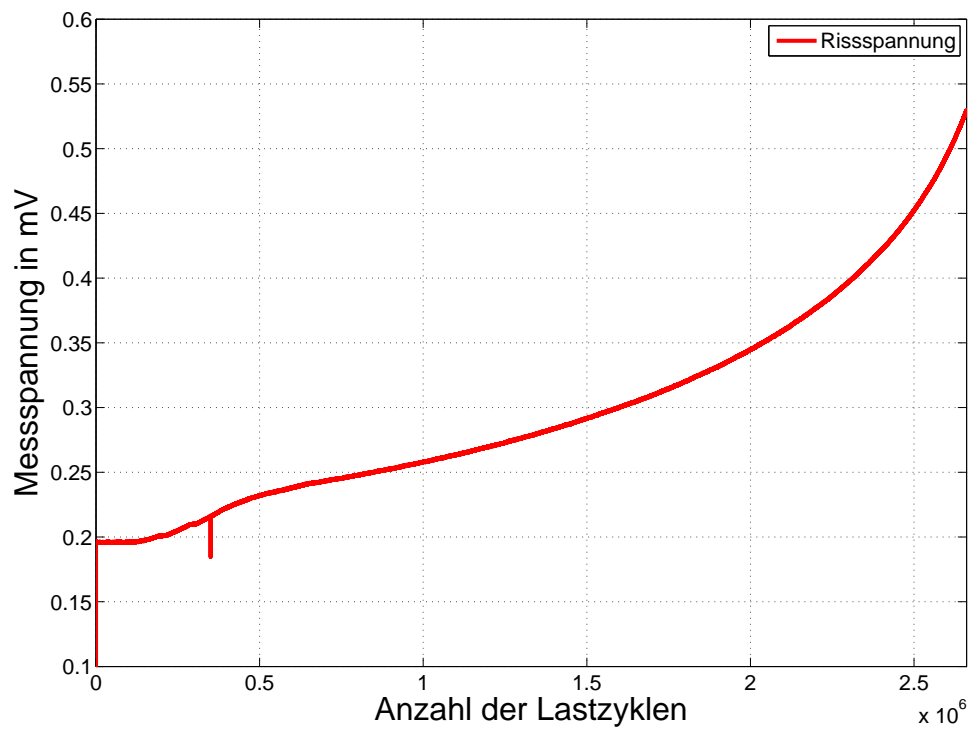


Abbildung C.3: Messspannung JS02

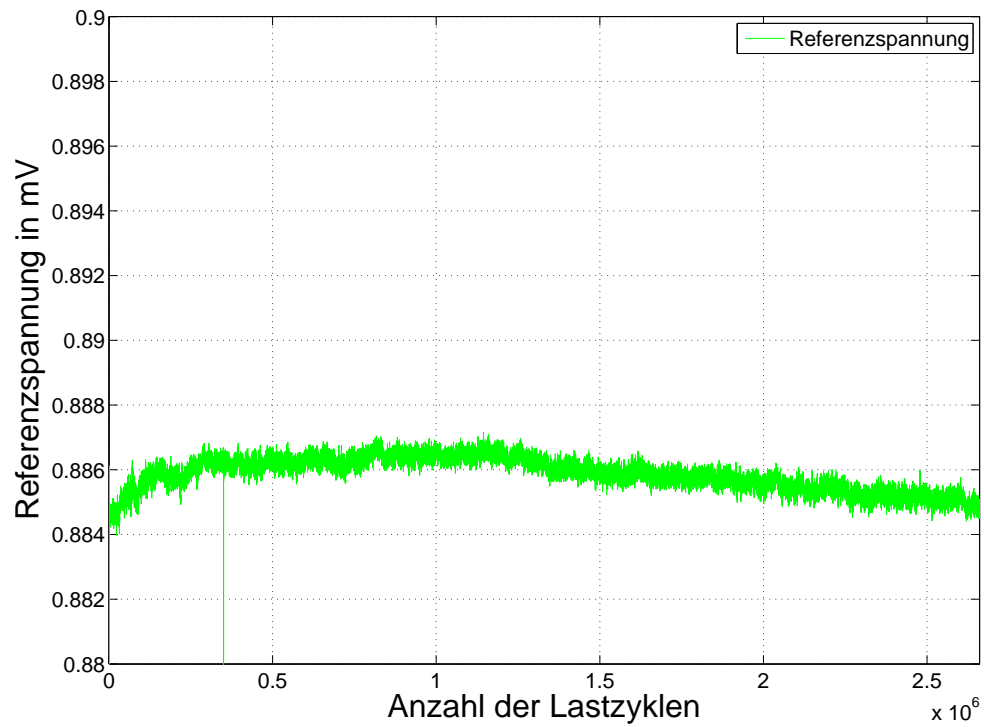


Abbildung C.4: Referenzspannung JS02

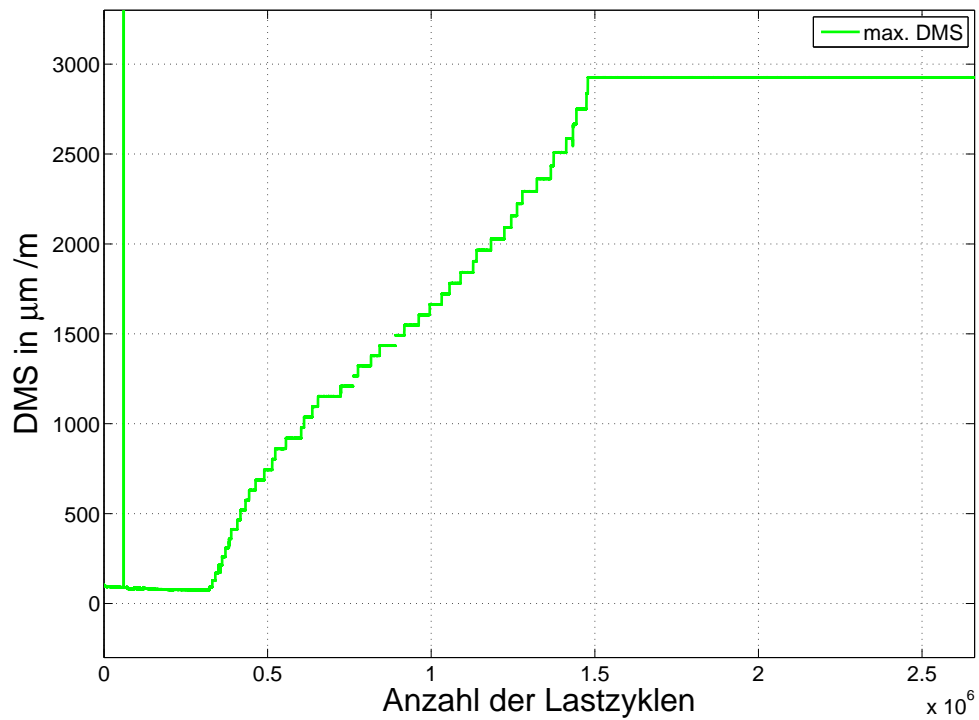


Abbildung C.5: DMS-Verlauf JS02

## D Ergebnisse JS20 *increasing K*

Anmerkung: Bei JS20 ist die Messung der Referenzspannung ausgefallen

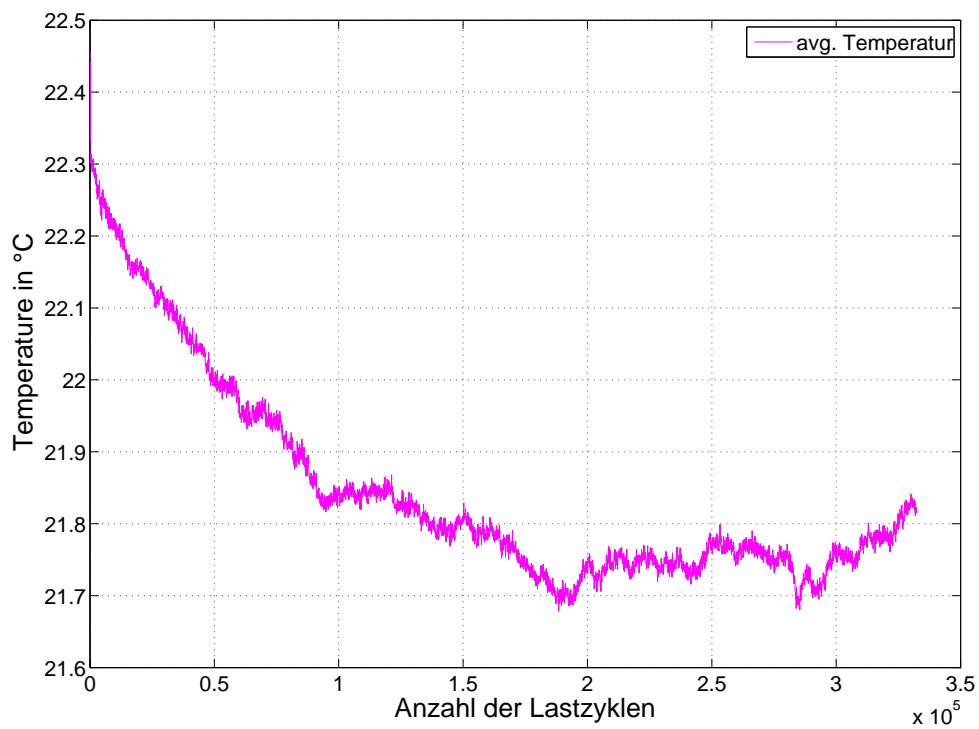


Abbildung D.1: Prüftemperatur JS20

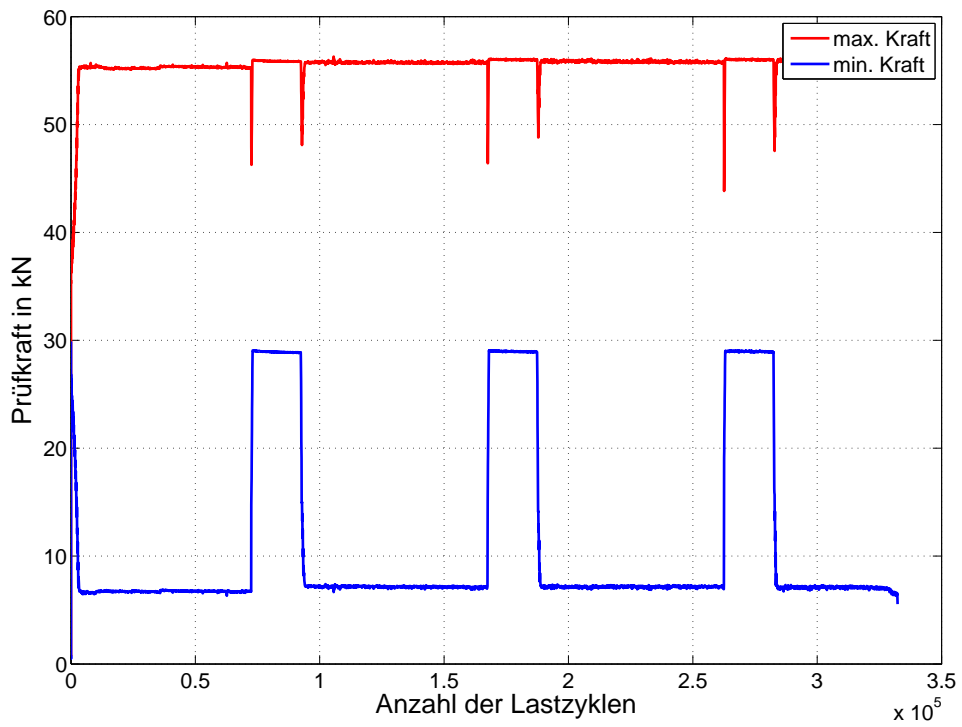


Abbildung D.2: Prüfkraft JS20

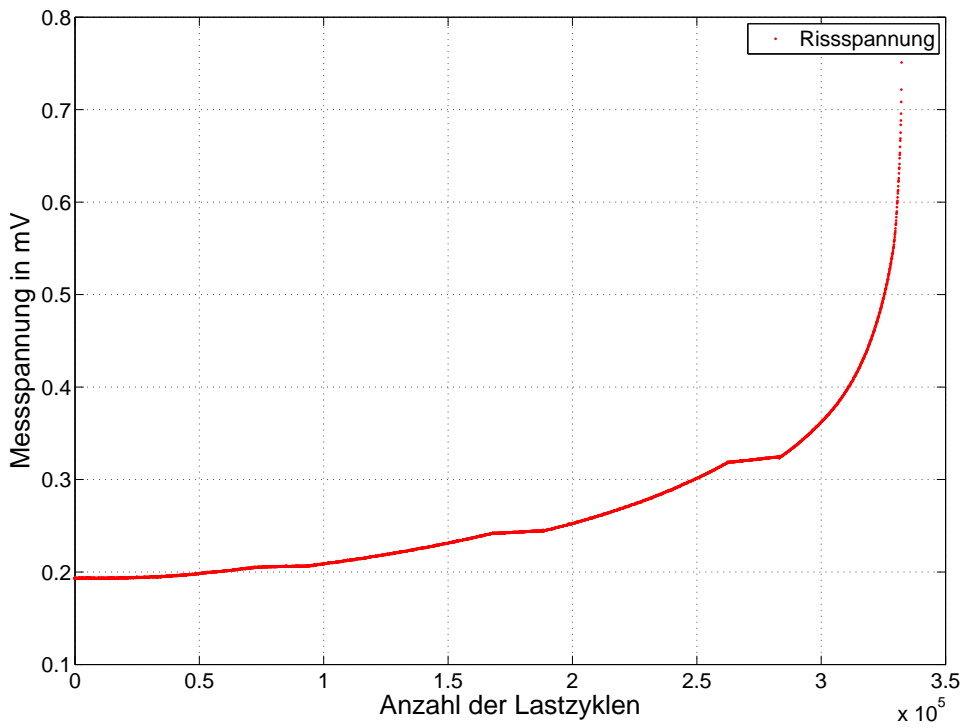


Abbildung D.3: Messspannung JS20

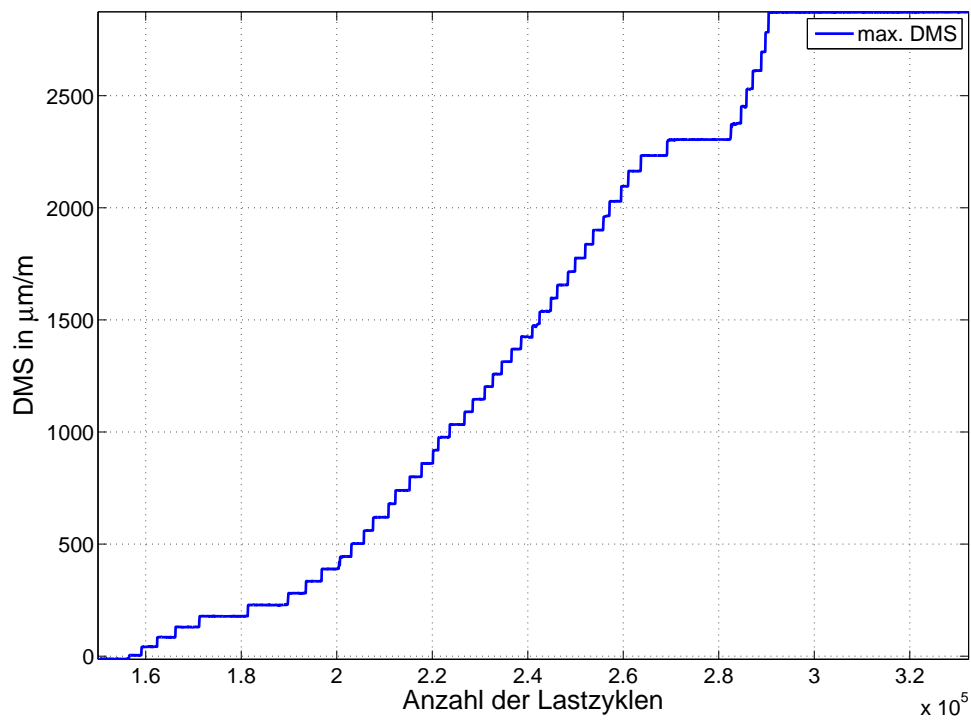


Abbildung D.4: DMS-Verlauf JS20